



Potencial de fitorremediación de especies del trópico húmedo en humedales artificiales

Tecnología verde y sustentable para el tratamiento de aguas residuales

Gaspar López Ocaña
Nancy Estrada Pérez
Carlos Alberto Torres Balcázar
Rudy Solís Silván



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”

*Potencial de fitorremediación de especies
del trópico húmedo en humedales
artificiales*

*Tecnología verde y sustentable
para el tratamiento de aguas residuales*

COLECCIÓN
JOSÉ N. ROVIROSA
Biodiversidad, desarrollo sustentable y trópico húmedo



Guillermo Narváez Osorio

Rector

Arturo Garrido Mora

Director de la División Académica
de Ciencias Biológicas



*Potencial de fitorremediación de especies
del trópico húmedo en humedales
artificiales*

*Tecnología verde y sustentable
para el tratamiento de aguas residuales*

*Gaspar López Ocaña
Nancy Estrada Pérez
Carlos Alberto Torres Balcázar
Rudy Solís Silván*



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



Primera edición digital, 2026

© Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

www.ujat.mx

Para su publicación esta obra ha sido dictaminada por el sistema académico de “doble ciego”. Los juicios expresados son responsabilidad del autor o autores. El contenido de esta obra no podrá utilizarse para entrenar modelos de inteligencia artificial sin el consentimiento expreso de sus autores (o herederos) y de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

ISBN: 978-607-606-754-3

Maquetación y diseño de portada: Jazmín Zapata de la Cruz

Corrección y cuidado de la edición: Martín Eduardo Martínez Granados y autorías

Hecho en Villahermosa, Tabasco, México

Índice

Agradecimientos	10
Presentación	11
Capítulo 1	
Fundamentos de los humedales artificiales.....	13
Humedales artificiales.....	13
Clasificación de los humedales artificiales.....	13
Humedal de flujo superficial o libre (HAFL)	14
Humedal de flujo subsuperficial (HAFS).....	14
Medio de soporte	16
Microorganismos	17
Vegetación	20
Contaminantes y su remoción	21
Procesos de fitorremediación por las plantas.....	24
Características de diseño	26
Ventajas y desventajas de los HA.....	28
Capítulo 2	
Especies vegetales utilizadas en humedales artificiales	30
Especies recomendables para su uso en humedales.....	31
Funciones y aplicación de la vegetación	32
Factores que afectan a la vegetación	34
Plantas ornamentales en humedales artificiales	34

Capítulo 3

Descripción de las especies estudiadas	36
<i>Acrostichum danaeifolium</i> Langsd & Fisch, 1810	36
<i>Canna indica</i> L. 1753	37
<i>Cladium jamaicense</i> Crantz 1766	39
<i>Colocasia esculenta</i> (L.) Schott 1832	40
<i>Cyperus articulatus</i> L. 1753	41
<i>Cyperus odoratus</i> L. 1753	42
<i>Aquarius paniculatus</i> (Micheli) Christenh & Byng. 1881	43
<i>Pontederia crassipes</i> Mart. 1883	44
<i>Enydra sessilifolia</i> (Ruiz & Pav.) Cabrera 1960	46
<i>Heliconia latispatha</i> Benth 1846	47
<i>Paspalum paniculatum</i> L. 1759	48
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud. 1841	49
<i>Pontederia sagittata</i> C. Presl 1827	50
<i>Sagittaria lancifolia</i> L. 1753	51
<i>Sagittaria latifolia</i> Willd. 1805	52
<i>Thalia geniculata</i> L. 1753	53
<i>Typha domingensis</i> Pers. 1807	55
<i>Xanthosoma sagittifolium</i> (L.) Schott 1832	56

Capítulo 4

Sitios de colecta de las especies estudiadas	58
-----------------------------------------------------------	----

Capítulo 5

Colecta, manejo y transporte	69
-------------------------------------------	----

Capítulo 6

Siembra y estabilización de los humedales	73
Planta de tratamiento	73
Unidades experimentales	77
Siembra de especies	81

Capítulo 7

Condiciones de operación de los humedales	84
Calidad de las aguas residuales	84

Medio de soporte	85
Criterios de operación.....	85
Capítulo 8	
Eficiencia de remoción de contaminantes básicos	87
La remoción de contaminantes básicos.....	87
Trenes de tratamiento recomendados.....	90
Capítulo 9	
Coeficientes cinéticos de las especies de estudio	93
Constante cinética de degradación “k” de unidades experimentales	93
Constante cinética de degradación “k” de humedales en serie.....	96
Capítulo 10	
Comportamiento biológico de las especies	99
<i>Acrostichum danaeifolium</i>	99
<i>Canna indica</i>	100
<i>Cladium jamaicense</i>	100
<i>Colocasia esculenta</i>	101
<i>Cyperus articulatus</i>	102
<i>Cyperus odoratus</i>	103
<i>Aquarius paniculatus</i>	104
<i>Pontederia crassipes</i>	104
<i>Enydra sessilifolia</i>	105
<i>Heliconia latispatha</i>	106
<i>Paspalum paniculatum</i>	107
<i>Phragmites australis</i>	108
<i>Pontederia sagittata</i>	108
<i>Sagittaria lancifolia</i>	109
<i>Sagittaria latifolia</i>	110
<i>Thalia geniculata</i>	111
<i>Typha domingensis</i>	112
<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	113

Capítulo 11	
Recomendaciones para el manejo de humedales.....	114
Consideraciones básicas en el manejo	114
Fitopatologías de las especies	118
Capítulo 12	
Manejo de residuos resultantes de la operación de HA	122
Los residuos generados en las plantas de tratamiento	122
Caso de estudio de generación de lodos en planta.....	123
Manejo de biomasa vegetal.....	128
Capítulo 13	
La biodiversidad en los humedales de estudio.....	131
Insectos	134
Arácnidos	149
Diplópodos.....	152
Moluscos	153
Crustáceos.....	155
Peces	156
Reptiles	157
Anfibios.....	166
Aves.....	167
Capítulo 14	
Los humedales artificiales ante el cambio climático ..	168
Una ruta hacia la neutralidad en carbono.....	169
Referencias	171
Semblanzas.....	180

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración por su aporte en el capítulo 13 de este trabajo en el campo de sus especialidades a los doctores Marco Antonio López Luna y Manuel Pérez de la Cruz, así como a la maestra en Ingeniería y Protección Ambiental (MIPA) Bernardita Campos Campos y en especial a Marilyn Calderón Miranda por sus comentarios y aportaciones en este trabajo.

De manera especial, extendemos nuestro agradecimiento a los jóvenes que han sido parte de este trabajo como prestadores de servicio social, prácticas profesionales, tesistas de licenciatura, maestría y doctorado, pues al haber sido formados en nuestro Laboratorio de Tecnología del Agua, son el pilar para la conservación de este recurso para las futuras generaciones.

Finalmente, deseamos agradecer a nuestra alma mater, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas, por formarnos y brindarnos el cobijo necesario para la realización de este proyecto.

Presentación

Los sistemas de tratamiento naturales como los humedales artificiales (HA) están siendo desarrollados y aplicados alrededor del mundo, dado que representan una alternativa de tratamiento de aguas residuales de bajos costos de instalación, operación y mantenimiento. Estos son terrenos húmedos que se encuentran permanentemente inundados o son saturados de agua periódicamente, en las cuales crece vegetación hidrófita flotante, enraizada o emergente, adaptados a ciertas condiciones, con medio de soporte donde se encuentran microorganismos que interactúan con dichas plantas en la purificación de los efluentes.

Los HA son una tecnología que se ha implementado como tratamiento complementario en algunos sistemas de tratamiento de aguas residuales. No obstante, la mayoría de estos sistemas han presentado problemáticas relacionadas con su falta de manejo y mantenimiento. Si bien es cierto que se trata de una tecnología biológica que emula condiciones de la naturaleza, se requiere de un manejo integral que permita asegurar la calidad de los procesos de depuración. Los problemas que comúnmente se presentan en estos sistemas se derivan de la falta de poda y la eliminación de raíces en el medio de soporte, provocando que la densidad poblacional de las especies presentes en el humedal disminuya, lo que impacta en la eficiencia del sistema.

En el caso particular de Tabasco, los HA han presentado problemas que ocasionan paros en las plantas de tratamiento debido a la falta de operación y buen manejo de las especies utilizadas, pues típicamente no se les provee poda y cosecha o eliminación de raíces en el medio de soporte, por lo que las variaciones de caudal, carga y temperatura provocan que estas especies encargadas de la depuración del sistema disminuyan la densidad de población, misma que

se tiene que reponer y restablecer en el humedal, dejando fuera de operación cierto tiempo el sistema de tratamiento por el traslado y estabilización de dicha vegetación.

Por lo anterior, el presente documento brinda información actualizada y técnica relacionada con el potencial de fitorremediación de diferentes especies de macrófitas empleadas en HA a escala piloto. Se trata de la recopilación y sistematización de datos especializados, los cuales van desde la identificación y descripción de las especies, caracterización, colecta, manejo y transporte, así como siembra y estabilización dentro de los HA, demostrando su eficiencia en la remoción de ciertos contaminantes básicos en el agua residual. Dicha información fue generada a través de investigaciones realizadas en el Laboratorio de Tecnología del Agua de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DACBiol-UJAT) desde 2012 a la fecha.

Se espera que el presente material contribuya a mejorar la comprensión sobre el potencial de los humedales empleando vegetación endémica, lo cual nos permite tener al alcance una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, así como una estrategia de mitigación/adaptación ante el cambio climático. De igual manera, esta información técnica podría contribuir al manejo de los humedales depuradores a escala urbana o municipal.

Capítulo 1

Fundamentos de los humedales artificiales

Humedales artificiales

Los humedales artificiales (HA) tienen ventajas sobre los tratamientos convencionales en lo económico y ambiental: son de bajo costo en cuanto a su construcción, operación y mantenimiento, siendo una alternativa viable para el saneamiento de las aguas residuales. Este proceso simula un humedal natural, desarrollando procesos físicos, químicos y biológicos. El diseño se basa principalmente en parámetros como el gasto, tiempos de retención hidráulica (TRH), tirantes operativos y en el uso de plantas macrófitas emergentes, flotantes o sumergidas, dispuestas en áreas diseñadas como lagunas, canales o zanjas a una profundidad inferior a 1 m y considerando el efecto de parámetros climáticos tales como precipitaciones, temperatura y radiación (Shukla et al., 2021). La interacción entre los distintos componentes (el sustrato, la columna de agua, la vegetación y microorganismos) condicionan el grado de depuración en la remoción de diversos contaminantes (Wang et al., 2003).

Clasificación de los humedales artificiales

Los HA se clasifican por el régimen del flujo del agua y por el tipo de las plantas macrófitas: humedal artificial de flujo superficial o libre (HAFL) y humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFS), de este último encontramos que se dividen en dos tipos, el humedal

artificial de flujo subsuperficial vertical y el más común, de tipo horizontal. Los HA típicamente utilizan plantas macrófitas acuáticas (Marín et al., 2023).

Humedal de flujo superficial o libre (HAFL)

En los HAFL, las plantas acuáticas están enraizadas en el fondo del humedal y el flujo de agua es a través de las hojas y tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera (EPA, 2000). Este tipo de humedal se recomienda para cargas de DBO máximas de 112 kg DBO/ha/d. Remueve nitrógeno, metales, patógenos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO, 60 al 80 %) y sólidos suspendidos totales (SST, del 50 al 90 %) (Arteaga et al., 2019). Estos humedales son una modificación de las lagunas convencionales y su profundidad es menor a 0.6 m (Delgadillo et al., 2010) (figura 1).

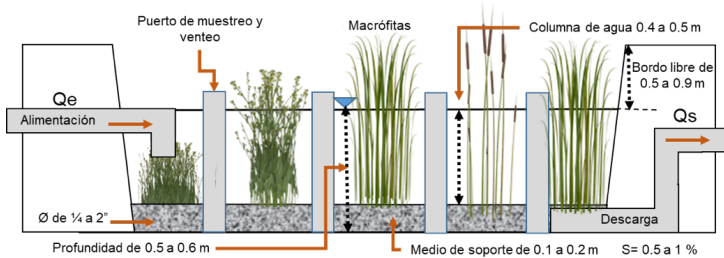


Figura 1. Humedal artificial de flujo superficial (HAFL).
Fuente: elaboración propia.

Humedal de flujo subsuperficial (HAFS)

En los HAFS el agua circula a través de un medio poroso (subterráneo) cuya profundidad es de 0.6 m. Las especies se plantan en el medio poroso y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas (EPA, 2000). Estos HA requieren menor área y no presentan problemas de olores o de mosquitos. Tienen un costo mayor y corren el riesgo de taponamiento, por lo que requieren monitoreo y mantenimiento constante. Se requiere cosechar las plantas y eliminar raíces para disminuir dicho riesgo. Los HAFS

en función de la forma de aplicación de agua al sistema pueden ser humedales de flujo subsuperficial horizontal (HAFS-H) (figura 2a) y humedales de flujo subsuperficial vertical (HAFS-V) (figura 2b).

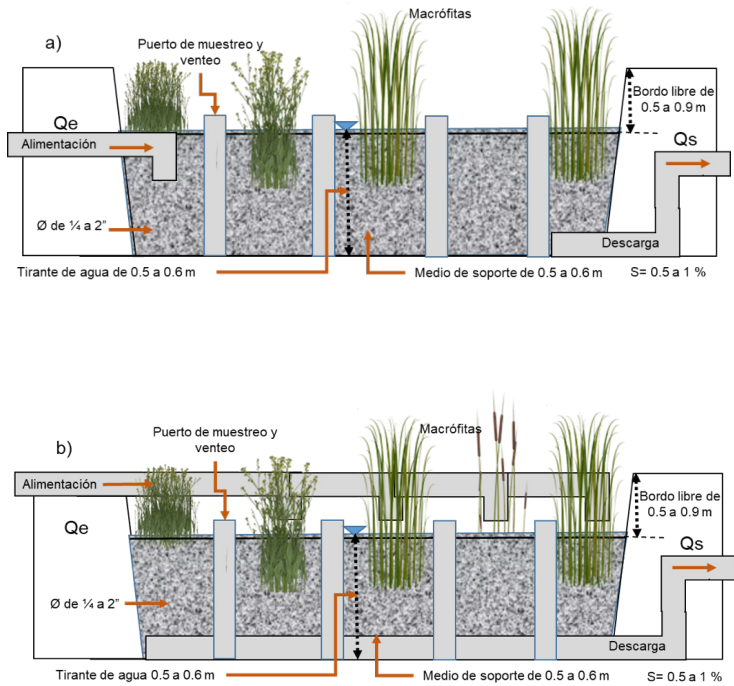


Figura 2a. Humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFS) horizontal.
2b. Humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFS) vertical.

Fuente: elaboración propia.

Medio de soporte

El sustrato es un material de soporte para el crecimiento de las plantas y para la formación de biopelículas de microorganismos, su granulometría condiciona la hidráulica del humedal, por lo que la columna de agua permite el transporte de sustancias y gases, proporcionando un ambiente óptimo para el desarrollo de procesos biogeoquímicos para plantas y bacterias. En el medio poroso se retienen y sedimentan sólidos suspendidos, se degrada la materia orgánica, se transforma y asimilan nutrientes y se inactivan microorganismos patógenos (Arteaga et al., 2019).

El medio de soporte debe ser limpio, homogéneo, capaz de mantener su forma (largo plazo), amigable con plantas y microorganismos. Los diámetros entre 5-8 mm ofrecen excelentes resultados, la conductividad hidráulica que depende del flujo de agua que circula a través del medio disminuye con el paso del tiempo (Arteaga et al., 2019). Los medios más comunes son grava gruesa y arena en espesores de 0.45 a 1.0 m y pendiente de 0 a 0.5 %. En la tabla 1 se incluyen características típicas del medio usado en HAFS.

Tabla 1
Características del soporte para HAFS

Tipo	Diámetro (mm)	Porosidad (η) (%)	Conductividad hidráulica (CH) (m/d)
Arena media	1	30	500
Arena gruesa	2	32	1,000
Arena y grava	8	35	5,000
Grava media	32	40	10,000
Grava gruesa	128	45	100,000

Fuente: CONAGUA, 2019; Arteaga et al., 2019.

Microorganismos

Los microorganismos realizan la degradación biológica, los microorganismos aerobios están presentes en la sección superior de humedal, donde el O_2 es liberado por las plantas (raíces) y hay O_2 atmosférico. En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios. La actividad microbiana: a) transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles, b) altera las condiciones de potencial redox del sustrato y así afecta la capacidad de proceso del humedal, y c) está involucrada en el reciclaje de nutrientes. Los microorganismos (bacterias, hongos, algas y protozoos) degradan las sustancias contaminantes presentes en el agua obteniendo nutrientes y/o energía necesaria para sus ciclos de vida. Se pueden clasificar dependiendo de las fuentes de energía y carbono que utilicen, en relación con oxígeno (tabla 2) y al régimen de temperatura que prefieran (tabla 3). Para humedales se consideran únicamente estas dos últimas clasificaciones (Rajan et al., 2019).

Tabla 2

Microorganismos en cuanto a su relación con el oxígeno

Clasificación	Observaciones
Aerobios estrictos	Son microorganismos que utilizan al oxígeno como aceptor de electrones
Anaerobios estrictos	Son microorganismos que no pueden sobrevivir en presencia de oxígeno y no pueden utilizar al oxígeno como aceptor de electrones
Facultativos	Son microorganismos que pueden utilizar al oxígeno como aceptor de electrones y, bajo ciertas condiciones, logran desarrollarse en ausencia de oxígeno. Dentro de este tipo de microorganismos se encuentran los llamados desnitrificadores que, en condiciones anóxicas, utilizan como aceptores de electrones a los nitritos (NO_2^-) y los nitratos (NO_3^-)

Fuente: CONAGUA, 2019; Rajan et al., 2019.

Tabla 3

Microorganismos y sus regímenes de temperatura

Clasificación	Observaciones
Criófilos	Este tipo de bacterias se logran reproducir en un rango de temperatura de -2 a 30 °C

Clasificación	Observaciones
Mesófilos	Este tipo de bacterias se reproducen exitosamente en el rango de 25 a 40 °C
Termófilos	Estas bacterias están presentes cuando la temperatura está en el rango de 45 a 60 °C
Esternotermófilos	Estas bacterias únicamente se reproducen a temperaturas mayores de 60 °C

Fuente: CONAGUA, 2019; Rajan et al., 2019.

Las poblaciones de los organismos responsables de la purificación de las aguas residuales son grandes y variadas. En la tabla 4 se presentan los géneros característicos; los trabajadores biológicos principales y más numerosos son los organismos saprófitos, incluyendo a las bacterias autotróficas.

Tabla 4

Organismos en el tratamiento biológico de las aguas residuales

Tipo	Organismos
Insectos	Cola de espiral acuática, <i>Podura</i> Larva de los gusanos rojos, <i>Chironomus</i> Larva y pupa de la mosca, <i>Psychoda</i>
Protozoarios	<i>Didinium</i> , <i>Euglena</i> , <i>Chaenea</i> , <i>Lionotus</i> , <i>Colpidium</i> <i>Stylonychia</i> , <i>Vorticela</i> , <i>Ameba</i> , <i>Arcella</i> , <i>Paramecium</i> , <i>Opercularia</i> , <i>Anthophysa</i>
Bacterias y hongos	<i>Thiospirillum</i> , <i>Zooglea ramigera</i> , <i>Streptococcus</i> , <i>Leptomitus</i> , <i>Sphaerotilus</i> , <i>Beggiatoa</i>

Fuente: CONAGUA, 2019; Rajan et al., 2019.

Los microorganismos aprovechan la materia orgánica estableciéndose (biopelícula) alrededor de la grava y en las raíces de las plantas. La eficiencia del HAFS será mayor cuando la superficie de biopelícula en el medio de soporte presente mayor densidad de microorganismos, por lo que el área requerida es menor que un HAFL, con un costo más alto debido a la cantidad del medio poroso (Mena, et al., 2008).

Las plantas, algas y microorganismos en los HA asimilan metales de las aguas residuales y las concentran a niveles más elevados que los reportados en el ambiente mediante la bioacumulación y biosorción, respectivamente. La biosorción secuestra metales metabólicamente por interacciones con biomasa microbial (viva o muerta),

se aplica en la biorremediación de ambientes contaminados por metales (Unz & Shuttleworthf, 1996). A continuación, en la tabla 5 presentamos las principales acciones microbianas en el proceso de tratamiento del agua residual.

Tabla 5

Acciones de los microorganismos en el saneamiento de aguas residuales en HA

Microorganismos	Acciones en el agua residual
Bacterias	La función de las bacterias es consumir la materia orgánica, degradar o transformar productos tóxicos presentes en las aguas residuales. Las bacterias (muy diversas), degradan compuestos orgánicos básicos como proteínas, lípidos, almidón o celulosa, y sus productos de descomposición. Las poblaciones bacterianas pueden crecer rápidamente y transformar nutrientes y otros productos
Hongos	Los hongos presentes en los HA son en su mayoría saprófitos. Son organismos heterótrofos, no fotosintéticos, y degradan la materia orgánica como lo hacen bacterias, algas y protozoos, y con el mismo mecanismo, o parecido, que las bacterias (liberalización de enzimas que transforman los productos en nutrientes asimilables). Tienen un factor limitante que es el pH, pues solo se desarrollan entre 5 y 6 UpH, por lo que el ambiente en los HA no suele ser siempre el más propicio para estos
Algas	Las algas son organismos fundamentales en muchas biocenosis de los HA. En general existen algas diversas que, según la estación, van cediendo la dominancia a grupos determinados y pueden ser algas verdes (dominan en primavera otoño e invierno) o algas verdeazuladas: (dominan en verano). La liberación de nitratos y fosfatos provoca la proliferación de las algas
Protozoos	Los protozoos son otro componente de las biocenosis de los HA que, en circunstancias apropiadas, pueden ejercer una función depuradora de primer orden, al consumir materia orgánica, bacterias y protozoos

Fuente: Seoáñez Calvo, 1999.

La tabla 6 muestra microorganismos indicadores de niveles de contaminación considerando su resistencia y adaptabilidad.

Tabla 6*Microorganismos dominantes según el nivel de contaminación*

Nivel 1 (mínima)	Nivel 2 (media)	Nivel 3 (máxima)
<i>Tabellaria fenestrata</i> , <i>Synura uvella</i> , <i>Closterium moniliferum</i> , <i>Audouinella violácea</i> , <i>Callitriche verna</i> , <i>Euglypha alveolata</i> , <i>Vorticella campánula</i> , <i>Gammarus pulex</i> , <i>Piscicola geometra</i> , <i>Cloeon</i> sp, <i>Limnaea stagnalis</i> , <i>Unio pictorum</i>	<i>Oscillatoria brevis</i> , <i>Anthophysis vegetans</i> , <i>Nitzschia palea</i> , <i>Paramecium caudatum</i> , <i>Carachaesium polypinum</i> , <i>Stentor coeruleus</i> , <i>Stratiomy's chameleon</i> , <i>Asellus aquaticus</i> , <i>Herpobdella octoculata</i> , <i>Theodorus danubialis</i> , <i>Mucor racemosus</i> , <i>Leptomitius lacteus</i>	<i>Zoogloea ramigera</i> , <i>Sphaerotilus natans</i> , <i>Thiotrix nivea</i> , <i>Beggiatoa alba</i> , <i>Euglena viridis</i> , <i>Colpidium colpoda</i> , <i>Vorticella microstoma</i> , <i>Rotaria neptunia</i> , <i>Chironomus thummi</i> , <i>Eristalis tenax</i> , <i>Tubifex tubifex</i>

Fuente: adaptado de Seoáñez Calvo, 1999.

Vegetación

Las plantas transportan O_2 a la zona de la raíz y tallos. Las raíces y rizomas penetran al medio de soporte (poroso) transportando el O_2 a mayor profundidad y con mejor concentración que lo que llega por difusión. De acuerdo con Arteaga et al. (2019), las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras:

- El tallo y la raíz permiten la fijación de microorganismos.
- Estabilizan el sustrato y controlan el régimen del flujo del agua.
- Las bajas velocidades de agua permiten depósitos de sólidos suspendidos.
- Las especies asimilan carbono, nutrientes y otros elementos incorporándolos a la planta.
- Las plantas interactúan principalmente con la atmósfera y sedimentos favoreciendo el intercambio de gases.
- El O_2 se libera desde las estructuras inferiores de las plantas y penetra a los espacios dentro del sustrato.

En los HA se han utilizado diversas especies de vegetación acuática (tabla 7).

Tabla 7
Tipos de vegetación acuática

Vegetación hidrófita	Descripción
Enraizadas emergentes	Son dominantes en humedales naturales, crecen en agua de 0.5 m por debajo del suelo (manto freático) hasta inundaciones más de 1.5 m, cuentan con tallos, hojas, raíces extensas y rizomas
Enraizadas de hojas postradas	Se enraizan al sustrato, sus hojas flotan sobre el agua y las partes reproductivas están sobre la superficie del agua. Se establecen a profundidades entre 0.5 y 3 m. Algunas plantas tienen varios tipos y formas de hojas (sumergidas y flotantes)
Enraizadas sumergidas	Se encuentran totalmente sumergidas, entre los más comunes están los pastos marinos y de agua dulce. Se enraizan al sedimento y todas las partes vegetativas están sumergidas. Se les encuentra a profundidades desde 0.3 m a 1 m dependiendo de la época del año
Flotadoras	No están enraizadas al sedimento, flotan libres sobre el agua y se mueven por el viento, tienen diversas formas, tamaños y hábitos. Las grandes forman rosetas en hojas aéreas flotantes, tienen raíces y rizomas sumergidos

Fuente: Barba et al., 2013.

Contaminantes y su remoción

Los HA actúan como depuradores mediante diversos procesos de remoción de contaminantes del agua residual. La influencia e interacción para la remoción de cada componente involucrado es compleja. A continuación, en la tabla 8 se muestran los principales mecanismos de remoción por HA de diferentes contaminantes.

Tabla 8
Mecanismos de remoción de contaminantes en HA

Contaminantes	HAFL	HAFS	Acuáticas flotantes
Compuestos orgánicos biodegradables	Conversión biológica por bacterias anaerobias, aerobias y facultativas por las plantas de detritos de DBO soluble, adsorción, filtración y sedimentación de DBO particulada	Conversión biológica por bacterias facultativas y anaerobias en plantas y detritos de superficie	Conversión biológica por bacterias facultativas y anaerobias en plantas y detritos de superficie

Contaminantes	HAFL	HAFS	Acuáticas flotantes
Sólidos suspendidos	Sedimentación, filtración	Sedimentación, filtración	Sedimentación, filtración
Nitrógeno	Nitrificación/desnitrificación, asimilación vegetal, volatilización	Nitrificación/desnitrificación, asimilación vegetal, volatilización.	Nitrificación/desnitrificación, asimilación vegetal, volatilización
Fósforo	Sedimentación, asimilación vegetal	Filtración, sedimentación asimilación vegetal	Sedimentación, asimilación vegetal
Metales pesados	Adsorción por plantas y detritos de superficie, sedimentación	Adsorción por plantas y detritos de superficie, sedimentación	Adsorción por raíces de las plantas, sedimentación
Componentes orgánicos traza	Volatilización, adsorción, biodegradación	Adsorción, biodegradación	Volatilización, adsorción, biodegradación
Organismos patógenos	Eliminación por antibióticos de las plantas, eliminación natural, depredación, radiación solar (UV), sedimentación	Eliminación por antibióticos de las plantas, eliminación natural, depredación, radiación solar (UV), sedimentación	Eliminación natural, depredación, irradiación UV, sedimentación

Fuente: Pérez López, 2009.

Remoción de la DBO (soluble y particulada). La DBO es removida por microorganismos, la adsorción se da en la superficie de las plantas y detritos de la columna de agua. Las plantas reducen la velocidad del agua y ayudan a la floculación, sedimentando y capturando la DBO (particulada). La materia orgánica se remueve ejerciendo una demanda de oxígeno, como lo hace la vegetación que muere. La DBO del efluente se remueve rápidamente si el humedal es de gran longitud (flujo pistón) (Pérez López, 2009).

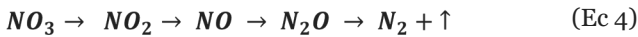
Remoción de sólidos. La remoción de materiales (sólidos) suspendidos y sedimentables, se realiza en el pretratamiento y esta se hace para evitar obstrucciones en tuberías, unidades y para evitar la colmatación del HA (Kolb, 1998). Los HA complementan esta remoción por filtración y sedimentación, aunado a que las raíces de las especies vegetales (macrófitas) y la porosidad del sustrato (medio de soporte) reducen la velocidad del agua, favoreciendo ambos procesos.



Remoción de nitrógeno. El N en el agua residual está presente como amonio o en un compuesto inestable que es transformado en amonio. La remoción de N en HA es por la nitrificación y desnitrificación en el sustrato (Delgadillo et al., 2010). La nitrificación requiere una serie de reacciones con oxígeno disuelto en el agua, así como amonio o nitrito como fuente de energía y CO_2 como fuente de carbono:



La desnitrificación remueve N bajo condiciones anóxicas; el oxígeno disuelto (OD) presente es nulo o con concentraciones menores a 2 %. El oxígeno está disponible en nitratos, nitritos o incluso sulfatos (Kolb, 1998). Las reacciones que llevan a la desnitrificación se muestran a continuación:



Remoción de fósforo. El P está presente como ortofosfato (PO_4^{3-}), polifosfato ($(\text{PO}_3)_n$) y fosfato orgánico ($\text{O}=\text{P}(\text{OR})_3$). El $\text{O}=\text{P}(\text{OR})_3$ (constituyente menor) y $(\text{PO}_3)_n$ requieren una posterior descomposición a una forma de PO_4^{3-} más asimilable. Aproximadamente el 25 % del PT fijado se encuentran en ortofosfatos tales como: PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4 y H_3PO_4 , que están disponibles para el metabolismo biológico inmediato (Delgadillo et al., 2010). La remoción de PO_4^{3-} se da por precipitación con Al, Fe, Ca y materiales arcillosos en el sustrato, del mismo modo por adsorción y complejización, aunque el P consumido por la planta es despreciable respecto a la adsorción (Kolb, 1998).

Remoción de metales pesados. Los metales (traza) se acumulan en el HA por adsorción y complejización con material orgánico. Estos están en formas solubles (biodisponibles) o como partículas asociadas. Se remueven de forma similar al P a bajo costo, acumulándose en un espacio donde es recogido para su disposición final (Pérez López, 2009).

Remoción de compuestos orgánicos. Los compuestos orgánicos sintéticos presentes en aguas residuales son resistentes a ser removidos por sistemas tradicionales de tratamientos. Los mecanismos de remoción incluyen la volatilización, la adsorción y la biodegradación (Pérez López, 2009).

Remoción de organismos patógenos. Se deben remover bacterias patógenas y virus para evitar afecciones a la salud pública. Los patógenos viven corto tiempo en agua natural y en mayor tiempo en aguas con temperaturas más bajas (frías) y con materia orgánica. Se ha reportado que los microorganismos se remueven por factores físicos, químicos y biológicos (Delgadillo et al., 2010). La remoción por medios físicos son la agregación, filtración, sedimentación y radiación ultravioleta; la biológica incluye la predación (bacteriófagos) y la muerte (declinación *die-off*). La remoción por factores químicos involucra la oxidación, adsorción y exposición a toxinas de otros microorganismos y de las plantas.

Procesos de fitorremediación por las plantas

De manera muy sistemática las plantas pueden incorporar las sustancias contaminantes mediante distintos mecanismos (figura 3), a los cuales en su conjunto se le conoce como fitorremediación y está compuesta por los procesos descritos en la tabla 9.

Tabla 9
Principales procesos de fitorremediación

Proceso	Descripción
Fitoextracción	Proceso donde las plantas concentran metales en hojas y raíces. En el caso particular llega a tratar el Cd, Co, Cr, Ni, Hg, Pb, Se y Zn
Rizofiltración	Proceso donde las raíces de las plantas absorben, precipitan y concentran metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradan compuestos orgánicos. Logran tratar el Cd, Co, Hg, Pb, Se, Zn, isótopos radioactivos y compuestos fenólicos

Proceso	Descripción
Fitoestabilización	Las plantas tolerantes a metales reducen la movilidad de estos y evitan el paso a medios subterráneos o al aire, obteniendo el tratamiento de lagunas de deshecho de yacimientos mineros. Propuesto para compuestos fenólicos y clorados
Fitoestimulación	Las plantas usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos (bacterias y hongos), para eliminar hidrocarburos (benceno, tolueno, poliaromáticos, etc.)
Fitovolatilización	Una vez que las plantas asimilan y modifican metales o compuestos orgánicos (Hg, Se, tetraclorometano y triclorometano), los transpiran liberándolos a la atmósfera
Fitodegradación	Las plantas (macrófitas o terrestres) asimilan, almacenan y degradan compuestos orgánicos y transforman en compuestos de menor toxicidad o no tóxicos.

Fuente: Munive et al., 2018.

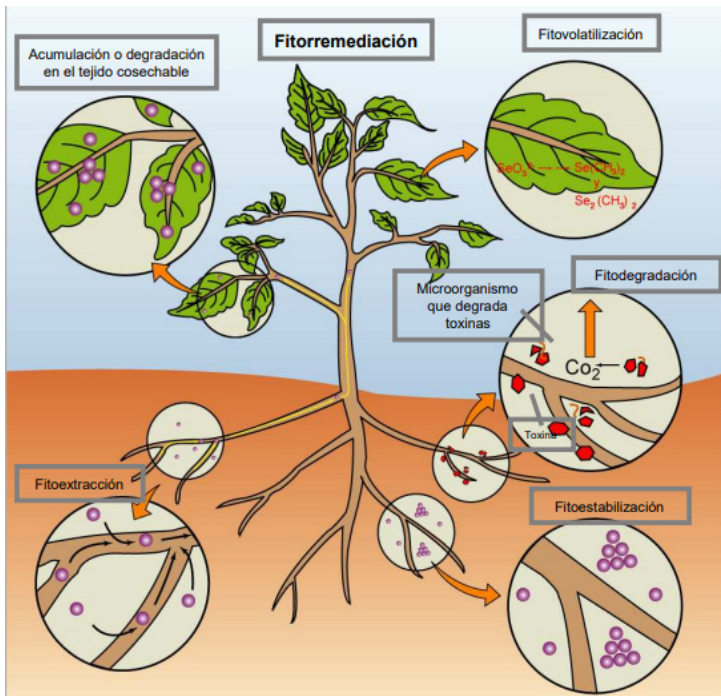


Figura 3. Procesos que se llevan a cabo en la vegetación.

Fuente: Scribd.

Características de diseño

El HA es más eficiente en la depuración cuando se construye en flujo, es decir, con relación largo-ancho mayor a 1:3. Los aspectos de suma importancia para la construcción de un HA son tener designada la capacidad de agua a tratar o caudal para considerar las estructuras de entrada del agua residual y salida del agua tratada, así como la selección y colocación del medio granular; para poder establecer la vegetación es necesario conocer las características del agua a tratar, para ello también se deben de conocer las condiciones ambientales (por la adaptación del tipo de vegetación a seleccionar), es por ello que en los estudios realizados se manejan vegetaciones de la región. Otro aspecto que no se debe dejar pasar por alto son los criterios de remoción para las principales variables como la DBO y nitrógeno, entre otros (Delgadillo et al., 2010).

Para el diseño de este tipo de sistemas de manera muy general se toma en consideración que el agua residual tiene un comportamiento de primer orden, para lo que se hace un diseño de flujo pistón con dispersión axial, y en ese sentido se considera el tiempo de retención hidráulica para la remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos y nitrógeno, utilizando en algunos casos modelos empíricos (Crites & Tchobanoglous, 2000). La tabla 10 presenta algunos de los parámetros típicos empleados en el diseño de los HA para tratar agua residual doméstica.

Tabla 10
Parámetros típicos de diseño y construcción de HA

Elemento	Vertical	Horizontal	Subsuperficial
Carga orgánica DBO ₅ inf. (kg/ha/d)	<112	<112	<150
Carga hidráulica (cm d ⁻¹)	<5	<5	<5
TRH (días)	1-2	5-15	>5
Área específica (m ²)	1-5	5-20	5-20
Relación largo-ancho	03:01	10:01	03:01
Tirante (m)	>1.0	<0.60	<0.60
Pendiente S (%) fondo	NA	<1	<1
Medio de soporte	Arena y grava	NA	Arena y grava
Vegetación	Variable	Variable	Variable

Fuente: UN-HABITAT, 2008.

Las variables como TRH, tasa de carga orgánica (TCO), área superficial (AS) y tirante del agua (Ti) son los principales criterios de diseño de los HAFL. En ese sentido, la carga hidráulica se presenta en unidades de pulg/d o ac/Mgal-d, tomando en cuenta que la tasas se estiman con el área y del caudal. Otro de punto a considerar para el diseño es la relación largo o ancho, así como los factores hidráulicos, térmicos y como punto principal, la vegetación. De manera general, los criterios de diseño de este tipo de humedales se presentan en la tabla 11.

Tabla 11

Criterios de diseño y calidad esperada del efluente para HAFL

Elemento	Unidad	Valor
Parámetro de diseño		
TRH	d	2-5 (DBO), 7-14 (N)
TCO DBO	lb/ac·d	<100
Tirante	pie	0.2-1.5
Área específica	ac/Mgal·d	5-10
Relación largo-ancho		2:1 a 4:1
Control de mosquitos		Requerido
No. de cosecha	año	3-5
Calidad esperada del efluente*		
DBO ₅	mg/L	<20
SST	mg/L	<20
N total	mg/L	<10
P total	mg/L	<5
*Calidad esperada de efluente basada en una carga de DBO ≤ 100 lb/ac·d (aguas residuales municipales)		

Fuente: Crites & Tchobanoglous, 2000; UN-HABITAT, 2008.

Para que este tipo de HA se pueda desarrollar con éxito deben incluirse características estructurales desde la entrada-salida, es decir, recirculación hasta los recubrimientos. Por su parte, para los HAFS los criterios importantes de diseño son el TRH, el AS, así como las tasas de carga (DBO y sólidos) y profundidad del medio. En la tabla 12 también se presentan los valores esperados del efluente de los HAFS.

Tabla 12
Criterios diseño y calidad del efluente en HAFS

Elemento	Unidad	Valor
Parámetro de diseño		
TRH	d	3-4 (DBO),6-10 (N)
TCO DBO	lb/ac•d	<100
Tasa de carga	lb/pie ² •d	0.008
de la entrada de SST	pie	1-2
Tirante del agua	pie	1.5-2.5
Tirante del medio		No aplica
Control de mosquitos, programa de siega		No aplica
Calidad esperada del efluente*		
DBO ₅	mg/L	<20
SST	mg/L	<20
N total	mg/L	<10
P total	mg/L	<5
*Calidad esperada de efluente basada en una carga de DBO ≤ 100 lb/ac•d (aguas residuales municipales)		

Fuente: Crites & Tchobanoglous, 2000; UN-HABITAT, 2008.

Ventajas y desventajas de los HA

Las macrófitas, los microorganismos y el medio de soporte son importantes dentro del sistema de HA. A continuación, presentamos las ventajas y desventajas en comparación con los sistemas convencionales de depuración de aguas (tabla 13) (Pérez López, 2009).

Tabla 13
Ventajas y limitaciones de los HA

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Presentan menor costo que otras tecnologías de tratamiento• El costo de operación y mantenimiento es bajo (energía y suministros)• Soportan variaciones de caudal o gasto• Facilitan el reciclaje y reutilización del agua• Proporcionan un hábitat para muchos organismos• Se construyen en armonía con el paisaje• Proporcionan beneficios adicionales a la calidad del agua, como un hábitat para la vida salvaje y establecen condiciones estéticas de los espacios abiertos• Favorecen el medio ambiente y cuentan con aceptación pública	<ul style="list-style-type: none">• Requieren grandes extensiones de terreno, comparado con los tratamientos convencionales• Son costosos si no se cuenta con terreno disponible y asequible• El rendimiento del sistema puede ser mayor o igual que al convencional• La eficiencia del sistema puede ser estacional (cambios ambientales incluyendo lluvias y sequías)• Los componentes biológicos son sensibles a sustancias como el amoníaco, pesticidas u otros tóxicos• Se requiere una mínima cantidad de agua para que sobrevivan, pero no soportan estar completamente secos

Fuente: Arteaga et al., 2019.

Capítulo 2

Especies vegetales utilizadas en humedales artificiales

La vegetación por implantar en los HA es un factor importante para garantizar el rendimiento óptimo en el tratamiento del agua residual, ya que airea el sistema radicular y proporciona O₂ a los microorganismos en la rizosfera, eliminan contaminantes (asimilación y fijación) y filtración de sólidos (sistema radicular) (Hamisi, et al., 2019).

Por tales motivos, es de gran importancia la correcta selección de la vegetación a implantar para cada región, pues se deben tener en cuenta diversos factores, tales como (Seoáñez Calvo, 1999):

- Temperatura
- Área de superficie del HA
- Tirante operativo
- Composición de los afluentes
- Evolución de los rizomas
- Especies colonizadoras activas (eficaz extensión de rizomas)
- Recolección periódica de las especies
- Excelente biomasa por unidad de superficie para máxima asimilación de nutrientes
- Especies de fácil adaptación a condiciones ambientales
- Productividad de las especies vegetales
- Especies de flora nativas
- Tipo de medio de soporte

Los HA pueden ser clasificados según el tipo de macrófitas que emplean en su funcionamiento: macrófitas fijas al sustrato (enraizadas) o macrófitas flotantes libres (tabla 14):

Tabla 14

Clasificación de los HA con respecto al tipo de macrófitas empleadas

Macrófitas	Concepto
Hojas flotantes	Principalmente angiospermas sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos. El jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>) y la lenteja de agua (<i>Lemna sp.</i>) son las especies más utilizadas para este sistema
Sumergidas	Comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carófitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares solo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos
Enraizadas emergentes	En suelos anegados permanente o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos

Fuente: Delgadillo et al., 2010.

Por ello, es importante también la búsqueda de nuevas especies vegetales locales que puedan ser útiles en el tratamiento con HA.

Especies recomendables para su uso en humedales

La tabla 15 muestra las diversas especies que algunos autores recomiendan para su uso en humedales.

Tabla 15

Especies básicas recomendables para HA

Tipo	Especies
Pteridofitos (helechos)	<i>Equisetum sp.</i> <i>Isoetes lacustris</i>
Algas	Verdes-Azules o cianobacterias <i>Anacystis sp.</i> <i>Spirulina sp.</i> <i>Phormidium sp.</i> <i>Nostoc sp.</i> <i>Microcystis sp.</i> <i>Oscillatoria sp.</i> <i>Anabaena sp.</i> Diatomea <i>Navicula sp.</i> <i>Melosira sp.</i> <i>Diatoma sp.</i> <i>Cyclotella sp.</i> <i>Nitzschia sp.</i> <i>Fragilaria sp.</i> <i>Surirella sp.</i>

Tipo	Especies
Algas	Verdes <i>Microspora sp. Enteromorpha intestinalis. Chuetophora sp. Stigeoclonium tenue. Bulbochaete sp. Cladophora sp. Chlorella sp. Chlorococcum sp. Micractinium sp. Selenastrum sp. Sphaerocystis sp. Carteria sp. Chlorella sp. Euglena sp. Phacus sp. Scenedesmus sp. Volvox sp. Pandorina monum. Oedogonium sp. Pediatrum sp. Oocystis sp.</i>
Briofitos (musgos)	<i>Polytrichum sp. Mniun cincioides. Sphagnum squarrosun. Sphagnum palustre. Tortella sp. Scorpidium scorpioides</i>
Plantas flotantes	<i>Ceratophyllum submersum. Ceratophyllum demersum. Miriophyllum spicatum. Miriophyllum verticillatum. Miriophyllum Alterniflorum. Zannichellia palustris. Elodea canadensis. Potamogeton lucens. Potamogeton crispus. Potamogeton pectinatus. Trapa natans. Holtonia palustris</i>
Plantas sumergidas	<i>Ceratophyllum submersum. Ceratophyllum demersum. Miriophyllum spicatum. Miriophyllum verticillatum. Miriophyllum Alterniflorum Zannichellia palustris. Elodea canadensis. Potamogeton lucens. Potamogeton crispus. Potamogeton pectinatus. Trapa natans. Hottonia palustris</i>
Plantas emergentes	<i>Scirpus validus. Scirpus lacustris. Scirpus lacustris tabernde montani. Scirpus pungens. Phragmites australis. Typha latifolia. Typha domingensis. Lythrum salicaria. Sparganium erectum. Phalaris arundinacea. Iris pseudacorus. Carex riparia. Carex vesicaria. Carex paniculata lusitánica. Lycopus europaeus</i>

Fuente: Vymazal, 2011; CONAGUA, 2019.

Funciones y aplicación de la vegetación

La vegetación que se selecciona tiene las siguientes funciones y aplicaciones:

- Busca utilizar el agua del humedal como medio, regula el régimen hídrico.
- Busca utilizar los nutrientes que contenga esa agua (retiene y procesa).
- Los vertidos de aguas residuales que aportan al humedal contienen, por una parte, nutrientes, y por otra, productos

que dificultan el devenir de las masas vegetales y a los que se tienen que adaptar.

- Retiene y procesa numerosos productos, que pueden incorporar a sus ciclos metabólicos.
- Tienen a regular y a limpiar los “extremismos” del medio; pH, sólidos en suspensión, productos disueltos, materia orgánica, etc., dentro de ciertos límites.
- Constituye una biocenosis biológicamente muy activa en todos sus componentes.

Los macrófitos en los HA tienen diferentes funciones y se muestran en la tabla 16.

Tabla 16

Función principal de las macrófitas dentro del HA

Propiedades	Función en el tratamiento	Efecto obtenido
Tejido aéreo de las plantas	Atenuación de la luz solar, influye en el microclima, reduce la velocidad del viento, mejora la apariencia del sistema y almacena de nutrientes	Reduce del fitoplancton, aísla durante el invierno y disminuye la temperatura en verano, reduce la resuspensión de los sólidos sedimentables y mejora la remoción de estos, mejora la estética y calidad de vida, genera menos daños al ambiente
Tejido de las plantas dentro del agua	Filtración, reduce la velocidad del agua, proporciona área superficial para que se adhieran las bacterias y secreción de oxígeno fotosintético y toma de nutrientes	Filtra desechos grandes, aumenta la velocidad de sedimentación de los sólidos y disminuye el riesgo de resuspensión, además aumenta el tiempo de residencia hidráulico en el sistema, incrementa la degradación aerobia, los nutrientes se emplean por las plantas para su crecimiento y reproducción
Raíces y rizomas en el sedimento	Proporciona área superficial para que se adhieran bacterias y otros microorganismos, estabiliza la superficie del sedimento, previene la coagulación en los sistemas de flujo vertical. Libera oxígeno, asimila nutrientes y libera antibióticos	Reduce el área total del sistema, disminuye la erosión del suelo, el crecimiento de las plantas y su movimiento abre espacios en el sustrato, incrementa la degradación aerobia de la materia orgánica y la nitrificación por el aumento de bacterias nitrificantes, reduce contaminantes, elimina microorganismos patógenos

Fuente: CONAGUA, 2019.

Factores que afectan a la vegetación

Es necesario conocer los factores y condiciones ambientales, biológicos y de calidad del agua previo al establecimiento de HA, pues estos factores condicionan el establecimiento y éxito de las especies (tabla 17).

Tabla 17

Factores condicionantes para la selección de especie

Fitogeográfico y edáfico	Climático	Biológico	Calidad del agua residual
Región fitológica	Precipitaciones	Periodo vegetativo	pH, OD, DBO ₅ , DQO, C.E.
Zona	Temperaturas	Especies vegetales del entorno	Color
Topografía	Humedad relativa	Fauna del entorno	Temperatura
-Pendiente	Índices climáticos	Especies viables de las listas disponibles	SST, SDT, Sólidos sedimentables
-Orientación	Características estacionales	Características ecológicas del entorno	Nutrientes: -N
Altitud	Días de helada	Importancia antrópica del entorno	-orgánico
Latitud	Días de helada	Necesidades de calidad del efluente del humedal	-amoniaco
Características geológicas	Evapotranspiración	Resistencia a la contaminación	-nitratos
Características edáficas	Vientos	Capacidad depuradora	-P
-pH			-orgánico
-Salinidad			-ortofosfatos
-Tipo de suelo			Bacterias
-Profundidad			Protozoos
-Materia orgánica			Virus
			Metales pesados

Fuente: Seoáñez Calvo, 1999.

Plantas ornamentales en humedales artificiales

Las plantas ornamentales se han utilizado como una alternativa para mejorar la estética de los HA, dan valor comercial con otros servicios ecosistémicos. Las plantas ornamentales aportan economía a la comunidad mediante la producción de flores, sumándole que el tratamiento de aguas servidas presenta un costo de operación bajo. La remoción en HA usando plantas ornamentales se presenta en la

tabla 18. Ha demostrado ser una opción que favorece el tratamiento de aguas residuales, con eficiencias de remoción de N y P > 50 %, DQO y coliformes superiores al 90 % de remoción con tiempos de retención de 3 a 6 días (Marín, 2017).

Tabla 18
HAFS con plantas ornamentales

Flujo	Especies	Localidad	Área de humedal	Remoción (%)	Referencia
Horizontal	<i>Thypa sp.</i> , <i>Zantedeschia aethiopica</i> , etc.	Pinoltepec, Emiliano Zapata, Veracruz	*60	NT:47 PT:33 DQO:67	Hernández (2016)
Horizontal	<i>Canna hybrid</i> , <i>Alpinia purpurata</i> y <i>Hedychium coronarium</i>	Pastorías, Actopan, Veracruz	**3.6	F:35-45 Cl:28-34	Marín (2017)
Horizontal	<i>Canna hybrids</i> y <i>Strelitzia reginae</i>	México	*65 TRH: 3 d	DQO:86 NT:30-33 PT:24-44	Merino et al. (2015)
Vertical	<i>Zantedeschia aethiopica</i>	CIBAC de UAM Xochimilco, México	*55 TRH: 9	DQO:92 N-NH ₄ :85 P-PO ₄ :80	Ramírez et al. (2009)
Horizontal	<i>Strelitzia reginae</i> , <i>Zantedeschia aethiopica</i> , <i>Canna hybrids</i> , <i>Anthurium andreanum</i> , <i>Hemerocallis dumortieri</i>	Ocotlán, Jalisco	**0.06 TRH: 4 d	DQO:>75 P:66 Coliformes:>99	Zurita et al. (2006)
Vertical	<i>Heliconia psittacorum</i>	Tapachula, Chiapas	*300 TRH:5.6 d	DQO:91 Coliformes:93	Orozco et al. (2006)

Notas: *Sistemas de tratamiento comunitario.

**Sistema de tratamiento experimental. NT: nitrógeno total; PT: fósforo total; P: fósforo; DQO: demanda química de oxígeno; F: fluoruro; Cl: cloruro; N-NH₄: nitrógeno de amonio; N-NH₃: nitrógeno de nitratos y P-PO₄: fósforo de fosfatos.

Fuente: adaptada de Mayge May, 2020.

Capítulo 3

Descripción de las especies estudiadas

En este apartado se describen, en las tablas 19 a 36, las especies que han sido evaluadas dentro del Laboratorio de Tecnología del Agua para identificar su potencial de fitorremediación. Estas especies se evaluaron desde la etapa de arranque (de su siembra hasta seis meses) a su estabilización (hasta un año de operación).

Acrostichum danaeifolium **Langsd & Fisch, 1810**

Tabla 19

Ficha técnica de Acrostichum danaeifolium

Nombre científico	<i>Acrostichum danaeifolium</i> Langsd & Fisch
Nombre común	Helecho de playa o de cuero
Orden	Polypodiales
Familia	<i>Pteridaceae</i>
Tallos	Hasta 4 m de altura
Hojas	Hojas agrupadas, con pinnulas erectas (de 30 a 60 pares de pinnulas/hoja); pelosas en la parte posterior, estrechamente curvadas, de hasta 25 cm de largo y 5 cm de ancho. Base atenuada, ápice redondeado, hojas muy juntas, todas las pinnulas son fértiles, raquis acanalado longitudinalmente, areolas adyacentes al raquis menos de tres veces más largas que anchas, oblicuas al raquis; peciolo de color claro de forma rectangular
Flores	
Raíz	Rizomas

Distribución	Se encuentra a orillas de lagunas, a orillas de ríos, en zonas inundadas la mayor parte del año, en Tabasco hay registro de colecta en Centla, Paraíso y Tenosique
Crecimiento	
Época de floración	
Notas	Helechos acuáticos de hasta 4 m de altura, son enraizadas emergentes

Fuente: Gómez Rodríguez, 2019; Royal Botanic Garden Kew, 2024a.



Figura 4. *Acrostichum danaeifolium* (izquierda). *Acrostichum danaeifolium* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

***Canna indica* L. 1753**

Tabla 20

Ficha técnica de Canna indica

Nombre científico	<i>Canna indica</i> L.
Nombre común	Hoja de cuenta, papatla, chancle, chilalaga, chocolón, bandera, caña de coro, coyol, changara y platanillo
Orden	Zingiberales
Familia	<i>Cannaceae</i>
Tallos	Son ramificados con escamas en la base (hacia la inflorescencia)

Hojas	Sus hojas alternas poseen una larga vaina que envuelve el tallo, la cual a veces está cubierta de pelos suaves y entrecruzados. Las láminas son grandes, ovadas (hasta 60 cm de largo), con ápice puntiagudo, vena media evidente y numerosas venas laterales paralelas
Flores	Son grandes y vistosas (hasta 8 cm), sésiles o con pedicelos cortos. Cáliz de tres sépalos (a veces uno menor), verdosos o rojizos, persistentes en el ápice del ovario. Corola con tubo corto y tres pétalos angostos, rectos y erectos (uno menor), alternos a los sépalos, de color amarillo a rojo (a menudo con manchas rojas). Estambres muy modificados: los tres exteriores petaloideos y más largos que los pétalos (a veces 2 desarrollados y 1 reducido); de los dos interiores, uno es el labelo (erecto o curvado y enrollado), y el otro (con antera fértil) también es erecto o curvado y enrollado. Ovario con protuberancias carnosas; estilo petaloide unido a la base del estambre
Raíz	Tallos subterráneos (rizomas) horizontales, gruesos
Distribución	Todo México
Crecimiento	Herbácea robusta, casi sin pelos
Época de floración	Flores y frutos durante todo el año
Notas	Es ornamental; las hojas se utilizan para envolver tamales y los rizomas harinosos son comestibles. Las semillas se utilizan en sonajas y para collares

Fuente: Jiménez, 1980; Rzedowski, 1998; Flora Vascular, 2022a; Royal Botanic Garden Kew, 2024b.



Figura 5. Flor de *Canna indica* (izquierda). *Canna indica* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

***Cladium jamaicense* Crantz 1766**

Tabla 21

Ficha técnica de Cladium jamaicense

Nombre científico	<i>Cladium jamaicense</i> Crantz
Nombre común	Cortadera y zacate (español); jol che', puuch, puj, su'uk (maya)
Orden	Poales
Familia	<i>Cyperaceae</i>
Tallos	Son erectos y cilíndricos, van de 1 a 3.5 m de alto, fistulosos
Hojas	Son caulinares, lineares, de 0.6 a 1.2 m de largo, margen serrado y cortante; vaina tubular
Flores	Son bisexuales, sin perianto de cerdas; con 2 o 3 estambres; ovario 3-carpelar, estilo continuo con el ovario. Los frutos son aquenios ovoides a fusiformes, con ápice atenuado en un estilopodio, estipitados, rugosos y brillantes
Raíz	Hierbas acuáticas, perennes con rizomas y estoloníferas, monoicas
Distribución	De Estados Unidos a Sudamérica, incluyendo las Antillas. En México se encuentra en Campeche, Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Colima, Nuevo León, Oaxaca, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán
Crecimiento	Presenta abundancia y tolerancia a diversos humedales con suelos de diferentes concentraciones de salinidad y sulfatos
Época de floración	Se produce en el tiempo de febrero a agosto
Notas	Forrajera (aves), artesanía, elaboración de sillas para montar a caballo

Fuente: Namestnik et al., 2012; Lot et al., 2015; Comparán, 2020; Royal Botanic Garden Kew, 2024c.



Figura 6. Flor de *Cladium jamaicense* (izquierda). *Cladium jamaicense* cosechada de unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: izquierda: elaboración propia; derecha: Comparán, 2020.

***Colocasia esculenta* (L.) Schott 1832**

Tabla 22

Ficha técnica de Colocasia esculenta

Nombre científico	<i>Colocasia esculenta</i> (L.) Schott
Nombre común	En México malanga o macal, kalo (del hawaiano) o cará en Brasil, yautía coco en República Dominicana y en Colombia se conoce como papa china
Orden	Alismatales
Familia	<i>Araceae</i>
Tallos	Tallos de hasta 90 cm, base tuberosa. Tiene tallo subterráneo, le brotan ramificaciones secundarias, laterales, horizontales, engrosadas, que se les conoce como cormelos. Los cormelos tienen una corteza marrón oscuro y la pulpa es blanca o amarilla, tiene nudos de donde nacen las yemas
Hojas	Son peltadas, con láminas de 32 a 36 cm de largo y de 22 a 70 cm de ancho
Flores	Los frutos son bayas subglobosas a oblongas, de 3.5 a 5 mm de largo y de 2.5 a 3.9 mm de diámetro; con semillas elipsoides, de color café claro
Raíz	Hierba perenne, rizomatosa
Crecimiento	Resulta propia de humedales y zonas encharcadas de las regiones de clima tropical
Época de floración	Todo el año
Notas	Se emplean para decorar zonas de desbordante humedad

Fuente: Rodríguez, 2002; IFAS, 2022; Royal Botanic Garden Kew, 2024d.



Figura 7. *Colocasia esculenta* en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua.

Fuente: García & Comparán, 2018.

Cyperus articulatus L. 1753

Tabla 23

Ficha técnica de Cyperus articulatus

Nombre científico	<i>Cyperus articulatus</i> L.
Nombre común	Chintul grande (Tabasco) o chintule (Oaxaca)
Orden	Poales
Familia	<i>Cyperaceae</i>
Tallos	De hasta 125 cm de largo y 2 a 3 mm de grueso, recubiertos de escamas lanceoladas de 2 a 4 cm de largo; culmos teretes, 1 a 3 por nudo, 40 a 140 (200) cm de alto, conspicuamente septados secos
Hojas	Láminas en forma de V de hasta 20 (40) cm de largo
Flores	Espiguillas generalmente de 10 a 35 mm de largo y 1 a 1.5 mm de ancho, laxamente ascendentes, linear-elípticas y comprimidas, con una coloración pardo-amarillento-rojiza. La raquilla es recta, persistente y presenta alas angostas. Las glumas, de 3 a 3.5 mm de largo por 1 a 1.5 mm de ancho, son ovado-elípticas, agudas, con 5 a 7 nervaduras y de dehiscencia tardía. Posee tres estambres y un estilo de hasta 3.5 mm de largo
Raíz	Planta perenne, con rizomas endurecidos
Distribución	Desde el sur de los Estados Unidos, México, Centroamérica y Sudamérica
Crecimiento	Crece en canales, a los bordes de lagos, pantanos (dulces o ligeramente salobres) y en potreros inundados
Época de floración	Florece y fructifica durante todo el año
Notas	Esta especie puede tener tallos cilíndricos, a diferencia de tallos triangulares de otras especies de <i>Cyperus</i>

Fuente: Martínez, 1979; iNaturalist Panamá, 2022; Royal Botanic Garden Kew, 2024e.

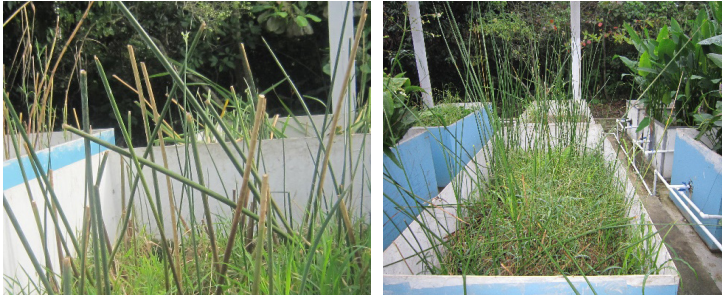


Figura 8. *Cyperus articulatus* (izquierda) *Cyperus articulatus* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

Cyperus odoratus L. 1753

Tabla 24

Ficha técnica de *Cyperus odoratus*

Nombre científico	<i>Cyperus odoratus</i> L.
Nombre común	Cuentas de Santa Elena, tuxpata (Tabasco) coyoliillo (El Salvador y Guatemala); totorilla (Argentina). En el estado de Tabasco se le conoce como navajuela
Orden	Poales
Familia	<i>Cyperaceae</i>
Tallos	Trígonos, de 0.5 a 1 cm de ancho en la base, glabros
Hojas	Hojas de 10 a 50 cm de largo, 4 a 10 mm de ancho, con los márgenes escabridos
Flores	Espiguillas de 5 a 27 mm de largo y 1 mm de diámetro, de color verde a café-rojizo, más o menos divaricadas (75-105°) y subdísticas cilíndricas, a veces en grupos de 3 a 30 flores. Raquilla desarticulada en la base del aquenio, engrosada y esponjosa en el lado estéril, y con dos alas hialinas o café (1-1.2 x 0.4-0.5 mm) envolviendo la base del aquenio en el lado fértil. Brácteola de ≈1 x 0.2-0.3 mm (lateral), acuminada, 5-7-nervada; perfilo secundario de 1.2-1.5 x 0.5 mm (lateral), obtuso. Glumas de 2-3.5 x 0.7-1 mm (lateral), algo rígidas, 7-9-nervadas, con quilla verde y lados lustrosos café-rojizos. Estambres 3, con filamentos hialinos de 2-2.5 mm y anteras de 0.4-0.8 mm
Raíz	De naturaleza fibrosa, pudiendo además presentar un rizoma corto (tallo subterráneo horizontal modificado)

Distribución	Norteamérica, Centroamérica, Antillas y Sudamérica
Crecimiento	Perennes, solitarias o cespitosas, de 40 a 120 cm de alto, bulbosas en la base
Época de floración	Todo el año
Notas	Por su alta tasa de crecimiento y reproducción la especie debe ser controlada

Fuente: Araiza y Almarzan, 2012; Fern, 2014; Ramachandran & Soosairaj, 2014; Plants use, 2016; Royal Botanic Garden Kew, 2024f y Flora Vascular, 2020b.



Figura 9. Flor de *Cyperus odoratus* (izquierda). *Cyperus odoratus* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).
Fuente: elaboración propia.

***Aquarius paniculatus* (Micheli) Christenh & Byng. 1881**

Tabla 25

*Ficha técnica de *Aquarius paniculatus**

Nombre científico	<i>Aquarius paniculatus</i> (Micheli) Christenh & Byng
Nombre común	Cucharero, espada de las amazonas
Orden	Alismatales
Familia	Alismataceae
Tallos	De hasta 50 cm de alto y hasta 40 mm de ancho

Hojas	Plantas emergidas o sumergidas con peciolo triangulares (16-80 cm) y láminas lanceoladas (8-30 cm x 1-12 cm) sin marcas pelúcidas, base atenuada a obtusa y ápice agudo. Inflorescencia glabra, simple o ramificada, en escapos de hasta 200 cm con 4 a 11 verticilos (5 a 21 flores por verticilo), triangulares en la base y entre verticilos, erectos a decumbentes, con yemas vegetativas. Brácteas de 1 a 5.5 cm; pedicelos erectos de 1 a 4 cm
Flores	Flores de 3 a 5 cm de diámetro; sépalos de 6 mm de largo; pétalos de 23 mm de largo, blancos
Raíz	Hidrófitas arraigadas, emergidas. Rizomas cortos y gruesos
Distribución	Es una especie de planta acuática originaria del Amazonas
Crecimiento	Es una especie acuática con hojas sumergidas de 3 a 7 dm de largo y 1 dm de ancho
Época de floración	Todo el año
Notas	Especie común presente en localidades perturbadas por actividades antrópicas

Fuente: Lehtonen & Gordon, 2010; Royal Botanic Garden Kew, 2024g.



Figura 10. Flor de *Aquarius paniculatus* (izquierda). *Aquarius paniculatus* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

***Pontederia crassipes* Mart. 1883**

Tabla 26

Ficha técnica de Pontederia crassipes

Nombre científico	<i>Pontederia crassipes</i> Mart.
Nombre común	Cucharilla, jacinto, jacinto de agua, lirio acuático, lirio de agua, carolina, tamborcillo, violeta de agua, ninfa

Orden	Commelinales
Familia	<i>Pontederiaceae</i>
Tallos	Aunque es una planta reducida y estolonífera, diferentes individuos están unidos por un tallo horizontal subterráneo y alargado, un tipo de rizoma
Hojas	Estas plantas forman una roseta basal. Si están fijas al fondo, sus pecíolos son largos y cilíndricos, de 3 hasta los 60 cm. En cambio, si son flotantes, los pecíolos son cortos y asemejan pequeñas bolitas. Las hojas tienen láminas casi redondas, más anchas que largas (de 2.5 a 16 cm de largo y 3 a 12 cm de ancho), con la punta como cortada (truncada) y la base recta o un poquito en forma de corazón (algo cordada)
Flores	Con una longitud de hasta 5 cm, estas flores exhiben una tonalidad lila que puede variar entre el azul y el morado, presentándose rara vez en color blanco. Su superficie está cubierta de pequeños pelos, y su forma se caracteriza por una base tubulosa que se abre hacia el ápice en seis segmentos de tamaño desigual: tres externos y tres internos. Uno de los segmentos internos destaca por ser más ancho y portar una distintiva mancha amarilla. En su interior, se aprecian seis estambres cuyos filamentos están adornados con pelos glandulares, siendo tres de ellos notablemente más largos. Las anteras, de forma aflechada, complementan la flor con su color azul
Raíz	Fibrosas y coloreadas
Distribución	Se ha registrado en todo el territorio mexicano
Crecimiento	Planta acuática libremente flotadora o fija al sustrato, perenne
Época de floración	En México florece de agosto a octubre, pero en el Bajío todo el año. En el sur de Estados Unidos de abril a julio
Notas	Es común encontrarla en aguas dulces con poca corriente como arroyos, ríos, embalses y pantanos, donde se le identifica como una maleza acuática

Fuente: Guevara & Ramírez, 2015; Royal Botanic Garden Kew, 2024h.



Figura 11. Flor de *Pontederia crassipes* (izquierda). *Pontederia crassipes* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

***Enydra sessilifolia* (Ruiz & Pav.) Cabrera 1960**

Tabla 27

Ficha técnica de Enydra sessilifolia

Nombre científico	<i>Enydra sessilifolia</i> (Ruiz & Pav.) Cabrera
Nombre común	En Tabasco es considerada una maleza acuática
Orden	Asterales
Familia	Asteraceae
Tallos	
Hojas	Compuestas, simples y dentadas y crecen entre los 3 a 8 cm
Flores	
Raíz	
Distribución	Se representa en regiones semiáridas, tropicales y subtropicales. Esta especie es aceptada, y su área de distribución nativa es México (Tabasco), Galápagos, Ecuador y Perú
Crecimiento	Usualmente a lo largo de las orillas de estanques o lagos, o en áreas pantanosas poco profundas
Época de floración	
Notas	Es una vegetación acuática que crece usualmente a lo largo de las orillas de estanques o lagos, o en áreas pantanosas poco profundas. Su tipo de crecimiento es indeterminado, significa que sus vástagos pueden crecer ilimitadamente

Fuente: Gardner, G., 1976, citado en www.kew.org, 2022; Royal Botanic Garden Kew, 2024i.



Figura 12. *Enydra sessilifolia* (izquierda). *Enydra sessilifolia* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

***Heliconia latispatha* Benth 1846**

Tabla 28

Ficha técnica de Heliconia latispatha

Nombre científico	<i>Heliconia latispatha</i> Benth
Nombre común	Ave de paraíso, caliguate
Orden	Zingiberales
Familia	<i>Heliconiaceae</i>
Tallos	Alcanza 2 a 3 m de alto
Hojas	Largas y puntiagudas, hasta 46 cm de largo, inflorescencia erecta
Flores	Nacen en diferentes direcciones con brácteas delgadas naranja a rojo y amarillas a verde. Pedúnculo de 10-60 cm de largo, glabro, brácteas cincinales en espiral, 8-17 por inflorescencia, la bráctea media 12-20 cm de largo y 5-7 cm de ancho en la base, ápice largamente acuminado, márgenes rectos, la superficie exterior glabra, amarilla, verde a anaranjada a roja
Raíz	Se caracterizan por sus miembros herbáceos perennes
Distribución	Desde el sur de México hasta Centroamérica
Crecimiento	Crece hasta 2 metros de alto
Época de floración	Se da en los meses de enero, febrero, mayo, junio, agosto y octubre
Notas	Su uso es ampliamente cultivado como ornamental

Fuentes: CONABIO-enciclovida, 2024; Royal Botanic Garden Kew, 2024j.



Figura 13. Flor de *Heliconia latispatha* (izquierda). *Heliconia latispatha* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

***Paspalum paniculatum* L. 1759.**

Tabla 29

Ficha técnica de Paspalum paniculatum

Nombre científico	<i>Paspalum paniculatum</i> L.
Nombre común	En Costa Rica se le conoce como zacatón
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Tallos	Simple y de porte erecto, esta estructura se distingue por sus nudos y entrenudos glabros
Hojas	Presenta vainas redondeadas o comprimidas, que son glabras pero tienen cilios. La lígula es pequeña, de 0.3 a 1 mm. Las láminas foliares son lineares y aplanadas, con dimensiones de 30 a 75 cm de largo y 10 a 30 mm de ancho. Estas láminas pueden ser glabras o puberulentas, y distintivamente poseen una hilera de tricomas en la cara abaxial, cerca de la lígula
Flores	Espiguilla de 2.6-3.2 x 1.8-2.4 mm, obovada, obtusa, puberulenta, pareada en 4 filas; gluma inferior ausente; gluma superior y lema inferior = longitud espiguilla, 5-nervias, puberulentas; flósculo superior = longitud espiguilla, endurecido, papiloso - estriado, pardo, glabro; anteras de 1.3-1.7 mm
Raíz	
Distribución	En México: Aguascalientes, Baja California, Chiapas, Colima, Jalisco, Michoacán, Morelia, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Sinaloa, Sonora, Tabasco y Veracruz
Crecimiento	Cuenta con un crecimiento como planta cespitosa
Época de floración	Periodo de julio a septiembre
Notas	Es encontrado en México y en las Indias Occidentales hasta Argentina. Ahora está establecida en Mississippi y el sur de Florida y crece en áreas perturbadas

Fuente: CICY, 2022; Royal Botanic Garden Kew, 2024k.



Figura 14. *Paspalum paniculatum* (izquierda). *Paspalum paniculatum* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

***Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. 1841**

Tabla 30

Ficha técnica de Phragmites australis

Nombre científico	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.
Nombre común	Carricillo, carrizo, caña de río, cañita, cañiza, senill, sisca
Orden	Poales
Familia	<i>Poaceae</i>
Tallos	Tallo erguido muy alto y generalmente no está ramificado hasta 4 m de longitud aproximadamente
Hojas	Hojas de 50 x 5 cm, verdes grisáceas, aplanadas, se adelgazan progresivamente hacia el ápice; vainas lisas, glabras, cubriendo los nudos y la lígula formada por una línea de pelos
Flores	Las flores se disponen en grupos o inflorescencias muy densas a modo de panícula (espiga o penacho, hasta 50 cm de longitud) con forma ovoide. La espiga contiene de 2 a 10 flores. Las semillas son muy pequeñas y de color negro
Raíz	Tiene rizoma rastrero con capacidad para crecer en la superficie buscando agua. Presenta 2 cm de diámetro, con gran inflorescencia al final del tallo
Distribución	En México se distribuye principalmente en Chihuahua, Jalisco y Michoacán y en pocas zonas del país en otros estados
Crecimiento	Planta herbácea perenne muy parecida a una caña

Época de floración	Las flores, que brotan en verano y otoño
Notas	Suele habitar zonas húmedas a orillas de cursos de agua y lagunas. En ríos se encuentran fundamentalmente en los tramos más bajos, donde la velocidad del curso de agua le permite enraizar

Fuente: Lansdown, R.V.,2017; Royal Botanic Garden Kew, 2024l.



Figura 15. Phragmites australis en área silvestre (izquierda). Phragmites australis establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

***Pontederia sagittata* C. Presl 1827**

Tabla 31

Ficha técnica de Pontederia sagittata

Nombre científico	<i>Pontederia sagittata</i> C. Presl
Nombre común	Junco, cola de pato, cuchara de pato, pata de vaca, reina de agua
Orden	Commelinales
Familia	<i>Pontederiaceae</i>
Tallos	Tallos erectos, rizomatos, hasta 1.5 m de alto
Hojas	Hojas simples, basales, pecioladas; peciolo no inflado de 1 a 1.5 m de largo; laminadas obovadas a lanceoladas, de 9 a 40 cm de largo y de 3 a 16 cm de ancho, base sagitada, ápice agudo a obtuso, margen entero; inflorescencia a pseudoespiga, de 5 a 17 cm de largo, con más de 50 flores, dispuestas en grupitos, pedúnculo piloso, de 4 a 10 cm de largo; lámina de la espata inferior semejante en forma y tamaño a lámina de las hojas no floríferas, espata superior infundibuliforme de 4 a 9 cm de largo
Flores	Flores bisexuales, zigomorfas; perianto de color lila o rara vez blanco

Raíz	Hierba acuática perenne, flotantes o rastreros, estoloníferos o rizomatosos
Distribución	Se distribuye en las partes bajas de la región tropical del continente americano, desde el sur de México hasta Panamá
Crecimiento	Hierbas perennes, enraizadas
Época de floración	Todo el año
Notas	Habita en selvas inundables, parte trasera del manglar, bordes de laguna, ríos, arroyos, canales y pantanos

Fuente: CONABIO, 2012; Lot, Olvera, Flores y Díaz, 2015; Royal Botanic Garden Kew, 2024m.



Figura 16. Flor de *Pontederia sagittata* (izquierda). *Pontederia sagittata* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

***Sagittaria lancifolia* L. 1753**

Tabla 32

Ficha técnica de Sagittaria lancifolia

Nombre científico	<i>Sagittaria lancifolia</i> L.
Nombre común	Cola de pato, hoja de papa de agua, flecha de agua, saeta de agua
Orden	Alismatales
Familia	<i>Alismataceae</i>
Tallos	Son plantas herbáceas perennes que crecen en el agua hasta 50 cm de profundidad y por encima de la superficie del agua pueden llegar a medir 45 cm de alto

Hojas	Las hojas tienen forma de flecha, la lámina de la hoja puede llegar a ser 15-25 cm largo y de 10-22 de ancho
Flores	Las flores son de forma circulares, en 3 pares de pétalos que pueden ser de color blanco
Raíz	Rizomas, estolones y tubérculos
Distribución	Desde Norteamérica, Centroamérica y Sudamérica. En México está presente en la mayoría de los estados
Crecimiento	Hábitats acuáticos y palustres predominan en pantanos o ciénegas de agua dulce y de poca corriente
Época de floración	Todo el año
Notas	En algunas partes se puede consumir el tubérculo y se conoce como papa de agua

Fuente: CONABIO, 2012; Royal Botanic Garden Kew, 2024n.



Figura 17. Flor de *Sagittaria lancifolia* (izquierda). *Sagittaria lancifolia* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

***Sagittaria latifolia* Willd. 1805**

Tabla 33

Ficha técnica de Sagittaria latifolia

Nombre científico	<i>Sagittaria latifolia</i> Willd
Nombre común	Bayoneta, hoja de flecha, cola de golondrina y tul
Orden	Alismatales
Familia	Alismataceae
Tallos	0.5 a 1.5 m de altura

Hojas	Con láminas ovado-trianguulares de 12 a 35 cm de largo y 3 a 22 cm de ancho, estas hojas son simples y se sostienen por peciolos.
Flores	3 flores por verticilo, brácteas glabras, de 0.3 a 1 cm de largo; flores generalmente unisexuales pediceladas, con pétalos blancos, casi del doble del largo de los sépalos.
Raíz	Rizoma erecto
Distribución	Tabasco, Campeche, Michoacán y Jalisco
Crecimiento	Hierbas perennes enraizadas emergentes
Época de floración	Todo el año
Notas	A pesar de compartir su distribución geográfica con <i>Sagittaria longiloba</i> y la posibilidad de confusión, esta especie se diferencia claramente por la longitud relativa de los lóbulos basales de sus hojas. Estos lóbulos son de 1.5 a 2 veces más largos que el ápice foliar, una característica que la distingue de <i>Sagittaria latifolia</i> , en la cual el ápice es tan largo como los lóbulos basales

Fuente: Novelo, 2006; Lot, Olvera, Flores y Díaz, 2015; Royal Botanic Garden Kew, 2024o.



Figura 18. Flor de *Sagittaria latifolia* (izquierda). *Sagittaria latifolia* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

***Thalia geniculata* L. 1753**

Tabla 34

Ficha técnica de Thalia geniculata

Nombre científico	<i>Thalia geniculata</i> L.
Nombre común	Hoja de laguna, popal, popalillo

Orden	Zingiberales
Familia	Marantaceae
Tallos	Con una altura que van de 1 a 4 metros, estas plantas son erectas y poseen rizomas
Hojas	Las hojas se presentan en una roseta basal y tienen pecíolos en las hojas de la base. La lámina es glabra (sin pelos) y de consistencia coriácea (como cuero), con dimensiones de 19 a 63 cm de largo y 4 a 26 cm de ancho
Flores	Presentan una corola con un tubo muy corto y un cáliz con sépalos pequeños, translúcidos y membranosos. Sus frutos son aquenios que no se abren solos al madurar y contienen semillas pequeñas de color pardo, gris o negro con manchas
Raíz	Con rizoma
Distribución	Gran parte de México y principalmente en el sureste
Crecimiento	Crece desde el nivel del mar hasta los 300 metros de altitud, cubriendo grandes extensiones de plantas herbáceas enraizadas y asociándose comúnmente con géneros como <i>Heliconia</i> , <i>Sagittaria</i> , <i>Typha</i> y <i>Cyperus</i>
Época de floración	Todo el año
Notas	Se encuentra en manglares, ciénagas y lagunas de clima cálido-húmedo, las hojas se emplean para envolver tamales y como abono

Fuente: CONABIO, 2012; Royal Botanic Garden Kew, 2024p.



Figura 19. Flor de *Thalia geniculata* (izquierda). *Thalia geniculata* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).

Fuente: elaboración propia.

***Typha domingensis* Pers. 1807**

Tabla 35

Ficha técnica de Typha domingensis

Nombre científico	<i>Typha dominguensis</i> Pers.
Nombre común	Espadaño, tule
Orden	Poales
Familia	<i>Typhaceae</i>
Tallos	Perenne de hasta 2.5 m de altura
Hojas	Iguala o excede la altura de las espigas, con vainas atenuada hacia la lámina, generalmente asimétricas, epidermis de la superficie ventral con glándulas mucilaginosas oscuras, de 1.5 m de largo y de 0.8 a 1.3 cm de ancho, envés ligeramente convexo cerca de la vaina y plano hacia el ápice, que es agudo
Flores	Las espigas masculinas, de 42 cm de largo y 1.5 cm de ancho, se encuentran separadas de las femeninas por un espacio de 0.7 a 5 cm. Sus flores poseen bractéolas filiformes a espatuladas, que pueden ser simples o ramificadas con segmentos largos, coloreadas con puntos morenos en el ápice y de 2.5 a 3.5 mm de largo. Los estambres, en número de 2 a 4, están total o parcialmente soldados, con filamentos de 1 a 2.5 mm y anteras de 2 a 3 mm de largo por 0.15 a 0.2 mm de ancho. El conectivo de las anteras es generalmente obtuso, a veces con una punta corta y aguda, y el polen se organiza en mónadas. Por otro lado, las espigas femeninas alcanzan hasta 48 cm de largo y 2 cm de diámetro. Sus flores presentan bractéolas largas y delgadas, acuminadas en el ápice, más largas que los pelos del ginóforo y de color moreno claro en el ápice, con una longitud de 3 a 5 mm. Los pelos del ginóforo son ligeramente coloreados en la punta y más cortos que los estigmas. El ovario es fusiforme, con un estilo de 1 a 2 mm de largo y un estigma largo y delgado de 0.5 a 1.5 mm de longitud
Raíz	Hierba acuática, enraizada, emergente
Distribución	Por todo México
Crecimiento	Hierba acuática, enraizada, emergente
Época de floración	Florece en primavera y fructifica hasta mediados de otoño
Notas	Puede afectar canales de riego y estanques de agua. Se utiliza en artesanías (cestos, petates, etc.)

Fuente: CONABIO, 2012; Lot et al., 2015; Royal Botanic Garden Kew, 2024q.



Figura 20. *Typha domingensis* (izquierda). *Typha domingensis* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua (derecha).
Fuente: elaboración propia.

***Xanthosoma sagittifolium* (L.) Schott 1832**

Tabla 36

Ficha técnica de Xanthosoma sagittifolium

Nombre científico	<i>Xanthosoma sagittifolium</i> (L.) Schott
Nombre común	Oreja de elefante, aro, bole, macabo, ocumo, rascadera, taioba, yaro, etc. En México se le conoce como macal
Orden	Alismatales
Familia	Araceae
Tallos	Tallo principal subterráneo
Hojas	Estas hojas, que pueden llegar a medir 1.3 metros de largo, son grandes y de forma triangular sagitada. Se caracterizan por tener tres nervios principales, una superficie superior (haz) de color verde brillante y una inferior (envés) verde claro. Sus largos pecíolos son acanalados
Flores	Presentan una disposición particular de sus flores: las femeninas se ordenan en polígonos, mientras que las masculinas, ubicadas en la parte superior del espádice, son estériles. Los espádices raramente son fértiles, dando lugar a frutos tipo baya, pequeños y ovoides, que al madurar adquieren un color verde y son carnosos. Es importante considerar que, a pesar de su uso ornamental en interiores y exteriores, algunas personas pueden experimentar toxicidad al consumir cualquier parte de esta planta

Raíz	Esta planta herbácea perenne se caracteriza por crecer a partir de un cormo o de un tallo principal subterráneo que adopta la forma de un rizoma
Distribución	Originaria de México a Brasil, es una de las plantas cultivadas más antiguas, con su cultivo actual concentrado en el Caribe
Crecimiento	Su hábitat natural se encuentra en áreas tropicales (0 a 1,900 metros sobre el nivel del mar), donde crece bajo el dosel del bosque, es decir, bajo la cubierta de las copas de los árboles
Época de floración	Florece todo el año. Planta herbácea perenne con un cormo o rizoma subterráneo principal, del que brotan tallos secundarios engrosados (cormelos)
Notas	El fruto de esta planta se aprovecha en una gran variedad de platillos, como sopas, guisos, asados, fritos y purés, e incluso en bebidas refrescantes, dulces y panes (utilizando la harina). Las hojas jóvenes también son comestibles, ya sea como verduras o en sopas. Por último, los cormos tienen usos tanto en la alimentación humana como animal

Fuente: Poot et al., 2002; Royal Botanic Garden Kew, 2024r.



Figura 21. *Xanthosoma sagittifolium* establecida en unidades experimentales del Laboratorio de Tecnología del Agua.

Fuente: García & Comparán, 2018.

Capítulo 4

Sitios de colecta de las especies estudiadas

Las figuras 22 a 41 muestran los sitios donde fueron extraídas las especies estudiadas y reportadas en este trabajo. Estos se localizan en los municipios de Centro y Centla en Tabasco; en su gran mayoría se trata de áreas rurales con reservorios de estas especies y cada vez más son ocupados y rellenados para el establecimiento de centros comerciales o proyectos urbanísticos. En cada una de las figuras se reporta el área aproximada donde se establece la especie y que es un área natural.



Figura 22. *Thalia geniculata*. Ranchería Emiliano Zapata km 3, Villahermosa, Tabasco. Coordenadas 499612.75 m E, 1988344.89 m N. Cuenta con un área de 126,026 m².

Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 23. *Paspalum paniculatum*. Ranchería Buena Vista segunda sección km 2, Villahermosa, Tabasco. Coordenadas 497801.84 m E, 1985451.88 m N. Cuenta con un área de 51,195 m².

Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 24. *Paspalum paniculatum*. Ranchería Buena Vista segunda sección, Villahermosa, Tabasco. Coordenadas 505310.52 m E, 1988569.55 m N. Cuenta con un área de 1,640 m².

Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 25. *Pontederia sagittata*. Km 2.5 de la carretera Torno Largo, sector Armenia, Colonia Gaviotas Sur. Coordenadas 510204.45 m E, 1987277.93 m N. Cuenta con un área de 302 m².

Fuente: Google Earth Pro, 2021.

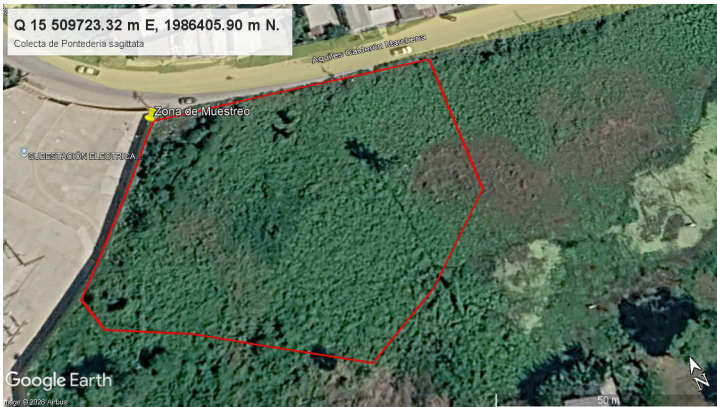


Figura 26. *Pontederia sagittata*. Municipio de Centro, Tabasco. Coordenadas 509723.32 m E, 1986405.90 m N. Cuenta con un área de 5,466 m².

Fuente: Google Earth Pro, 2021.

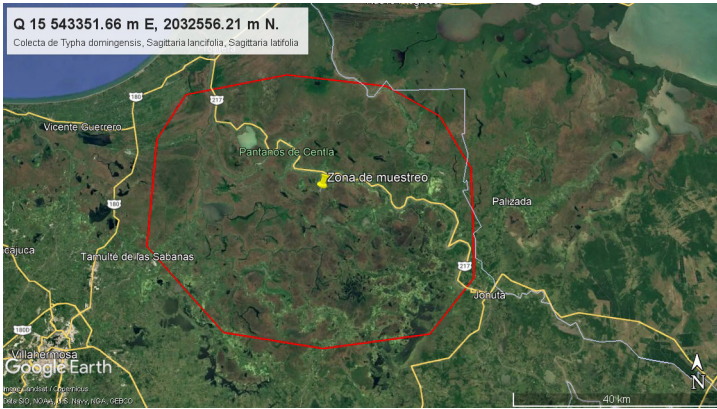


Figura 29. *Typha domingensis*, *Sagittaria lancifolia*, *Sagittaria latifolia*. Pantanos de Centla, Tabasco. Coordenadas 543351.66 m E, 2032556.21 m N. Cuenta con un área de 1,300,689,767 m².
Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 30. *Sagittaria lancifolia*. Canal de desagüe del Parque Logístico Industrial de Tabasco. Villahermosa, Tabasco. Coordenadas 501243.00 m E, 1990032.00 m N. Cuenta con un área de 8,638 m².
Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 31. *Sagittaria latifolia*. Colonia Carrizal, en la Avenida Ruiz Cortines, Villahermosa, Tabasco. Coordenadas 503819.28 m E, 1988751.82 m N. Cuenta con un área de 23,832 m².
Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 32. *Phragmites australis*. Villahermosa, Tabasco, Colonia Gaviotas Sur. Coordenadas 509879.00 m E, 1986374.61 m N. Cuenta con un área de 7,392 m².
Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 33. *Aquarius paniculatus*. Villahermosa, Tabasco. Coordenadas 510312.39 m E, 1987185.91 m N. Cuenta con un área de 1,942 m².
Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 34. *Pontederia crassipes*, *Paspalum paniculatum*, *Cyperus articulatus*, *Typha domingensis*, *Cyperus odoratus*, *Heliconia latispatha*, *Pontederia sagittata*, *Thalia geniculata*, *Sagittaria lancifolia*, *Canna indica*. Zonas aledañas al Laboratorio de Tecnología del Agua en la División Académica de Ciencias Biológicas, que se encuentra ubicada en la Carretera Villahermosa a Cárdenas km 0.5. Coordenadas 502744.00 m E, 1989200.00 m N. Cuenta con área de 23,441 m².
Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 35. *Colocasia esculenta*, *Xanthosoma sagittifolium*. Av. Ruiz Cortines, colonia Carrizal, Villahermosa, Tabasco. Coordenadas 504167.89 m E, 1988705.99 m N. Cuenta con un área de 14,504 m².
Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 36. *Acrostichum danaeifolium*, *Typha domingensis*. Comunidad el Cedro, Nacajuca Tabasco. Coordenadas 506158.03 m E, 1994951.33 m N. Cuenta con un área de 19,447 m².
Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 37. *Acrostichum danaeifolium*, *Typha domingensis*. Colonia Casa Blanca, sobre la carretera federal, frente al Parquesote en Centro, Tabasco. Coordenadas 510310.61 m E, 1991760.26 m N. Cuenta con un área de 200 m².
Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 38. *Acrostichum danaeifolium*, *Typha domingensis*. Ranchería Aztlanes segunda sección, Centro, Tabasco. Coordenadas 526873.54 m E, 1999810.43 m N. Cuenta con un área de 36,322 m².
Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 39. *Cladium jamaicense*. Carretera Villahermosa-Frontera km 40.5, Centla, Tabasco. Coordenadas 521264.00 m E, 2024548.00 m N. Cuenta con un área de 16,566 m².

Fuente: Google Earth Pro, 2021.

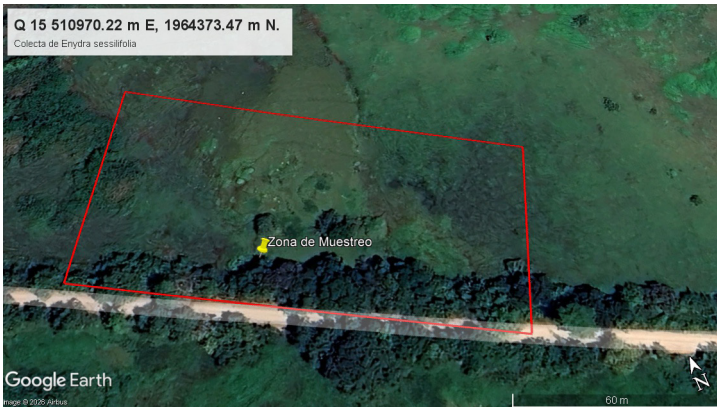


Figura 40. *Enydra sessilifolia*. Ranchería Río Teapa, Jalapa, Tabasco (Campo los Agaves). Coordenadas 510970.22 m E, 1964373.47 m N. Cuenta con un área de 8,380 m².

Fuente: Google Earth Pro, 2021.



Figura 41. *Canna indica*. Colonia Sabina, Villahermosa, Tabasco, prolongación de la Av. Gregorio Méndez Magaña. Coordenadas 503925.00 m E, 1986207.00 m N. Cuenta con un área de 647 m².
Fuente: Google Earth Pro, 2021.

Capítulo 5

Colecta, manejo y transporte

La colecta de las especies generalmente se realiza en sitios parcial o totalmente inundados, en los cuales el tirante de agua puede variar de 0.5 a 1.5 m. Para ello, el personal activo en campo debe contar con equipo de seguridad, como botas de hule, camisa de manga larga y pantalón de algodón, chaleco salvavidas, guantes de carnaza, machete, pala recta, entre otros materiales. A continuación, se describen los pasos generales para la colecta, manejo y transporte de las especies.

1. Una vez en el sitio de colecta, para mayor facilidad y seguridad en el lugar de extracción se disponen tablas de triplay para colocarse sobre ellas y evitar hundimientos sobre el área.
2. Para realizar la extracción de las plantas, se busca que estas sean de preferencia juveniles, las cuales son extraídas excavando alrededor de esta con una pala recta, de manera tal que se obtenga la planta con el material de suelo natural que la soporta.
3. Cuando las plantas están fuera del agua, se retira el exceso de suelo y se colocan en recipientes de plástico (tinas) con capacidad de 50 litros, realizando la colecta del número de plantas requeridas según el cálculo previo para el área de sembrado en el humedal, siendo superficial de 1.2 m de ancho por 2.5 m de largo.
4. Una vez colocadas las plantas en el recipiente, a este se le colocan de un 30 a un 50 % de volumen de agua del sitio de muestreo o humedal donde se extrajo la planta para evitar que se deshidraten; del mismo modo, se le

coloca una tela para cubrirlas del golpe del viento en el transporte.

5. Se buscan sitios a una distancia de no más de dos horas de donde se establecerán, para evitar que las plantas sufran estrés.
6. Una vez en el sitio donde establecerán en los humedales, se deben revisar y lavar las raíces de las plantas y des- echar plantas que presenten enfermedades como hongos, o que puedan portar insectos que lleguen a afectarlas por herviborías en el proceso de adaptación.
7. Cada uno de los individuos debe caracterizarse morfo- lógicamente antes de ser sembrados. Las características típicas a determinar son peso (húmedo y seco), altura de la planta (longitud de tallo y longitud de hojas), cantidad de hojas (ancho y largo), cantidad de tallos, diámetro del tallo, número de inflorescencias (longitud de las flores y número de brácteas) y la cantidad de hijos nuevos. Esto es para conocer las condiciones iniciales de las especies en su medio natural.
8. Posteriormente las plantas deben ser adaptadas al agua residual, por lo que es recomendable dejarlas con agua residual al 50 % con agua de una fuente de abastecimien- to no potable (50 %) para que se adapte a las condiciones durante un periodo de 3 a 5 días.
9. En el caso de que las plantas no sean juveniles, se reco- mienda realizar una poda para estandarizar el crecimien- to de las especies, cortar las hojas y dejar alrededor de 0.3 a 0.5 m (dependiendo del tipo de humedal a sembrar) para las especies como *Sagittaria lancifolia*, *Sagitta- ria latifolia*, *Pontederia sagittata*, *Thalia geniculata* y *Typha domingensis*.
10. En el caso de las especies ciperáceas o helechos se reco- mienda sembrar toda la planta para que esta se repro- duzca directamente en el humedal, pues cuando se han cortado separando las raíces pueden llegar a morir.

Las figuras 42 a 45 presentan colectas de algunas especies que fueron estudiadas en el Laboratorio de Tecnología del Agua de 2013 a 2021.



Figura 42. Colecta de *Cladium jamaicense*.
Fuente: elaboración propia.



Figura 43. Colecta de *Typha domingensis*.
Fuente: elaboración propia.



Figura 44. Colecta de *Aquarius paniculatus*.
Fuente: elaboración propia.



Figura 45. Colecta de *Sagittaria latifolia*.
Fuente: elaboración propia.

Capítulo 6

Siembra y estabilización de los humedales

Como parte de la preparación para la siembra de las plantas remediadoras es necesario preparar adecuadamente los humedales donde se establecerán. Es importante aclarar que en el caso de los humedales establecidos en la planta piloto de HA y el sistema de tratamiento de la DACBiol fueron construidos a partir de placas de acero al carbón y de concreto armado.

Planta de tratamiento

El sistema de tratamiento de aguas residuales de la División tiene como tratamientos secundarios HA en serie integrados con dos trenes con tres reactores idénticos. El proceso inicia con la captación de un cárcamo (1.2 x 1.2 x 2.3 m) al que llegan las aguas residuales de las áreas sanitarias y cafeterías, posteriormente por bombeo ingresa a un tanque séptico (5 x 4 x 1.8 m), luego el agua se divide en dos trenes ingresando a un HAFS y posteriormente a dos HAFL; estos HA constan de 8.3 m de largo, 2.5 m de ancho y 0.5 m de tirante para cada reactor (López et al., 2018). A continuación, presentamos el corte de las unidades de tratamiento de humedales (figuras 46 y 47).

El agua residual, una vez en el tanque séptico, se distribuye por gravedad mediante tubería con accesorios de PVC de 3", hasta dos registros de distribución de 0.1 m³ alimentado a los HA en serie. En los HA la recolección de la vegetación muerta (materia orgánica) en el interior de los reactores es constante con el fin de evitar la liberación de sustancias en el efluente, lo que involucra la revisión diaria de la tubería, las válvulas y las conexiones asegurando un

buen estado físico para evitar obstrucciones al paso del agua y se verifica el flujo del influente adecuado (flujo laminar). También se verifica si existe la presencia de alguna plaga y se fumiga en caso de ser necesario. El material de soporte utilizado en los trenes de tratamientos de HA es grava de río (canto redondo) con las características mostradas en la tabla 37.

Tabla 37

Valores promedio \pm DE de las características del material de soporte utilizado (N=10).

Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad real (kg/m ³)	Porosidad de lecho (%)	Diámetro de partícula (pulgadas)
1460 \pm 52.21	2438 \pm 37.11	53 \pm 0.1	0.76 \pm 0.26

Fuente: López et al., 2018.

Antes de colocar el medio de soporte (sustrato) dentro de las unidades, debe pasar por un proceso de lavado y secado para retirar cualquier impureza. El proceso de lavado se lleva a cabo seccionando el sustrato en pequeñas pilas, las cuales son depositadas en tinas o recipientes de plástico con una capacidad de 50 litros, en donde las impurezas de menor densidad se remueven con un colador y posteriormente el medio de soporte es extendido sobre una lona donde se deja secar con la luz solar.

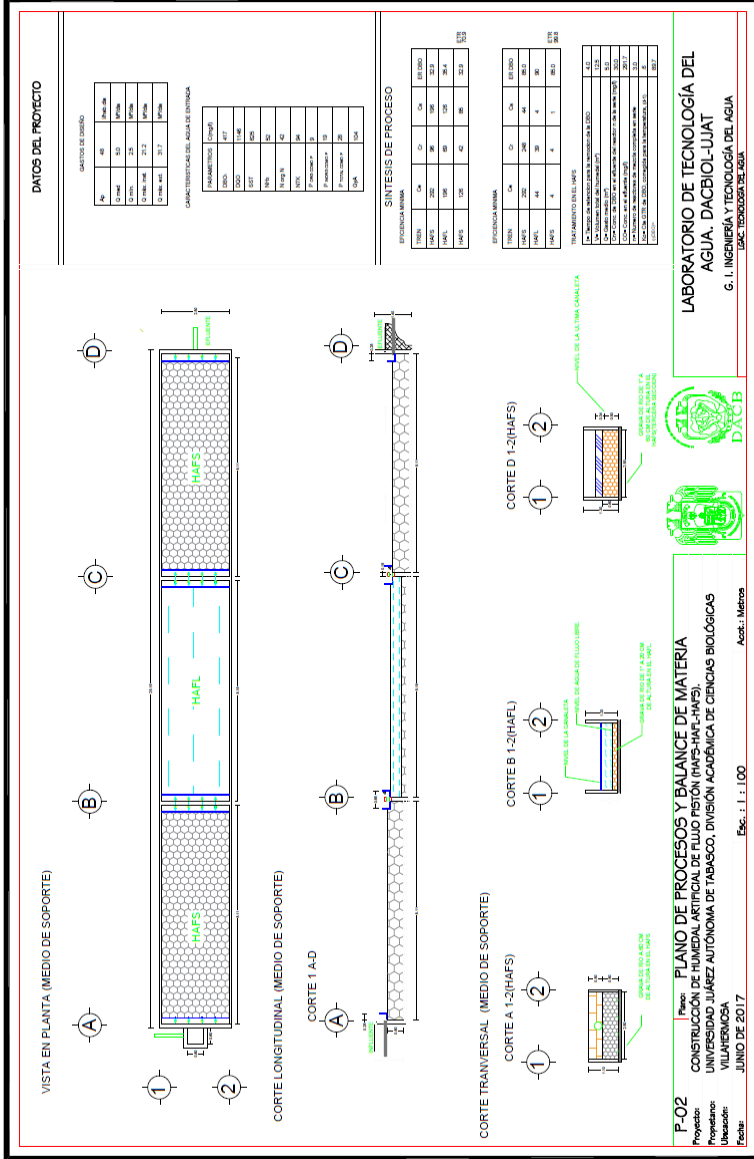


Figura 46. Plano hidráulico funcional de los HA en series.
Fuente: López et al., 2018.

Unidades experimentales

Las unidades experimentales fueron diseñadas por López et al. (2014). Son de flujo subsuperficial y libre con las dimensiones de 2.5 m de largo x 1.2 m de ancho x 1 m de alto con una superficie aproximada de 3 m² y un volumen total de 3 m³. Para evitar la corrosión se les aplicó un esmalte alquidálico anticorrosivo (primario 1) color blanco en la parte externa. En la parte interna se aplicó un impermeabilizante (top tapagoterías) que es una pasta acrílica a base de resinas y cargas minerales de consistencia pastosa, con 1 cm de espesor.

Posteriormente, se aplicó una capa de impermeabilizante elastomérico, complementado con capas de una fibra textil (pellón) cortándose de una longitud de 4 metros para reforzar la parte interna. Este procedimiento se repitió tres veces dentro del reactor para evitar posibles filtraciones. Posterior a la impermeabilización, se procedió a la colocación de la tubería hidráulica necesaria para distribuir el agua del cárcamo hasta el tanque de control, para lo cual se realizó una serie de conexiones con PVC hidráulico de 1 pulgada de diámetro, desde la bomba en el cárcamo hasta los humedales.

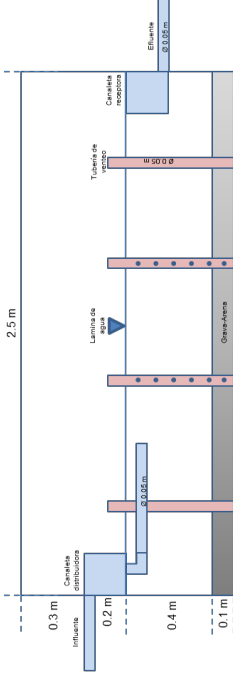
Dentro de las unidades experimentales se instalaron nueve puntos de muestreo con tubos de PVC de 60 cm de largo, perforados cada 6 cm con cuatro agujeros, distribuyéndolos dentro del reactor (tres en la entrada del reactor, tres en la parte media y tres en la salida del reactor), para así poder evaluar la distribución del contaminante dentro del humedal. Una vez instalada la tubería hidráulica necesaria, se procedió a colocar el sustrato, el cual fue grava de ¾ de pulgada a 0.5 m como medio de soporte para los HAFS y de 0.1 a 0.2 para los HAFL. Este material funcionará como medio filtrante y soporte para las raíces de las especies que se evalúen (figuras 48 y 49).

Como parte del seguimiento de la estilización es necesario caracterizar el agua a la salida la cisterna, observando comportamiento hidráulico, la temperatura, carga y gasto. Para ello se determinan parámetros de control como la temperatura (SM 2550), turbiedad (SM 2130 B), color (APHA 2120), oxígeno disuelto (OD, SM 4500 OG), potencial de hidrógeno (pH, SM 9040 B), conductividad eléctrica (CE, SM 1250 B) y sólidos disueltos totales (SDT, SM 2540). Para determinar la temperatura, CE, SDT y pH se utiliza el equipo multiparamétrico HANNA Waterproof Tester modelo HI 98129; para el OD el HANNA Dissolved Oxygen modelo HI 98193; para

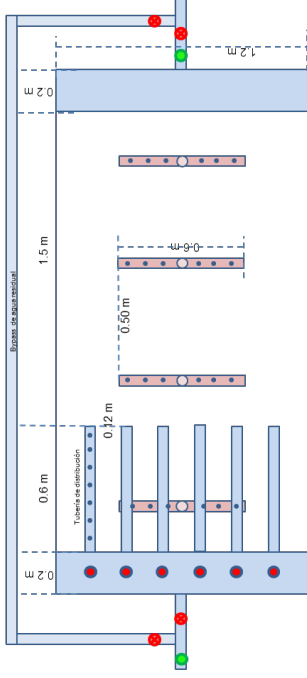
el color el fotómetro LaMotte SMART3 y para la turbidez un turbidímetro HANNA HI 98703. En la caracterización del agua de los parámetros normados se recomienda los procedimientos de las normas NMX: Temperatura (NMX-AA-007-SCFI-2000), pH (NMX-AA-008-SCFI-2001), DBO (NMX-AA-028-SCFI-2001), DQO (NMX-AA-030-SCFI-2001), SST (NMX-AA-034-SCFI-2001), con el fin de evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes para las descargas de aguas y verificar el cumplimiento de los LMP como lo refiere la NOM-001-SEMARNAT-2021. Esta etapa debe realizarse en laboratorio, llevando el control de proceso en todo momento.

Infraestructura

- Cuerpo externo de lamina de acero al carbon cable 10, de Recubrimiento Syryl 14 primario epoxico catalizado, Syryl 100 epoxico catalizado con poliamida y Syryl 2001 recubrimiento de
- Canaliza de distribucion de 0.2m x 0.2m x 1.2 m.
- Canaliza receptora de 0.2m x 0.2m x 1.2 m.
- Tuberia de vertido de PVC hidraulico de 2" de Ø, 10 m.L
- Cuerpo de PVC hidraulico de 2" de Ø, 8 Pz.
- Oficina en tubo de vertido de 1", de Ø, 6 horizontal, 6 vertical.
- Oficina en tubo de distribucion de 1", de Ø, 7 horizontal, 7 vertical.
- Válvula reguladora de flujo de PVC hidraulico de 2" de Ø, 4 Pz.
- Graa de 1/2" de Ø, 0.3 m³.



Corte Longitudinal. Escala 1:20



Vista en planta. Escala 1:20

Criterios de Diseño	
Parámetro	Valor
Q _{max}	0.20 m ³ /día
Q _{min}	0 m ³ /día
Q _{med}	0 m ³ /día
COV	40.00 g/hab/día
F _{max}	0.17 Kg/día
T _{max}	7.78 día
C _{pe}	833.33 mg/l
C _{de}	833.33 mg/l
ER _{max}	92.57 %

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
 División Académica de Ciencias Biológicas
 Grupo Académico Evaluación y Herramienta Ambiental
 LOM: "Iniciativa Carlos de Caramuzar"

Proyecto Programa de Fomento a la Investigación
 Clave UJAT-2012-IA-02

Evaluación de Humedales Antifúngicos Experimentales de Flujo Libre y Subsuperficial Bajo Diferentes Condiciones de Operación y Vegetación.
 Humedal Artificial Experimental de Flujo Libre

Diseño y Construcción:
 Responsable: Dr. Gaspar López Ocaña
 Colaboradores: M. en C. Carlos Alvarado Torres, Blazquez, Dr. Raúl Germán Bañeza Meguals, Dr. Juan Manuel Ramírez Batallas, M. en I. Juan José Guzmán Vidal

Villahermosa, Tabasco: Abril del 2013

Figura 48. Plano estructural del HA de flujo libre. Fuente: López et al., 2014.

Siembra de especies

Para la siembra de plantas en las unidades experimentales es necesario calcular en primera instancia el número de plantas con base en la ecuación 5, donde se estima el número de plantas necesarias por metro cuadrado. Típicamente para especies de tamaño regular con *Pontederia sagittata*, *Sagittaria lancifolia*, *Sagittaria latifolia*, *E. paniculatus*, suele establecerse un total de 25 ejemplares de cada especie en cada unidad experimental (HAFL y HAFS) con un arreglo de “tresbolillo” (figura 50). Para el caso de especies de menor densidad o tamaño como *Phragmites australis*, *Cyperus articulatus* o *Heliconia latispatha* se estiman hasta 40 individuos para las unidades experimentales (1.2 x 2.5 m). El diseño de siembra en tresbolillo (Pazmiño & Jaramillo, 2019), aplicado a las unidades experimentales de la DACBiol-UJAT se basa en la siguiente ecuación:

$$n = \frac{A}{D^2 * \cos 30} \quad (\text{Ec } 5)$$

Donde: n = número de plantas, A = área del campo (m²), D = distancia entre planta y planta (m), coseno de 30° = es un coeficiente que siempre es invariable, cualquiera que sea el marco.

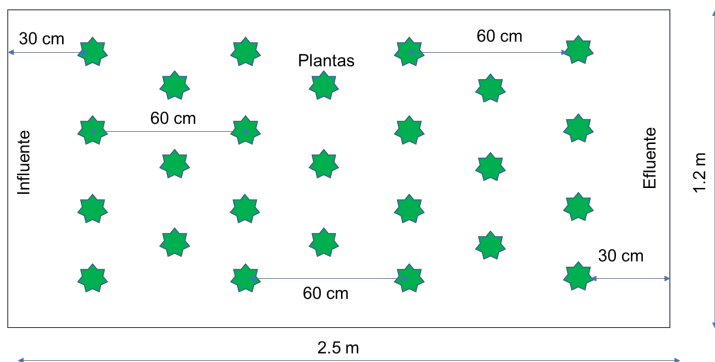


Figura 50. Sembrado de las especies en HAFS y HAFL con método tresbolillo.
Fuente: elaboración propia.

Previo al sembrado de las plantas y que se haya realizado la caracterización inicial de la morfología de las especies se debe realizar la poda de los ejemplares para que se establezca un crecimiento homogéneo y se aprecie más fácilmente la estabilización y crecimiento de estas. Para el caso de la siembra en HAFS, las plantas se establecen a 25 cm del nivel de operación (0.5 m) y el tallo debe sobresalir 10 cm sobre la superficie del medio de soporte, por lo que la longitud de la planta con raíz y tallo debe ser alrededor entre 35 y 40 cm, quedando la raíz por lo menos 15 cm por debajo de la superficie del medio de soporte (grava). Una vez instaladas las plantas se procede a llenar de agua residual con el tirante de operación y se inicia el periodo de estabilización dentro del humedal. Durante este lapso algunas plantas perecen y tienen que ser retiradas del humedal y de ser necesario reemplazarlas, sin embargo, generalmente las plantas se adaptan y se reproducen, ocupando las nuevas plantas o hijuelos las áreas aledañas al punto de siembra.

Para el caso de los HAFL, la planta que se establezca debe podarse y por lo general estas quedan de entre un tamaño entre 30 y 40 cm. Deben establecerse a nivel de piso o fondo del humedal, ya que el medio de soporte será de 10 a 20 cm típicamente, por lo cual el nivel del agua en el humedal debe ser como máximo de 30 cm, manteniéndose este nivel hasta que la planta vaya creciendo unos centímetros, por lo que paulatinamente debe incrementarse (5 cm cada semana) el nivel del agua en el humedal hasta que las plantas estén por encima de los 50 cm. Generalmente, las especies establecidas en los HAFL presentan mayor talla que las establecidas en los HAFS.

El monitoreo de las remediadoras se debe realizar semanalmente y las variables que se deben monitorear son: largo y ancho de tallo, largo y ancho de raíz, número de tallos, número y largo de espigas y plantas nuevas. Para tener un mejor control durante el monitoreo y evitar el estrés de las plantas, el muestreo debe ser sistemático y determinar el total de plantas (vivas y muertas), recolectar la biomasa muerta, hojas caducas y plantas que mueran en el proceso de adaptación y depuración del agua residual y establecer periodos de poda y cosecha de estas. En la tabla 38 se presenta una recomendación sobre las plantas por m² que pueden establecerse, así como la adaptación y éxito de estas en los tipos de humedales.

Tabla 38

Número de plantas recomendadas para el establecimiento en los tipos de HA

Especies	Siembra (plantas/m²)	Tipo de flujo
<i>A. danaeifolium</i>	4.7	FL-FS
<i>C. indica</i>	13.3	FS
<i>C. jamaicense</i>	4.7	FL-FS
<i>C. esculenta</i>	8.3	FS
<i>C. articulatus</i>	13.3	FL-FS
<i>C. odoratus</i>	8.3	FS
<i>A. paniculatus</i>	8.3	FL-FS
<i>P. crassipes</i>	10.0	FL
<i>E. sessilifolia</i>	8.3	FL-FS
<i>H. latispatha</i>	13.3	FS
<i>P. paniculatum</i>	13.3	FL-FS
<i>P. australis</i>	13.3	FL-FS
<i>P. sagittata</i>	10.0	FL-FS
<i>S. lancifolia</i>	8.3	FL-FS
<i>S. latifolia</i>	8.3	FL-FS
<i>T. geniculata</i>	10.0	FL-FS
<i>T. domingensis</i>	8.3	FL-FS
<i>X. sagittifolium</i>	8.3	FS

Nota: flujo libre (FL) y flujo subsuperficial (FS).

Fuente: elaboración propia.

Capítulo 7

Condiciones de operación de los humedales

Calidad de las aguas residuales

Como podemos observar, el agua residual generada en la DAC-Biol-UJAT que se suministra a la PTAR y a las unidades experimentales presenta características de agua con concentración media por tener concentraciones mayores a 200 mg/L de SST y entre 300 y 500 mg/L de DQO según lo establece Tchobanoglous “Metcalf y Eddy” (1996). Los resultados de los trenes de tratamiento se presentan en la tabla 39.

Tabla 39

Valores promedio (\pm DE) de los contaminantes básicos en el influente (cárcamo) de las unidades de tratamiento durante el 2019 (N = 30)

Parámetro	Unidad	Semestre A		Semestre B	
		X	\pm DE	X	\pm DE
pH	UpH	8.6	0.2	8.6	0.2
Temperatura del agua	°C	25.3	1.8	28.3	0.5
Conductividad eléctrica	μ S/ cm	1900.9	229.7	1204.3	59.3
Sólidos disueltos totales	mg/L	950.5	115.0	599.2	99.2
Color	UC	1305.1	141.5	1157.3	194.2
Turbiedad	UNT	96.4	7.8	85.3	15.2
Potencial oxido reducción	mV	-297.8	44.4	-380.5	63.2
Oxígeno disuelto	mg/L	2.6	0.7	1.8	0.6
Sólidos suspendidos totales	mg/L	260.2	21.0	219.4	41.1
Demanda química de oxígeno	mg/L	373.0	43.0	543.2	48.5

Fuente: elaboración propia.

Medio de soporte

El material de soporte utilizado en todos los tratamientos de HA fue grava de río (canto redondo) con las características presentes en la tabla 40:

Tabla 40

Valores promedios (\pm DE) de las características del material de soporte utilizado ($N = 30$)

Medio de soporte	Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad real (kg/m ³)	Porosidad de lecho (%)	Diámetro de partícula (pulgadas)	Conductividad E. (dS m ⁻¹)
Grava de río	1,450.0 \pm 50.21	2,430 \pm 35.11	53 \pm 0.1	0.75 \pm 0.25	125.46 \pm 11.81
Grava de cerro	1,420.6 \pm 43.94	2,690.16 \pm 36.67	52.86 \pm 1.56	0.83 \pm 0.12	94.13 \pm 3.58

Fuente: elaboración propia.

Criterios de operación

En las tablas 41 y 42 se presentan las características de operación de los HA implementados en las fases experimentales y de evaluación de las distintas especies. Los principales parámetros son el gasto caudal, el tiempo de retención hidráulica, porosidad del medio de soporte, coeficientes cinéticos de degradación, entre otros parámetros de importancia para los estudios realizados con los humedales experimentales. Es importante hacer mención que estos criterios de operación cumplen con las recomendaciones establecidas por CONAGUA (2019), entre otros especialistas en el diseño y manejo de humedales.

Tabla 41

Datos de operación del HAFL

Parámetro	Valor	Unidad
Gasto medio (Qmed) =	0.20	m ³ /día
Gasto mínimo (Qmín) =	0.10	m ³ /día

Parámetro	Valor	Unidad
Gasto máximo instantáneo (Q _{máx. Inst}) =	0.90	m ³ /día
Carga orgánica unitaria (COU) =	40.00	gr/hab/día
Flujo másico de entrada (F _{me}) =	0.17	kg/día
Constante cinética (K ₁) =	0.45	d ⁻¹
Tiempo de retención hidráulica (TRH) =	7.78	días
Concentración de entrada (C _e) =	300 a 600	mg/L
Concentración de salida (C _s) =	30-60	mg/L
Eficiencia de remoción de demanda bioquímica de oxígeno (ER DBO) =	80-92.75	%
TRH teórico =	6-7.5	días
Eficiencia teórica (n) =	40-55	%
Tirante hidráulico =	0.5	m

Fuente: elaboración propia.

Tabla 42
Datos de operación del HAFS

Parámetro	Valor	Unidad
Gasto medio (Q _{med}) =	0.20	m ³ /día
Gasto mínimo (Q _{mín}) =	0.10	m ³ /día
Gasto máximo instantáneo (Q _{máx. Inst}) =	0.90	m ³ /día
Carga orgánica unitaria (COU) =	40.00	gr/hab/día
Flujo másico de entrada (F _{me}) =	0.17	kg/día
Constante cinética (K ₁) =	0.25	d ⁻¹
Tiempo de retención hidráulica (TRH) =	5.83	días
Concentración de entrada (C _e) =	300 a 600	mg/L
Concentración de salida (C _s) =	60-120	mg/L
Eficiencia de remoción de demanda bioquímica de oxígeno (ER DBO) =	76-90	%
TRH teórico =	3-4.5	días
Eficiencia teórica (n) =	60-80	%
Tirante hidráulico =	0.5	m

Fuente: elaboración propia.

Capítulo 8

Eficiencia de remoción de contaminantes básicos

La remoción de contaminantes básicos

El éxito en los HA depende de funciones ecológicas que son similares a las de los humedales naturales y, en gran medida, de las interacciones dentro de las comunidades vegetales. La remoción de contaminantes (SST y DBO) en HAFL generalmente es mejor en celdas con plantas de mayor densidad y biomasa que en celdas contiguas sin plantas. Sin embargo, los mecanismos por los cuales las poblaciones de plantas mejoran el rendimiento del tratamiento todavía no se determina completamente. Se ha planteado que una relación entre la superficie vegetal y la densidad de las poblaciones microbianas adheridas mejora el rendimiento. Las comunidades de plantas en los HA sufren cambios significativos después de la siembra inicial y muy pocos HA mantienen la composición de especies y distribuciones de densidad previstas en su diseño. Muchos de estos cambios son previsible y muchos tienen poco efecto aparente sobre el rendimiento del tratamiento, otros cambios, sin embargo, pueden resultar en un rendimiento deficiente (Red et al., 1995).

Un HA opera con un flujo relativamente estable de agua en contraste con los humedales naturales, debido al efecto de la precipitación variable en su cuenca. Como resultado, la ecología de los HA se ve afectada por inundaciones continuas y concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y otros constituyentes de aguas residuales a niveles consistentemente más altos de otro modo al que ocurrirían en la naturaleza. Las variaciones de temperatura también afectan el ren-

dimiento del tratamiento, aunque no consistentemente para todos los componentes de las aguas residuales. La remoción de algunos constituyentes disminuye con temperaturas más bajas, pero la DBO, SST y otros mecanismos físicos se ven menos afectados (floculación, sedimentación) (Delgadillo et al., 2010).

Las algas inevitablemente se convierten en componentes de los sistemas de HAFL y pueden afectar el rendimiento del tratamiento. La presencia de algas en áreas abiertas sumergidas con vegetación puede formar un dosel vivo que bloquea la luz del sol que debe penetrar la columna de agua a esa vegetación, que da como resultado niveles reducidos de oxígeno disuelto (OD). La presencia en agua abierta, sin sombra cerca de la salida de un HA, típicamente promueve floraciones estacionales de especies de algas fitoplanctónicas, lo que resulta en una elevada concentración de SST y nutrientes en el efluente. Varias especies de plantas acuáticas flotantes, especialmente la lenteja de agua, tienen tasas muy altas de producción primaria, lo que da como resultado grandes cantidades de biomasa y residuos no vivos atrapados que se acumulan dentro de la porción completamente vegetada en los sistemas de estanques y HAFL (EPA, 2000).

En la tabla 43 se presentan los resultados de las especies operando en flujo libre o subsuperficial. Estas fueron evaluadas contando con un pretratamiento de tipo reactor anaerobio de primera generación y posteriormente se sometió el agua a tratamiento por el humedal (libre o subsuperficial), siendo este un tratamiento secundario.

Tabla 43

Eficiencias de remoción (%) promedio de contaminantes básicos en HAFL y HAFS, con las especies estudiadas en Tabasco

Vegetación	Tipo de flujo	Eficiencia de remoción (%)									
		Color	Turb.	SDT	SST	DBO	DQO	NT	PT	CT	
<i>A. danaeifolium</i>	FL	66.1	63.1	15.7	64.9	63.2	87.5	74.0	40.0	66.8	
<i>A. danaeifolium</i>	FS	91.3	97.5	23.7	97.0	97.5	95.0	82.0	56.0	88.2	
<i>C. indica</i>	FS	82.0	86.0	38.0	81.0	80.0	82.0	40.0	42.0	52.0	
<i>C. jamaicense</i>	FL	80.0	86.9	10.5	87.6	92.0	85.7	64.0	33.0	60.0	
<i>C. jamaicense</i>	FS	73.5	74.7	1.2	78.7	90.0	90.5	56.0	25.0	78.0	
<i>C. esculenta</i>	FS	87.4	94.8	38.0	88.3	91.2	83.5	47.0	38.0	56.0	
<i>C. articulatus</i>	FL	81.0	86.7	19.0	78.0	78.0	83.0	63.0	28.0	60.0	
<i>C. articulatus</i>	FS	78.0	91.6	22.0	83.0	85.0	86.0	64.0	26.0	46.0	

Vegetación	Tipo de flujo	Eficiencia de remoción (%)								
		Color	Turb.	SDT	SST	DBO	DQO	NT	PT	CT
<i>C. odoratus</i>	FS	81.6	92.0	15.6	90.0	88.0	89.0	13.6	22.5	67.0
<i>A. paniculatus</i>	FL	63.6	76.5	22.0	72.0	82.0	85.0	46.0	37.0	54.0
<i>A. paniculatus</i>	FS	87.9	91.5	35.8	80.0	88.0	90.0	51.0	39.0	58.0
<i>P. crassipes</i>	FL	79.6	94.7	25.0	93.6	93.1	93.4	90.0	83.0	58.0
<i>E. sessilifolia</i>	FS	75.0	90.0	30.4	87.7	94.0	93.9	63.0	80.0	60.0
<i>H. latispatha</i>	FS	88.5	94.8	70.3	92.0	88.0	87.0	60.0	37.0	55.0
<i>P. paniculatum</i>	FL	80.0	71.1	60.0	89.0	80.3	89.0	88.0	81.0	69.0
<i>P. paniculatum</i>	FS	85.0	87.4	45.5	96.0	96.2	91.0	94.0	83.0	60.0
<i>P. australis</i>	FS	80.0	81.0	19.0	72.0	95.4	9.5	76.0	40.0	46.0
<i>P. sagittata</i>	FL	86.6	94.2	32.0	86.3	95.1	78.5	90.0	80.0	70.0
<i>P. sagittata</i>	FS	75.4	79.5	32.7	90.0	96.0	90.0	88.0	71.0	66.0
<i>S. lancifolia</i>	FL	98.0	94.0	45.0	97.0	93.0	94.0	90.0	87.0	65.0
<i>S. latifolia</i>	FL	79.6	96.0	46.0	94.0	96.0	97.0	96.0	94.0	76.0
<i>S. latifolia</i>	FS	85.5	93.8	34.0	95.5	95.9	92.0	97.0	93.0	70.0
<i>T. geniculata</i>	FL	79.6	92.3	29.4	78.3	86.3	82.6	90.0	80.0	60.0
<i>T. geniculata</i>	FS	83.2	75.9	17.1	84.4	75.8	82.4	86.0	68.0	58.0
<i>T. domingensis</i>	FL	85.0	97.0	26.0	97.7	97.0	97.0	97.0	91.0	67.0
<i>T. domingensis</i>	FS	83.4	79.1	29.3	86.0	88.0	87.0	80.0	65.0	58.0
<i>X. sagittifolium</i>	FS	83.4	90.1	35.9	86.0	89.0	90.0	60.0	48.0	60.0
Control (sin vegetación)	FL	48.2	42.8	22.5	56.5	52.0	43.0	36.0	12.5	49.0
Control (sin vegetación)	FS	50.5	48.3	21.5	59.0	50.0	50.0	42.0	16.0	57.0

Nota: flujo libre (FL) y flujo subsuperficial (FS).

Fuente: elaboración propia.

Este desempeño fue medido después de un año de operación, cuando ya los humedales se encontraban completamente estabilizados. El tiempo de retención hidráulico juega un papel muy importante, al igual que la temperatura para nuestra zona, lo que hace que los humedales tengan en su gran mayoría un buen desempeño. Para poder obtener el desempeño de las especies en los humedales debemos considerar restar los valores de los blancos que están incluidos en la tabla 43 de los valores reportados por cada especie.

Trenes de tratamiento recomendados

Es importante analizar la selección de los HA para implementar los trenes o arreglos de los sistemas de tratamiento vía HA en el trópico húmedo. Las especies que tienen la mayor eficiencia de remoción de materia orgánica medida como DQO (90 a 97 %) son: *Sagittaria latifolia*, *Typha domingensis*, *Acrostichum danaeifolium*, *Sagittaria lancifolia*, *Enydra sessilifolia*, *E. crassipes*, *Paspalum paniculatum*, *Cladium jamaicense*, *E. paniculatus*, *Pontederia sagittata* y *Xanthosoma sagittifolium*. En el caso de tener que seleccionar especies para la remoción de nitrógeno las de mayor desempeño (90 a 97 %) son: *Sagittaria latifolia*, *Typha domingensis*, *Paspalum paniculatum*, *E. crassipes*, *Pontederia sagittata*, *Sagittaria lancifolia* y *Thalia geniculata*. Finalmente, las especies con mayor remoción de fósforo (80 a 94 %) son: *Sagittaria latifolia*, *Typha domingensis*, *Sagittaria lancifolia*, *E. crassipes*, *Paspalum paniculatum*, y *Enydra sessilifolia*.

Para el caso de poblaciones humanas pequeñas, generalmente se pueden aplicar –para un ahorro en el costo de inversión y operación– sistemas basados en pretratamiento, fosa séptica y dos humedales en serie. A continuación, presentamos en la tabla 44 la síntesis del proceso con la remoción de DQO. Corroborando la remoción del contaminante se procede a diseñar las unidades de tratamiento. Este análisis puede realizarse para los contaminantes de la tabla 43.

Tabla 44

Remoción (%) promedio de DQO para un sistema descentralizado

Datos de proyecto				
Gasto de entrada (Qe) =	3	LPS		
Concentración inicial DQO (Ce) =	550	mg/L		
Flujo másico de entrada (FMe) =	142.6	kg/día		
Masa total removida (MTR) =	139.5	kg/día		
Eficiencia total del proceso (ETP) =	97.8	%		
Concentración de salida (Cs) =	11.9	mg/L		
Remoción de DQO (kg/día) de las unidades de proceso con eficiencia promedio				
Unidades	Ce	Cs	Rem	ER (%)

Datos de proyecto				
Pretratamiento	142.6	135.4	7.1	5
Fosa séptica	135.4	94.8	40.6	30
HAFS- <i>Thalia geniculata</i>	94.8	17.1	77.7	82
HAFI- <i>Thalia geniculata</i>	17.1	3.1	14.0	82

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en la figura 51 se presentan los tratamientos que pueden emplearse satisfactoriamente en el trópico húmedo, tanto en comunidades urbanas como en las rurales, ya que en la actualidad se pueden establecer sistemas de tratamiento para gastos parciales en comunidades mayores a 10,000 habitantes.

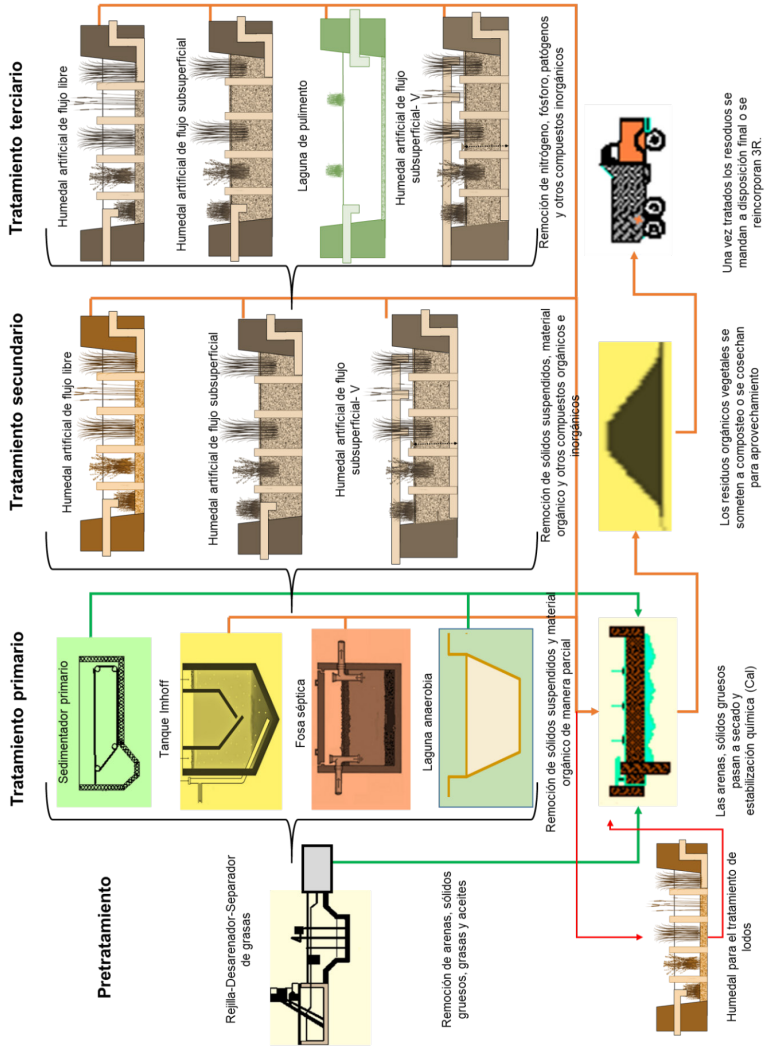


Figura 51. Tratamiento de aguas residuales y manejo de residuos propuestos para su uso en el sureste de México.
Fuente: elaboración propia.

Capítulo 9

Coeficientes cinéticos de las especies de estudio

Constante cinética de degradación “k” de unidades experimentales

La cinética de degradación “k” sirve para conocer el comportamiento de los parámetros y las tasas de cambio en el tratamiento, siendo de interés conocer en los humedales la velocidad de remoción por el sustrato y la tasa de incremento de biomasa (Romellón et al., 2022). Las reacciones que ocurren en el tratamiento de aguas residuales son homogéneas y heterogéneas. En la primera, los reactivos se distribuyen uniformemente por toda el agua estableciendo el mismo potencial de reacción en cualquier punto dentro del volumen de control, y pueden ser reversibles o irreversibles. La segunda la reacción ocurre usualmente en la superficie de los compuestos reactantes, y los reactivos se distribuyen en sitios específicos (Sierra, 2011). En la degradación de contaminantes en los reactores biológicos las condiciones ambientales pueden controlarse regulando el pH, la temperatura y los elementos trazas que se agregan, así como añadiendo o excluyendo el oxígeno y la mezcla apropiada. Este control asegura que los microorganismos puedan crecer homogenizando el gasto y la carga orgánica (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Para el caso de los HA evaluados tanto en la planta piloto como en la planta de tratamiento de aguas residuales vía HA de la DACBiol, se analizaron parámetros del influente y efluente de los humedales, evaluando el gasto y tiempo de retención hidráulico (TRH) por tipo de flujo en los humedales. En estos, la cinética de degradación tiene un comportamiento de primer orden y los humedales en ambos flujos cumplen con la relación largo-ancho de un reactor de flujo pistón

y de acuerdo con López et al. (2019), Comparán (2020) y García (2020), los HAFL se comportan como un reactor de flujo pistón en términos de remoción de materia orgánica de acuerdo con el TRH y los HAFS se comportan similares a un flujo pistón, estimándose la k a partir de la siguiente ecuación (López et al., 2019):

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-kt} \quad (\text{Ec } 6)$$

Donde:

t: tiempo de retención para la remoción de DQO (d)

Ce: concentración de DQO en el efluente del reactor (mg/L)

Co: concentración en el influente

k: constante de degradación (días⁻¹)

Para las estimaciones de los coeficientes cinéticos de reacción k de la tabla 45 se obtuvieron los parámetros de calidad del agua después de un año de operación y los TRH para los HAFL se comportaron en promedio 6.5 días, mientras que los HAFS presentaron en promedio un TRH de 4.5 días y el gasto un 0.2 m³/día para ambos tipos de humedales. Cabe aclarar que las condiciones de influente y efluente son variables por épocas del año al ser aguas residuales provenientes de un campus universitario donde la población en actividad es muy variable por periodos escolares. La tabla 45 también presenta la k para los humedales blancos o testigos, siendo el signo negativo (-) indicador de degradación. Esta k es global aparente, ya que en el humedal se presentan varios factores que intervienen como es la sedimentación, filtración, fotooxidación, entre otras.

Tabla 45

Estimaciones de coeficientes cinéticos considerando su comportamiento de orden 1 para los diferentes humedales y especies

Vegetación	Tipo de flujo	Coeficientes cinéticos de reacción k (días ⁻¹)			
		Color	Turbiedad	DBO	DQO
<i>A. danaeifolium</i>	FL	-3.9	-6.1	-6.0	-5.7
<i>A. danaeifolium</i>	FS	-2.4	-2.8	-1.9	-2.2
<i>C. jamaicense</i>	FL	-5.6	-5.3	-5.5	-5.1
<i>C. jamaicense</i>	FS	-2.8	-2.3	-2.5	-2.2
<i>C. esculenta</i>	FS	-2.4	-1.5	-1.6	-1.8

Vegetación	Tipo de flujo	Coeficientes cinéticos de reacción k (días ⁻¹)			
		Color	Turbiedad	DBO	DQO
<i>C. articulatus</i>	FL	-5.6	-4.9	-2.8	-6.2
<i>C. articulatus</i>	FS	-3.4	-2.4	-2.5	-2.5
<i>C. odoratus</i>	FS	-2.8	-2.1	-2.9	-2.9
<i>A. paniculatus</i>	FL	-4.8	-4.2	-4.2	-4.3
<i>A. paniculatus</i>	FS	-2.7	-1.8	-1.7	-2.3
<i>P. crassipes</i>	FL	-5.7	-5.8	-5.4	-5.7
<i>E. sessilifolia</i>	FS	-3.1	-2.2	-2.4	-1.7
<i>H. latispatha</i>	FS	-2.3	-1.5	-2.2	-1.5
<i>P. Paniculatum.</i>	FL	-2.1	-3.7	-3.7	-3.7
<i>P. paniculatum</i>	FS	-3.1	-2.0	-1.5	-1.6
<i>P. australis</i>	FS	-3.2	-2.8	-2.6	-2.5
<i>P. sagittata</i>	FL	-4.3	-3.7	-2.4	-2.1
<i>P. sagittata</i>	FS	-2.8	-2.2	-1.9	-1.1
<i>S. lancifolia</i>	FL	-6.3	-5.6	-3.7	-3.7
<i>S. latifolia</i>	FL	-6.3	-4.4	-3.0	-3.0
<i>S. latifolia</i>	FS	-3.4	-2.4	-2.6	-2.0
<i>T. geniculata</i>	FL	-5.7	-5.7	-4.0	-5.0
<i>T. geniculata</i>	FS	-3.0	-3.2	-1.2	-2.2
<i>T. domingensis</i>	FL	-5.0	-3.1	-2.8	-2.7
<i>T. domingensis</i>	FS	-3.3	-2.2	-3.3	-4.3
<i>X. sagittifolium</i>	FS	-2.7	-2.6	-2.6	-1.2
Control (sin vegetación)	FL	-2.1	-2.1	-2.2	-2.1
Control (sin vegetación)	FS	-2.5	-2.4	-2.3	-2.6

Nota: flujo libre (FL) y flujo subsuperficial (FS).

Fuente: elaboración propia.

Constante cinética de degradación “k” de humedales en serie

Es importante recordar que los valores de los coeficientes cinéticos k corresponden a un humedal que opera como tratamiento secundario y terciario, estando estos en serie con flujos subsuperficial-libre-libre, cuyos tiempos de retención son de 5.31 horas, 8.31 horas y 8.31 horas, respectivamente, teniendo un total de 22 horas para ambos trenes de tratamiento (tren 1 y tren 2). En estos humedales las especies presentes en este arreglo (subsuperficial-libre-libre) son *Pontederia sagittata*, *Thalia geniculata* y *Sagittaria lancifolia*. En la tabla 46 se presenta el desempeño y coeficientes cinéticos para los parámetros más importantes en el control de procesos del humedal y la estimación del comportamiento del color y turbiedad a lo largo del reactor de las figuras 52 a la 55.

Tabla 46

Desempeño y estimaciones de coeficientes cinéticos considerando su comportamiento de orden 1 para los HA en serie de la DACBiol-UJAT

Humedal	Parámetro	Tren 1			Tren 2		
		Color (UC)	Turbiedad (UNT)	DQO (mg/L)	Color (UC)	Turbiedad (UNT)	DQO (mg/L)
HAFS-Ps	C inicial	1319.4	92.6	342	1319.4	92.6	380
	C final	946.9	65.9	232	946.9	65.9	213
	ER (%)	28.2	28.8	32.2	28.2	28.8	43.9
	k (días ⁻¹)	1.5	1.54	1.76	1.5	1.54	2.62
HAFL-Tg	C inicial	946.9	65.9	232	946.9	65.9	213
	C final	495.5	42.85	215	495.5	42.85	136
	ER (%)	47.7	35.0	7.3	47.7	35.0	36.2
	k (días ⁻¹)	1.88	1.25	0.22	1.87	1.24	1.3
HAFL-SI	C inicial	495.5	42.85	215	495.5	42.85	136
	C final	509	35	82	509	35	71
	ER (%)	-2.7	18.3	61.9	-2.7	18.3	47.8
	k (días ⁻¹)	1.1	1.12	1.59	-0.08	0.58	1.88

Nota: *Pontederia sagittata* (Ps), *Thalia geniculata* (Tg), *Sagittaria lancifolia* (SI).

Fuente: elaboración propia.

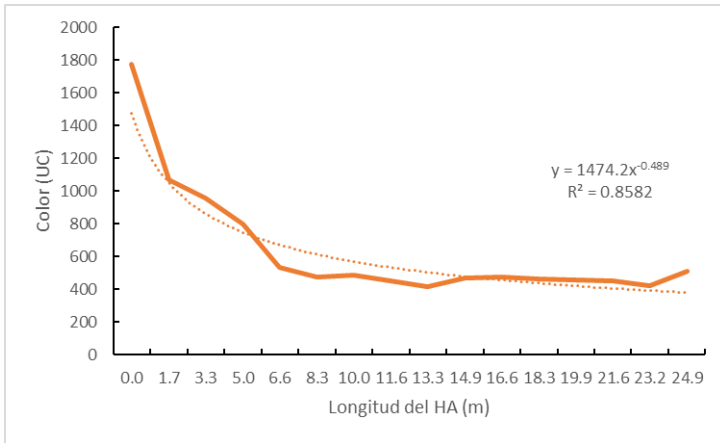


Figura 52. Comportamiento longitudinal del color en el humedal del tren 1.
Fuente: López et al., 2018.

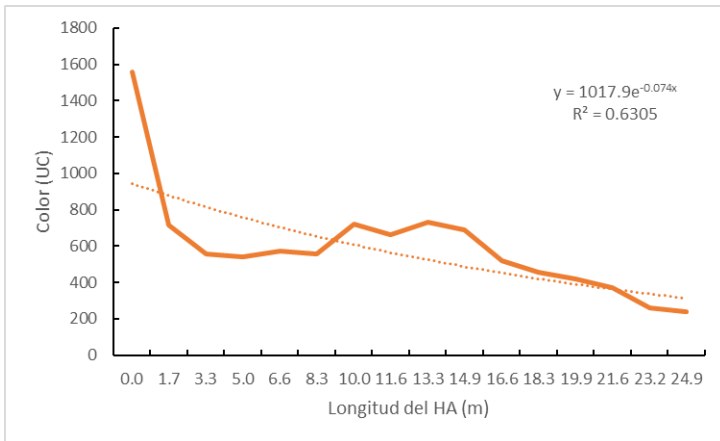


Figura 53. Comportamiento longitudinal del color en el humedal del tren 2.
Fuente: López et al., 2018.

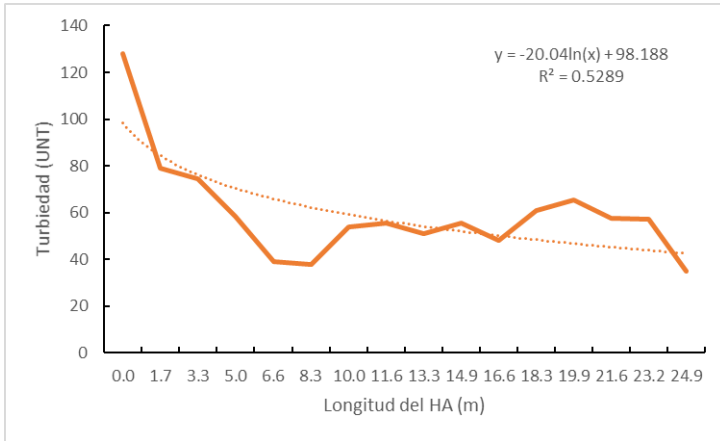


Figura 54. Comportamiento longitudinal de la turbiedad en el humedal del tren 1.
Fuente: López et al., 2018.

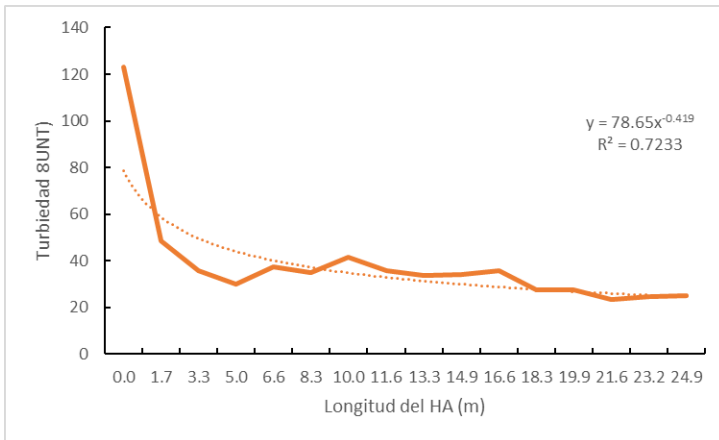


Figura 55. Comportamiento longitudinal de la turbiedad en el humedal del tren 2.
Fuente: López et al., 2018.

Capítulo 10

Comportamiento biológico de las especies

Acrostichum danaeifolium

Durante la estabilización *Acrostichum danaeifolium* presenta una rápida adaptación en HAFS, ya que en ocho días aparecen nuevas hojas, mientras que en HAFL se presentan a los 15 días. Al finalizar la estabilización (cuatro meses), en el HAFS la especie presentó una población en 12 plantas, mientras que en el HAFL solo 9. Esta especie no puede adaptarse fácilmente en HAFL debido a que el medio de soporte con poco espesor (0.10 a 0.20 m) no permite un agarre suficiente para las raíces, pues estas son muy grandes y pesadas, por lo que la planta se desenraiza fácilmente y al caerse sobre el agua empieza su descomposición y muere. En la tabla 47 se muestran las características finales de la vegetación en los dos tipos de flujos.

Tabla 47

*Valores promedio ($\pm DE$) de las variables morfométricas de la especie *Acrostichum danaeifolium* en etapa inicial y final*

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final HAFS	Etapa final HAFL
Peso planta (kg)	3.820	8.4129.31	5.6131.14
No. plantas	15	12	6
No. hojas/planta	204.5	332.25	141.6
Altura planta (cm)	11633	197.827.3	142.11 11.87
Largo raíz (cm)	63 11	94.41 11	48.7 7.8
Ancho raíz (cm)	7023	96.617	44.821
Perímetro tallos (cm)	6 0.9	8.92 0.7	6.41 0.4

Fuente: Gómez Rodríguez, 2019.

Canna indica

Las plantas de *Canna indica* son empleadas en HAFS y dependiendo del tipo de sembrado (tresbolillo, rectangular, etc.), se estima que para una óptima distribución de la misma y buen drenaje se pueden plantar hasta 13.3 individuos/m², combinándose en la superficie con algún pasto para que este amortigüe la temperatura que el medio de soporte como la grava alcanza por su exposición al sol. En la tabla 48 se presentan las características de la especie una vez estabilizada y después de seis meses de operación, que es el periodo entre podas.

Tabla 48

*Valores promedio (\pm DE) de las variables morfológicas de la especie *Canna indica* en etapa inicial y final*

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final
Peso planta (kg)	0.54 \pm 0.27	0.59 \pm 0.69
Diámetro de tallo (cm)	1.84 \pm 0.11	2.5 \pm 0.13
Largo de tallo (cm)	78.50 \pm 16.08	164.6 \pm 22.88
Diámetro de la raíz (cm)	24.24 \pm 3.06	30.7 \pm 5.16
Largo de la raíz (cm)	14.80 \pm 1.92	18.5 \pm 2.48
Humedad (%)	68.50 \pm 7.11	64.50 \pm 6.96
Número de hojas	4.60 \pm 1.34	5.60 \pm 1.14
Largo de hojas (cm)	24.71 \pm 7.61	37.79 \pm 5.14
Ancho de hojas (cm)	11.77 \pm 2.07	17.18 \pm 1.95
Números de pseudotallos	1.00 \pm 1.00	0.60 \pm 0.55
Largo de pseudotallos (cm)	55.80 \pm 20.13	55.73 \pm 64.59
Diámetro de pseudotallos (cm)	1.74 \pm 0.22	1.33 \pm 0.76

Fuente: Córdoba Pedraza, 2021.

Cladium jamaicense

De *Cladium jamaicense* fueron plantados 14 surcos inicialmente en HAFS y HAFL, cada surco presentaba de 4 a 6 plantas, y se colocaron en un arreglo de cuatro y tres surcos por fila. El HAFS

inició con 78 plantas y a los tres meses tenía 148 plantas (189.7 %), presentando una densidad de 59.2 plantas/m², con largo de hojas de 85 cm. El HAFL inicio con 81 plantas, a los tres meses tenía 49 plantas con una densidad de 19.6 plantas/m², con largo de hojas de 70 cm. Se presentó mortandad, pues no sobrevive en regímenes variables de inundación y permanentes, lo que ocasiona su muerte y baja reproducción y crecimiento. En la tabla 49 se muestran las características finales de la vegetación en los dos tipos de flujos.

Tabla 49

Valores promedio (±DE) de las variables morfológicas de la especie Cladium jamaicense en etapa inicial y final

Parámetro	Etapa inicial HAFS	Etapa inicial HAFL	Etapa final HAFS	Etapa final HAFL
Productividad (kg/m ²)			27.23	8.9
No. total de surco	14	14	14	7
No. total de plantas	78	81	391	83
Densidad (plantas/m ²)			130.3	27.7
Largo de hojas (m)	2.35±0.16	2.37±0.15	4.7±0.08	4.20±0.06
Ancho de hojas (cm)	2.7±0.3	2.8±0.1	3.38±0.14	3.1±0.09
Hojas/planta			17±2.8	13.5±1.5
Largo de raíz (cm)	19.05±2.05	18.77±0.54	25±1.2	22.7±2.1
Diámetro de raíz (cm)	25.38±1.35	25.44±0.93	42.3±1.8	30.1±1.1

Fuente: Comparán Sánchez, 2020.

Colocasia esculenta

Durante la estabilización de *Colocasia esculenta* en HAFS, esta presentó rápida adaptación al agua residual, pues en siete días se detectó la aparición de nuevas hojas en crecimiento. Al término de un mes que se estimó su estabilización mostró un aumento en su población de 24 a 27 ejemplares. Esta especie presenta una buena propagación de nuevos individuos, aumentando su densidad poblacional (tabla 50).

Tabla 50

Valores promedio ($\pm DE$) de las variables morfológicas de la especie *Colocasia esculenta* en etapa inicial y final

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final
Biomasa de planta (kg)	0.396 \pm 0.07	23.162
Biomasa total (kg)	9.915	31.548
No. plantas	25	72
No. de hojas	4 \pm 1.41	5.33 \pm 0.57
Largo de hoja (cm)	21 \pm 2.58	46 \pm 5.19
Ancho de hoja (cm)	16.75 \pm 2.21	35 \pm 7.0
Largo del tallo (cm)	45 \pm 5.29	85 \pm 10.44
Diámetro del tallo (cm)	11.25 \pm 2.62	19.66 \pm 3.05
Humedad (%)		85.546

Fuente: García & Comparán, 2018.

Cyperus articulatus

La especie *Cyperus articulatus* en HAFS mostró dificultad para establecerse, a partir del primer mes de siembra comenzó a establecerse y se reprodujo, presentó deshidratación por el calor del medio de soporte. Cuando las plantas son adultas presentan inflorescencias de color café o pardo. La especie presentó un 8.9 \pm 3.5 % de humedad. En la tabla 51 se presentan las características de la especie en el estudio.

Tabla 51

Valores promedio ($\pm DE$) de las variables morfológicas de la especie *Cyperus articulatus* en etapa inicial y final

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final
Peso (kg)	0.14 \pm 0.36	0.258.9 \pm 0.72
Altura (cm)	118 \pm 12.0	178.3 \pm 17.0
Diámetro de tallo (cm)	0.7 \pm 0.4	1.3 \pm 0.4
Largo de raíz (cm)	12 \pm 2.9	12.6 \pm 3.9
Perímetro (cm)	2 \pm 1.2	3.7 \pm 1.2

Parámetro	Etapas inicial	Etapas final
Largo de hojas (cm)	47±9.0	83.5±13.9
Ancho de hojas (cm)	1.5±0.8	2.9±0.8

Fuente: elaboración propia.

Cyperus odoratus

La especie *Cyperus odoratus* en HAFS no mostró afectaciones adversas y empezó a crecer de forma exponencial a partir del primer mes de siembra. Cuando las plantas sembradas son adultas presentan inflorescencias (espigas) en cada una de las plantas, el color es café o pardo. En la segunda semana aparecen nuevas espigas en las plantas. Después de un mes la planta empieza a estabilizarse, esta presentó un 6.7±2.4 % de humedad. En la tabla 52 se presentan las características de la especie obtenida en el estudio.

Tabla 52

Valores promedio (±DE) de las variables morfológicas de la especie Cyperus odoratus en etapas inicial y final

Parámetro	Etapas inicial	Etapas final
Masa planta (kg)	0.509±0.3	0.709±0.5
No. tallos	4.6±2.3	14.6±10.0
Largo de tallo (cm)	80.7±15.0	147.9±24.8
Diámetro de tallo (cm)	0.7±0.3	1.6±0.8
Largo de raíz (cm)	23.8±7.7	21.5±8.9
Diámetro de raíz (cm)	13.6±4.4	19.9±6.3
No. espigas	3.0±1.2	2.3±4.5
Largo de espigas (cm)	49.5±17.3	31.2±36.7
Ancho de hojas (cm)	0.7±0.3	1.4±0.6

Fuente: Rodríguez, 2020.

Aquarius paniculatus

Esta especie muestra fácil adaptación en ambos flujos. Esta planta es considerada una maleza, pues se establece en zonas húmedas de cuerpos de agua y áreas ganaderas. Se establecieron en ambas unidades experimentales 25 plantas, al final del periodo fueron más de 50 plantas. El peso total de vegetación plantada para el HAFL y el HAFS fue de 21.66 gr y 20.8 gr, mismos que se comparan con el peso de la vegetación al final del experimento (tabla 53).

Tabla 53

*Valores promedio (\pm DE) de las variables morfológicas de la especie *Aquarius paniculatus* en etapa inicial y final*

Variable	HAFL-inicial	HAFS-inicial	HAFL-final	HAFS-final
Biomasa por planta (kg)	0.87 \pm 0.52	0.84 \pm 0.40	4.58 \pm 1.85	5.54 \pm 1.91
Biomasa total (kg)	21.66	20.8	197.09	238.06
% humedad			87.3	91.21
Largo de raíz (cm)	27.28 \pm 6.8	29.3 \pm 5	36.14 \pm 4.06	44.57 \pm 8.6
Largo del tallo (cm)	94.92 \pm 13.3	87.3 \pm 11.5	157.54 \pm 8.77	97.54 \pm 18.82
Largo de hoja (cm)	30.04 \pm 3	31.65 \pm 2.1	38.81 \pm 2.33	33.09 \pm 3.62
No. de flores	0.96 \pm 0.88	0.88 \pm 0.7	8.90 \pm 1.62	1.45 \pm 1.07
Largo de tallo de flor (cm)	81 \pm 10.7	78.9 \pm 11	191 \pm 15.17	128.18 \pm 9.83
No. de hojas	4 \pm 1.02	4 \pm 1.56	29 \pm 6.01	36.90 \pm 7.02

Fuente: García Ramírez, 2020.

Pontederia crassipes

La especie *Pontederia crassipes* es una especie invasora que se encuentra establecida en todos los cuerpos (lóticos y lénticos) de agua en el estado de Tabasco, sin embargo, podemos hacer uso de esta y aplicarla directamente en la remoción de nutrientes, característica por la cual se establece en los cuerpos de agua que presentan descargas de aguas residuales. Esta especie por ser hidrófita flotante se establece favorablemente en HAFL en unidades de postratamiento (terciario). Esta presenta una humedad de 68.8 \pm 4.9 % y se reproduce

fácilmente durante las primeras dos semanas, incrementándose exponencialmente al mes de instalada. En la tabla 54 se presenta la morfometría de la especie.

Tabla 54

*Valores promedio (\pm DE) de las variables morfométricas de la especie *Pontederia crassipes*, en etapa inicial y final*

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final
Masa planta (kg)	1.85 \pm 0.5	2.68 \pm 0.8
No. tallos	7.6 \pm 1.3	16.6 \pm 1.8
Largo de tallo (cm)	25.7 \pm 1.5	47.9 \pm 4.8
Diámetro de tallo (cm)	0.6 \pm 0.3	1.2 \pm 0.8
Largo de raíz (cm)	13.8 \pm 7.7	15.5 \pm 8.9
Diámetro de raíz (cm)	10.6 \pm 4.4	16.9 \pm 6.3
Largo de hojas (cm)	18.5 \pm 7.3	25.2 \pm 6.7
Ancho de hojas (cm)	15.7 \pm 0.3	21.4 \pm 0.6
No. de hojas	9.2 \pm 1.3	16.2 \pm 3.3

Fuente: elaboración propia.

Enydra sessilifolia

Enydra sessilifolia mostró fácil adaptación desde la segunda semana a partir de la siembra en HAFS. Tras ocho días se pudo observar el crecimiento de nuevos hijuelos en cada uno de los ejemplares; no se presentó disminución en el número de ejemplares sembrados originalmente. Después de tres meses se pudo observar un crecimiento rápido, sin embargo, al mismo tiempo que nuevos hijos nacían, la planta original comenzaba a morir. La planta presentó un 68 \pm 12 % de humedad (tabla 55).

Tabla 55

Valores promedio ($\pm DE$) de las variables morfológicas de la especie *Enydra sessilifolia*, en etapa inicial y final

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final
No. plantas	25	<150
Masa (kg)	0.48 \pm 0.72	12.44 \pm 0.23
Número de tallos	3.3 \pm 0.5	6.3 \pm 0.5
Largo de tallo (cm)	37.8 \pm 4.7	97.8 \pm 4.7
Diámetro tallo (cm)	1.1 \pm 1.4	1.9 \pm 1.1
Largo de raíz (cm)	10.4 \pm 2.6	16.4 \pm 2.6
Diámetro raíz (cm)	5.1 \pm 1.3	8.1 \pm 1.0
No. de hojas	35.2 \pm 5.0	85.2 \pm 5.0
Largo de hoja (cm)	3.8 \pm 0.7	6.2 \pm 1.7
Ancho de hoja (cm)	0.7 \pm 0.2	2.2 \pm 0.2

Fuente: Rodas López, 2020.

Heliconia latispatha

En HAFS se sembraron 40 individuos *Heliconia latispatha*. Esta especie no mostró un buen desarrollo en este tipo de humedal, pues presentó una mortandad significativa. Estas plantas presentan un 55.4 \pm 10.5 % de humedad (tabla 56). La falta de adaptación se presume principalmente porque no tolera periodos prolongados de inundación y altas cargas de materia orgánica en las aguas residuales. Bajo estas condiciones, la floración de las heliconias fue a partir del mes, teniendo un tiempo de vida promedio también de un mes.

Tabla 56

Valores promedio ($\pm DE$) de las variables morfológicas de la especie *Heliconia latispatha*, en etapa inicial y final

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final
No. plantas	40	17
Peso (kg)	0.45 \pm 0.23	0.69 \pm 0.84
No. pseudo-tallo	2.47 \pm 1.18	5.8 \pm 4.57

Parámetro	Etapas inicial	Etapas final
Long. pseudo-tallo (cm)	57.85±5.78	43.85±15.02
Diámetro pseudo-tallo (cm)	1.53±0.54	2.76±1.08
Long. raíz (cm)	16.88±5.64	13.27±5.64
Diámetro raíz (cm)	6.62±4.93	18.72±8.16
No. hojas	3.65±2.39	14.0±11.25
Ancho de hoja (cm)	13.91±2.40	8.90±3.05
Long. de hoja (cm)	37.75±4.62	13.27±5.64

Fuente: Mayge May, 2020.

Paspalum paniculatum

Paspalum paniculatum se adapta fácilmente en ambos tipos de flujo. Estas plantas requieren de otra especie para un mejor desarrollo, que les permita mantenerse sobre la superficie del agua y no debajo de esta por lo menos tres o cuatro semanas luego de su siembra, con la finalidad de prevenir una descomposición de esta que pudiera generar alguna alteración en los parámetros de color y turbiedad. Esta especie presenta una humedad de 14.8±6 %. Crece como guías largas, con pocas hojas y raíces muy pequeñas, y su comportamiento se presenta en la tabla 57.

Tabla 57

Valores promedio (\pm DE) de las variables morfométricas de la especie *Paspalum paniculatum* en etapas inicial y final

Parámetro	Etapas inicial	Etapas final HAFS	Etapas final HAFL
Peso promedio (kg)	6.78±5.75	30.25±1.77	29.75±8.84
No. plantas	60	<100	<100
Longitud de tallo (m)	0.83±0.34	1.45±0.02	1.74±0.37
Long. de la hoja (cm)	0.10±0.10	0.35±0.05	0.39±0.06
Ancho de la hoja (cm)	0.20±0.10	0.23±0.02	0.31±0.02
Diámetro del tallo (cm)	0.80±0.10	0.11±2.12	0.11±0.03

Fuente: elaboración propia.

Phragmites australis

Phragmites australis en HAFS mostró adaptación entre los siete y los diez días después de su siembra, observándose el crecimiento de pequeñas raíces y yemas en los nudos del tallo. Esta especie generalmente no se establece sola o dominante, se encuentra generalmente acompañada de alguna otra especie o pasto que soporte condiciones inundables. Se recomienda establecerlo con dos o tres individuos. Después de seis meses el crecimiento fue muy significativo, como se muestra en la tabla 58, pues se presentó una reproducción de dos a cuatro hijuelos por surco. Esta especie también es reportada como una especie invasora, sin embargo, en el sureste de México se ha establecido favorablemente en los humedales presentes en la región y es muy fibrosa, por lo que el porcentaje de humedad es de 8.8 ± 2.1 %. Las características de la especie se presentan en la tabla 58.

Tabla 58

Valores promedio ($\pm DE$) de las variables morfométricas de la especie *P. australis* en etapa inicial y final

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final
Peso planta (kg)	0.105 \pm 0.02	0.189 \pm 0.02
Biomasa total (kg)	3.98 \pm 0.37	12.8 \pm 0.92
No. plantas	60	152
Altura (m)	0.66 \pm 0.12	1.64 \pm 0.14
Largo hoja (cm)	11.21 \pm 1.03	17.97 \pm 7.86
Ancho hoja (cm)	1 \pm 0.25	1.65 \pm 0.09
Diámetro tallo (cm)	0.79 \pm 0.33	1.69 \pm 0.27
Largo raíces (cm)	5.41 \pm 0.73	9.43 \pm 0.92

Fuente: elaboración propia.

Pontederia sagittata

Durante la estabilización, que dura entre cuatro y seis meses, la especie *Pontederia sagittata* presenta una buena adaptación con medios de soporte neutros y es difícil su reproducción y estable-

cimiento si el agua o el medio de soporte establece condiciones alcalinas. La especie *Pontederia sagittata* presenta una humedad de 62.44 ± 4.5 %. Muestra una mayor adaptación y crecimiento en HAFS, sin embargo, presenta mucha sensibilidad a la presencia de condiciones alcalinas (9 a 10 U pH). Esta especie soporta alta cargas orgánicas y se establece favorablemente en unidades de tratamiento secundaria utilizando ambos tipos de flujo, logrando su estabilización entre tres y cuatro meses. Las características de la especie se presentan en la tabla 59.

Tabla 59

*Valores promedio ($\pm DE$) de las variables morfométricas de la especie *Pontederia sagittata* en etapa inicial y final*

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final HAFS	Etapa final HAFL
Peso planta (kg)	6.8 \pm 1.9	9.5 \pm 2.5	12.5 \pm 3.5
Largo tallo (cm)	47.8 \pm 10.4	111.2 \pm 10.0	141.2 \pm 14.0
Diámetro tallo (cm)	5.7 \pm 1.6	4.2 \pm 1.8	6.2 \pm 1.0
Largo raíz (cm)	19.6 \pm 11.4	22.4 \pm 12.3	28.4 \pm 14.4
Diámetro raíz (cm)	31.3 \pm 13.2	34.7 \pm 22.8	48.7 \pm 16.8
Número de hojas	0.0 \pm 0.0	360 \pm 9.9	41.0 \pm 6.9
No. de tallos	8.6 \pm 3.4	52.4 \pm 9.7	51.4 \pm 8.7
Largo de hojas (cm)	0.0 \pm 0.0	24.1 \pm 6.6	26.1 \pm 4.6

Fuente: elaboración propia.

Sagittaria lancifolia

La especie *Sagittaria lancifolia* presenta una buena adaptación en un periodo de cuatro meses y, al igual que la mayoría de las especies, la alcalinidad y las altas cargas de materia orgánica afectan su reproducción y adaptación; se va adaptando a dichas condiciones y se reproducen favorablemente los hijuelos de los individuos que toleraron las condiciones. Esta especie presenta un 53.2 ± 2.1 % de humedad. Tiende a crecer más, presentando mayor talla en los HAFL, el nivel de inundación la induce a crecer, estableciéndose con mayor éxito cuando está en humedales en serie en etapa terciaria. Las características de la especie se presentan en la tabla 60.

Tabla 60

Valores promedio (\pm DE) de las variables morfológicas de la especie *Sagittaria lancifolia* en etapa inicial y final

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final HAFS	Etapa final HAFL
Peso planta (kg)	2.2 \pm 1.7	3.1 \pm 1.5	4.8 \pm 1.5
Largo tallo (cm)	93.3 \pm 20.5	106.1 \pm 24.4	156.1 \pm 24.4
Diámetro tallo (cm)	7.8 \pm 2.1	8.1 \pm 0.6	12.1 \pm 0.6
Largo raíz (cm)	26.4 \pm 12.6	30.4 \pm 9.6	42.4 \pm 9.6
Diámetro raíz (cm)	23.6 \pm 11.0	34.8 \pm 14.8	44.8 \pm 14.8
Número de hojas	1.3 \pm 1.7	8.9 \pm 1.4	11.9 \pm 1.4
No. de tallos	8.5 \pm 2.5	9.5 \pm 1.6	12.5 \pm 1.6
Largo de hojas (cm)	23.8 \pm 11.3	44.8 \pm 13.5	64.8 \pm 13.5

Fuente: elaboración propia.

Sagittaria latifolia

Sagittaria latifolia presenta una buena adaptación, y la alcalinidad con altas cargas de materia orgánica afectan su reproducción y adaptación, estabilizándose se entre los tres y cuatro meses. Una vez que se reproducen los nuevos hijuelos, tolerando las condiciones de agua residual, presenta un 63.4 \pm 6.8 % de humedad. Para establecerse en HAFL requiere que los incrementos de agua dentro del humedal sean paulatinos, de manera que dé tiempo a la planta de crecer. Si se inunda repentinamente, esta especie tiende a perder individuos y solo las plantas de mayor tamaño se establecen (tabla 61).

Tabla 61

Valores promedio (\pm DE) de las variables morfológicas de la especie *Sagittaria latifolia* en etapa inicial y final

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final
No. plantas	25	63
Masa (kg)	0.70 \pm 0.35	2.90 \pm 0.36
Largo de tallo (m)	0.41 \pm 0.46	114.5 \pm 0.8
Largo de raíz (m)	10.86 \pm 3.18	22.12 \pm 4.8

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final
Diámetro de tallo (cm)	10.86±3.1	14.3±3.8
No. de hojas	6± 2.73	9.6± 3
Ancho de la hoja (cm)	12±5.3	20.67± 2.3
Largo de la hoja (cm)	14.4±3.6	23.10±8.4
Biomasa total (kg)	24.3±1.6	55±1.5
Humedad (%)		61±12

Fuente: elaboración propia.

Thalia geniculata

La especie *Thalia geniculata* genera una biomasa semanal de 2.8 ±1.6 kg/planta en peso húmedo, con un 42 % de humedad. Esta presenta mayor distribución en las áreas perturbadas de la región. Se adapta fácilmente tanto en HAFL como en HAFS. Presenta problemas en los flujos libres cuando estos operan medios de soporte con tirantes menores a 20 cm. Esto se debe a que esta planta presenta raíces muy grandes y con muchos hijuelos en su base, lo que ocasiona que, al tener mayor peso y por acción del viento, tienda a desenraizarse y sumergirse en el agua provoca su descomposición. Muestra tolerancia a cargas orgánicas de media a alta concentración y puede ser utilizado favorablemente como tratamiento secundario. Las características de la especie se presentan en la tabla 62.

Tabla 62

Valores promedio (±DE) de las variables morfológicas de la especie Thalia geniculata en etapa inicial y final

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final HAFS	Etapa final HAFL
Peso planta (kg)	7.8±0.7	12.0±1.9	19.0±1.3
Largo tallo (cm)	167.8±73.1	342.5±23.6	282.5±23.8
Diámetro tallo (cm)	8.3±1.9	6.5±2.5	4.5±0.5
Largo raíz (cm)	20.0±4.1	46.0±3.8	26.0±3.0
Diámetro raíz (cm)	26.9±10.2	186.4±28.9	123.4±25.6

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final HAFS	Etapa final HAFL
Número de hojas	3.7±2.7	57.1±16.4	37.1±14.4
No. de tallos	8.5±2.5	64.9±7.8	44.9±5.8
Largo de hojas (cm)	37.7±19.4	84.8±5.4	64.8±3.4

Fuente: elaboración propia.

Typha domingensis

La especie *Typha domingensis* es la más empleada en los HA presentes en el estado de Tabasco, ya que presenta una adaptación normal en los dos flujos. Las apariciones de nuevas hojas se presentan en ocho días, llegando a su estabilización a los seis meses, por lo que durante ese periodo no presenta mucha propagación. A partir de ese periodo se observa un crecimiento significativo, desechando biomasa vegetal de manera considerable, por lo que se considera riesgosa, ya que estos humedales se incendian durante el periodo de estiaje, posiblemente por el contenido energético de la biomasa que alcanza entre 5,000 y 6,000 Kcal/kg. Las características de la especie se presentan en la tabla 63.

Tabla 63

Valores promedio (\pm DE) de las variables morfológicas de la especie *Typha domingensis* en etapa inicial y final

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final HAFS	Etapa final HAFL
Peso planta (kg)	2.30.9	3.480.88	4.190.71
No. plantas	17	21	23
No. hojas/planta	56.2	111.14	92.18
Altura planta (cm)	124.616.5	234.614.6	226.1715.3
Largo raíz (cm)	12.1 6.0	27.1 5.7	25.1 6.1
Ancho raíz (cm)	23.32.8	43.31.07	43.31.07
Perímetro tallos (cm)	1.90.9	2.840.9	2.270.6

Fuente: elaboración propia.

Xanthosoma sagittifolium

Xanthosoma sagittifolium presentó crecimiento de nuevas hojas a los nueve días, sin embargo, la estabilización de esta especie no se logró establecer. Durante la etapa de estudio esta no presentó reproducción, teniendo poca adaptación, pues ciertos individuos perecieron debido principalmente a que los microorganismos se alimentan del fruto o raíz. Sabemos que el crecimiento de las plantas dentro de los HA está regulado por diversos factores, como carga orgánica y nutrientes presentes en el agua residual, por lo que típicamente las plantas tienen un crecimiento mayor al que consiguen en su medio natural, siendo la excepción esta especie. Las características se presentan en la tabla 64.

Tabla 64

*Valores promedio (\pm DE) de las variables morfométricas de la especie *Xanthosoma sagittifolium* en etapa inicial y final*

Parámetro	Etapa inicial	Etapa final
Biomasa de planta (kg)	0.432 \pm 0.08	9.44
Biomasa total (kg)	10.8	11.697
No. plantas	25	13
No. de Hojas	3.75 \pm 1.5	6.2 \pm 1.09
Largo de hoja (cm)	25.25 \pm 2.5	41.2 \pm 5.31
Ancho de hoja (cm)	11.75 \pm 2.36	31.4 \pm 2.96
Largo de tallo (cm)	53 \pm 3.55	81.8 \pm 5.93
Diámetro de tallo (cm)	12.25 \pm 2.21	24.8 \pm 3.83
Humedad (%)		79.14

Fuente: García & Comparán, 2018.

Capítulo 11

Recomendaciones para el manejo de humedales

Consideraciones básicas en el manejo

En la tabla 65 se muestran las observaciones y recomendaciones para mejorar la operación de estos sistemas y la calidad de las aguas residuales, además de promocionar herramientas que permitan ahorros económicos y mejoras funcionales cubriendo las necesidades de los organismos operadores y reguladores, por lo que con estas observaciones se amplía el impacto de esta biotecnología, favoreciendo la implantación de los avances tecnológicos y la conservación de los humedales naturales.

Tabla 65

Observaciones y recomendaciones para el correcto manejo y operación de los HA (factor humano, el humedal y las especies vegetales)

	Observaciones y recomendaciones
Personal	<ul style="list-style-type: none">• El personal dedicado a la operación de los HA debe tener conocimiento sobre el caudal de operación, la carga orgánica, el tiempo de retención, capacidad y flexibilidad de cada unidad de tratamiento• El jefe o encargado de operación de humedales debe tener conocimientos sobre balances de materia, medición de caudales, calidad del agua, control y manejo de plagas, higiene y seguridad, entre otros conocimientos de la ingeniería ambiental y tecnología de tratamiento de aguas residuales
Humedales	<ul style="list-style-type: none">• Se debe elegir el material correcto para la elaboración de los HA, esto con el propósito de evitar filtraciones con el paso del tiempo o que el humedal no resista el soporte y la vegetación• Para la alimentación es necesario elegir el tipo de válvula correcta que nos permita controlar el flujo de agua

Observaciones y recomendaciones

Humedales	<ul style="list-style-type: none"> • Si los HA no son operados de acuerdo con el caudal de diseño, las eficiencias de remoción serán mínimas y ocasionará malos olores, lo que representará una molestia para los seres humanos • Deben implementarse medios de soporte de canto redondo de río y de brecha sedimentaria (grava de cerro) en HA, pues reducen costos de construcción, operación y mantenimiento, son bajos en erosión y atrición y permiten un adecuado crecimiento de la biopelícula y, como consecuencia, presenta altas eficiencias de remoción • Realizar la limpieza del medio de soporte previo a su instalación para evitar colmataciones en el humedal y de esa manera optimizar la vida útil del mismo. El medio de soporte generalmente se debe limpiar cada uno o dos años, para lo cual se debe seguir un monitoreo continuo por los pozos de venteo • El mantenimiento preventivo de los HA debe ser semanal, con la finalidad de garantizar la eficiencia de remoción y que la operación del sistema sea la correcta • Es importante que exista una continua operación y mantenimiento para mantener un flujo constante del agua, verificando bases y laterales, evitando filtraciones por corrosión o asentamientos diferenciales • Para que las eficiencias se mantengan, se recomienda tener controlado el caudal de operación, de manera que se eviten sequías en el humedal o condiciones de inundación • Verificar que las válvulas se encuentren reguladas para que el humedal trabaje correctamente y cumpla con el tiempo de retención estipulado • Realizar limpieza de canaletas para evitar la obstrucción en tuberías y conexiones por desprendimiento de biomasa vegetal, para garantizar la adecuada circulación del agua a través del sistema • Se recomienda promover la reutilización del agua tratada para el riego de cultivos y jardinerías de la institución, para reducir el consumo de agua potable y de esta manera contribuir con la preservación del ambiente
Especies	<ul style="list-style-type: none"> • El establecimiento de las especies es variable, algunas se adaptan en un corto periodo (de tres a seis meses) o en algunos casos su estabilización tarda más de ocho meses, lo que depende del medio de soporte y la calidad del agua, por lo que se recomienda dar seguimiento a fin de observar el comportamiento a largo plazo (hasta un año) • Durante el proceso de estabilización es muy importante que se cuide el nivel de agua en los humedales, ya que si rebasa el nivel de las especies (<i>Sagittaria lancifolia</i> y <i>Sagittaria latifolia</i>), estas tardarán más en propagarse y corren el riesgo de empezar a morir. No exceder más de 30 cm de tirante de agua, debido a que puede causar la mortandad de más del 50 % de los individuos • Se recomienda también el monitoreo y caracterización de las especies con el fin de observar la absorción de los nutrientes y remoción de metales que absorbe cada tipo de planta, para establecer un manejo adecuado de la planta para su aprovechamiento o su tratamiento y disposición final • Cosechar las hojas secas de las plantas y retirar especies invasoras que afecten el establecimiento y remoción de contaminantes de las especies del humedal. Cortar la vegetación muerta para evitar que estas mismas aporten color y turbiedad al momento de tomar las muestras y de esa manera evitar alteraciones de corto circuito • Se recomienda realizar la poda de especies cada cuatro a seis meses, para reactivar el proceso de degradación de las plantas por la necesidad de aprovechar nutrientes • Realizar campañas de limpieza de hojas muertas pues, en tiempos de sequía, es necesario monitorear constantemente los humedales; debido a la alta densidad de biomasa aérea de ciertas especies puede presentarse un alto riesgo de incendio

Observaciones y recomendaciones

Especies

- Para el caso particular del helecho (*Acrostichum danaeifolium*), la poda no es necesaria, ya que si se realiza la vegetación muere, sin embargo, la especie tiene un método autónomo de deshacerse de las hojas que no le sirven, por lo cual es necesario estar pendientes para extraerlas oportunamente y evitar su contacto con el medio
- Se recomienda retirar de *Aquarius paniculatus* la hojarasca seca dos veces al mes, pues esta podría aportar carga orgánica nuevamente al humedal
- Los cambios de estado de tiempo y estacionales crearán problemas para las especies como la aparición de plagas o mortandad, sin embargo, la supervisión continua ayudará a reducir esta problemática
- Realizar el control de plagas para evitar la pérdida de especies en los humedales
- Limpiar constantemente los reactores para evitar la proliferación de algas que crecen por arriba del agua en el caso de los HAFL
- Cosechar y retirar cierto número (40 a 60 %) de las especies cada uno o dos años, ya que con el paso del tiempo, al tener exceso de materia orgánica se satura su capacidad de absorción y la asimilación de contaminantes en sus tejidos y decae así la actividad microbiana, haciéndose cada vez más lenta la eficiencia de remoción
- Con *Cladium jamaicense* se recomienda utilizar surcos pequeños para ayudar a una mejor distribución de la especie en toda el área superficial de tratamiento
- Especies terrestres de ornato, como *Canna indica* y *Heliconia latispatha*, pueden presentar mortandad mayor al 50 % de la especie sembrada si el agua presenta altas cargas orgánicas y no se prepara el medio de soporte con un material como arcilla en la superficie de los HAFS
- Hay generación significativa de residuos orgánicos en el proceso de operación
- Se deben cosechar las heliconias antes de los treinta días para poder darle uso en arreglos florales y se deben colocar mallas para la protección solar de las plantas o cubrir el medio de soporte superficial con algún tipo de pasto
- En la recolección de los especímenes, extraer los surcos con el sustrato del lugar de crecimiento original, para evitar el estrés de la planta al alejarlas del clima, bacterias, tipo de suelo, asociaciones vegetativas y nutrientes a los que ya están adaptados
- Para evitar la proliferación de mosquitos es necesario mantener un flujo constante de agua y evitar que se estanque en el humedal

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en las figuras 56 a 61 se muestran algunas de actividades de mantenimiento preventivo para el manejo adecuado de los humedales.



Figura 56. *Thalia geniculata* crece hasta 6 m después de seis meses de operación.

Fuente: elaboración propia.



Figura 57. Poda y extracción de plantas para recuperar volumen y porosidad del humedal.

Fuente: elaboración propia.



Figura 58. Monitoreo de las plantas para eliminar las plantas muertas y hojarasca.

Fuente: elaboración propia.



Figura 59. Una vez colmatado el humedal, se recomienda el retiro y limpieza del soporte.

Fuente: elaboración propia.



Figura 60. En cada cambio de soporte debe asegurarse que el humedal no presente filtraciones.
Fuente: elaboración propia.



Figura 61. Se deben instalar pozos de monitoreo y venteo con la distribución adecuada de las plantas.
Fuente: elaboración propia.

Fitopatologías de las especies

En la tabla 66 se presentan las observaciones y recomendaciones de fitopatologías observadas en especies durante la operación de los HA.

Tabla 66

Síntomas observados en las especies en los HA

Padecimiento	Especies	Causa	Tratamiento	Observaciones
Distorsión o deformación de las hojas y agallas	Todas con excepción de <i>Acrostichum danaeifolium</i> y <i>Cladium Jaimaicense</i>	Hongos (<i>Doassansiopsis deformans</i>)	Fungicida Amistar 50. Ingrediente activo Azoxyestrobil. A una dosis de 150 g/ha. = 150 g/200 L = 0.75 g/L. La vegetación se fumiga una vez a la semana con un aspersor de 1 L donde se agregaron los 0.75 g/L del fungicida. El tratamiento se repite dos semanas más a una dosis de 1 g/L	Estas anomalías afectan la propagación y el crecimiento de esta especie y de manera directa a la cantidad total de la biomasa generada; algunos individuos presentan mortandad
Manchas negras		Hongos del orden ustilaginales (carbones)		
Manchas foliares redondeadas de color marrón con un halo verdoso		Hongos del género <i>Cercospora</i> y <i>Alternaria</i>		

Herviboría o predación de hojas y plantas	<i>Colocasia esculenta</i> y <i>Paspalum paniculatum</i>	Pulgón amarillo (<i>Melanaphis sacchari</i>)	Para el control de la plaga del pulgón amarillo se preparó una solución jabonosa, para la cual se agregaron dos cucharadas de jabón comercial a 1 L de agua, posteriormente se aplicó en las zonas de concentración de pulgones. Este procedimiento se aplica una vez a la semana por un periodo de tres semanas	Estas especies después de tres meses de ser plantadas presentaron descomposición del tubérculo en la base del tallo y posterior muerte de la planta
Deformación y enanismo ligado a la pronta muerte	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Pulgón negro (<i>Aphis phabae</i>)		Provoca la mortandad de más del 50 % de las especies plantadas.
Reducción del crecimiento y rendimiento	<i>Cyperus odoratus</i>	Pulgón negro (<i>Aphis phabae</i>)		Reduce la capacidad fotosintética y respiratoria de la planta
Herviboría	Se presentaron todas las especies excepto en <i>Cladium jamaicense</i>	Larvas de lepidóptero (notuidae) (<i>Spodoptera frugiperda</i>) Larva de polilla (<i>Tyria jacobaeae</i>) Oruga Monarca del Sur (<i>Danaus erippus</i>) Iguana (<i>Iguana iguana</i>) Caracoles del genero licomalaria	Bioinsecticidas a base de cítricos	Se comen las hojas y plantas en general provocando mortandad de individuos, pudiendo reducir en un 40 a 60 % la población de las unidades experimentales

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en las figuras 62 a 67 se muestran algunas de las afecciones y predadores de las especies establecidas en los humedales.



Figura 62. Hongos del género *Cercospora* y *Alternaria* en *Sagittaria latifolia*.

Fuente: elaboración propia.



Figura 63. Pulgón amarillo.

Fuente: García & Comparán, 2018.



Figura 64. Hojas cortadas de *Sagittaria latifolia* por iguana iguana.

Fuente: elaboración propia.



Figura 65. Predación de *Thalia geniculata* por insecto minador.

Fuente: elaboración propia.



Figura 66. Larva spodoptera se alimenta de las plantas.

Fuente: elaboración propia.



Figura 67. Oruga de falsa monarca (*Danaus* sp.) que se alimenta de hojas.

Fuente: elaboración propia.

Capítulo 12

Manejo de residuos resultantes de la operación de HA

Los residuos generados en las plantas de tratamiento

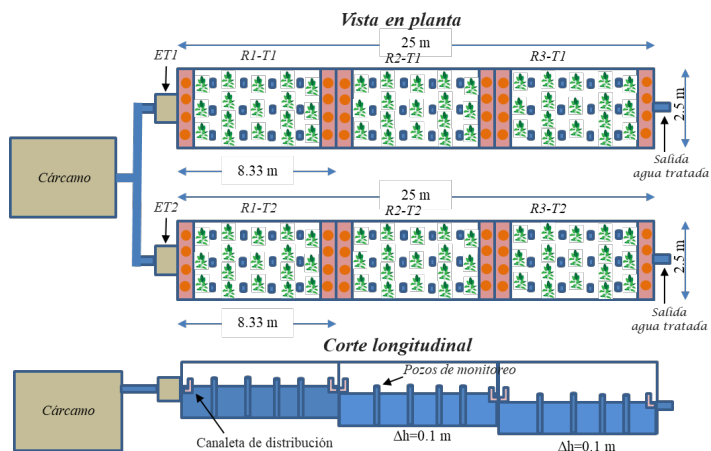
En la operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales con la tecnología de HA se generan diversos tipos de residuos en varios puntos de los sistemas, tales como el pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario. Todo sistema de tratamiento debe contar con un manejo adecuado de sus residuos de acuerdo con las disposiciones legales (plan de manejo) pues en una planta de tratamiento se generarán residuos sólidos con características urbanas, residuos sólidos de manejo especial y residuos peligrosos (LGPGIR, 2015). Estos ya no pueden disponerse de manera informal y sin tratamiento previo en terrenos baldíos, zonas inundables o cuerpos receptores, práctica común realizada en el estado de Tabasco y en muchas partes de México; hoy se debe caracterizar conforme lo establece la NOM-004-SEMARNAT-2002 y aplicar un tratamiento para la disposición final segura, aunado a un estudio de factibilidad para la valorización y minimización de los mismos integrándolos a procesos como lo establece la filosofía o regla para el cuidado del medio ambiente de las 3R que son reducir, reutilizar y reciclar.

En plantas con tecnologías de HA, en el pretratamiento de aguas residuales típicamente tendremos una generación de residuos sólidos con características urbanas (madera, plásticos, etc.), arenas, grasas y aceites provenientes de la rejilla o cribado, los desarenadores y el tanque de separación de grasas (flotación natural o forzada). Durante el tratamiento primario se recupera material de sílice (arenas

finas, limo y arcilla) con arrastre de materia orgánica, este lodo es conocido como lodo primario y como composición típica el 70 % de este material es inorgánico y un 30 % orgánico. En el tratamiento secundario se genera biomasa vegetal que debe ser retirada en el mantenimiento preventivo como es la limpieza de material muerto o marchito (semanalmente), durante la poda (de cuatro a seis meses) y durante la cosecha o eliminación de individuos (de ocho meses a un año de operación), tareas que se realizan para recuperar espacio dentro del humedal y el tiempo de retención hidráulico. También las unidades de tratamiento secundario (HAFS o HAFL) se encargarán de la remoción de materia orgánica y otros constituyentes químicos y por el tiempo de operación permanecerán dentro de las unidades de dos a cuatro años (dependiendo del diseño), llegando a la mineralización por degradación anaerobia y se generará un lodo estabilizado que debe ser extraído por lo menos cada dos años, una vez que se haya presentado colmatación parcial del medio de soporte presente en el humedal. Cuando el espacio lo permite en las plantas de tratamiento se pueden establecer celdas de humedales para la degradación de lodos proveniente de los humedales establecidos como tratamiento secundario o terciario. En el tratamiento terciario establecido con humedales se generan residuos del mismo modo que en las unidades de tratamiento secundario, como la biomasa vegetal y remoción de ciertos constituyentes, por lo que estos residuos pueden someterse al mismo manejo de que los residuos del tratamiento secundario. Es importante considerar que los humedales generan CH_4 entre otros gases, por la descomposición anaerobia de la materia orgánica, pero tienen a compensarlo por la absorción del carbono atmosférico como CO_2 .

Caso de estudio de generación de lodos en planta

A continuación, se describe la estimación de generación de residuos en un sistema de tratamiento de HA de la DACBiol-UJAT, pero presentamos en primera instancia el diagrama de procesos (figura 68) de la planta de tratamiento de aguas residuales de la DACBiol.



ET1 y ET2: Entradas a cada tren de tratamiento de HA en serie
 R1-T1 y R1-T2: Humedal artificial de flujo subsuperficial con *Pontederia sagittata*.
 R2-T1 y R2-T2: Humedal artificial de flujo libre con *Thalia geniculata*.
 R3-T1 y R3-T2: Humedal artificial de flujo libre con *Sagittaria lancifolia*.

Figura 68. Diagrama de procesos de las unidades de tratamiento aplicado en la DACBioI-UJAT.

Fuente: elaboración propia.

En las siguientes estimaciones (tabla 67) se presentan los valores promedios del gasto (flujo volumétrico, Q_{med}), las concentraciones (C) de los parámetros SST, DBO y DQO, presentando los valores correspondientes a los flujos máxicos diarios (FM) de cada sustancia.

Tabla 67

Datos de operación los HA DACBioI-UJAT

Parámetro	Valor	Unidad
Q_{med} =	0.7	LPS
Q_{med} =	60	m ³ /día
C_{SST} =	300	mg/L
C_{DBO} =	450	mg/L
C_{DQO} =	650	mg/L
FM_{SST}	18	kg/día
FM_{DBO}	27	kg/día
FM_{DQO}	39	kg/día

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 68 se presentan los valores típicos de remoción de estos contaminantes básicos, los cuales son necesarios para estimar las remociones de estas sustancias para el agua residual dentro de cada una de las unidades de proceso, para ello generalmente se estima la remoción de materia orgánica (DBO) e inorgánica (SST) presente en el agua residual.

Tabla 68

Remoción típica (%) de las unidades de proceso en el sistema de tratamiento

Unidades	% R SST	% R DBO	% R DQO
Rejillas	2.5 a 5	0	0
Desarenador	5 a 8	5 a 8	5 a 8
Desnatador	12 a 15	15 a 20	15 a 20
Fosa séptica	40 a 60	30 a 45	30 a 45
HAFS	60 a 70	70 a 80	70 a 80
HAFL	60 a 70	70 a 80	70 a 80
HAFL	60 a 70	70 a 80	70 a 80

Fuente: CONAGUA, 2019; Crites & Tchobanoglous, 2000.

En las tablas 69 y 70 se presentan la masa de entrada (ME), de salida (MS) y removida (MR) en las unidades de proceso con los valores máximos de remoción de contaminantes, posteriormente se presenta la masa total removida (MTR), la concentración final de salida del contaminante y la eficiencia total del proceso (ETP). Del mismo modo, se indica el tipo de residuo removido (ER %) en cada etapa, flujo másico de entrada (FME), salida (FMS) y removida (FMR). Al final puede verificar en código de colores los residuos sólidos urbanos (RSU), los residuos sólidos de manejo especial (RSME) y los residuos peligrosos (RP) generados en la PTAR.

Tabla 69

Remoción de sólidos suspendidos totales del proceso con eficiencia máxima

U. proceso	FME (kg/día)	FMS (kg/día)	FMR (kg/día)	ER (%)
Rejillas	18.0	17.1	0.9	5
Desarenador	17.1	15.7	1.4	8

U. proceso	FME (kg/día)	FMS (kg/día)	FMR (kg/día)	ER (%)
Desnatador	15.7	13.4	2.4	15
Fosa séptica	13.4	5.3	8.0	60
HAFS	5.3	1.6	3.7	70
HAFL	1.6	0.5	1.1	70
HAFL	0.5	0.1	0.3	70
		MTR	17.86	kg/día
		C _{SALIDA}	2.41	mg/L
Código de color		ETP	99.20	%
RSU	RSME	RP		

Fuente: elaboración propia.

Tabla 70

Remoción de materia orgánica (DBO) del proceso con eficiencia máxima

U. Proceso	FME (kg/día)	FMS (kg/día)	FMR (kg/día)	ER (%)
Rejillas	27.0	27.0	0.0	0
Desarenador	27.0	24.8	2.2	8
Desnatador	24.8	19.9	5.0	20
Fosa séptica	19.9	10.9	8.9	45
HAFS	10.9	2.2	8.7	80
HAFL	2.2	0.4	1.7	80
HAFL	0.4	0.1	0.3	80
		MTR	26.91	kg/día
		C _{SALIDA}	1.46	mg/L
		ETP	99.68	%

Fuente: elaboración propia.

En las tablas 71 y 72 se presentan las densidades de los residuos separados en las unidades del proceso (SST y DBO), la masa y el volumen de los residuos diarios en condiciones iniciales (cruda) y una vez degradada o tratada, reportada como masa y volumen netos.

Tabla 71

Residuos (SST) separados en las unidades de proceso del sistema de tratamiento

Tipos de RS	Densidad	Material crudo		Material degradado	
	(kg/m ³)	M (kg/día)	V (m ³ /día)	MN (kg/día)	VN (m ³ /día)
RSU	200	0.9	0.005	0.9	0.005
R-AS	1600	9.4	0.006	7	0.004
R-ORG	600	7.6	0.013	2	0.001
Σ		17.856	0.023	9.743	0.010

Nota: RSU: residuo sólido urbano; R-AS: residuos de arena; R-ORG: residuos orgánicos.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 72

Residuos (DBO) separados en las unidades de proceso del sistema de tratamiento

Tipos de RS	Densidad	Material crudo		Material degradado	
	(kg/m ³)	FM (kg/día)	FV (m ³ /día)	FM (kg/día)	FV (m ³ /día)
RSU	200	0.0	0.00	0.0	0.000
R-AS	1600	11.1	0.01	8	0.005
R-ORG	600	15.8	0.03	5	0.003
Σ		26.913	0.033	12.515	0.008

Nota: RSU: residuo sólido urbano; R-AS: residuos de arena; R-ORG: residuos orgánicos.

Fuente: elaboración propia.

Por último, en la tabla 73 se presentan la masa y el volumen por tipo de residuo, indicando el manejo que se establece y las indicaciones que se deben llevar a cabo tanto para el tratamiento, seguimiento normativo y la disposición o aprovechamiento final.

Tabla 73

Estimaciones de los lodos generados en la PTAR de la DACBioI-UJAT

Tipo de manejo	FM (kg/día)	FV (m ³ /día)	Observaciones
Relleno sanitario	0.900	0.005	RSU. Son residuos con características domiciliarias que en su conjunto con los residuos de este tipo por su volumen y masa son RSME
Lecho secado	9.391	0.006	RSME. Arenas que son en primera instancia secadas en lecho
	11.102	0.007	
	20.494	0.013	
Tratamiento: digestión, secado, etc.	7.564	0.013	RP. Actualmente en la DACBioI se tiene cuidado de ver que se empleen sustancias peligrosas y que no se viertan a las aguas residuales.
	15.810	0.026	
	23.374	0.039	
Reutilización	6.574	0.004	RME. Son materiales que ya se pueden utilizar para relleno de terreno o en la industria de la construcción
	7.772	0.005	
	14.346	0.009	
Disposición final	2.269	0.010	RP. Si no cumple LMP de la NOM-004- SEMARNAT -2002, se confina o encapsula, si cumple LMP pasa a reutilización. En la DACBioI no son RP, pues los metales son trazas y están dentro de los LMP
	4.743	0.003	
	7.012	0.013	

Fuente: elaboración propia.

Manejo de biomasa vegetal

Las macrófitas presentan una producción muy alta de biomasa, algunas especies pueden duplicar su peso en días en condiciones óptimas por su crecimiento acelerado (Romellón et al., 2022). En la región algunas especies se aprovechan como alimento de animales de granja, alimento para humanos, usos medicinales y artesanales, por sus bajos costos, requerimientos en cuidados, mantenimiento, entre otros, aunado a los beneficios en la depuración de contaminantes que estos organismos hacen en la PTAR de HA. En la PTAR DACBioI aproximadamente el 60 % de los residuos orgánicos (biomasa vegetal) generados al año tienen un tratamiento por compostaje con base en las recomendaciones de elaboración de compostas en huertos

y jardines del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. (CIBNOR, 2021); el resto de los materiales tienen otro tipo de disposición. A continuación, presentamos el diagrama de flujo del manejo y aprovechamiento de las especies en el Laboratorio de Tecnología del Agua DACBiol-UJAT (figura 69).

Primera etapa: Muestreo, siembra y estabilización de la especie



Segunda etapa: Manejo de las especies en la operación



Tercera etapa. Aprovechamiento del material cosechado

Venta de flores



Plantas para acuarios



Artesanías Tabasqueñas



Cuarta etapa. Cuantificación de la biomasa total y compostaje de los residuos

Balance de masas



Composteo



Figura 69. Manejo de los residuos orgánicos vegetales de la PTAR de la DACBiol-UJAT.

Fuente: elaboración propia.

Capítulo 13

La biodiversidad en los humedales de estudio

Las especies animales son importantes para el manejo de los humedales. Estos ocupan menos biomasa que las plantas en HA, pero son capaces de alterar los flujos de energía y de masa. Los brotes de plagas de insectos en HA pueden defoliar pantanos enteros y sistemas acuáticos flotantes, interrumpiendo los ciclos de minerales y alterando la calidad del agua. El enraizamiento de la alimentación inferior para peces (principalmente carpa) provoca la resuspensión de sedimentos, lo que afecta el desempeño de los HA en la remoción de SST y contaminantes asociados. La presencia de grandes poblaciones estacionales de aves acuáticas desempeña un papel significativo. La presencia de especies silvestres es generalmente de efectos positivos y roles secundarios en HA, pueden generar la presencia no deseada de personas en estas áreas y poner en riesgo la salud de estos. Los HAFL son similares a la ecología de humedales naturales y hábitats acuáticos, e inevitablemente atraen especies animales que dependen de ambientes húmedos durante parte o toda su historia de vida (EPA, 2000).

Todos los grupos de animales están representados en los HA: protozoos, insectos, moluscos, peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos. La tabla 74 resume las especies animales que pueden encontrarse en HA.

Tabla 74
Especies animales encontradas en HA

Grupo animal	Miembros del grupo comúnmente encontrado en HA	Función o importancia para el proceso de tratamiento	Consideraciones
Invertebrados, incluyendo protozoarios, insectos, arañas y crustáceos	Estará presente una amplia variedad, pero la diversidad y las poblaciones variarán por estación y espacio	Indudablemente juegan un papel en el ciclo y las transformaciones químicas y biológicas y en el soporte de la red alimentaria para los organismos superiores, pero no se han definido las funciones exactas	Se debe considerar el control de mosquitos: los monocultivos de plantas son más susceptibles a ser diezmados por infestaciones de insectos
Peces	Especies adaptadas a vivir en la superficie o cerca de ella (pez mosquito, pez del fango); especies adaptadas a vivir en aguas contaminadas (pez globo, bagre, pez killi, carpa)	Consumidores de insectos y material en descomposición (p.ej. los peces mosquito comen larvas de mosquito)	Las condiciones anaeróbicas limitarán las poblaciones; áreas de anidación requeridas; los comederos inferiores pueden desarraigar plantas y resuspender sedimentos
Anfibios y reptiles	Sapos, lagartos, serpientes, tortugas	Consumidores de organismos inferiores	Las tortugas tienen una habilidad asombrosa para caer en las estructuras de control de agua y quedar atrapadas en las tuberías, por lo que se necesitan dispositivos de exclusión de tortugas; es necesario monitorear las estructuras de control y los diques para detectar daños u obstrucciones
Aves	Una gran variedad (35-63 especies) está presente, incluidas especies de bosques y praderas, así como aves acuáticas, pero la diversidad y las poblaciones varían estacional y espacialmente	Consumidores de organismos inferiores	El uso intensivo, especialmente por aves acuáticas migratorias, puede contribuir a la carga de contaminación estacional

Grupo animal	Miembros del grupo comúnmente encontrado en HA	Función o importancia para el proceso de tratamiento	Consideraciones
Mamíferos	Pequeños roedores (musarañas, ratones, campañoles); grandes roedores (conejos, nutrias, ratas almizcleras, castor); grandes herbívoros (ciervos); grandes carnívoros (zarigüeyas, mapaches, zorros)	Consumidores de plantas y organismos inferiores	Las poblaciones de nutria y rata almizclera pueden alcanzar niveles molestos, eliminando la vegetación y destruyendo los diques; es posible que se requieran controles estructurales y remoción de animales

Fuente: McAllister, 1992, 1993a, 1993b.

El manejo de especies silvestres en los HA requiere mantener un equilibrio entre atraer beneficios y controlar especies de plagas (EPA, 1993a). La mayoría de las especies silvestres en los humedales son atractivas, pero a menudo desapercibidas, muchas especies son atractivas para la estética, pero en ocasiones afectan el éxito del HA. Las especies perjudiciales en los humedales incluyen roedores excavadores (cavan madrigueras y consumen vegetación emergente beneficiosa), mosquitos (causan molestias y problemas de salud), y ciertos peces que se alimentan en el fondo (arrancan vegetación y remueven los sedimentos resuspendiendo contaminantes en la columna de agua), aves acuáticas en gran número (causan problemas similares y sus excrementos aportan nutrientes en el agua de humedales).

A continuación, en las tablas 75 a 107 se reportan las especies encontradas en los HA de la DACBiol-UJAT.

Insectos

Tabla 75

Ficha técnica de Danaus sp.

Nombre científico	<i>Danaus sp.</i>
Nombre común	Falsa monarca
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insecta, insectos
Orden	Lepidoptera, lepidópteros
Familia	Nymphalidae, ninfálidos
Género	Danaus
Especie	<i>Danaus sp.</i>
Observaciones	<p>La mariposa falsa monarca es de las más extendidas en América y realiza una larga migración anual a los bosques mexicanos. Su tamaño va de 9 a 10 cm. Los machos son más grandes con una mancha en las alas, las hembras presentan marcas negras. En su hábitat natural se alimentan del néctar de flores y necesitan la planta <i>asclepia</i> (algodoncillo). Ponen sus huevos en el algodoncillo y las orugas se alimentan de esta al nacer, ofreciendo a las mariposas una defensa natural contra los depredadores, ya que la mariposa se vuelve tóxica o al menos de mal sabor para sus depredadores</p>

Fuente: Biodiversidad mexicana.

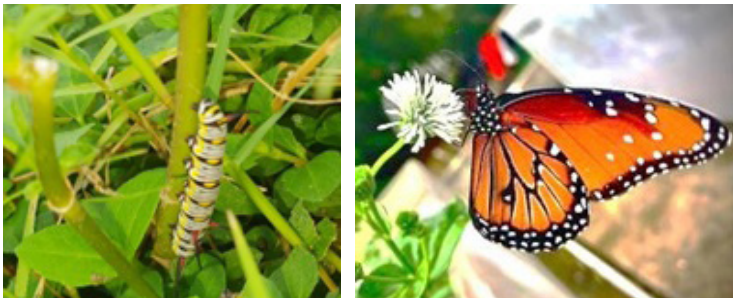


Figura 70. Oruga (izquierda). Mariposa falsa monarca (derecha).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 76

Ficha técnica de Manduca sexta

Nombre científico	<i>Manduca sexta</i>
Nombre común	Gusano del tabaco
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insecta, insectos
Orden	Lepidoptera, lepidópteros
Familia	Sphingidae
Género	<i>Manduca</i>
Especie	<i>M. sexta</i> (LINNAEUS, 1763)
Observaciones	Durante su estadio larval se alimenta de papa, tabaco, tomate y otras plantas de la familia Solanaceae y durante su estadio adulto consume néctar de algunas flores. Tiene un ciclo de vida de 30 a 50 días y comprende cinco estadios principales: huevo, larva, pre-pupa, pupa y adulto. La falta de alimento evita la metamorfosis (larva) para transformarse en pupa

Fuente: Enciclovida.



Figura 71. Gusano de tabaco (*Manduca sexta*).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 77

Ficha técnica de Dinia eagrus

Nombre científico	<i>Dinia eagrus</i>
Nombre común	Polilla imitadora de la avispa de punta escarlata
Reino	Animalia, animales

Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insecta, insectos
Orden	Lepidoptera, lepidópteros
Familia	Dinia
Género	<i>Dinia eagrus</i>
Especie	La especie fue descrita por primera vez por Pieter Cramer en 1779. La envergadura puede alcanzar unos 30 milímetros (1.2 pulgadas). Las alas son hialinas (como el vidrio), excepto por las venas y el borde marrones y una marca marrón en las alas anteriores. El cuerpo es marrón negrozco con algunas rayas azules metalizadas, peludos, planos y anchos. El abdomen es negro y largo con márgenes y punta de color rojo brillante. Esta especie se puede encontrar en México, Guatemala, Costa Rica, Nicaragua, Panamá, Honduras y Río de Janeiro, Brasil
Observaciones	Polilla imitadora de la avispa de punta escarlata

Fuente: Wikiwand.

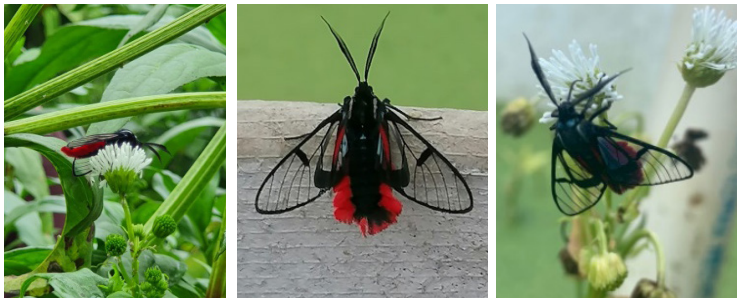


Figura 72. Polilla avispa de cuerpo escarlata (*Dinia eagrus*).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 78

Ficha técnica de *Nannotrigona perilampoides*

Nombre científico	<i>Nannotrigona perilampoides</i>
Nombre común	Abeja sin aguijón, abeja melipona, Bo'ol (maya)
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insecta, insectos
Orden	Hymenoptera
Familia	Apidae

Tribu	Meliponini
Género	Nannotrigona
Especie	<i>Nannotrigona perilampoides</i>
Observaciones	Abeja mexicana sin aguijón que habita desde regiones costeras hasta los 1,200 metros de altitud. Mide 4 mm, normalmente son tímidas y huidizas. Los nidos son cubiertos y la entrada es un tubo de cerumen blando, claro, de entre 5 a 20 cm de longitud visible y perforados hacia la punta. Nidifican en arboles vivos. No es una especie que se emplee para la producción de miel

Fuente: iNaturalist.

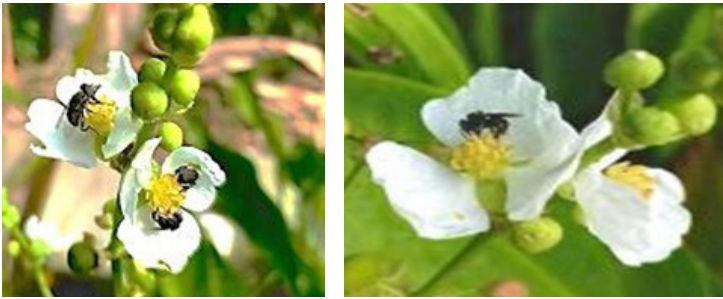


Figura 73. Abeja melipona (*Nannotrigona perilampoides*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 79

Ficha técnica de *Cycloneda sanguínea*

Nombre científico	<i>Cycloneda sanguínea</i>
Nombre común	Vaquita roja
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insecta, insectos
Orden	Coleoptera
Familia	Coccinellidae
Género	Cicloneda
Especie	<i>Cycloneda sanguínea</i> (Linneo, 1763)

Observaciones

Es un depredador de insectos muy eficiente como agente de control biológico por su voracidad, respuesta funcional y respuesta numérica. Cuerpo de forma esférica (oval). Los élitros son lisos y pulidos en su superficie, en la base de estos, hacia la parte central, tienen dos puntos de color blanco hasta la unión de estos. Los adultos como las larvas son importantes depredadores de insectos. Es una especie afidófaga, controlan otras plagas, fundamentalmente puestas de lepidópteros

Fuente: EcuRed.

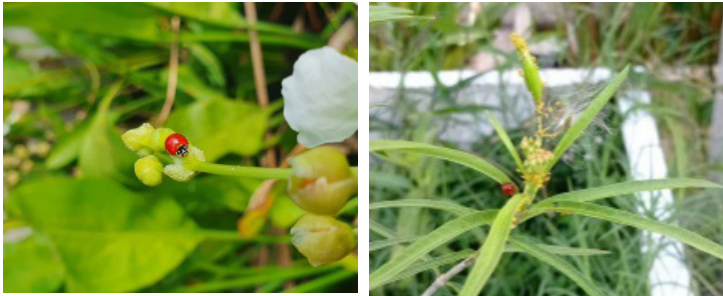


Figura 74. Vaquita roja (*Cycloneda sanguinea*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 80

Ficha técnica de *Corydalus cornutus*

Nombre científico	<i>Corydalus cornutus</i>
Nombre común	Mosca Dobson
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insecta, insectos
Orden	Neuroptera
Familia	Corydalidae
Género	Corydalus
Especie	<i>Corydalus cornutus</i>

Observaciones

Las moscas Dobson se caracterizan por un cuerpo cilíndrico largo con patas cortas. Los machos suelen poseer mandíbulas bien desarrolladas, que en algunas especies se utilizan en la lucha y la defensa. Las larvas, a veces conocidas como *hellgrammites* o *toe-biters*, son acuáticas y se las comen los peces, especialmente la lubina; a menudo los pescadores los utilizan como cebo para peces. Las larvas maduras migran de su hábitat de agua dulce al suelo húmedo, musgo o vegetación en descomposición cerca del agua para formar células pupales de las que emergen los adultos. Las larvas grandes y viejas pueden medir hasta 8 cm de largo, tienen piezas bucales fuertes para morder y son feroces depredadores de otros insectos acuáticos y pequeños invertebrados. Las larvas de megaloptera son un componente importante de la fauna de macroinvertebrados de los arroyos y sirven como indicadores ambientales bióticos debido a su alta intolerancia a la contaminación del agua

Fuente: Britannica.



Figura 75. Mosca Dobson (*Corydalus cornutus*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 81

Ficha técnica de Dysdercus

Nombre científico	<i>Dysdercus</i>
Nombre común	Chinche Pyrrhocoridae, gran chinche de algodoncillo
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insecta, insectos
Orden	Hemiptera
Familia	Pyrrhocoridae
Género	<i>Dysdercus</i>

Observaciones

Conocidos como "bichos de algodón rojo". Son confundidos con insectos de la familia *Lygaeidae*, pero se distinguen por la ausencia de ojos simples u ocelos en la cabeza. Se diferencian de otros géneros de *Pyrhocoridae* por las marcas blancas en el cruce de la cabeza y el tórax. Este es un insecto de tipo picador. Los adultos alcanzan la madurez sexual rápidamente, copulando a los 2 o 3 días después de su aparición. La hembra inicia la oviposición de 7 a 12 días después de la cópula, deposita sus huevos en diversos lugares que ofrecen humedad y protección, como el suelo húmedo, sobre residuos vegetales, bajo terrones de tierra, entre la hojarasca e incluso en las bochas del algodónero. En cada puesta, coloca entre 50 y 70 huevos. Dada su capacidad para ser fecundada nuevamente y realizar hasta 10 posturas, una sola hembra puede llegar a ovipositar alrededor de 500 a 600 huevos a lo largo de su vida. Las ninfas recién eclosionadas se congregan en el sitio de nacimiento, donde se alimentan de las hojas caídas del algodónero o succionan sustancias nutritivas de la parte basal del tallo o de las bochas (cápsulas del algodón). Tras completar su tercera muda de piel, las ninfas ascienden por la planta y se dispersan en busca de alimento. Su desarrollo ninfal comprende cinco estadios, con una duración total que oscila entre 21 y 34 días. Estas chinches son una plaga para el cultivo de algodón. Tanto en su etapa adulta como en los estadios ninfales del segundo al quinto, se alimentan de las semillas y las cápsulas de algodón. Este ataque provoca la aparición de manchas amarillas o marrones en las fibras del algodón, lo que reduce su calidad y valor comercial

Fuente: Wikiwand; argentina.gob.ar



Figura 76. Gran chinche del algodoncillo (*Dysdercus*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 82

Ficha técnica de Dryadula phaetusa

Nombre científico	<i>Dryadula phaetusa</i>
Nombre común	Mariposa bandas naranja, tigre de la granadilla
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insecta, insectos
Orden	Lepidoptera
Familia	Nymphalidae
Género	Dryadula
Especie	<i>Dryadula phaetusa</i> (Linnaeus, 1758)
Observaciones	<p>Esta mariposa tiene una envergadura de aproximadamente 40-41 mm y no muestra diferencias notables entre machos y hembras (sin dimorfismo sexual). Sus alas delanteras son principalmente anaranjadas con tres franjas negras longitudinales, puntos anaranjados y una franja negra central. El cuerpo es púrpura oscuro y espinoso. Dorsalmente, el macho es naranja brillante con líneas negras definidas, mientras que la hembra es más opaca con líneas negras difusas. Los adultos se alimentan del néctar de varias flores (como <i>Hirtella racemosa</i>, <i>Lantana camara</i>, <i>Stachytarpheta jamaicensis</i>) y de excrementos de aves para obtener sales minerales. Las larvas se alimentan de plantas como <i>Passiflora talamancensis</i> y especies de <i>Tetrastylis</i>, donde las hembras depositan huevos individuales. Las orugas dejan marcas de masticación en estas plantas. Los adultos suelen descansar en grupos pequeños sobre la hierba y vuelan durante todo el año. Esta especie se encuentra desde el nivel del mar hasta los 1,500 msnm, distribuyéndose desde Kansas hasta Brasil, en campos abiertos, pastizales y áreas alteradas</p>

Fuente: UNAM; Universidad Francisco Marroquín.

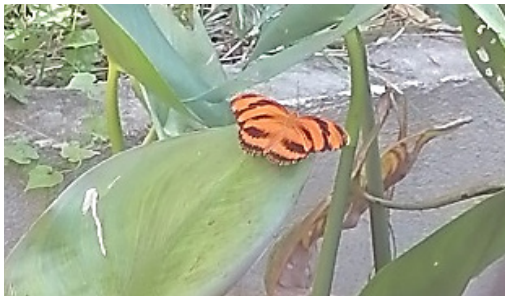


Figura 77. Mariposa bandas naranja, tigre de la granadilla (*Dryadula phaetusa*).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 83

Ficha técnica de Phyciodes phaon

Nombre científico	<i>Phyciodes phaon</i>
Nombre común	Mariposa luna faón
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insectos
Orden	Lepidopteros
Familia	Nymphalidae
Género	Ficiodes
Especie	<i>Phyciodes phaon</i>

Observaciones

Las alas anteriores son de color naranja oscuro y negro con una banda mediana de color crema pálido. La parte inferior de las alas traseras es de color crema a amarillento; las mariposas de primavera y otoño tienen un ala trasera gris. Los machos patrullan durante el día cerca de la planta hospedante. Los huevos se depositan en pequeños grupos en el envés de las hojas de la planta huésped; las orugas comen hojas. Suelen habitar en aberturas en bosques espinosos, áreas abiertas con plantas muy cultivadas, dunas, pastizales, bordes de caminos. Se distribuyen al norte de Guatemala por Cuba y México hasta el sur de California a través del sur de Texas y Florida hasta la costa de Carolina del Sur. Se desvía hacia el este de Colorado, Nebraska, Kansas y Missouri

Fuente: Butterflies and Moths of North America.

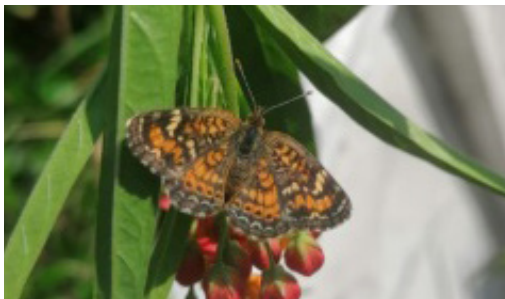


Figura 78. Mariposa luna faón (*Phyciodes phaon*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 84

Ficha técnica de Polites vibex

Nombre científico	<i>Polites vibex</i>
Nombre común	Saltarina remolino
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insectos
Orden	Lepidopteros
Familia	Hesperiidae
Género	Cortes
Especie	<i>Polites vibex</i>

Observaciones

Los machos y las hembras son muy diferentes. La parte superior del macho es de color amarillo anaranjado; el ala anterior tiene un estigma negro y un parche cuadrado negro vecino; los márgenes negros de las alas traseras son lisos por dentro. La parte inferior es de color amarillo anaranjado; el ala trasera tiene algunas manchas negras grandes y borrosas. En el caso de las hembras, el ala superior es marrón oscuro; el ala anterior tiene algunos puntos claros. La parte inferior es gris o amarillo hollín con una mancha pálida central delineada con escamas oscuras. El vuelo adulto es rápido y veloz. Las hembras suelen encontrarse en claros o bordes de bosques; los machos se posan para esperar a las hembras durante la tarde. Las orugas viven en un tubo de hojas unidas como seda y se alimentan principalmente de noche. Habitan en matorrales o abiertos que incluyen dunas, campos, pinares, bordes de caminos, claros de bosque, patios y parques. Las podemos encontrar al sureste de los Estados Unidos y las Indias Occidentales al sur a través del este de México y Centroamérica hasta Argentina. Periódicamente se desvía hacia el norte hacia el noreste de Iowa, el norte de Ohio y Connecticut

Fuente: Butterflies and Moths of North America.

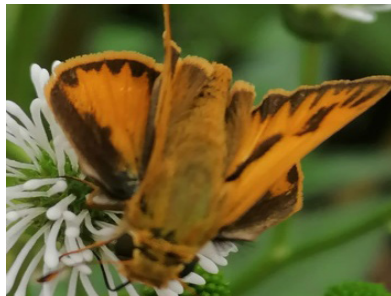


Figura 79. Saltarina remolino (*Polites vibex*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 85

Ficha técnica de Anartia fatima

Nombre científico	<i>Anartia fatima</i>
Nombre común	Mariposa luna faón
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insecta
Orden	Lepidoptera
Familia	Nymphalidae
Género	Anartia
Especie	<i>Anartia fatima</i>
Observaciones	<p>La parte superior es marrón. Las alas anteriores tienen bandas medianas y submarginales de color crema o blanca o una banda mediana roja quebrada.</p> <p>Los machos patrullan por las hembras receptivas. Los huevos se depositan en los sépalos y brácteas de los racimos florales. Vuelan durante todo el año en el sur de Texas. Se alimentan del néctar de las flores. Pueden habitar en áreas subtropicales abiertas y perturbadas, como campos, lugares con maleza, huertos y vegetación secundaria. Se distribuyen desde Panamá al norte a través de Centroamérica hasta México. Vaga y ocasionalmente coloniza el centro y sur de Texas</p>

Fuente: Butterflies and Moths of North America.



Figura 80. Mariposa luna faón (*Anartia fatima*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 86

Ficha técnica de Cornops acuaticum

Nombre científico	<i>Cornops acuaticum</i>
Nombre común	Saltamontes jacinto de agua
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insecta
Orden	Ortópteros
Familia	Acrididae
Género	<i>Cornops</i>
Especie	<i>Cornops acuaticum</i>

Observaciones

Es considerada una especie benéfica porque se alimenta de malezas acuáticas. De las plantas hospedadoras que sirven como alimento a los insectos de esta especie, la preferida es el camalote *Eichhornia azurea*, *Eichhornia crassipes*, *Pontederia cordata*. Oligófago. Dicotiledóneas: *Commelina* sp., *Reussia* sp., *Zebrina* sp., *Echinodorus* sp., *Eleocharis* sp. Esta especie se distribuye sin prejuicios económicos: Argentina, Uruguay y México

Fuente: Acridomorph.

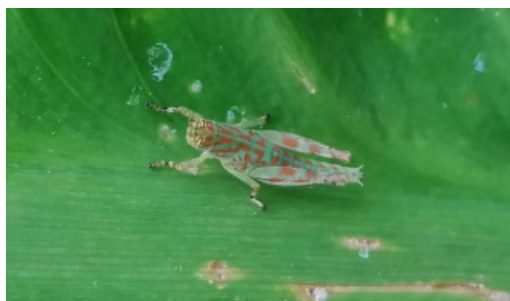


Figura 81. Saltamontes jacinto de agua (*Cornops acuaticum*).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 86

Ficha técnica de Rhetus arcus

Nombre científico	<i>Rhetus arcus</i>
Nombre común	Doctor cola de espada o mariposa de cola larga
Reino	Animalia, animales

Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insecta
Orden	Lepidoptera
Familia	Riodinidae
Género	<i>Rhetus</i>
Especie	<i>Rhetus arcus</i>

Observaciones

Las mariposas de este género *Rhetus* se destacan por sus palpos cortos y por tener un hermoso brillo azul en la superficie de las alas. Se encuentra desde México hasta Perú, generalmente solo en la vecindad de arroyos o zanjas. Ocurre en hábitats de selva tropical y bosques nubosos en altitudes entre 0 y 1,200 m, pero es más común entre 400 y 800 m. La mariposa se puede ver durante todo el año. Los huevos son blancos y se ponen individualmente en tallos o axilas de las hojas. Las plantas alimenticias son *Terminalia amazónica* (Combretaceae) y *Mabea occidentalis* (Euphorbiaceae). Las mariposas tienen un vuelo muy rápido y errático. Los machos posan debajo de las hojas a una altura de entre 3 y 8 m sobre el suelo temprano en la mañana. Más tarde, presumiblemente después de que se haya producido el apareamiento, descienden al nivel del suelo para empaparse de lodo húmedo

Fuente: Learn About Butterflies.



Figura 82. Mariposa de cola larga (*Rhetus arcus*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 88

Ficha técnica de *Anartia jatrophae*

Nombre científico	<i>Anartia jatrophae</i>
Nombre común	Pavo real blanco
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos

Clase	Insecta
Orden	Lepidoptera
Familia	Nymphalidae
Género	Anartia
Especie	<i>Anartia jatrophae</i>

Observaciones

La parte superior es blanca con marcas de color marrón y una doble fila de medias lunas claras en los márgenes. Las alas anteriores tienen una mancha redonda y negra; tiene dos ala traseras. La forma del ejemplar de la estación seca (invierno) es más grande y pálida; mientras que la de la estación húmeda (forma de verano) es más pequeña y oscura. Los machos patrullan y ocasionalmente se posan para encontrar hembras. Los huevos se ponen solos cerca de la planta huésped o debajo de sus hojas. Las podemos encontrar en áreas abiertas y húmedas como bordes de estanques y arroyos a lo largo de las zanjas poco profundas, campos cubiertos de maleza y parques. Se distribuyen desde el norte de Argentina central, México y las Indias Occidentales hasta el sur de Texas y el sur de Florida. Migra y coloniza temporalmente el centro de Texas y la costa de Carolina del Sur

Fuente: Butterflies and Moths of North America.



Figura 83. Pavo real blanco (*Anartia jatrophae*).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 89

Ficha técnica de *Theretra oldenlandiae*

Nombre científico	<i>Theretra oldenlandiae</i>
Nombre común	La polilla del halcón impatiens
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Insectos

Orden	Lepidoptera
Familia	Esfingidos
Género	<i>Theretra</i>
Especie	<i>Theretra oldenlandiae</i>

Observaciones

Las podemos encontrar en India, Sri Lanka, China, Borneo, Japón, Filipinas, Tailandia y Australia. Fue descrito por Johan Christian Fabricius en 1775. La especie se diferencia de *Theretra lycetus* en que es de color marrón grisáceo sin un matiz rosado y las dos líneas dorsales en el abdomen son de color blanco plateado. También hay rayas oblicuas en las alas anteriores y los lados del abdomen son de color ocre, no dorado. Ala posterior con la banda submarginal ocre y estrecha. La larva es de color marrón violáceo pálido. Hay una línea subdorsal amarilla y manchas blancas con una línea lateral pálida debajo de ellas en los somitas torácicas. Se pueden ver los ocelos con anillos negros en las somitas 4 a 40, donde los dos primeros están centrados con azul y los posteriores con púrpura. En los primeros estadios, los ocelos posteriores están centrados con color carmesí con bandas dorsales de motas amarillas. La especie se encuentra en hábitats abiertos de tierras bajas

Fuente: Atlas of Living Australia.



Figura 84. La polilla del halcón impatiens (*Theretra oldenlandiae*).
Fuente: elaboración propia.

Arácnidos

Tabla 90

Ficha técnica de Leucauge argyra

Nombre científico	<i>Leucauge argyra</i>
Nombre común	La araña de jardín
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Arachnida
Orden	Araneae
Familia	Tetragnathidae
Género	Lecauge
Especie	<i>Leucauge argyra</i>

Observaciones

Es una araña huésped de *Hymenoepimecis argyraphaga*, una avispa parasitoide costarricense o puertorriqueña. Se encuentra en Asia, Estados Unidos y Brasil. Se sabe que es una especie colonial, con arañas que mantienen territorios individuales/telarañas orbiculares dentro de un andamiaje de líneas de apoyos compartidos mantenidos por el grupo. Las colonias de individuos multigeneracionales a menudo presentan niveles de estratificación de tamaño. Esta especie tiene tres líneas en el abdomen que corren paralelas solo a la mitad del abdomen, dentro de los dos exteriores se doblan hacia dentro antes de continuar paralelas nuevamente por el resto del abdomen. La telaraña de los juveniles tiene una maraña superior con hilos que la conecta con el eje y ocasionalmente otra maraña debajo de la telaraña orbe, pero estas marañas están ausentes en las telarañas de los adultos. La maraña superior consta de unos pocos hilos que cubren solo una sección estrecha en el medio de la noche

Fuente: JungleDragon.



Figura 85. La araña de jardín (*Leucauge argyra*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 91

Ficha técnica de *Pisaurina mira*

Nombre científico	<i>Pisaurina mira</i>
Nombre común	Araña de tela de vivero
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Arachnida
Orden	Araneae
Familia	<i>Pisauridae</i>
Género	<i>Pisaurina</i>
Especie	<i>Pisaurina mira</i>

Observaciones Las hembras crean una telaraña de seda como una especie de vivero para cuidar a sus crías. Se encuentran en todo el mundo, excepto en ambientes extremadamente secos o fríos, y son comunes en casi todas partes. Pueden caminar sobre la superficie de cuerpos de agua quietos e incluso sumergirse temporalmente bajo la superficie para escapar de los enemigos. Pueden saltar distancias de 130 a 150 mm, pero tienen problemas en superficies lisas como el vidrio. Como todas las arañas, ayudan a controlar insectos, no son dañinas para los humanos, su mordedura no puede más que matar a un pez pequeño

Fuente: Animal Diversity Web.



Figura 86. La araña de tela de vivero (*Pisaurina mira*).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 92

Ficha técnica de Micrathena sagittata

Nombre científico	<i>Micrathena sagittata</i>
Nombre común	Araña punta de flecha
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	Arachnida
Orden	Araneae
Familia	<i>Araneidae</i>
Género	<i>Micrathena</i>
Especie	<i>Micrathena sagittata</i> . Esta especie fue descrita por Walckenaer en 1841
Observaciones	El macho mide 0.42-0.47 cm de longitud, tiene el carapacho café, patas marrón opistosoma y el vientre negro y marrón. La hembra mide 0.81 cm de largo, tiene carapacho marrón con un margen lateral pálido, patas marrón, abdomen blanco a amarillo o naranja. Se distribuye de Estados Unidos hasta México, Centroamérica y el noreste de Sudamérica. Es de hábitat terrestre y vive en cultivos de algodón, cerca de arroyos y humedales, huertos de durazno, bosques de palma y en cualquier arbusto de altura media

Fuente: Enciclopedia.

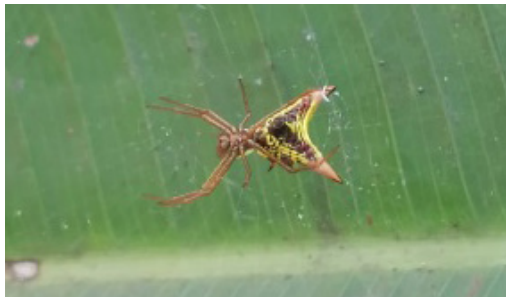


Figura 87. La araña punta de flecha (*Micrathena sagittata*).
Fuente: elaboración propia.

Diplópodos

Tabla 93

Ficha técnica de Diplopoda

Nombre científico	<i>Diplopoda</i>
Nombre común	Milpiés
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda, artrópodos
Clase	<i>Diplopoda</i>
Familia	Diplopo
Especie	<i>Diplopoda</i>

Observaciones

Conocido como milpiés, aunque las patas no superan las 750, la mayoría tienen menos de 200; el récord lo ostenta la especie *Illacme plenipes* de California, con 375 pares de patas. Se conocen más de 12,000 especies, siendo uno de los grupos más diversos de organismos terrestres. Se les confunde como parientes de ciempiés y son una clase distinta. Se diferencian entre ellos, principalmente, en que casi todos los segmentos del tronco llevan dos pares de patas, mientras que los ciempiés solo tienen un par por segmento. La mayoría de miriápodos son pequeños, de centímetros de longitud, pero también hay especies tropicales gigantes que alcanzan longitudes hasta 30 cm. Carecen de aparato inoculador de veneno, pero muchos diplópodos tienen una hilera de glándulas en los costados que segregan sustancias químicas pestilentes e irritantes cuando son molestados, producen erupciones en la piel humana; puede ir acompañado de actitudes defensivas como enroscarse en forma de bola o espiral, huyen de la luz y prefieren los lugares cálidos y húmedos, se mueven lentamente, sus patas les proporcionan energía suficiente para escarbar entre las hojas caídas y remover el suelo en busca de plantas blandas o en descomposición para alimentarse. Son importantes recicladores, pues devuelven sustancias químicas al suelo para que las plantas vuelvan a utilizarlas. En los jardines y zonas urbanas son considerados una plaga

Fuente: EcuRed.



Figura 88. Milpiés (*Diplopoda*).
Fuente: elaboración propia.

Moluscos

Tabla 94

Ficha técnica de Bithynia tentaculata

Nombre científico	<i>Bithynia tentaculata</i>
Nombre común	Bitinia del barro
Reino	Animalia, animales
Filo	Mollusca
Clase	Gastropoda
Orden	Littorinimorpha
Familia	Bithyniidae
Género	Bithynia
Especie	<i>Bithynia tentaculata</i> (LINNAEUS, 1758)
Observaciones	Gasterópodo con la concha de 7-13 x 5-9 mm, amarillenta, a menudo cubierta con una capa parda o negruzca, con 5 vueltas de espiral no muy convexas con una sutura profunda, con una apertura y el opérculo apuntados. Habita en aguas dulces ricas en calcio como estanques, lagos pocos profundos y canales, vive en grava, arena, arcilla, barro, rocas y en macrófitas acuáticas hasta profundidades de 5 m. Se alimenta raspando el sustrato con su rádula y utiliza las branquias para filtrar las partículas suspendidas en el agua

Fuente: Asturnatura.

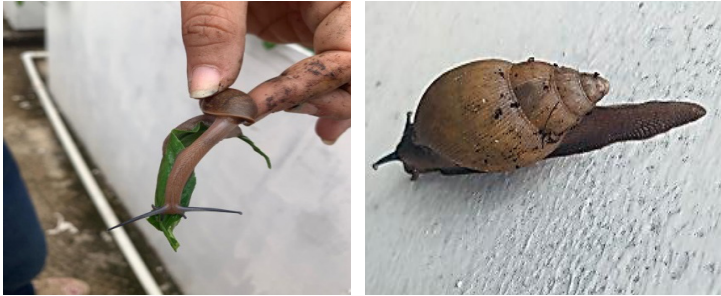


Figura 89. Bitinia del barro (*Bithynia tentaculata*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 95

Ficha técnica de *Pomacea canaliculata*

Nombre científico	<i>Pomacea canaliculata</i>
Nombre común	Caracol manzano
Reino	Animalia, animales
Filo	Mollusca
Clase	Gastropoda
Orden	Architaenioglossa
Familia	Ampollaridae
Género	Pomaceae
Especie	<i>Pomacea canaliculata</i> (Lamarck,1828)
Observaciones	Es un molusco gastrópodo de agua dulce de las lagunas y arroyos. Puede sobrevivir a periodos de sequía (condición anfibia). Puede hibernar, permaneciendo de 4 a 5 meses hasta que vuelvan las condiciones ambientales favorables. Es carroñera o predadora de otros caracoles, se alimentan de una amplia gama de vegetales. Esta especie exótica invasora fue introducida para cultivarla y utilizarla como alimento, tal como se hace en el sureste asiático. Debido a un problema de palatabilidad de este caracol no tuvo mercado en la población y su cultivo fue abandonado. Esta y <i>P. canaliculata</i> , invadieron diferentes áreas y países, causando una pérdida de millones de dólares por la devastación de los arrozales. Forma parte de las "100 de las especies exóticas invasoras más dañinas del mundo"

Fuente: Malacología.



Figura 90. Caracol manzano (*Pomacea canaliculata*).
Fuente: elaboración propia.

Crustáceos

Tabla 96

Ficha técnica de *Faxonius virilis*

Nombre científico	<i>Faxonius virilis</i>
Nombre común	El cangrejo de río viril
Reino	Animalia, animales
Filo	Arthropoda
Clase	Malacostra
Orden	Decapoda
Familia	Cambaridae
Género	Faxonius
Especie	<i>Faxonius virilis</i>

Observaciones	<p>El cangrejo de río viril, se reclasificó en agosto de 2017 y el género se cambió de <i>Orconectes</i> a <i>Faxonius</i>. Es un cangrejo de río de agua dulce que puede tolerar salinidades de agua salubre de hasta al menos 14 PSU. Es nativo de los grandes lagos, el sur del Océano Ártico y los drenajes del norte de Mississippi desde el norte de Arkansas, y Tennessee hasta Alberta y el sureste de Quebec, con las poblaciones que se extienden hacia el oeste en el drenaje del Mississippi hasta Montana y Colorado. También se ha encontrado en México, New Brunswick, Inglaterra y los Países Bajos. En algunas partes de su área de distribución, se ha informado que <i>O. virilis</i> desplaza a las especies nativas de cangrejos de río. Historia de la invasión: primer registro de mareas no nativas de América del Norte: 1959. Primer registro de mareas no nativas de la costa oeste: 1959. Primer registro de mareas no nativas de la costa oeste/del Golfo: 1960</p>
---------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Invasion History.



Figura 91. El cangrejo de río viril (*Faxonius virilis*).
Fuente: elaboración propia.

Peces

Tabla 97

Ficha técnica de Vieja melanura

Nombre científico	<i>Vieja melanura</i>
Nombre común	Mojarra paleta
Reino	Animalia, animales
Filo	Chordata
Clase	Actinopterygii
Orden	perciformes
Familia	Cichlidae
Género	Vieja
Especie	<i>Vieja melanura</i>
Observaciones	Cíclido quetzal, cíclido pelirrojo o cíclido cabeza de fuego, es una especie de cíclido originaria de América central. Se distribuye en el río Usumacinta y río Grijalva en los países de México, Belice y Guatemala, así como en arroyos y lagunas. Puede alcanzar una longitud de 35 cm. También es popular en el comercio de los acuarios

Fuente: Fishipedia



Figura 92. Mojarra paleta (*Vieja melanura*).
Fuente: elaboración propia.

Reptiles

Tabla 98

Ficha técnica de Kinosternon leucostomum

Nombre científico	<i>Kinosternon leucostomum</i>
Nombre común	Pochitoque, chachagua o, a nivel nacional, casquito o casquito de labios blancos
Reino	Animalia, animales
Filo	Chordata
Clase	Reptilia
Orden	Testudines
Familia	Kinosternidae
Género	Kinosternon
Especie	<i>Kinosternon leucostomum</i> (Dumeril & Bibron, 1851)

Observaciones

Esta especie la podemos encontrar en el sur de Guatemala, Belice, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Colombia y Ecuador y fue descubierta en 1851 de la mano de Dumeril y Bibron. Entre sus características podemos denotar su caparazón marrón y liso; por otra parte, su plastrón es amarillo y con uniones de color negro. Su longitud máxima es de 190 mm en los machos, mientras que son más grandes las hembras. Son animales con actividad nocturna y de día prefieren tomar el sol permaneciendo inmóviles. Su alimentación es omnívora e incluye insectos, anfibios como ranas y renacuajos, peces, moluscos, crustáceos, plantas acuáticas, hojas, talos y carroña, les gusta habitar en pantanos y zonas arenosas con alta vegetación, pero tienen la gran capacidad de adaptarse a casi todos los cuerpos de agua. Actualmente se encuentran en la Norma 59 de protección de la SEMARNAT modificada en 2010 como una especie bajo protección especial, además, dicha norma aboga por factores que puedan afectar la población de esta tortuga. Sin embargo, la reducción de su hábitat y la contaminación han mermado en gran medida su población. Su estatus de conservación es de preocupación menor

Fuente: DeTortugas; Zenteno et al., 2001; Cázares Hernández, 2015.



Figura 93. Tortuga de pantano labios blancos (*Kinosternon leucostomum*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 99

Ficha técnica de Trachemys venusta

Nombre científico	<i>Trachemys venusta</i>
Nombre común	Hícotea, jícotea o tortuga pinta
Reino	Animalia, animales
Filo	Chordata
Clase	Reptilia
Orden	Testudines
Familia	Emydidae

Género	Trachemys
Especie	<i>Trachemys venusta</i> (Gray, 1856)
Observaciones	Es nativa del sur de México, Belice, Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá y Colombia. Es una tortuga dulceacuicola que suele habitar en estanques y pantanos. También se le conoce como hícotea, pecho de Carey, tortuga pintada, tortuga de caparazón de pavo real. Tienen la capacidad de autorregular su temperatura, factor que disminuye el tiempo de exposición que necesita al sol y mejora su metabolismo para no contagiarse de alguna enfermedad pulmonar por hongos como la pulmonía u hongos en las escamas. Su tamaño máximo es de 48 cm. Durante su adultez cuenta con un peso que ronda entre los 4 y 5 kg. Su alimentación varía conforme pasan los años: primero comen animales como crustáceos pequeños como el camarón, reptiles pequeños o carnes a medio consumir por otros depredadores. Cuando la tortuga se vuelve adulta pareciera que es herbívora pero sigue comiendo carne. De acuerdo con las normas oficiales mexicanas ha sido sobreexplotada, por lo cual se le considera sujeta a protección especial. Sus usos potenciales son el consumo de su carne y huevos y su caparazón suele ser empleado para artesanías. También son utilizadas como ornato o como mascotas

Fuente: Enciclovida; Zenteno et al. (2001); Cázares Hernández (2015).



Figura 95. Tortuga hícotea (*Trachemys venusta*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 100

Ficha técnica de *Crocodylus moreletii*

Nombre científico	<i>Crocodylus moreletii</i>
Nombre común	Cocodrilo de pantano
Reino	Animalia, animales
Filo	Chordata
Clase	Reptilia

Orden	Crocodylia
Familia	Crocodylidae
Género	Crocodylus
Especie	<i>Crocodylus moreletii</i> (Dumeril & Bibron, 1851)

Observaciones El cocodrilo de pantano, una especie presente principalmente en el sureste mexicano, pero con presencia en otros estados de la república, nace midiendo entre 25 y 30 cm y puede alcanzar una longitud de 3.0 a 3.5 metros. Su hábitat preferido son cuerpos de agua dulce poco profundos con abundante vegetación acuática, como pantanos, estanques, humedales, arroyos, lagunas y ríos de corriente lenta. Los adultos son territoriales, compartiendo espacios reducidos solo durante la temporada de reproducción, principalmente machos con hembras. Son de hábitos nocturnos. El ataque ocasional a humanos genera conflictos que resultan en la eliminación de individuos y, potencialmente, de poblaciones locales. Esta especie ha sufrido explotación intensa, siendo su piel el producto más valioso, aunque se aprovechan su carne, órganos y otras partes

Fuente: Gobierno de México.



Figura 96. Cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletii*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 101

Ficha técnica de *Iguana iguana*

Nombre científico	<i>Iguana iguana</i>
Nombre común	Iguana verde
Reino	Animalia, animales
Filo	Chordata
Clase	Reptilia
Orden	Squamata
Familia	Iguanidae

Género	Iguana
Especie	<i>Iguana iguana</i>
Observaciones	Son excelentes nadadoras y trepadoras, las hembras pueden llegar a medir hasta 2 m y pesar hasta 6 kg. Los machos alcanzan hasta 2.2 m y hasta 15 kg. Su color varía dependiendo del estado de ánimo, la temperatura, salud y la edad. La dieta es variada de acuerdo con la edad: siendo juveniles consumen brotes de hojas, semillas, flores, insectos, capullos y frutos. De adultos son herbívoras, las podemos encontrar en diversos hábitats como bosques (húmedos, muy húmedos y secos), áreas rocosas, matorrales, acantilados, mangles, ríos, zonas áridas y sabana con arbustos y árboles dispersos, entre otros. En México se distribuyen en estados de costa desde Puebla al sur del país. Pueden llegar a encontrarse amenazadas, se hallan en la categoría sujeta a protección especial de la NOM-059-SEMARNAT-2010

Fuente: Gobierno de México.



Figura 97. Iguana verde (*Iguana iguana*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 102

Ficha técnica de *Leptophis mexicanus*

Nombre científico	<i>Leptophis mexicanus</i>
Nombre común	Ranera bronceada, bejuquillo
Reino	Animalia, animales
Filo	Chordata
Clase	Reptilia
Orden	Squamata
Familia	Culubridae

Género	Leptophis
Especie	<i>Leptophis mexicanus</i>
Observaciones	<p>Son serpientes medianas y delgadas. Los machos alcanzan 88 cm de longitud hocico-cloaca, con una cola de aproximadamente 50 cm. Las hembras son más pequeñas y con cola proporcionalmente menor. Tienen cabeza alargada, ojos grandes con pupilas redondas. Se distribuyen en México, desde Tamaulipas y Nayarit hacia el sur, extendiéndose hasta Sudamérica. Prefieren vegetación densa, refugiándose en bases de hojas de palma, enramadas y bromelias. Se encuentra en diversos tipos de selva (alta, mediana y baja), bosques espinosos y palmares. Es carnívora, con una dieta principal de ranas y sapos, especialmente de los géneros <i>Hyla</i> y Bufo de hábitos arborícolas. En México se considerada amenazada según la NOM-059-SEMARNAT-2010</p>

Fuente: iNaturalist.



Figura 98. Culebra pico mexicana (*Leptophis mexicanus*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 103

Ficha técnica de *Drymobius margaritiferus*

Nombre científico	<i>Drymobius margaritiferus</i>
Nombre común	Serpiente corredora de petatillos
Reino	Animalia, animales
Filo	Chordata
Clase	Reptilia
Orden	Squamata
Familia	Culubridae
Género	<i>Drymobius</i>
Especie	<i>Drymobius margaritiferus</i>

Observaciones

Es ovípara, con reproducción en la estación lluviosa, la puesta varía entre 4 y 5 huevos, la incubación varía entre 64 y 68 días. Se alimenta de ranas y sapos, lagartijas, huevos de reptiles y pequeños mamíferos. Es terrestre y diurno del bosque lluvioso y de los claros de bosque en asociación a los cuerpos de agua, se distribuye en las tierras bajas de la vertiente atlántica y pacífica. El patrón dorsal de adultos es reticulado; cada escama exhibe un centro amarillo bordeado de oscuro (verde a negro). Los especímenes juveniles ostentan franjas transversales oscuras anteriormente, pero son reticulados posteriormente y con manchas nucales claras de forma semicircular. Presenta de 139 a 150 escamas ventrales y de 100 a 121 escamas subcaudales

Fuente: Enciclopedia.



Figura 99. Serpiente corredora de petatillos (*Drymobius margaritiferus*).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 104

Ficha técnica de Boa imperator

Nombre científico	<i>Boa imperator</i>
Nombre común	Boa, boa constrictor, mocosha, mazacuata y limacoa
Reino	Animalia, animales
Filo	Chordata
Clase	Sauropsida
Orden	Squamata
Familia	Boidae
Género	Boa
Especie	<i>Boa imperator</i> (Daudin, 1803)

Observaciones

Es una subespecie de las regiones tropicales y subtropicales de México, Centroamérica y el norte de Sudamérica. Está presente en varios tipos de hábitats tales como zonas desérticas, bosques tropicales, bosques nubosos, matorrales y también en campos de cultivo. Tienen en promedio entre 1.3 m y 2.5 m de longitud y pueden alcanzar hasta 3.7 m. Pesan alrededor de 6 kg y las hembras son más grandes que los machos. Su tiempo de vida salvaje es de 20 a 30 años y exceden los 40 en cautiverio. Se alimentan de pequeños mamíferos, como ratas, ratones y conejos, así como utilizan el mismo sistema "constrictor" de la anaconda y demás "boidae". Esta especie se diferencia de otras especies de boidos por la combinación de los siguientes caracteres: 1) fosetas labiales ausentes; 2) escamas de la parte superior de la cabeza y costados del hocico (región loreal) pequeñas; 3) presencia de dos hileras de escamas grandes entre la punta y la orbital; 4) dorso del cuerpo y de la cola con manchas grandes, a manera de anillos cerrados; 5) presencia de órganos vestigiales del cinturón pelviano a manera de uñas a cada lado de la cloaca

Fuente: Reptiles del Ecuador; Enciclovida.



Figura 100. Boa o mocosha (*Boa imperator*).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 105

Ficha técnica de *Claudius angustatus*

Nombre científico	<i>Claudius angustatus</i>
Nombre común	Taiman o tortuga almizclera
Reino	Animalia, animales
Filo	Chordata
Clase	Sauropsida
Orden	Testudines
Familia	Kinosternidae
Género	Claudius

Especie

Claudius angustatus

Observaciones

Es la única especie de tortuga representante del género *Claudius* de la familia Kinosternidae. La CONABIO considera a la familia Staurotypidae. No presenta subespecies, aunque se pueden identificar dos variedades, una más grande que la otra, y también existe una gran variedad de coloración, encontrándose algunos ejemplares muchos más claros. Alcanza 17 cm de longitud en el carapacho, con cabeza grande, mandíbulas arqueadas, la superior con un par de picos y un par de barbas en el cuello, tiene brazos cortos y robustos con membranas en los dedos. Carapacho color café, café amarillento o cercano al negro. En México se distribuye en el sureste hasta Belice y Guatemala. Vive principalmente en lugares inundables, fangosos y raramente sale de su escondite. Prefiere los climas cálido, húmedo y semiárido. Se considera en peligro de extinción por la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, la cual considera a la especie en peligro de extinción, la UICN2019-1, como casi amenazada. Entre los principales riesgos que le amenazan se encuentra la sobreexplotación y su uso como alimento

Fuente: Enciclovida.



Figura 101. Taiman o tortuga almizclera (*Claudius angustatus*).

Fuente: elaboración propia.

Anfibios

Tabla 106

Ficha técnica de Smilisca baudinii

Nombre científico	<i>Smilisca baudinii</i>
Nombre común	Rana arborícola mexicana, rana arbórea de Baudin o rana trepadora
Reino	Animalia, animales
Filo	Chordata
Clase	Amphibia
Orden	Anura
Familia	Hylidae
Género	Smilisca
Especie	<i>Smilisca baudinii</i> (Dumeril & Bibron, 1841)
Observaciones	Especie de anfibio nativa de Centroamérica y el sur de Norteamérica. Cuenta con una longitud hasta de 6 cm, cuerpo robusto, con un par de sacos vocales debajo de la cabeza (machos), la piel es lisa de coloración variada, frecuentemente tiene manchas oscuras en un fondo claro de color café, crema o verde olivo; el vientre es granular de color crema y sin manchas. Las patas tienen manchas transversales. En México la especie no se encuentra bajo ninguna categoría de riesgo según la NOM-059-SEMARNAT-2010

Fuente: iNaturalist.



Figura 102. Rana trepadora (*Smilisca baudinii*).
Fuente: elaboración propia.

Aves

Tabla 107

Ficha técnica de Amazilia candida

Nombre científico	<i>Amazilia candida</i>
Nombre común	Colibrí cándido
Reino	Animalia, animales
Filo	Chordata
Clase	Aves
Orden	Apodiformes
Familia	Trochilidae
Género	Amazilia
Especie	<i>Amazilia candida</i> (Bourcier & Mulsant, 1846)

Observaciones

El colibrí bicolor mide entre 9 y 11 cm y pesa de 3 a 8 gramos. Tiene dorso bronce verdoso y su región ventral blanca, con manchas verdes a los lados de la garganta, pecho y costados. Su mandíbula es rosada con la punta del pico negra, sus patas son oscuras. Se distribuye del sur de México a Centroamérica. Su hábitat abarca diversos tipos de bosque, desde aquellos donde la vegetación pierde sus hojas en la estación seca hasta bosques de niebla, bosques siempre verdes, riberas arboladas, claros y plantaciones de plátano y café. Se alimenta de néctar, pequeños insectos y son aves de hábitos solitarios. Durante el cortejo, los machos forman grupos y cantan en la vegetación densa. A pesar de que sus poblaciones están en declive principalmente por la deforestación, es considerado bajo el estatus de preocupación en su lista roja de especies amenazadas

Fuente: iNaturalist.



Figura 103. Colibrí cándido (*Amazilia candida*).

Fuente: elaboración propia.

Capítulo 14

Los humedales artificiales ante el cambio climático

El cambio climático se ha convertido en la amenaza socioambiental más grande de los últimos años. La palabra *cambio* hace referencia a una alteración en las variables del clima, teniendo como mayor evidencia las perturbaciones en las temperaturas del planeta y algunos patrones de precipitación y nivel del mar. Desde el siglo XIX, las actividades humanas son el primer factor del cambio climático, principalmente por la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) (ONU, 2024).

De acuerdo con el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2022), este evento climático pasó de ser un fenómeno a una realidad exacerbada por las actividades humanas que no responden a esquemas de sostenibilidad. Es considerado ya un suceso climático, sin precedentes, innegable e inequívoco (VI informe IPCC, 2022), cuyos impactos afectan a todo el planeta, sin distinción geopolítica, pero sí con impactos diferenciados, es decir, en algunas regiones del mundo se tiene mayor exposición y sensibilidad hacia este.

Latinoamérica es considerada una región altamente vulnerable a los impactos del cambio climático, en donde los efectos se verán en menor tiempo y con mayor fuerza. No obstante, aún hay una ventana de oportunidades, sobre todo desde el punto de vista de estrategias de adaptación y mitigación a través del uso de tecnologías energéticas sustentables (ONU, 2021). Una de ellas es, precisamente, la implementación de tecnologías de bajo costo y manejo asequible, las cuales están inspiradas en los procesos naturales de nuestro entorno, esto es, los humedales artificiales (HA). Estos son considerados una obra ingenieril en la que se llevan a cabo procesos de depuración biológica empleando vegetación, suelo y microorganismos, los cuales

permiten remover ciertos contaminantes básicos del agua (Rivas Hernández, 2022).

El uso de esta tecnología permite —además de ser una estrategia de adaptación— mejorar la capacidad en el tratamiento del agua residual y generar hábitats para la vida, lo que beneficia a la biodiversidad y permite un espacio recreacional por su belleza escénica. Entre otras de sus funciones, provee la regulación del flujo de agua bajo condiciones extremas, ya sea durante inundaciones o sequías (UNEP, 2017). Algunos de los beneficios de los HA son los siguientes:

- Contribuyen a la fijación de carbono y a la disminución de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).
- Reducen el efecto de los vertidos agrícolas, domésticos e industriales.
- Son una alternativa económica y de bajo consumo energético para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales.
- Pueden eliminar bacterias del agua, metales, diversos xenobióticos y contaminantes emergentes, lo que permite reutilizarla.
- Si se diseñan correctamente, pueden servir como puntos de biodiversidad y escalas de migración.

Una ruta hacia la neutralidad en carbono

El aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente de CO₂, es la mayor causa en la promoción del cambio climático. De acuerdo con Rogerson et al. (2021), contar con ecosistemas como los humedales en su estado natural representa un ambiente óptimo como un reservorio y sumidero de dióxido de carbono hacia la atmósfera. Sin embargo, estos ecosistemas naturales han tendido a la baja, dado como resultado el crecimiento de la mancha urbana (Hu et al., 2017), y son fuertemente amenazados por el cambio climático (Salimi et al., 2021).

La implementación de HA resulta entonces una estrategia interesante para mitigar los impactos del cambio climático. Al igual que los humedales naturales, los artificiales han demostrado ser una

ruta hacia la descarbonización, en términos de su capacidad para almacenar o secuestrar carbono. Pero su potencial va más allá, al permitir un manejo integral del agua residual a través de la “purificación” del agua, pero también al hacer posible una reconexión con los espacios naturales, liberación y devolución de nutrientes en el agua superficial, permitiendo la conservación y restauración de hábitats (Ahn & Schmidt, 2019), contribuyendo así a una mejora en la salud pública relacionada con el acceso al agua.

Los humedales han sido identificados como uno de los ecosistemas más productivos del planeta: a través de la fotosíntesis pueden secuestran y acumular carbono, ya sea como biomasa en las plantas o como materia orgánica en el suelo. La acumulación de agua dentro de estos sistemas provee un ambiente anóxico en donde una gran cantidad de carbono es acumulado, dando lugar a un sumidero (Laiho, 2006).

Nuestro país ha asignado un compromiso a escala mundial a través de la Agenda 2030. Esta agenda es un plan compartido con diversas economías alrededor del mundo para alcanzar los objetivos por la paz y la prosperidad de las personas y el planeta. Tenemos el compromiso de reducir nuestras emisiones al 2035 en un 35 % y atendiendo a los objetivos “6. Agua limpia y saneamiento”; “11. Ciudades y comunidades sostenibles”, y “13. Acción por el clima” de la agenda 2030 convertimos en una economía neutral y sustentable. Como respuesta, integrar enfoques de desarrollo sustentable que consideren tecnologías como los HA permitirán integrar objetivos comunes (sociales, económicos y ambientales) en la construcción de un mejor territorio y resiliencia ambiental.

Referencias

- Ahn, C., and & Schmidt, S. (2019). Designing wetlands as an essential infrastructural element for urban development in the era of climate change. *Sustainability* 11 (7), 1920. doi:10.3390/su11071920
- Araiza C.A. & Almarzan-Merchan J. (2012). Identificación y clasificación en biotipos de las malezas asociadas con el cultivo de la palma de aceite. *Ciencia y Agricultura* Vol. 9, No. 2. 87-96. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencia_agricultura/article/view/2819/2587
- Barba, E., Alva, M. A., & Calva, L. G. (2013). Guía ilustrada para la identificación de plantas acuáticas en humedales de Tabasco. ECOSUR Editorial. <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000053273>
- Cázares Hernández, E. (2015). *Guía de las tortugas dulceacuícolas de Veracruz*. Instituto Tecnológico Superior de Zongolica.
- Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). (2022). Flora de la península de Yucatán. *Paspalum paniculatum*. https://www.cicy.mx/sitios/flora%20digital/ficha_virtual.php?especie=619
- Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste S. C. (CIBNOR). (2021). *La composta. Importancia, elaboración y uso agrícola*. 2a. ed. Trillas.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 30. Diseño de PTARM: Humedales Artificiales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2012). Ficha informativa de malezas de México. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/paginas/lista-plantas.htm>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). *Heliconia latispatha*. Enciclovida. <https://enciclovida.mx/especies/158270-heliconia-latispatha>
- Comparán Sánchez, L. E. (2020). *Cinética de remoción de contaminantes básicos en humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial con vegetación Cladium jamaicense*. Tesis de Maestría en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental. Universidad Juárez Autónoma

- de Tabasco. http://ri.ujat.mx/bitstream/20.500.12107/3445/1/4_Tesis_Luis.pdf
- Córdoba Pedraza, Samuel. (2021). *Canna indica L. y especies de césped en el tratamiento de aguas residuales domésticas vía humedales artificiales de flujo subsuperficial*. Tesis de Ingeniería Ambiental. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Crites, R. & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. McGraw Hill Interamericana.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F. & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Centro A.G.U.A.
- Fern (2014). Plantas tropicales útiles, *Cyperus odoratus*. <http://tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Cyperus+odoratus>
- Flora vascular. (20 de enero de 2022b). *Cyperus odoratus* L. Sp. Pl.: 46 (1753). <https://www.floravascular.com/index.php?spp=Cyperus%20odoratus>
- Flora vascular. (20 enero 2022a). *Cannaceae*. <https://www.floravascular.com/index.php?familia=Cannaceae>
- García Ramírez F. Y. & Comparán Sánchez, L. E. (2018). *Remoción de contaminantes básicos en aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial utilizando Colocasia esculenta y Xanthosoma sagittifolium*. Tesis de Ingeniería Ambiental. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- García Ramírez F. Y. (2020). *Cinética de degradación en aguas residuales domésticas con humedales artificiales utilizando Echinodoros paniculatus*. Maestría en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. http://ri.ujat.mx/bitstream/20.500.12107/3446/1/5_Tesis_F%C3%A1tima%20Yaireth%20Garc%C3%ADa%20Ram%C3%ADrez.pdf
- Gardner, G. (1976) citado en www.kew.org. <http://apps.kew.org/herbcat/detailsQuery.do?barcode=K000054364>
- Gómez Rodríguez A. C. (2019). *Tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales con Acrostichum danaeifolium y Typha domingensis*. Tesis de Maestría. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <http://ri.ujat.mx/handle/20.500.12107/3442>
- Guevara Granja, M. F. & Ramírez Cando, L. J. (2015). *Eichhornia crassipes*, su invasividad y potencial fitorremediador la granja. *Revista de Ciencias de la Vida*, vol. 22, No. 2, 5-11. Universidad Politécnica Salesiana Cuenca, Ecuador.
- Hamisi, R., Renman, A. & Renman, G. (2019). Performance of an On-Site Wastewater Treatment System Using Reactive Filter Media and a Sequencing Batch Constructed Wetland. *Sustainability* 2019, 11, 3172; doi:10.3390/su11113172

- Hernández, M. E. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 1(2), 1-12.
- Hu, S., Niu, Z., Chen, Y., Li, L. & Zhang, H. (2017). Global Wetlands: Potential Distribution, Wetland Loss, and Status. *Sci. Total Environ.* 586, 319-327. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.02.001
- IFAS. (2022). *Colocasia esculenta* Taro salvaje, dasheen. <https://plants.ifas.ufl.edu/plant-directory/colocasia-esculenta/>
- iNaturalist Panamá (20 de enero de 2022). Carricillo *Cyperus articulatus*. <https://panama.inaturalist.org/taxa/161422-Cyperus-articulatus>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. *Sixth Assessment Report*. Working group II. IPCC.
- Javier Rodríguez, L. M. (2020). *Cyperus odoratus en el tratamiento de agua residual doméstica en un humedal de flujo subsuperficial*. Tesis de Ingeniería Ambiental. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Jiménez, R. 1980. Canaceae. En: Sosa, V. (ed.). *Flora de Veracruz*. Fascículo 11. Instituto de Ecología. Xalapa, Veracruz, México.
- Kolb, P. (1998). *Design of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós*. Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur. Universität für Bodenkultur. <https://boku.summon.serialssolutions.com/#!/search?ho=-t&l=es-ES&q=AC02249265>
- Laiho, R., 2006. Decomposition in peatlands: reconciling seemingly contrasting results on the impacts of lowered water levels. *Soil Biol. Biochem.* 38, 2011-2024. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.02.017>
- Lansdown, R.V. (2017). *Phragmites australis* (amended version of 2015 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T164494A121712286. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T164494A121712286>. En «*Phragmites australis*». *Tropicos.org*. Missouri Botanical Garden. <https://colombia.inaturalist.org/taxa/64237-Phragmites-australis>
- Lehtonen, S. & Gordon, E. (2010). Actualización del conocimiento de los géneros *Echinodorus* y *Helanthium* (*Alismataceae*) en Venezuela. *Acta Botánica Venezuelica*, 33, 249-272.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Nueva Ley publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 8 de octubre de 2003. Última reforma publicada DOF 18-01-2021. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf
- López Ocaña, G., Torres Balcázar, C. A., López Vidal, R., Bautista Margulis, R. G., Pampillón González, L., Valdés Manzanilla, A. & Padrón López, R. M. (2018). Diseño, construcción y arranque de un humedal artificial en serie para el tratamiento de aguas residuales domés-

- ticas. *Proyecto Folio*: 298, Primer Informe. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- López-Ocaña, G., Bautista-Margulis, R. G., Valdés-Manzanilla, A., Torres-Balcázar, C. A., López-Vidal, R., Pérez-Sánchez, E. & Pampillón-González, L. (2019). Spatial distribution behavior of basic pollutants in a subsurface-flow wetland with *Thalia geniculata*. *Int. J. Environ. Impacts*, Vol. 2, No. 2 (2019) 145-160. DOI: 10.2495/EI-V2-N2-145-160
- López-Ocaña, G., Torres-Balcázar, C. A., Bautista-Margulis, R. G., Hernández-Barajas, J. R., Gutiérrez-Vidal, J. J., de la Cruz-Luna, E. & Ferrer-Sánchez, M. I. (2014). Diseño de sistemas experimentales de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial. En: W. M. Contreras Sánchez, R. Angulo Pineda y F. Morales Hoil (Eds.), *Perspectiva Científica desde la UJAT*, 133-145). 1a. ed. Villahermosa, Tabasco. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <http://www.archivos.ujat.mx/2014/divulgacion%20cientifica/SDDC2013final.pdf>
- Lot, A., Olvera, M., Flores, C. & Díaz, A. (2015). *Guía ilustrada de campo-Plantas indicadoras de humedales*. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000059529>
- Marín-Muñiz, J. (2017). Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reúso del agua. *Agro Productividad*, 10(5), 90-95.
- Marín-Muñiz, J. L., Sandoval Herazo, L. C., López-Méndez, M. C., Sandoval-Herazo, M., Meléndez-Armenta, R. Á., González-Moreno, H. R. & Zamora, S. (2023). Treatment Wetlands in Mexico for Control of Wastewater Contaminants: A Review of Experiences during the Last Twenty-Two Years. *Processes*, 11, 359. <https://doi.org/10.3390/pr11020359>
- Martínez, M., (1979). *Catálogo de nombres vulgares y científicos de plantas mexicanas*. Fondo de Cultura Económica.
- Mayge May, J. (2020). *Evaluación de un humedal artificial experimental de flujo subsuperficial con Heliconia latispatha*. Tesis de Ingeniería Ambiental. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- McAllister, L. S. (1992). *Habitat quality assessment of two wetland treatment systems in Mississippi-A pilot study*. EPA/600/R-92/229. U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Corvallis, OR.
- McAllister, L. S. (1993a). *Habitat quality assessment of two wetland treatment systems in the arid west-A pilot study*. EPA/600/R-93/117. U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Corvallis, OR.
- McAllister, L. S. (1993b). *Habitat quality assessment of two wetland treatment systems in Florida-A pilot study*. EPA/600/R-93/222. U.S.

- Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Corvallis, OR.
- Mena, J., Rodríguez, L., Nuñez, J. & Villaseñor, J. (2008). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: ventajas de los sistemas híbridos. *Alquimia Soluciones Ambientales*. Congreso Nacional de Medio Ambiente. http://Www.Conama9.Org/Conama9/Download/Files/Cts/2643_Jmena.Pdf
- Merino-Solís, M., Villegas, E., de Anda, J. & López-López, A. (2015). The Effect of the Hydraulic Retention Time on the Performance of an Ecological Wastewater Treatment System: An Anaerobic Filter with a Constructed Wetland. *Water*, 7(3), 1149-1163. <https://doi.org/10.3390/w7031149>
- Munive Cerrón, R., Loli Figueroa, O., Azabache Leyton, A. & Gamarra Sánchez, G. (2018). Fitorremediación con maíz (*Zea mays* L.) y composta de Stevia en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria* 9(4): 551-560. DOI: 10.17268/sci.agropecu.2018.04.11. <http://www.scielo.org.pe/pdf/agro/v9n4/a11v9n4.pdf>
- Namestnik, S. A., Thomas, J. R. & Slaughter, B. S. (2012). Two recent plant discoveries in Missouri: *Cladium mariscus* subsp. *jamaicense* (Cyperaceae) and *Utricularia minor* (Lentibulariaceae). *Phytoneron* 2012-92, 1-6.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. DOF: 11/03/2022. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. - Lodos y biosólidos. - Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. DOF: 15/08/2003. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003
- Novelo Retana, A. (2006). Plantas acuáticas de la reserva de la biósfera Pantanos de Centla. Retrieved January 15, 2021. <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/FichapubGPO25.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2021). Cambio climático: América Latina será una de las regiones más afectadas. <https://news.un.org/es/story/2021/08/1495582>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2024). Acción por el clima. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- Orozco, C. E., Cruz, A. M., Rodríguez, M. A. & Pohlan, A. J. (2006). Humedal subsuperficial de flujo vertical como sistema de depuración terciaria en el proceso de beneficiado de café. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 6, 190-196.

- Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). (2022). Cambio climático: una amenaza para el bienestar de la humanidad y la salud del planeta. La adopción de medidas inmediatas puede asegurar nuestro futuro. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/resources/press/press-release-spanish/>
- Pazmiño, P. & Jaramillo, T. (2019). Sistemas de siembra utilizados 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>
- Pérez López, M. E. (2009). *Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango*. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación de Materiales Avanzados. Chihuahua. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/598/1/Tesis%20Ma.%20Elena%20P%C3%A9rez%20L%C3%B3pez.pdf>
- Plants use (2016). *Cyperus odoratus* (PROSEA). [https://uses.plantnet-project.org/en/Cyperus_odoratus_\(PROSEA\)](https://uses.plantnet-project.org/en/Cyperus_odoratus_(PROSEA))
- Poot Matu, J. E., Centurión Hidalgo, D., Espinosa Moreno, J., Cázares Camero, J. G. & Mijangos Cortés, M. A. (2002). Rescate e identificación de raíces y tubérculos tropicales subexplotados del estado de Tabasco, México. *Etnobiología* 2, 59-73.
- Rajan Rajitha J., Sudarsan J. S., Nithiyantham S. (2019). Microbial population dynamics in constructed wetlands: Review of recent advancements for wastewater treatment. *Environ. Eng. Res.* 2019; 24(2), 181-190. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.127>
- Ramachandran, A. & Soosairaj, S. (2014). *Cyperus odoratus* L. (*Cyperaceae*) a newly recorded species in India. *International Journal of PharmTech Research*. 6. 518-520.
- Ramírez-Carrillo, H. F., Luna-Pabello, V. & Arredondo-Figueroa, J. (2009). Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8(1), 93-99. <http://www.redalyc.org/pdf/620/62011375008.pdf>
- Rivas Hernández, A. (2022). *¿Cómo construir un humedal para el tratamiento del agua residual en mi escuela?* Jiutepec, Mor. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 61. <https://doi.org/10.24850/b-imta-2022-08>
- Rodas López, P. (2020). *Remoción de contaminantes básicos en agua residual doméstica en humedal artificial de flujo subsuperficial con Enydra sessilifolia*. Tesis de Ingeniería Ambiental. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Rodríguez, S. (2002). Informe sobre la producción de las raíces y tubérculos. Reunión del Grupo Nacional de Viandas. Santo Domingo, Villa Clara, Cuba.
- Rogerson, R., Horgan, D., & Roberts, J. (2021). Integrating artificial urban wetlands into communities: a pathway to carbon zero? *Front Built - environ*. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.777383>

- Romellón Cerino, M. J., López Ocaña, G., Reyes Osorio, J., Romellón Cerino, J. C. & Arias Peregrino, V. M. (2022). Efecto de la poda de macrófitas sobre microorganismos adheridos al medio de soporte y la carga orgánica en humedales artificiales. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 11(21), 1-33. <https://doi.org/10.23913/ciba.v11i21.111>
- Romellón-Cerino, M. J., Estrada-Pérez, N. & López-Ocaña, G. (2022). Remoción y cinética de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. *Renewable Energy, Biomass & Sustainability (REB&S)*, Vol. 3, No. 1, 24-34. https://aldeser.org/uploads/1/3/0/8/130818527/a3_v3n1_reb_s.pdf
- Royal Botanic Garden Kew. (2024a). *Acrostichum danaeifolium* Langsd. & Fisch. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:17002360-1#higher-classification>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024b). *Canna indica* L. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:319130-2>.
- Royal Botanic Garden Kew. (2024c). *Cladium jamaicense* Crantz. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:303470-1>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024d). *Colocasia esculenta* (L.) Schott. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:1170772-2>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024e). *Cyperus articulatus* L. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:303822-1>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024f). *Cyperus odoratus* L. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:74939-2>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024g). *Echinodorus paniculatus* Micheli. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:58362-1>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024h). *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:1198589-2>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024i). *Enydra sessilifolia* (Ruiz & Pav.) Cabrera. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:91046-2>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024j). *Heliconia latispatha* Benth. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:796959-1>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024k). *Paspalum paniculatum* L. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:184526-2>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024l). *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30337627-2>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024m). *Pontederia sagittata* C. Presl. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:698184-1>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024n). *Sagittaria lancifolia* L. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:58516-1>

- Royal Botanic Garden Kew. (2024o). *Sagittaria latifolia* Willd. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:225280-2>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024p). *Thalia geniculata* L. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:798255-1>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024q). *Typha domingensis* Pers. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:836837-1#higher-classification>
- Royal Botanic Garden Kew. (2024r). *Xanthosoma sagittifolium* (L.) Schott. <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:89373-1>
- Rzedowski, G. C. (1998). *Cannaceae*. En: Rzedowski, G. C. de y J. Rzedowski (eds.). *Flora del Bajío y de regiones adyacentes*. Fascículo 64. Instituto de Ecología-Centro Regional del Bajío. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Salimi, S., Almuktar, S. & Scholz, M. (2021). Impact of climate change on wetland ecosystems: a critical review of experimental wetlands. *Journal of Environmental Management*. (286): 112160. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112160>
- Seoánez Calvo, M. (1999). *Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales. Fundamentos científicos, tecnologías y diseño*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Shukla, A., Parde, D., Gupta, V., Vijay, R. & Kumar, R. (2021). A review on effective design processes of constructed wetlands. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 1-26. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03549-y>
- Sierra, C. A. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Ediciones de la U.
- Tchobanoglous, G. "Metcalf & Eddy". (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Redes de alcantarillado y bombeo*. Tomo III. Editorial Mc Graw Hill México.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). (2000). *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. EPA/625/R-99/010. <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL>
- UNEP. (2017). *Climate Change Adaptation Technologies for Water: a practitioner's guide to adaptation technologies for increased water sector resilience*. UN Environment DHICentre on water and environment.
- UN-HABITAT. (2008). *Constructed Wetlands Manual*. UN-HABITAT Water for Asian Cities Programme Nepal, Kathmandu. United Nations Human Settlements.
- Unz, R. F. & Shuttleworth, K. L. (1996). Microbial Mobilization and Immobilization Of Heavy Metals. *Curr. Opin. Biotechnology*, 7, 307-310.

- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia* (2011) 674: 133-156. DOI 10.1007/s10750-011-0738-9
- Wang, H., Xu, J. & Sheng, L. (2020). Purification mechanism of sewage from constructed wetlands with zeolite substrates: A review. *Journal of Cleaner Production* 258 (2020) 120760. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120760>
- Zenteno, R. C., Sánchez, A. M., Torres, R. E. & Cruz, R. M. (2001). Historia natural de las tortugas dulceacuícolas del Ejido Río Playa, Comalcalco, Tabasco. *Universidad y Ciencia*, 6(12), 12-22.
- Zurita, F., de Anda, J. & Belmont, M. A. (2006). Performance of laboratory-scale wetlands planted with tropical ornamental plants to treat domestic wastewater. *Water Quality Research Journal of Canada*, 41(4), 410-417. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2006.044>

Semblanzas

Gaspar López Ocaña

Ingeniero ambiental, maestro en Ingeniería y Protección Ambiental, con Especialidad en Sistemas de Tratamiento de Aguas y Aguas Residuales y doctor en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales. Ha incursionado en líneas de investigación y proyectos sobre contaminación de suelo, modelación ambiental, restauración de suelos impactados por hidrocarburos, evaluación de impactos, riesgos y daños ambientales, restauración ecológica, monitoreo de calidad del aire, calidad del agua, diseño de sistemas de potabilización y tratamientos de aguas residuales, disposición y tratamiento térmico de residuos sólidos, legislación y gestión ambiental. Es responsable y colaborador en proyectos de carácter ambiental; brinda servicios profesionales en industrias, empresas y sector gubernamental, orientadas hacia el tratamiento de aguas residuales, potabilización, impacto ambiental y gestión de RSU. Actualmente es profesor investigador tiempo completo titular B de la División de Ciencias Biológicas de la UJAT. Es responsable del Laboratorio de Tecnología del Agua, líder del grupo de investigación Procesos Termodinámicos y Gestión Hídrica Sostenible (GI-DACBIOL-13-2024). Ha sido integrante del SNI (nivel 1), miembro del SEI, cuenta con perfil PRODEP y como director de tesis ha concluido 66 de licenciatura, 16 de maestría y 5 de doctorado. Cuenta con dos libros, 19 capítulos de libro, 29 artículos científicos en revistas indexadas y científicas y participa en encuentros académicos y en redes de investigación (nacionales e internacionales).

Nancy Estrada Pérez

Ingeniera ambiental, maestra en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental. Actualmente es estudiante del Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales. Cuenta con la participación en tres artículos publicados en revistas indexadas JCR y CONAHCYT referentes al tratamiento del agua. Ha participado como ponente en congresos internacionales y nacionales. En la iniciativa privada tiene experiencia como técnico laboratorista y de campo en muestreo y caracterización de descargas de aguas residuales. Ha participado en la evaluación y diseño de sistemas de tratamiento de agua potable, del mismo modo en el área administrativa y técnica en el seguimiento de proyectos en el Laboratorio de Tecnología del Agua desde hace seis años a la actualidad. Ha incursionado en líneas de investigación y desarrollado de proyectos en el área de calidad del agua y aguas residuales para el diseño de sistemas de tratamiento y potabilización de agua. Ha dirigido tesis de licenciatura relacionadas con la gestión e ingeniería ambiental.

Carlos Alberto Torres Balcázar

Ingeniero industrial químico por el Instituto Tecnológico de Celaya y maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Profesor en los programas de Ingeniería Ambiental en los niveles licenciatura y maestría en la UJAT, impartiendo cursos sobre operaciones y procesos unitarios, sistemas de tratamiento de aguas para potabilización y para aguas residuales domésticas, energías alternas, manejo y tratamiento de residuos sólidos urbanos, entre otros. Ha desarrollado y colaborado en más de 15 proyectos de investigación para el tratamiento de aguas residuales domésticas, mediante lodos activados en reactores de mezcla completa continuos y discontinuos, filtros biológicos y humedales artificiales, realizando pruebas con diferentes especies de plantas nativas en la zona del sureste mexicano, así como incineración de residuos sólidos. Ha sido colabora-

dor en más de 25 artículos científicos arbitrados a nivel nacional e internacional, en capítulos de libros nacionales y en ponencias en congresos nacionales e internacionales. Director de tesis en más de 19 trabajos, tanto a nivel licenciatura como maestría. Integrante del grupo de investigación Procesos Termodinámicos y Gestión Hídrica Sostenible de la UJAT y miembro del Sistema Estatal de Investigadores del Estado de Tabasco. Actualmente se desarrolla en la línea de generación y aplicación del conocimiento de tecnologías del agua.

Rudy Solís Silván

Ingeniero ambiental, maestro en Ciencias Ambientales y doctor en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales. Cuenta con seis artículos publicados en revistas indexadas JCR y CONAHCYT referentes al tratamiento del agua. Ha participado como ponente en 15 congresos internacionales en los últimos tres años. Ha sido integrante del SEI en el periodo 2015-2024. Fue director técnico en Agua y Saneamiento Urbano de la Asociación Mexicana de Ingeniería, Ciencia y Gestión Ambiental. Es capacitador externo en materia ambiental y seguridad en el trabajo No. de registro SOSR-810822-7Lo-0005. Es gestor ambiental para la elaboración de MIA en sus modalidades particular y general, informes preventivos, estudios de riesgo ambiental y evaluación de daños ambientales con número de autorización No. SBSCC-AUT-PF-003-2021/EXPEDIENTE No. PF-003-2021. Obtuvo el primer lugar como asesor en el área de Biotecnología y Ciencias Agropecuarias en el 6º. Encuentro de Jóvenes hacia la Investigación, organizado por el CONAHCYT y el Consorcio de Universidades Mexicanas con el tema “Bioelectricidad a partir del cultivo de Anana comosus (piña)” en 2018. Primer lugar en Industria y Manufactura en la 17a. Expo Industrial CANACINTRA Tabasco 2019, organizada por la Cámara Nacional de la Industria de Transformación delegación Tabasco con los prototipos: Robot buscador, Planta procesadora de pozol y Máquina secadora de cacao. Actualmente cuenta con su propia empresa ambiental ECOBIOT-SA, en la que estudiantes del ITSC y UPCH realizan residencias profesionales.



Wilfrido Miguel Contreras Sánchez

Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

Pablo Marín Olán

Director de Difusión y Divulgación Científica y Tecnológica

Analuís Kú Ortíz

Jefa del Departamento Editorial de Publicaciones
No Periódicas

