



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE  
HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
FACULTAD DE BIOLOGÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL**

**TESIS**

**“EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN EL AGUA, POR  
MEDIO DE VEGETACIÓN HIDRÓFITA DISPONIBLE EN EL ESTADO DE  
MICHOACÁN (*Typha domingensis* y *Eleocharis densa*)”**

**Que para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA:  
INGENIERO CIVIL DANIEL QUEZADA VILLANUEVA**

**DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN:  
DOCTOR EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
EZEQUIEL GARCÍA RODRÍGUEZ**

**CODIRECTOR DE INVESTIGACIÓN:  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
ING. RICARDO RUIZ CHÁVEZ**

**Morelia, Michoacán, Octubre de 2019**

# ÍNDICE

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
1.- INTRODUCCIÓN .....	1
2.- MARCO TEÓRICO .....	3
2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES .....	4
2.2 VEGETACIÓN.....	7
2.3 MICROORGANISMOS EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES .....	10
2.4 PROCESOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES .....	11
2.5 DISEÑO DE HUMEDALES .....	17
2.6 NOM-001-SEMARNAT-1996 .....	20
3.- ANTECEDENTES .....	22
4.- JUSTIFICACIÓN .....	25
5.-OBJETIVOS .....	25
5.1 OBJETIVO GENERAL .....	25
5.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	25
6.- HIPÓTESIS.....	26
7.- METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	26
8.- RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	50
9.-CONCLUSIONES .....	62
10.- FUENTES CONSULTADAS.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Humedal de flujo superficial .....	4
Figura 2. Humedal de flujo subsuperficial. ....	5
Figura 3. Humedal de flujo subsuperficial con flujo vertical.....	6
Figura 4. Humedal de flujo subsuperficial con flujo horizontal.....	7
Figura 5. Tipos de plantas en humedales. ....	9
Figura 6. Ciclo del nitrógeno.....	15
Figura 7. Sitio elegido para construcción de modelos .....	30
Figura 8. Recolección de muestras .....	31
Figura 9. <i>Typha domingensis</i> .....	34
Figura 10. <i>Eleocharis densa</i> .....	35
Figura 11. Preparación de terreno.....	36
Figura 12. Terreno nivelado y despálme .....	36
Figura 13. Trazo de terreno.....	37
Figura 14. Zanjas para colocación de los modelos .....	37
Figura 15 Válvulas de control .....	38
Figura 16. Instalación hidráulica.....	38
Figura 17. Proceso de geomembrana .....	39
Figura 18. Tubería de recolección y salida.....	39
Figura 19. Medio de soporte.....	40
Figura 20. Plantación de hidrófitas .....	40
Figura 21. Humedales experimentales.....	41
Figura 22. Puesta en marcha .....	41
Figura 23. Aforo.....	42
Figura 24. Medición de hidrófitas .....	43
Figura 25. Inflorescencia de <i>typha domingensis</i> .....	43
Figura 26. Inflorescencia de <i>eleocharis densa</i> .....	43
Figura 27. Llenado de tinaco .....	44
Figura 28. Toma de muestras .....	45
Figura 29. Comparación visual de muestras .....	45
Figura 30. Muestras y digestor .....	46
Figura 31. Espectrofotómetro .....	46
Figura 33. Prueba de conos Imhoff para SSed .....	47
Figura 34. Secado y pesado de muestras.....	48
Figura 35. Prueba de coliformes fecales .....	48
Figura 36. Medición de parámetros de campo .....	49
Figura 37. Comparativa de DBO .....	57
Figura 38. Comparativa de SST .....	57
Figura 39. Porcentajes de remoción <i>typha domingensis</i> .....	58
Figura 40. Porcentajes de remoción <i>eleocharis densa</i> .....	58
Figura 41. Medición de raíces <i>typha domingensis</i> .....	59
Figura 42. Desarrollo de raíces <i>eleocharis densa</i> .....	60

Figura 43. Etapa inicial de humedales 3/12/18.....	60
Figura 44. Etapa final y actual 27/08/19 .....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Importancia de los componentes de las hidrófitas en los humedales artificiales. ....	8
Tabla 2. Principales especies de vegetación utilizadas en los humedales.....	10
Tabla 3. Límites máximos permisibles de DBO y SST de la NOM-001-SEMARNAT-1996 .....	21
Tabla 4. Datos para diseño del humedal experimental .....	26
Tabla 5. Criterios de diseño y remoción en humedales de flujo subsuperficial .....	27
Tabla 6. Resultados primer muestreo .....	50
Tabla 7. Sólidos en todas sus formas primer muestreo .....	50
Tabla 8. Porcentajes de remoción primer muestreo.....	51
Tabla 9. Resultados segundo muestreo.....	52
Tabla 10. Sólidos en todas sus formas segundo muestreo.....	52
Tabla 11. Porcentajes de remoción segundo muestreo .....	53
Tabla 12. Resultados tercer muestreo .....	54
Tabla 13. Sólidos en todas sus formas tercer muestreo .....	54
Tabla 14. Porcentajes de remoción tercer muestreo.....	55

## **RESUMEN**

Se analizó un humedal de flujo subsuperficial con flujo horizontal, en donde se dispuso de dos especies de plantas hidrófitas emergentes, que son la *Typha domingensis* (espadaña tropical o tule) y *Eleocharis densa*, plantas elegidas debido a que son endémicas del Estado de Michoacán, respecto a las cuáles se obtuvieron los valores de remoción de contaminantes de acuerdo a las normas mexicanas (NOM-001-SEMARNAT-1996), específicamente DBO y SST.

Para este análisis se construyeron dos modelos de humedal, cuyo medio de soporte es gravilla, pero con la variación de vegetación, en este caso, *Typha domingensis* y *Eleocharis densa*. Durante la operación se hizo el monitoreo del influente y el efluente, por medio de aforo y muestreo, para su posterior análisis en el laboratorio.

Se verificó la eficiencia de remoción de cada una de las especies de plantas mencionadas; y así se establecieron los parámetros para una buena selección de la vegetación hidrófita, misma que deberá usarse en el tratamiento de aguas residuales.

Los porcentajes de remoción obtenidos para el humedal con *Typha domingensis* fue de 94.17% en DBO y 82.61% en SST, mientras que en el humedal con *Eleocharis densa* se obtuvo un 95.15% en DBO y 96.14% en SST.

## **PALABRAS CLAVE**

Humedal, subsuperficial, DBO, SST, modelos.

## **ABSTRACT**

A subsurface wetland with horizontal flow was analyzed, where two species of emerging hydrophilic plants were available, which are *Typha domingensis* (tropical bulrush or tule) and *Eleocharis densa*, plants chosen because they are endemic to the State of Michoacán, regarding which pollutant removal values were obtained according to Mexican standards (NOM-001-SEMARNAT-1996), specifically BOD and SST.

For this analysis, wetland models were built, whose support medium is gravel, but with the variation of vegetation, in this case, *Typha domingensis* and *Eleocharis densa*. During the operation, the influent and effluent were monitored, through capacity and sampling, for later analysis in the laboratory.

The removal efficiency of each of the plant species mentioned was verified; and thus the parameters were established for a good selection of hydrophilic vegetation, which should be used in the treatment of wastewater.

The removal percentages obtained for the wetland with *Typha domingensis* was 94.17% in BOD and 82.61% in OSH, while in the wetland with *Eleocharis densa*, 95.15% in BOD and 96.14% in OSH were obtained.

## 1.- INTRODUCCIÓN

Los humedales son sistemas de tratamiento para aguas residuales que consisten en un área cubierta de agua, con un tiempo de retención suficiente para que se den condiciones superficiales de saturación, con plantas emergentes, flotantes o libres en su interior que se encargan de llevar a cabo los procesos biológicos para la eliminación de los contaminantes en el agua por medio de su estructura.

Se sabe que los humedales se dividen dependiendo el tipo de flujo, en flujo superficial o subsuperficial, dando así la pauta del tipo de vegetación a utilizar. Los humedales de flujo subsuperficial se subdividen por su funcionamiento hidráulico en humedales de flujo subsuperficial con flujo vertical y con flujo horizontal.

Los humedales de flujo subsuperficial con flujo horizontal tienen una mejor eficiencia de remoción ya que por el movimiento del agua a forma de pistón, se filtra en el medio de soporte y da una mejor distribución del agua a lo largo del sistema.

En cuanto a la vegetación utilizada en los humedales se tienen las plantas acuáticas que se dividen a su vez dependiendo de dónde se encuentran sus órganos asimiladores siendo plantas anfibias (emergentes), plantas sumergidas y plantas flotantes. Para el caso de las plantas anfibias, son utilizadas en ambos tipos de humedales, de flujo superficial y flujo subsuperficial y tanto flotantes como sumergidas son utilizadas en humedales de flujo superficial. Su función es la de absorber contaminantes como nitrógeno o metales pesados, dar zonas de sombra para mantener temperaturas, dar soporte a la biopelícula, oxigenar la rizósfera, entre otros.

Para la correcta elección del tipo de planta es necesario hacer un análisis a fondo de las características de las mismas para tener una referencia más exacta en su eficiencia, sin embargo, existen muchos estudios sobre distribución territorial, tanto de humedales como de las plantas para estos tratamientos, así como estudios para la eficiencia en remoción de contaminantes como nitrógeno total y fósforo total, pero solo enfocados en un tipo de vegetación, por lo que se hace necesario, el análisis de más de un tipo de planta acuática, ampliando así el campo de elección.



Este factor dependerá también de la facilidad de obtención, así como de diversos factores climáticos y de radiación solar de la zona donde se proyecte el humedal.

Dentro de los humedales ocurre la remoción de diferentes contaminantes como son nitrógeno, fósforo, patógenos, sólidos suspendidos, metales pesados y materia orgánica, esta remoción es por medio de diferentes procesos como las reacciones en el agua en la biopelícula formada en el sustrato, o en las partes de las plantas sumergidas, dando paso además a varios procesos físico-químicos que dan lugar al tratamiento de las aguas residuales.

En el caso de la remoción del nitrógeno, ocurren varios procesos, tales como la desnitrificación, nitrificación, amonificación y la fijación del nitrógeno; factores fundamentales en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno. (Ver figura 1)

Los microorganismos encargados de llevar a cabo reacciones y procesos de remoción de contaminantes en humedales son principalmente bacterias, protozoos, algunos hongos y actinomicetos. (Curt, 2004)

Se hace énfasis en la remoción de DBO y sólidos suspendidos totales debido a que son los de mayor importancia en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, ya que en estos parámetros es donde se concentra la mayor cantidad de contaminantes en las aguas residuales.

La presente investigación se llevará a cabo, tomando en cuenta las condiciones predominantes en el Estado de Michoacán de Ocampo, para los tipos de vegetación acuática más abundante e idónea para ser utilizada en los humedales como sistemas de tratamiento.

## 2.- MARCO TEÓRICO

La descarga de aguas residuales en cursos naturales de agua (arroyos, ríos, humedales) es una práctica antigua, surgida de la necesidad de evacuar dichas aguas fuera de los núcleos urbanos. El impacto ambiental que tales descargas causan obligó a considerar que la depuración previa era imprescindible, particularmente para núcleos urbanos de gran población.

Las observaciones realizadas por naturalistas, ecólogos y otros investigadores sobre la capacidad depuradora de los humedales naturales incentivó el desarrollo de los sistemas de depuración basados en humedales artificiales, que en Europa se remonta a los años “50” del siglo XX, iniciando en Alemania, y en Estados Unidos a la década de los “60” del mismo siglo. La denominación que se aplica a estos sistemas es la de “humedales artificiales”, en oposición a la denominación “humedales naturales”, en los que el hombre no ha influido en su construcción. (Fernández, 2004)

En la antigüedad, los humedales naturales eran considerados como simples estancamientos de agua, teniendo que ser en ocasiones, drenados; ya que se consideraban simples y desagradables estancamientos de agua.

Los humedales artificiales son mecanismo de remoción de contaminantes de las aguas residuales en los cuales se incorporan elementos de ingeniería, diseñados, construidos y operados con el fin de obtener una calidad el agua esperada. (CONAGUA, 2015)

En un inicio los humedales artificiales eran utilizados solo para la depuración de aguas con bajas cargas orgánicas y aguas grises, para los años 80’s se comenzaron a utilizar para caudales mayores, en los años 90’s se comenzaron a utilizar para el tratamiento de aguas residuales municipales, de retorno agrícola y aguas de industrias vertedoras de aguas con alto contenido orgánico. Ya para el año 2000, comenzaron a crearse asociaciones dedicadas al estudio más detallado de estos sistemas, obteniendo así mayor conocimiento en los procesos biológicos, químicos, físicos e hidráulicos.

En un humedal, el influente es tratado a través de varios procesos físico-químicos y bacteriológicos; el oxígeno necesario para estos procesos, es suministrado por las propias plantas, que convierten el oxígeno por fotosíntesis, o lo toman del aire e inyectan hasta la zona radicular.

La transferencia de oxígeno hacia la zona radicular, por parte de estas plantas acuáticas, es un requisito imprescindible, para que la eliminación microbiana de algunos contaminantes se realice con eficacia, estimulando además la degradación de la materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes.

## 2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales se dividen en humedales de flujo superficial (HFS) y humedales de flujo subsuperficial (HFSS).

**Humedales de flujo superficial (HFS):** estos humedales son estanques con paredes ataludadas y fondo impermeable que van de profundidades de los 0.30 metros a 1 metro (Fuentes, 2011), es de flujo horizontal.

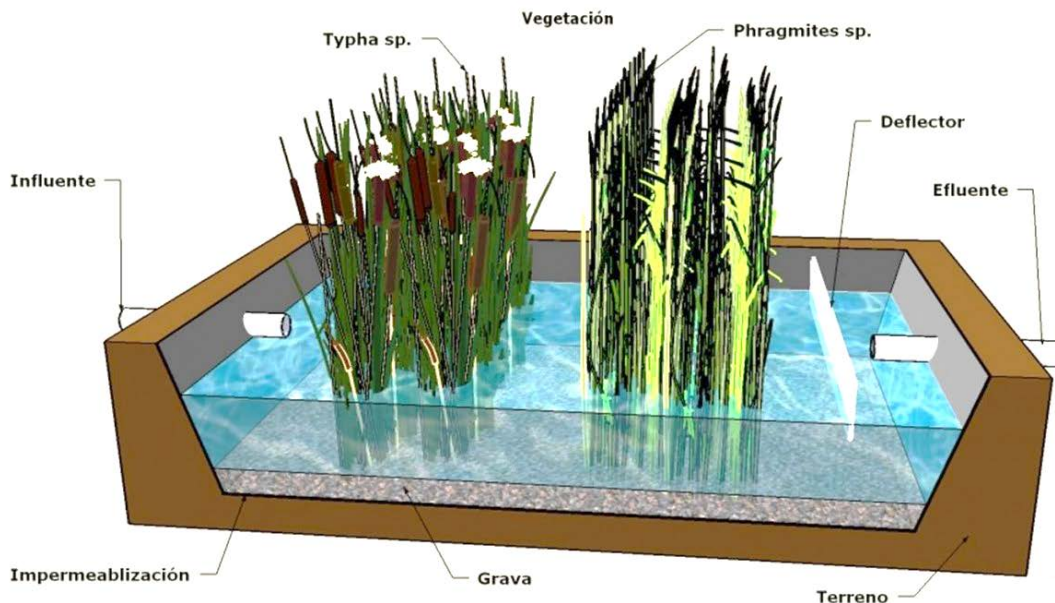


Figura 1. Humedal de flujo superficial

Fuente: Aquaberri S.L., 2013

Este tipo de humedal ocupa una superficie mayor de área disponible que los humedales de flujo subsuperficial (HFSS), se asemeja más a un humedal natural y son una modificación del sistema de lagunas convencionales. (Ver figura 2).

En este tipo de humedales, se utiliza vegetación emergente dependiendo de la profundidad, así como plantas hidrófitas flotantes y sumergidas.

La eliminación se lleva a cabo por reacciones en el agua o en la superficie del sustrato por lo que su eficiencia se ve fuertemente disminuida.

**Humedales de flujo subsuperficial (HFSS):** en este tipo de humedal, el flujo del agua ocurre en el sustrato, cuya profundidad depende del alcance de las raíces de la vegetación utilizada (ver figura 3). La profundidad aproximada en la que ocurre estos procesos es de 0.70 metros (CONAGUA, 2015). En función de su configuración hidráulica, los humedales son de flujo vertical o de flujo horizontal.

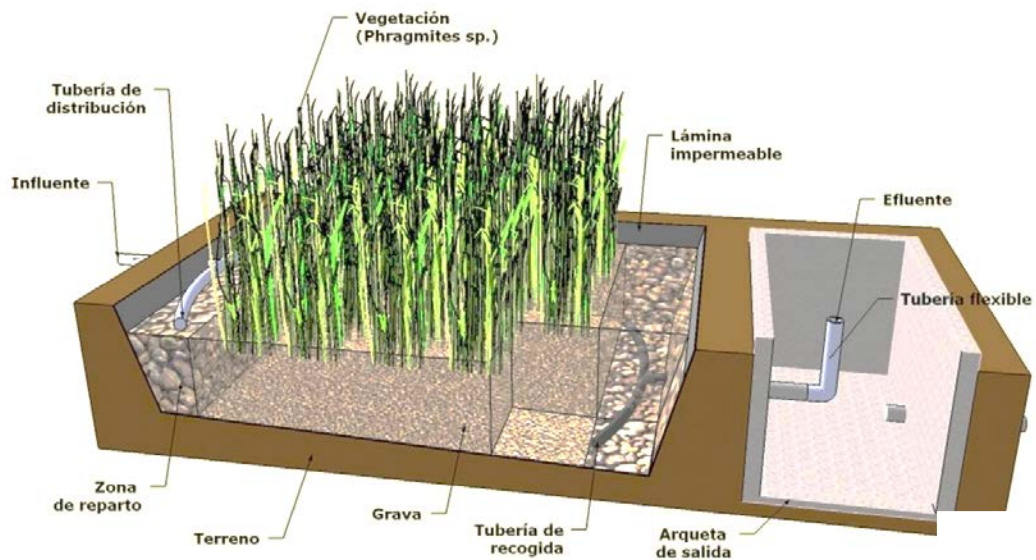


Figura 2. Humedal de flujo subsuperficial.

Fuente: Aquaberri S.L., 2013

- **Humedal de flujo subsuperficial de flujo vertical:** el agua se vierte de manera intermitente de arriba hacia abajo por medio de tuberías colocadas

en la parte superior del humedal, esta se infiltra por el medio de soporte, que, en este tipo de configuración hidráulica, se constituye de varias capas, siendo las más finas las superiores, y las de mayor diámetro las inferiores. El agua es recogida por una tubería de drenaje colocada en el fondo. Para favorecer las condiciones aerobias del sistema se colocan tubos de entrada y salida de aire, como chimeneas. (Ver Figura 4)

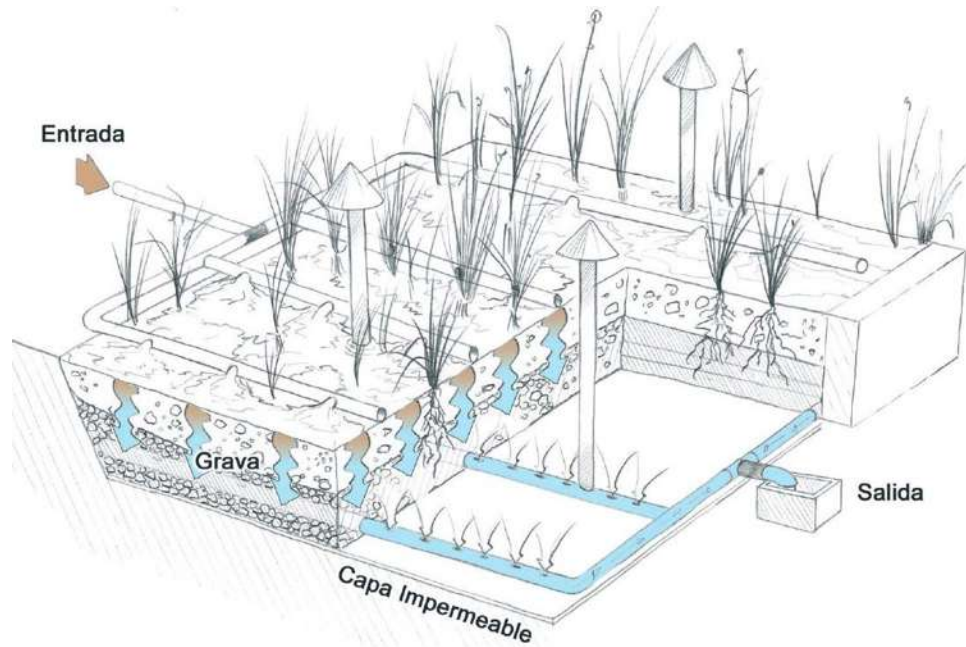


Figura 3. Humedal de flujo subsuperficial con flujo vertical

Fuente: Fuentes, 2011

- **Humedal de flujo subsuperficial de flujo horizontal:** es el más comúnmente utilizado y tiene sus orígenes en los estudios de Seidel (1967) y Kickuth (1977). Consiste en un sistema compuesto por una cama de arena o grava donde se planta algún tipo de hidrófita emergente, y en el fondo consta de una capa impermeable (ver figura 5). El agua se aplica de manera constante y es tratada conforme avanza por el medio de soporte de manera lateral (flujo tipo pistón), la profundidad varía entre los 0.45 a 1 metro y tiene una pendiente en el fondo de entre 0.5% a 1% la entrada de agua no es directa al material de soporte si no que existe una zona de amortiguamiento con material de un diámetro mayor al del soporte.

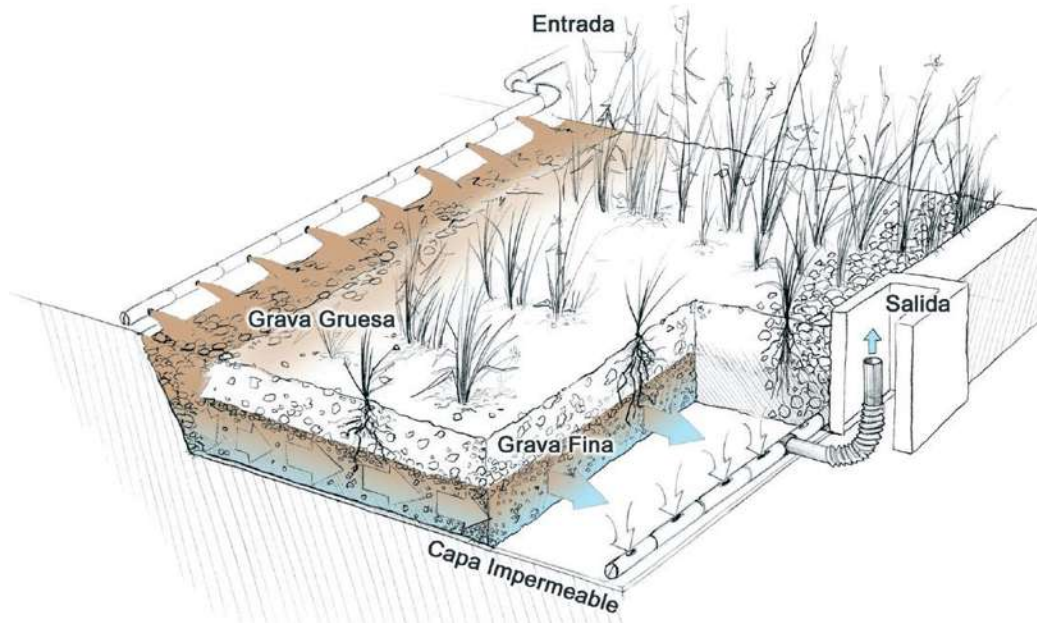


Figura 4. Humedal de flujo subsuperficial con flujo horizontal

Fuente: Fuentes, 2011

## 2.2 VEGETACIÓN

La fitodepuración es la eliminación de contaminantes por medio de complejos procesos biológicos y fisicoquímicos en los que participan las plantas del mismo sistema acuático. Este proceso sucede tanto en humedales naturales como artificiales.

Se refiere más específicamente en cuestión de humedales a la eliminación de contaminantes por medio de plantas hidrófitas.

El papel que juega la vegetación en los humedales está dado por los rizomas y raíces enterradas. Tienen la habilidad de transferir oxígeno de la atmósfera hasta la zona de las raíces por medio del tallo y las hojas. El oxígeno en esta zona crea zonas aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno para producir reacciones de degradación de la materia orgánica y nitrificación.

En la tabla 1 se enlista la importancia de los componentes de las hidrófitas en los humedales artificiales.

**Tabla 1. Importancia de los componentes de las hidrófitas en los humedales artificiales.**

Propiedad	Importancia para el proceso
<b>Tejido aéreo de la planta</b>	Atenuación de la luz.- Reduce el crecimiento de algas. Influencia en el microclima.- Aislamiento en el invierno. Minimiza el impacto de la velocidad del viento.- Reduce el riesgo de resuspensión. Almacenamiento de nutrientes.
<b>Tejido de la planta en contacto con el agua</b>	Efecto de filtración. Reduce la velocidad de la corriente y el incremento de esta forma la tasa de sedimentación. Incrementa el área superficial disponible para el crecimiento de biopelícula. Excreción de oxígeno fotosintético que permite la degradación aerobia de contaminantes. Asimilación de nutrientes.
<b>Raíces y rizomas</b>	Previene la obstrucción del medio, principalmente en humedales de flujo vertical. Liberación de oxígeno que permita la degradación en condiciones aerobias. Estabilizan la superficie de los humedales, disminuyendo el fenómeno de erosión.

Fuente: CONAGUA, 2015

### Clasificación de las plantas.

Las plantas acuáticas o hidrófitas, se dividen a su vez dependiendo donde se encuentran sus órganos asimiladores (ver figura 6), por lo que se tiene:

- **Plantas anfibas (emergentes):** estas plantas tienen una parte sumergida y otra expuesta en el exterior, están arraigadas a la superficie del sustrato. Su principal función es la de funcionar como filtro permitiendo la floculación y la sedimentación otras funciones son la de servir de soporte para los microorganismos, sombrear el agua, extraer nutrientes y oxigenar el agua por medio de la rizósfera. Entre las importantes plantas emergentes se encuentran la *Typha latifolia*, *T. domingensis*, *T. angustifolia*, *Schoenoplectus sp.* y la caña comun *Phragmites australis*.
- **Plantas acuáticas sumergidas:** son aquellas que se desarrollan debajo del agua, sus órganos vegetativos están sumergidos totalmente. Son plantas

interesantes en los humedales ya que al estar sumergidos sus órganos vegetativos, el oxígeno liberado por fotosíntesis pasa directamente al agua, teniendo una buena oxigenación. Se pueden encontrar las siguientes plantas sumergidas: en humedales naturales *Ranunculus aquatilis* (ranúnculo de agua) y *Potamogeton spp* y otras utilizadas en estanques ornamentales por su capacidad de oxigenar como *Ceratophyllum demersum* o *Myriophyllum verticillatum*.

- **Plantas flotantes:** son aquellas en las que sus órganos asimiladores están flotando sobre la superficie del agua, comprende plantas de flotación libre donde sus raíces están flotando en el agua (como la lenteja de agua) y las flotantes enraizadas donde sus raíces están adheridas al fondo del humedal pero sus hojas flotan en la superficie del agua (como los nenúfares), entre las especies utilizadas en sistemas de tratamiento están: la lenteja de agua (*Lemna minor*) y el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*). Su principal función es extraer nutrientes y evitar el crecimiento de algas, pero si se sale de control su crecimiento puede convertirse en una plaga que trae problemas al ecosistema.

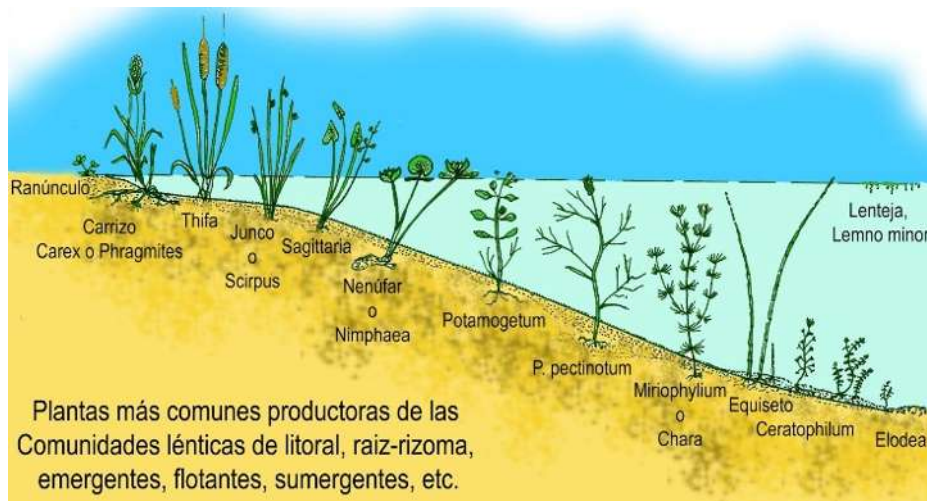


Figura 5. Tipos de plantas en humedales.

Fuente: Amarsoria, 2016

Los principales tipos de plantas emergentes utilizadas en humedales se presentan en la tabla 2:



**Tabla 2. Principales especies de vegetación utilizadas en los humedales**

Sistemas de flujo superficial (especies flotantes o sumergidas)		Sistemas de flujo subsuperficial (especies emergentes)	
Nombre científico	Nombre común	Nombre científico	Nombre común
<i>Eichornia crassipes</i>	Jacinto o lirio acuático	<i>Typha angustifolia</i>	Tule
<i>Lemna sp</i>	Lenteja de agua	<i>Typha latifolia</i>	Tule, espadaña
<i>Wolffia sp</i>		<i>Scirpus sp</i>	Tule, junco
<i>Pistia stratiotes</i>	Lechuga de agua	<i>Carex sp</i>	Junco
<i>Elodea canadensis</i>		<i>Eleocharis sp</i>	Junco
<i>Hydrilla verticillata</i>		<i>Juncus sp</i>	Junco
<i>Limnobium stoloniferum</i>	Cucharita, Chilicastie tostón	<i>Arundo donax</i>	Caña
<i>Lemna gibba</i>	lenteja de agua	<i>Pragmites Communis</i>	Carrizo
<i>Potamogeton spp</i>		<i>Phragmites australis</i>	Junco
		<i>Schoenoplectus colifornicus</i>	Papiro
		<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Alcatraz o cala

Fuente: CONAGUA, 2015

### 2.3 MICROORGANISMOS EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

En los humedales artificiales se pueden encontrar microorganismos como bacterias, protozoos, actinomicetos y hongos. Se desarrollan de manera natural en los humedales y se encargan de descomponer la materia orgánica y producir biomasa. Son organismos heterótrofos que necesitan de carbono para hacer sus funciones.

Se desarrollan alrededor de partículas sólidas, sedimentos y desechos y partes sumergidas de plantas.

Las bacterias participan en procesos esenciales para el funcionamiento de los humedales. Se encargan de descomponer la materia orgánica y la remoción de contaminación hacia la atmosfera como anhídrido carbónico y metano. Participan en el ciclo del nitrógeno al hidrolizar el nitrógeno orgánico para transformarlo en formas asimilables como amonio o nitrato y algunas bacterias anaerobias producen desnitrificación al convertir ion nitrato a nitrógeno gaseoso.

La disponibilidad de fósforo también depende en parte de la intervención microbiana, ya que transforman formas insolubles de fósforo en formas que pueden aprovechar las plantas. Otras funciones de las bacterias es reducir azufre a sulfuros y la oxidación de sulfatos.

Los protozoos son abundantes en las aguas residuales de tipo orgánico. Mantienen un control sobre la población bacteriana responsables de la descomposición de la materia orgánica al alimentarse de ellas, contribuyen a la floculación de partículas y excretan productos metabólicos de ortofosfatos y amonio, compuesto orgánicos del fósforo y el nitrógeno los cuales son asimilables para las plantas.

Los hongos que pueden encontrarse en los humedales son en su mayoría actinomicetos, organismos saprófitos que se alimentan de restos de organismos, en este caso, restos de alimentos o residuos de plantas, contribuyendo a la disminución de la carga orgánica contaminante del sistema.

## **2.4 PROCESOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES**

### **Remoción de materia orgánica**

La remoción de materia orgánica en los sistemas de humedales es rápida, debido al flujo lento de los humedales de flujo superficial y a la gran filtración en los humedales de flujo subsuperficial debido al sustrato. Esta materia orgánica sedimentable se descompone dependiendo de la cantidad de oxígeno disponible, una parte del DBO se encuentra disponible en forma coloidal y es removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos. Esta actividad biológica puede ser anaerobia o aerobia. Una pequeña parte de la materia orgánica se remueve por medio de la filtración y sedimentación.

Esta biodegradación se lleva a cabo por microorganismos que están adheridos a las raíces o a los sedimentos presentes, los cuales son heterótrofos y autótrofos, llevando a cabo todos sus procesos de descomposición aprovechando la luz y haciendo procesos de óxido-reducción para la síntesis de energía para crear nuevas células. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

En los procesos biológicos participan organismos vivos (microorganismos y microrganismos) que influyen en factores como el pH, disponibilidad de oxígeno y la temperatura, para la eliminación de la materia orgánica se pueden presentar procesos de óxido-reducción, hidrólisis o fotólisis.

La materia orgánica disponible sirve de sustrato a los microorganismos para poder desarrollarse totalmente. La disponibilidad de oxígeno que se mide como DBO, indica el tipo de microorganismos que existirán en el medio que se encargarán de la degradación de la materia orgánica. Los microorganismos aerobios necesitan el oxígeno para desarrollarse correctamente. Estos microorganismos son muy eficientes para la degradación de materia orgánica en gases, compuestos minerales y biomasa microbiana. Esto nos indica que las condiciones aerobias son mejores para la eliminación de materia orgánica que las condiciones anaerobias. Los microorganismos anaerobios necesitan otros aceptores de electrones como óxidos de nitrógeno, nitrógeno, azufre o tiosulfato. Las reacciones resultantes son menos eficientes que las aerobias.

Las tasas de degradación dependen de factores como la temperatura, la degradabilidad de los compuestos orgánicos y la disponibilidad de oxígeno. En procesos aerobios los compuestos resultantes son compuestos oxidados de nitrógeno y azufre, anhídrido carbónico y agua. En condiciones anaerobias son metano, ácidos orgánicos y alcoholes.

El clima cálido acelera el proceso de remoción de DBO durante los primeros días, pero a medida que pasa más tiempo la remoción se hace lenta ya que se produce DBO residual por los procesos en el humedal, y por esto la salida de DBO no será cero.

### **Remoción de sólidos suspendidos**

A pesar de que los sólidos suspendidos son removidos en su mayoría en los tratamientos previos, los humedales filtran y sedimentan los remanentes, terminando la remoción.

En los sistemas de humedales de flujo superficial la sedimentación ocurre por floculación/sedimentación y filtración/intercepción, la sedimentación ocurre por efecto de la gravedad. Cabe mencionar que el sistema puede generar más sólidos suspendidos debido a partes de la vegetación, así como microorganismos y precipitados.

En los sistemas de humedales de flujo subsuperficial esta remoción se facilita debido a que el flujo del agua se ralentiza dando un tiempo ideal para permitir una mejor floculación y sedimentación de los sólidos y se tiene una gran superficie para estos procesos proporcionada por el lecho de soporte ayudando también al proceso de adsorción.

Las raíces y el sustrato disminuyen la velocidad del flujo para facilitar estos procesos de remoción.

### **Remoción de nitrógeno**

El nitrógeno está presente en las aguas residuales en forma de nitrato, nitrito, amoniacal y nitrógeno orgánico. La concentración de nitrógeno total en el influente de un humedal proveniente de un tratamiento primario va de 8 a 85 mg/L, el nitrógeno amoniacal puede ir de 1 a 40 mg/L y el nitrógeno nítrico va de 0 a 1 mg/L (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

En los humedales el nitrógeno es eliminado por procesos físico-químicos y biológicos.

Los procesos fisicoquímicos que se dan son la sedimentación, filtración, intercepción y floculación ocurriendo en el nitrógeno orgánico ya que es parte de la materia orgánica asociada con los sólidos en suspensión. Otro proceso es la sorción en la biopelícula formada en las plantas emergentes o restos vegetales. La variación de pH puede provocar la volatilización del amoniacal, con las condiciones ideales de temperatura y alcalinidad el ion amoniacal para a amoniacal gas que puede desprenderse del sistema.

Los procesos biológicos consisten en la amonificación, nitrificación, desnitrificación, fijación de nitrógeno y asimilación por parte de las plantas (Curt, 2004). Mismos que a continuación se mencionan.

La amonificación también denominada hidrólisis es la transformación biológica del nitrógeno contenido en la materia orgánica en nitrógeno amoniacal durante la degradación de la materia orgánica. Se puede producir en condiciones aerobias o anaerobias, pero se sabe que en condiciones anaerobias se da un poco más lento que en condiciones aerobias, velocidad que depende del pH y la temperatura. Las aguas residuales se hidrolizan totalmente en 19 horas a temperaturas de entre 11 y 14 °C

La nitrificación es la transformación del amoniaco en nitrato por parte de microorganismos nitrificantes aerobios suspendidos en el agua o en la biopelícula de la superficie vegetal sumergida. El ion nitrato a diferencia del amonio, no se inmoviliza si no que permanece en el agua, pudiendo ser absorbido por las plantas, microorganismos o ser reducido (desnitrificación). La velocidad del proceso también depende del pH y la temperatura.

La desnitrificación se produce por microorganismos anaerobios que utilizan el nitrato como fuente aceptora de electrones y el carbono orgánico como donante electrónico que transforman el nitrato en nitrógeno gaseoso. Es indispensable la ausencia total de oxígeno y la presencia de carbono orgánico, el cual sería el limitante ya que en los humedales el fondo se mantiene en condiciones anóxicas. Este proceso se da principalmente en los sedimentos del humedal, así como en las biopelículas con nula presencia de oxígeno y alto contenido de carbono orgánico, como zonas del fondo donde hay residuos de plantas en descomposición o exudados de las plantas. El nitrógeno gaseoso queda en la columna de agua donde puede ser fijado por los microorganismos fijadores o puede desprenderse a la atmósfera.

La asimilación de N<sub>2</sub> a nitrógeno orgánico se denomina fijación de nitrógeno, llevado a cabo por microorganismos que producen nitrogenasa en condiciones aerobias o anaerobias. En los humedales sucede en la capa superficial del agua en las zonas

abiertas, en los sedimentos, en la rizósfera oxidada y sobre la superficie de hojas y tallos de las plantas.

Por último, las plantas asimilan las formas inorgánicas de nitrógeno para formar compuestos nitrogenados estructurales.

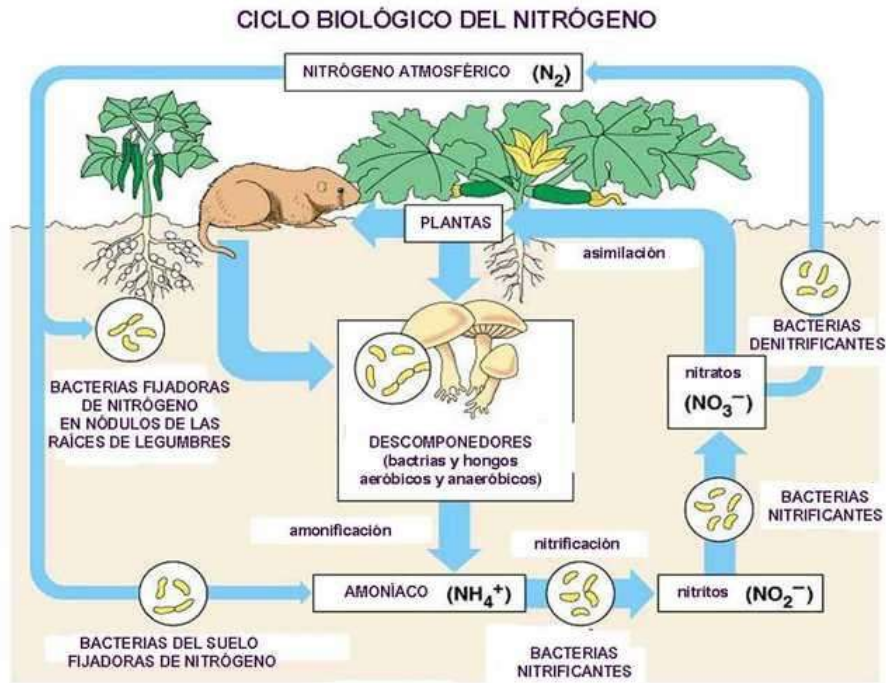


Figura 6. Ciclo del nitrógeno

Fuente: Agricultures, 2016

### Remoción de fósforo

La remoción más notoria de fósforo en los humedales se da con la inmovilización y deposición de fosfatos en los sedimentos. Las plantas del sistema contribuyen a esta remoción mientras se retiren en tiempos indicados del sistema para evitar su reingreso al sistema con la degradación y muerte de las plantas.

La remoción de fósforo por parte de las plantas y microorganismos en humedales se da de mejor manera en tiempos de climas templados ya que el desarrollo de las plantas depende mucho del clima.

### Remoción de patógenos

En aguas residuales existen una gran diversidad de microorganismos como bacterias, protozoos, hongos o virus entre otros que pueden ser patógenos, sin embargo, se utiliza un solo tipo de microorganismos para caracterizar las aguas ya que intentar hacerlo con todos los existentes sería un impedimento económico muy fuerte. Estos microorganismos que sirven de índice de contaminación fecal son los coliformes fecales.

Los patógenos pueden estar en la parte de sólidos del influente o suspendidos en el agua. Para el primer caso pueden separarse por medio de sedimentación, interceptación o absorción/adsorción. Después de ser separados pueden quedar retenidos en la biopelícula o en los sedimentos. La eliminación de estos patógenos se da al intentar sobrevivir a las condiciones ambientales de los humedales, como temperatura y la disponibilidad de sustrato los cuales no se presentan en la cantidad que necesitan. Esto debido a que la temperatura es menor a la que tienen en el ambiente del intestino y el sustrato debe conseguirlo entrando en competencia con los demás microorganismos que en ocasiones son depredadores de este tipo de patógenos. Pueden existir virus o protozoos que no se eliminen en el sistema por lo que de ser necesario debe instalarse un sistema de desinfección posterior.

### **Remoción de metales pesados**

Los metales traza tienden a tener afinidad por la adsorción y complejación con la materia orgánica, por lo que se depositan en el fondo del humedal ya sea en forma soluble o como partículas asociadas siendo la primera forma más biodisponible.

Los procesos físico-químicos que determinan la distribución entre las partículas y sus fases disueltas son: precipitación, sedimentación, erosión, difusión, complejación y adsorción. Varios parámetros determinan el control de la sedimentación en el agua, tales como pH, fuerza iónica, relación flujo/sólidos suspendidos, condiciones óxicas/anóxicas, concentraciones de ligantes orgánicos e inorgánicos, contenido de carbono orgánico particulado y disuelto.

## 2.5 DISEÑO DE HUMEDALES

Para el diseño de los humedales es necesario considerar y/o determinar la topografía, los módulos, operación en serie o paralelo, profundidad, así como las estructuras de entrada y salida. Es importante considerar también las actividades de operación y mantenimiento, ya que por ejemplo es más fácil dar limpieza a los tubos de distribución de caudal armados con codos a 45°, en comparación con codos de 90 grados. El diseño hidráulico debe evitar la formación de zonas muertas y flujos preferenciales, tanto como sea posible. El flujo del agua en el interior del humedal debe romper las resistencias creadas por la vegetación, capa de sedimentos, raíces y sólidos acumulados en los humedales.

El diseño conceptual se planteará con base en restricciones como la disponibilidad de terreno, ubicación del sistema, actividades de operación y mantenimiento, objetivos de tratamiento, entre otros.

Para el diseño de humedales artificiales se considera la temperatura ambiental máxima y mínima y la temperatura promedio del agua, estacionalidad y velocidad, factores que determinan el valor de las constantes de remoción, el periodo de estiaje y el lluvioso (avenidas, dilución del agua a tratar, riesgo de lavado del sistema); los parámetros de diseño normalmente utilizados son: caudal, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, nitrógeno total, fósforo total y coliformes fecales.

- **Profundidad**

La profundidad para el diseño de los humedales de flujo subsuperficial depende de la profundidad que pueda alcanzar la vegetación utilizada, teniendo un rango entre 0.3 y 0.9 metros (EPA, 2000) siendo 0.6 metros (EPA, 2000) el valor más comúnmente utilizado.

- **Tiempo de retención hidráulico**

El tiempo de retención hidráulica es el tiempo que tarda una molécula de agua que entra en el reactor en salir del mismo, mientras mayor sea este valor significa que el agua residual estará mayor tiempo en contacto con los



sedimentos biológicamente activos y se dará una mayor sedimentación. La EPA propone la siguiente fórmula para su cálculo:

$$t = \frac{A n d}{Q} \quad (Ec. 1)$$

Donde:

t= tiempo de retención hidráulico (días)

A= área del humedal (m<sup>2</sup>)

n= Coeficiente de porosidad del material de soporte, este valor se propone de 0.40 si no se utilizan plantas en el humedal y de 0.35 si se utilizan plantas (EPA 1993)

d= profundidad del humedal (m)

Q= gasto medio (m<sup>3</sup>/día)

- **Área**

Para el cálculo del área del humedal de acuerdo la Water Environmental Federation (WEF, 2009) se tiene la fórmula siguiente:

$$A_s = \frac{Q[\ln(C_o) - \ln(C_e)]}{K t d n} \quad (Ec. 2)$$

Donde:

A<sub>s</sub>= área superficial del humedal (m<sup>2</sup>)

Q= gasto medio (m<sup>3</sup>/día)

C<sub>o</sub>= concentración de DBO en el influente (mg/l)

C<sub>e</sub>= concentración de DBO en el efluente (mg/l)

Kt= constante de decaimiento

d= profundidad del humedal (m)

n= coeficiente de porosidad del material

Para este cálculo es necesario definir la constante de decaimiento. Para poder calcularla se necesita conocer la temperatura promedio del agua en invierno ya que en esta época se dan condiciones críticas para el humedal. La EPA propone la siguiente fórmula para su obtención:

$$K t = K_{20} \theta^{T-20} \quad (Ec. 3)$$

Donde:

$K_t$ = constante de decaimiento

$K_{20}$ = proporción de la constante de temperatura de las aguas residuales a 20 °C definida con un valor de 1.104 (EPA, 1993)

$T$ = temperatura del agua en invierno

$\theta$ = coeficiente de temperatura igual a 1.06 (EPA, 1993)

- **Eficiencia**

Se tienen fórmulas para el cálculo de concentraciones en el efluente de algunos contaminantes, como son demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales (SST) y nitrógeno total.

En el caso de la concentración de DBO en el efluente se tiene la siguiente fórmula (CNA, 2007):

$$C_e = C_o \text{Exp}(-K_t t) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

$C_o$ = concentración de DBO en el influente (mg/l)

$C_e$ = concentración de DBO en el efluente (mg/l)

$K_t$ = constante de decaimiento

$t$ = tiempo de retención hidráulico (días)

Para el cálculo de la concentración de SST en el influente se tiene la siguiente fórmula propuesta por Reed and Brown en 1995:

$$C_{e,SST} = C_{o,SST} \left( 0.1058 + 0.0011 \frac{100 Q}{A_s} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$C_{e,SST}$ = concentración de SST en el efluente (mg/l)

$C_{o,SST}$ = concentración de SST en el influente (mg/l)

$A_s$ = área superficial del humedal ( $m^2$ )

$Q$ = gasto medio ( $m^3/\text{día}$ )

Para el cálculo de concentración de nitrógeno total en el efluente se utiliza la siguiente fórmula (CNA, 2007):

$$C_{e,N} = (0.52 C_{o,N}) + 3.1 \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$C_{e,N}$ = concentración de nitrógeno total en el efluente (mg/l)

$C_{o,N}$ = concentración de nitrógeno total en el influente (mg/l)

$A_s$ = área superficial del humedal ( $m^2$ )

$Q$ = gasto medio ( $m^3/día$ )

## **2.6 NOM-001-SEMARNAT-1996**

Esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes de la nación, teniendo por objeto el cuidar la calidad y posibilitar sus usos. Esta norma es de observancia obligatoria para los responsables de las descargas.

La norma establece como límites máximos para DBO y Sólidos suspendidos totales los mostrados en la tabla 3.

**Tabla 3. Límites máximos permisibles de DBO y SST de la NOM-001-SEMARNAT-1996**

PARÁMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	RIOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
	P.M	P.D.	P.M	P.D.	P.M	P.D.	P.M	P.D.	P.M	P.D.	P.M	P.D.	P.M	P.D.	P.M	P.D.	P.M	P.D.	P.M	P.D.
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150

(1) Instantáneo

(2) Muestra Simple Promedio Ponderado

(3) Ausente según el método de Prueba definido en la NMX-AA-006

P.D.= Promedio Diario; P.M.= Promedio Mensual

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos

(SEMARNAT, 1996)

### **3.- ANTECEDENTES**

Los estudios en cuanto a remoción de contaminantes en humedales artificiales se han hecho alrededor del mundo, enfocándose en la remoción de nitrógeno y fósforo en la mayoría de los casos, buscando la introducción de modelos de humedales como parte del tratamiento secundario y terciario en aguas residuales. En relación a ello, en este trabajo se analizan algunos artículos de importancia, que sirven como guía para llevar a cabo la investigación.

#### **Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal**

Los tratamientos convencionales de las aguas residuales son costosos y requieren altos consumos energéticos, además en su mayoría no eliminan nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo causantes de la eutrofización en los cuerpos receptores de los efluentes de estas plantas. Los llamados sistemas naturales y dentro de estos los humedales han venido a resolver parte de estos problemas. El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una metodología que incorpore tanto los elementos desde el punto de vista de la cinética del proceso de tratamiento, como los elementos geométricos e hidráulicas con la comprobación del tipo de flujo a esperar dentro del reactor. (González & Deas, 2011)

#### **Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango**

Este trabajo muestra información que permite establecer como sistema de tratamiento terciario de aguas residuales domésticas a los humedales artificiales y con ello, apoyar a los sistemas locales de tratamiento a cumplir con el contenido de coliformes fecales que solicita la normatividad en materia de descargas de agua (10 Unidades formadoras de colonias/mL), además de bajar los contenidos de fósforo y nitratos y evitar con ello la eutrofización de los cuerpos de agua.

*Eleocharis densa*, *Schoenoplectus americanus* y *S. tabernaemontani* fueron usadas en la construcción de los micro-humedales. Las eficiencias promedio, alcanzadas por los sistemas, fueron: de 98.46 a 99.78% en remoción de CF, de 89 a 99% en FS y de 93 a 99 % en  $N-NH_4^+/NH_3$ . (Pérez M. , 2009)

### **Tolerancia de macrófitas acuáticas a aguas residuales domésticas y su eficiencia en humedales artificiales en condiciones de invernadero**

En este estudio, se analizó la tolerancia de diversas especies acuáticas y semi acuáticas bajo tres calidades de agua. Los parámetros considerados en este caso fueron el contenido de oxígeno disuelto, fosfato soluble, nitrato, amoníaco, coliformes fecales, sólidos suspendidos totales, pH y conductividad eléctrica. De 28 especies, se seleccionaron *Schoenoplectus americanus*, *S. tabernaemontani*, y *Eleocharis densa*. Para amoníaco y fosfatos, los sistemas con grava y plantas removieron entre 96 y 98% y entre 99 y 100%, respectivamente. Los contenidos de coliformes fecales disminuyeron uniformemente en todos los sistemas, entre 98.5 y 98.7% (Pérez, Gonzalez, López, Martínez, & Cuevas, 2009).

### **Phytoremediation of Landfill Leachate with *Colocasia esculenta*, *Gynerum sagittatum* and *Heliconia psittacorum* in Constructed Wetlands**

En este estudio, se realizó la evaluación de la acumulación de algunos metales pesados como Cd (II), Hg (II), Cr (VI) y Pb (II) en las especies *Gynerium sagittatum* (Gs), *Colocasia esculenta* (Ce) y *Heliconia psittacorum* (He) plantadas en humedales construidos que tratan lixiviados de rellenos sintéticos. Se analizaron las concentraciones de estos metales en la raíz, tallo, rama y hojas. Como resultado, las eficiencias medias de eliminación de DQO, NTK y NH<sub>4</sub> + -N fueron 66, 67 y 72%, respectivamente y la remoción de metales pesados varió de 92 a 98% en todas las unidades. Las raíces mostraron un mayor contenido de metal que los brotes. Las plantas evaluadas demostraron su idoneidad para la fitorremediación de los lixiviados de rellenos sanitarios y todos ellos pueden clasificarse como acumuladores de metales (Madera, Peña, Peña, Rousseau, & Lens, 2015).

### **Performance Evaluation of Horizontal Subsurface Flow–Constructed Wetlands for the Treatment of Domestic Wastewater in the Tropics**

Se llevó a cabo un estudio piloto a escala para evaluar el rendimiento de los humedales horizontales construidos en el subsuelo (HSSF-CW) bajo condiciones tropicales. El estudio reveló el desempeño exitoso de los humedales en términos de

cumplimiento con los estándares locales de descarga con Respecto a la demanda de oxígeno químico (DQO), BOD5, sólidos suspendidos totales (TSS) y SO<sub>2</sub>-4-S con una eficiencia media de eliminación de masa entre 58.9 y 74.9%. Eliminación moderada de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N y fósforo total (TP). La constante estimada de velocidad aérea de primer orden y la BOD5 concentración de fondo mostró el HSSF-CW a ser competitivo área-requisito (Mburu, Tebitendwa, Rousseau, Bruggen, & Lens, 2013)

### **Modelos de remoción y transformación de compuestos nitrogenados en humedales artificiales de flujo sub superficial; panorama actual y propuesta para generar nuevos modelos.**

En este trabajo se realizó una investigación sobre estudios realizados enfocados a desarrollar modelos que simulan compuestos nitrogenados en humedales artificiales de flujo subsuperficial, además, se creó una metodología para detectar las características más comunes de estos trabajos y se desarrolló una propuesta para facilitar la validación de nuevos modelos conceptuales del flujo de nitrógeno (Rosado, 2010).

### **Evaluación del suministro de nutrientes sobre la eficiencia de remoción de contaminantes de un humedal artificial a escala laboratorio**

En este estudio, se realizó un experimento de laboratorio para evaluar el efecto de balances de la nutrición vegetal, sobre la eficiencia de humedales construidos en la remoción de carga orgánica carbonosa y de nitrógeno orgánico, con la especie vegetal *Phragmites australis*. La eficiencia de remoción de nitrógeno orgánico disminuyó a lo largo de la experimentación (Orduña, 2012).

### **Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales de flujo sub-superficial utilizando *Stipa ichu* para el tratamiento de aguas residuales domésticas**

Se evaluaron dieciocho humedales artificiales, seis de ellos sin plantas, doce con plantas y, de estos últimos, seis inoculados con hongo solubilizador de fósforo del genero *Penicillium* (HSF). Durante un periodo de estudio de diez semanas se estableció la eficiencia de remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas, se observó una remoción del fósforo total hasta concentraciones

inferiores a 0.7 ppm (97.38 % y 98.13% en humedales con plantas y en humedales con HSF, respectivamente). Un alcance significativo de los humedales radica en altas remociones (99.55%) de DQO y DBO5 que presentan concentraciones por debajo de 14 ppm en humedales con plantas. Además, se logró reducir exitosamente la concentración de nitrógeno total, con remociones de hasta el 94.73%. (Hernández, Ramos, Castillo, & Orduña, 2015)

#### **4.- JUSTIFICACIÓN**

En el Estado de Michoacán, no se cuenta con la suficiente información en cuanto a remoción de contaminantes por medio de plantas hidrófitas emergentes en humedales, así como su capacidad de adaptación a las condiciones de la región; esta situación puede traducirse en eficiencias de remoción por debajo de lo esperado. En este trabajo, se tomará en cuenta los límites máximos permisibles establecidos en la norma NOM-001- SEMARNAT-1996.

#### **5.-OBJETIVOS**

##### **5.1 OBJETIVO GENERAL**

Obtener la eficiencia de remoción de un humedal de flujo subsuperficial de flujo horizontal, en términos de DBO y SST, con algunos tipos de plantas presentes en el Estado de Michoacán.

##### **5.2 OBJETIVOS PARTICULARES**

- Diseñar y construir un humedal experimental en el que se utilicen las hidrófitas predominantes en la región.
- Caracterizar química, física y biológicamente el influente y el efluente de un humedal experimental, haciendo énfasis en los parámetros DBO y SST.
- Comparar los resultados de la calidad del agua en el efluente del humedal, para así cotejar con lo establecido en la norma, específicamente DBO y SST (NOM-001-SEMARNAT-1996).
- Promover el uso de esta tecnología para el tratamiento de aguas residuales municipales en el estado de Michoacán.



## 6.- HIPÓTESIS

En los humedales en los que se utilizan *Typha domingensis* (*espadaña tropical o tule*) y *Eleocharis densa*, como vegetación, se obtiene un efluente que cumple con la norma NOM 001-SEMARNAT 1996, en cuanto a DBO y SST.

## 7.- METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### a) Selección del humedal experimental:

El humedal seleccionado fue el humedal de flujo subsuperficial, debido a sus mejores resultados de remoción de contaminantes y patógenos por la existencia de un sustrato de soporte para la vegetación, dando una mayor área para la sedimentación, adsorción y depósito de los distintos contaminantes y patógenos. Su mejor eficiencia en comparación a los humedales de flujo vertical es debido al tiempo de retención hidráulica.

### b) Diseño del humedal experimental:

Para el diseño del humedal subsuperficial con flujo horizontal se partió del espacio disponible para la construcción del modelo. En el espacio disponible se trazaron y acomodaron 4 módulos, todos ellos con medidas de 2.10 metros de largo por 0.70 metros de ancho, por lo que se tiene un área de 1.47 metros cuadrados en cada uno. En la tabla 4 se muestran los datos de diseño, el valor de DBO y SST del influente se tomaron de la recomendación bibliográfica de Metcalf & Eddy. Partiendo de estos datos se utilizó la ecuación 3 (Ec. 3) para obtener la concentración de DBO en el efluente.

**Tabla 4. Datos para diseño del humedal experimental**

Datos para diseño	
L=	2.10 m
W=	0.70 m
Ad=	1.47 m <sup>2</sup>
T=	7 °C
DBO <sub>inf</sub> =	220 mg/l
SST <sub>inf</sub> =	220 mg/l

Para aplicar la Ec. 3 se propone un tiempo de retención hidráulico de 7 días, recomendado en la tabla 5.

**Tabla 5. Criterios de diseño y remoción en humedales de flujo subsuperficial**

Criterio	Rango/clase	Rango/clase usual	Parámetros	porcentajes de remoción
Profundidad del metro	30 - 76 cm	30 - 65 cm	DBO	70 - 96
Substrato (arena, grava o rocas)	<40 mm	20 - 30 mm	Sólidos suspendidos	60 - 90
Tipo de planta	emergente	junco y carrizo	Nitrógeno	40 - 90
Tiempo de residencia	6 - 14 días	6 - 7 días	Fósforo	40 - 80
Carga hidráulica	< 200 L/m <sup>2</sup> /d	150 L/m <sup>2</sup> /d	Coliformes	60 - 95
Área	0.01-250 acres			

Fuente: CNA, 2007

Entonces se tiene:

$$C_e = C_o \text{Exp}(-Kt t)$$

Se calcula Kt con la Ec.4, la cual será utilizada también en el cálculo del área superficial:

$$Kt = K_{20} \theta^{T-20}$$

Sustituyendo el valor de la temperatura promedio del agua en invierno en la ciudad de Morelia que es de 7°C:

$$Kt = (1.104) 1.06^{7-20}$$

$$Kt = 0.5176 d^{-1}$$

Ahora sustituyendo los valores correspondientes en la Ec.3 se tiene la concentración de DBO en el efluente:

$$C_e = 220 \frac{mg}{l} \text{Exp}(-0.5176 d^{-1} \times 7 d)$$

$$C_e = 5.87 \frac{mg}{l}$$

Este valor de concentración de DBO en el efluente nos indica que se espera una eficiencia del 97.33% de remoción, cumpliendo con la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Con este valor y la constante de decaimiento ya se tienen todas las variables para aplicar la fórmula de área superficial (Ec. 2) para obtener el gasto a tratar con el área disponible, la profundidad del humedal se propone de 0.7 metros de acuerdo a las recomendaciones de la EP, el valor de la porosidad del material de soporte se obtuvo de manera experimental, en este caso el valor es de 0.49, este despeje se muestra a continuación:

$$A_s = \frac{Q[\ln(C_o) - \ln(C_e)]}{Kt d n}$$

Despejando el gasto queda:

$$Q = \frac{A_s Kt d n}{[\ln(C_o) - \ln(C_e)]}$$

Sustituyendo se tiene:

$$Q = \frac{1.47 \text{ m}^2 \cdot 0.5176 \text{ d}^{-1} \cdot 0.70 \text{ m} \cdot 0.49}{[\ln(220) - \ln(5.87)]}$$

$$Q = 0.07202 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$Q = 72.02 \frac{\text{l}}{\text{día}}$$

El valor del gasto obtenido es por módulo.

Ahora se obtiene el valor de la concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente con la Ec. 5 para tener un valor posible de remoción de SST.

$$C_{e,SST} = C_{o,SST} \left( 0.1058 + 0.0011 \frac{100 Q}{A_s} \right)$$

$$C_{e,SST} = 220 \frac{mg}{l} \left( 0.1058 + 0.0011 \frac{100 (0.07202 \frac{m^3}{día})}{1.47 m^2} \right)$$
$$C_{e,SST} = 24.46 \frac{mg}{l}$$

Esto nos indica que se espera una eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales del 89.03%, cumpliendo con la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Por último, se comprueba el tiempo de retención hidráulico con la EC. 1.

$$t = \frac{A n d}{Q}$$

Sustituyendo los valores se tiene:

$$t = \frac{1.47 m^2 0.49 0.70m}{0.07202 \frac{m^3}{día}}$$
$$t = 7 \text{ días}$$

- c) **Selección de materiales de soporte:** se hará la selección del material para sustrato tomando en cuenta sus características físicas, así como la facilidad de obtención en la zona donde se hará el modelo.

Se seleccionó grava y tezontle con un diámetro efectivo de 3/4", la grava fue seleccionada ya que en trabajos realizados y humedales funcionales en plantas de tratamiento para poblaciones se han tenido buenos resultados con su utilización. El tezontle se seleccionó por ser un material de fácil obtención en la ciudad y de un precio accesible, así como la poca información existente relacionada a su utilización como material de soporte en humedales artificiales.

- d) **Selección de sitio para instalación de modelo:**

Para la construcción del modelo se empezaron a hacer gestiones para el permiso de utilización del espacio disponible dentro de la planta de

tratamiento de aguas residuales del UMSNH CIAC BICENTENARIO, se hizo llegar la petición al departamento de Servicios Generales de la UMSNH, hasta el momento se está a la espera de la entrega de un oficio de permiso para proceder al inicio de los trabajos, esto aún no se ha concretado debido a la situación imperante en la Universidad Michoacana.

El permiso fue otorgado en el mes de junio de 2018, haciendo la planeación correspondiente para iniciar los trabajos el día 19 de junio.

La planta no está en funcionamiento, y la infraestructura no recibe mantenimiento, sin embargo, aún está en condiciones aceptables.

Se seleccionó un espacio disponible a lado del tanque de cloración donde se tiene el área necesaria para la construcción de los modelos (Figura 7).



Figura 7. Sitio elegido para construcción de modelos

- e) **Caracterización de la vegetación a utilizar:** para llevar a cabo la caracterización de las especies vegetales se recolectaron muestras de especies presentes en el lugar de construcción. La existencia de un humedal formado de manera natural en la zona de construcción da las condiciones para el crecimiento de vegetación hidrófita nativa de la ciudad.

Elegir especies adaptadas en la zona elegida facilita el proceso de adaptación y operación de los modelos. Se observaron las especies emergentes en la zona de humedal natural para hacer la selección de 2 de

ellas. Se seleccionó por la cantidad presente de ejemplares de las especies, así como por facilidad de manejo de estas. Al tener seleccionadas las especies se procedió a la obtención de las muestras con herramientas manuales, este proceso se hizo en presencia y con la supervisión de la Doctora en Biología Mariela Gómez Romero, quién fue la encargada de la caracterización e identificación de las especies seleccionadas.



**Figura 8. Recolección de muestras**

El resultado de la caracterización se muestra a continuación:

***Typha domingensis* Pers.**

**Reino:** Plantae

**Subreino:** Tracheobionta

**División:** Magnoliophyta

**Clase:** Liliopsida

**Orden:** Poales

**Familia:** Typhaceae

**Género:** *Typha*

**Especie:** *T. domingensis* Pers.

**Nombres:** Espadaña, tule, masa de agua, cola de gato, cola pecho, petalzimicua, vela de sabana.

**Origen y distribución geográfica:** América. Distribución secundaria Eurasia y África. En México se conoce de Aguascalientes, Baja California Norte, Baja California Sur, Campeche, Chiapas, Coahuila, Colima, Distrito Federal, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, Sinaloa, Tlaxcala, Veracruz, Yucatán.

**Hábito y forma de vida:** Hierba acuática, enraizada, emergente.

**Tamaño:** Hasta de 2.5 m de altura.

**Hojas:** Generalmente igualando o excediendo la altura de las espigas, parte superior de las vainas atenuada hacia la lámina, generalmente asimétricas, pero algunas veces simétricas, epidermis de la superficie ventral (hacia dentro) conteniendo gran cantidad de glándulas mucilaginosas de color oscuro, dispuestas en líneas longitudinales y comúnmente extendiéndose hacia la base de la lámina, láminas hasta 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.

**Inflorescencia:** De color moreno claro, con una o más brácteas foliáceas caducas.

**Espiga/Flores:** Espigas masculinas hasta de 42 cm de largo y 1.5 cm de ancho y en general separadas de las femeninas por 0.7 a 5 cm, bractéolas de las flores masculinas filiformes a espatuladas, simples a ramificadas, algunas veces con incisiones que forman segmentos largos, frecuentemente coloreadas con puntos morenos en el ápice, de 2.5 a 3.5 mm largo, estambres de 2 a 4, total o parcialmente soldados, filamentos de 1 a 2.5 mm de largo, anteras de 2 a 3 mm de largo y 0.15 a 0.2 mm de ancho, conectivo generalmente obtuso y algunas veces con una punta corta y aguda, polen arreglado en mónadas; espigas femeninas hasta de 48 cm de largo y 2 cm de diámetro, flores femeninas con bractéolas largas y delgadas, acuminadas en el ápice, más largas que los pelos del ginóforo (estructura que levanta al ovario), de color moreno claro en el ápice, de 3 a 5 mm de largo, pelos del ginóforo ligeramente coloreados en la punta y más cortos que los estigmas, ovario fusiforme (con extremos que se alargan y la parte media ancha), estilo de 1 a 2 mm de largo, estigma largo y delgado, de 0.5 a 1.5 mm de largo.

**Frutos y semillas:** Fruto fusiforme, de 1 a 1.5 mm de largo.

**Hábitat:** En lugares tranquilos de agua dulce de lagos, lagunas, pantanos, zanjas y canales.

**Distribución por tipo de zonas bioclimáticas:** Se distribuye preferentemente en las regiones cálido-húmedas por debajo de los 1000 m de altitud.

**Distribución altitudinal:** Hasta 1000 m, ocasionalmente más alto; se conoce del Valle de México a 2250 m.

**Ciclo de vida:** Planta perenne.



**Fenología:** Florece en primavera y fructifica hasta mediados de otoño.

**Efectos sobre la biodiversidad y ecosistemas:** Es una especie nativa, pero puede comportarse como invasiva ocasionalmente, estableciendo poblaciones grandes casi exclusivas de esta especie.

**Usos:** Se utiliza en la cestería, para hacer petates, etc.

(CONABIO, 2009)



**Figura 9. *Typha domingensis*  
*Eleocharis densa* Benth.**

**Clasificación taxómica:**

**Reino:** Plantae

**División:** Magnoliophyta

**Clase:** Liliopsida

**Orden:** Poales

**Familia:** Cyperaceae

**Género:** *Eleocharis*

**Especie:** *Eleocharis densa* Benth.

*Eleocharis densa* Benth. Perenne, con rizomas horizontales gruesos y endurecidos; tallos de 10 cm a 1.5 m de altura y de (2.3) 3 a 10 mm de ancho, algo esponjosos, de sección circular o planos al secarse, generalmente algo estrechos en el ápice, en la unión con la espiga; vainas de color rojizo en la base, con el ápice membranoso, truncado o débilmente oblicuo, en ocasiones mucronado; espiguillas por lo general cilíndricas y obtusas en el ápice, con muchas flores densamente agrupadas y 1 a 3 (rara vez más) glumas vacías en la base, redondeadas y firmes; glumas fértiles de 2 a 4.4 mm de longitud y de 1.2 a 1.6 mm de ancho, generalmente aplicadas, obtusas o subagudas, de color café pálido, con la nervadura central de color verde o paja y el ápice hialino; estambres 3, con anteras hasta de 2.4 mm de longitud, de color amarillo; estilo trífido o bífido; aquenio obovado, biconvexo o de sección débilmente triangular, túrgido, de 1.1 a 1.5 mm de longitud y de alrededor de 0.8 a 1 mm de ancho, con la superficie diminutamente reticulada, de color amarillo a oliváceo o café, tubérculo lanceolado, de sección triangular o algo aplanado, hasta de 0.8 mm de longitud, no constreñido en la base, de color café; cerdas 5 a 7, desiguales, algunas más largas que el aquenio, unidas en la base. En el Valle se ha colectado entre los 2250 y 2400 m de altitud, en charcos y a orilla de canales, en los municipios de Tepetzotlán, Cuautitlán, Villa N. Romero y Chalco. Registrado del centro de México a Guatemala (Rzedowski & Rzedowski, 2001)



Figura 10. *Eleocharis densa*

- f) **Preparación del sitio:** La preparación del sitio se hizo con herramientas manuales como son palas, picos, marro, machete, etc. La zona elegida para la instalación del humedal contaba con un desnivel de aproximadamente 15 cm, por lo que primero se hizo la nivelación del terreno, así como el despalme del área para el humedal para después comenzar la excavación.



Figura 11. Preparación de terreno



Figura 12. Terreno nivelado y despalme

- g) **Construcción del humedal experimental:** Para dar inicio a la construcción de los modelos se trazó en el terreno con hilo y cal para tener las guías para la excavación.



**Figura 13. Trazo de terreno**

La excavación se llevó a cabo con herramientas manuales. La profundidad de los humedales es de 70 centímetros, se dejará un bordo libre de 10 centímetros por lo que la profundidad total sería de 80 centímetros, la excavación se hará de 40 centímetros dejando 40 centímetros por encima del nivel de la excavación. El material obtenido de la excavación se colocará alrededor del espacio del modelo para proporcionar soporte a la geomembrana que será colocada como capa impermeable.



**Figura 14. Zanjas para colocación de los modelos**

A la par de la excavación, se realizó la instalación de la red hidráulica para llevar el agua residual del cárcamo de bombeo hasta los modelos. Para esto se instaló una extensión en el tubo de salida de la bomba 1 con una válvula de esfera de 2" en el extremo para el control de la purga del cárcamo y una de 1" para controlar el llenado del tinaco.



**Figura 15 Válvulas de control**

La línea de conducción se hizo con tubería de PVC de 1", en primer lugar, se conduce el agua residual del cárcamo de bombeo a un tinaco de 450 litros, esto para mantener un mejor control del gasto que se conducirá a la entrada de los modelos.



**Figura 16. Instalación hidráulica**

Al tener listas las zanjas para la colocación de los modelos, se procedió a la preparación de las cubetas de geomembrana para la impermeabilización del medio, para esto se hizo el corte a la medida y posteriormente fue llevado a

las instalaciones de la empresa AQUALMA para su pegado por medio de fusión y extrusión con calor para un sellado perfecto evitando fugas en los modelos.



**Figura 17. Proceso de geomembrana**

Al tenerse listas las cubetas de geomembrana, se hizo un afine en las paredes de las zanjas hechas para la colocación del medio impermeable. posteriormente se colocaron las cubetas para proceder a la elaboración de las tuberías tipo sifón con tubo de PVC de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro para la recolección del agua tratada. Estas tuberías se colocaron en el fondo del humedal. Para colocarlas se hizo una perforación en la pared de la geomembrana para la salida del tubo que conduce el agua tratada, para evitar fugas por estas perforaciones se selló con sellador especial para lugares húmedos.



**Figura 18. Tubería de recolección y salida**

Colocado el tubo de salida se procedió al llenado de los humedales con el material de soporte hasta la altura de 70 centímetros.



Figura 19. Medio de soporte

Terminado el llenado de las cubetas con el material de soporte se hizo la plantación de las especies hidrófitas elegidas para el tratamiento, en este caso se plantó *Typha domingensis* y *Eleocharis densa*. Cabe mencionar que se hizo trasplante de rizomas, y por medio de estos se espera la reproducción de las hidrófitas.



Figura 20. Plantación de hidrófitas

Por último, se hizo la colocación de las tuberías de llegada, por medio de las cuales se alimentará de agua residual a los modelos. Estas tuberías constan de tubos de PVC de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro, cada entrada cuenta con una válvula del mismo diámetro para el control de gasto de entrada. En el extremo final se hizo la colocación de una tubería horizontal para distribuir uniformemente el gasto en el ancho de los modelos.



**Figura 21. Humedales experimentales**

**h) Operación y mantenimiento del humedal experimental:**

El inicio de operación de los modelos experimentales se dio el día 19 de noviembre del año 2018.

En primer lugar, se hizo un llenado total de los modelos para verificar el correcto funcionamiento de las tuberías de entrada y de salida y favorecer la adaptación de las hidrófitas plantadas, así como la verificación del estado de la geomembrana. Después de localizar la existencia de fugas, se procedió a su reparación. De igual forma se hicieron labores de limpieza en el sitio, retirando toda la basura existente.



**Figura 22. Puesta en marcha**

Pasado el tiempo de llenado y revisión de los modelos para su correcto funcionamiento, se inició la calibración por medio de las válvulas en la entrada de cada modelo. Para llegar al gasto de 72.02 l/día se deben recibir



50 mililitros por minuto, entonces se realizaron aforos en las entradas utilizando una probeta graduada de 50 ml y un cronometro.



Figura 23. Aforo

Posteriormente, se iniciaron mediciones en la longitud de las plantas hidrófitas, esto para verificar su adaptación al medio. Se pudo observar en el caso de la *typha domingensis* un crecimiento acelerado en las plantas más pequeñas de alrededor de 3 a 4 centímetros por día, mientras que en las más altas su crecimiento es más lento, de alrededor de 0.5 a 1 cm cada 2 días.

Otra actividad realizada fue la remoción de algunos ejemplares de *typha domingensis* que se secaron durante el tiempo de adaptación.

En el caso de la *Eleocharis densa* se tuvo una adaptación más lenta en comparación de la *typha domingensis*, ya que se necesitaron cerca de 7 semanas para empezar a apreciarse los primeros brotes en la superficie, haciendo mediciones se tiene un crecimiento de entre 3 y 4 centímetros por semana, teniendo por el momento una mayor densidad en crecimiento en comparación con la *typha domingensis*.



**Figura 24. Medición de hidrófitas**

Durante el mes de mayo se pudo observar que la *typha domingensis* comenzó su ciclo reproductivo por medio de esporas con el crecimiento de su inflorescencia, llegando a mediados del mes de junio a liberar esporas por medio del viento.

**Figura 25. Inflorescencia de *typha domingensis***

La *eleocharis densa* comenzó a mostrar crecimiento de inflorescencia en la segunda semana del mes de junio.

**Figura 26. Inflorescencia de *eleocharis densa***

Para la operación constante de los modelos se hace el bombeo de agua residual del cárcamo de bombeo al tinaco de 450 litros cada 2 días. De manera constante se revisan los tubos horizontales de entrada a los modelos para realizar una limpieza de estos para evitar el taponamiento por causa de los sólidos acumulados en su interior.



Figura 27. Llenado de tinaco

i) **Monitoreo de la eficiencia de remoción de la vegetación hidrófita (determinación de DBO o SST):**

Se muestrearon los efluentes de los 2 modelos, así como el influente. Se le realizaron pruebas de DQO, DBO, coliformes fecales, sólidos en todas sus formas y parámetros de campo en el laboratorio de ingeniería ambiental en el edificio de posgrado de la facultad de ingeniería civil de la UMSNH. En la figura 26 se muestra el proceso de la toma de muestras para los análisis, mientras que en la figura 27 se ilustra una comparación visual de las muestras tomadas, como puede observarse hay una gran diferencia entre la muestra del influente, y las muestras de los efluentes de los 2 modelos utilizados. El influente es totalmente gris con sólidos en suspensión, en tanto las muestras de los efluentes presentan total transparencia, la única característica llamativa de estas muestras es que aun presentan un ligero olor a agua residual.



Figura 28. Toma de muestras



Figura 29. Comparación visual de muestras

- **DQO**

La primera prueba realizada fue la de demanda química de oxígeno (DQO). La DQO es una medida del oxígeno requerido para oxidar todos los componentes presentes en el agua, tanto orgánicos como inorgánicos, por medio de la acción de agentes fuertemente oxidantes en medio ácido (UMSNH, 2018).

Se utilizó el método espectrofotométrico, indicado en la norma mexicana NMX-AA-030/1-SCFI-2012.



Figura 30. Muestras y digestor

Figura 31. Espectrofotómetro

- **DBO**

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una medida de la cantidad de oxígeno consumido en el proceso biológico de degradación de la materia orgánica en el agua en un periodo de 5 días (UMSNH, 2018).

Este proceso se hizo conforme al marcado en la norma mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001.

Figura 32. Prueba de DBO

- **Sólidos en todas sus formas**

Los sólidos son toda la materia, excepto el agua contenida en los materiales líquidos. El término sólido involucra 10 determinaciones que representan un análisis completo del contenido de sólidos de una muestra de agua, estas determinaciones son:

<b>ST</b>	Sólidos totales	<b>SSF</b>	Sólidos suspendidos fijos
<b>STV</b>	Sólidos totales volátiles	<b>SDT</b>	Sólidos disueltos totales
<b>STF</b>	Sólidos totales fijos	<b>SDV</b>	Sólidos disueltos volátiles
<b>SST</b>	Sólidos suspendidos totales	<b>SDF</b>	Sólidos disueltos fijos
<b>SSV</b>	Sólidos suspendidos volátiles	<b>Ssed</b>	Sólidos sedimentables

(UMSNH, 2018).

En esta prueba se siguió el procedimiento marcado en la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 para sólidos en general, excepto sólidos sedimentables, para ese caso se utilizó la norma mexicana NMX-AA-004-SCFI-2013.



Figura 33. Prueba de conos Imhoff para SSed



Figura 34. Secado y pesado de muestras

- **Coliformes fecales**

Los coliformes son microorganismos patógenos que provienen principalmente de los excremento humanos. El número de estas bacterias que se encuentre en cualquier volumen de agua definido es una medida de la calidad de aguas negras o desperdicios que se hayan descargado en el agua, y puede interpretarse como una medida de la calidad del agua para el consumo humano.

Para esta prueba se realizó el procedimiento del numero mas probable (NMP) marcado en la norma oficial mexicana NOM-112-SSA1-1994.



Figura 35. Prueba de coliformes fecales

- **Parámetros de campo**

Los parámetros de campo son de gran importancia ya que sirven como base de referencia para la determinación de la mayoría de los parámetros de laboratorio y, en algunos casos son parte de los mismos.

Los parámetros de campo tomados en las muestras fueron, pH con un potenciómetro; oxígeno disuelto (O.D.) con un medidor de oxígeno disuelto; salinidad (Sal), conductividad eléctrica (C.E), temperatura (T) y sólidos disueltos totales (SDT) con un multiparamétrico. Cabe señalar que el pH también se midió con tiras indicadoras de pH en el humedal con *typha domingensis* para comparar el resultado con el obtenido con el potenciómetro. La temperatura también se midió con un termómetro para comparar el obtenido con el multiparamétrico.

**Figura 36. Medición de parámetros de campo**



## 8.- RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Primer muestreo

En la tabla 8 se muestra el resumen de los resultados de los parámetros medidos en todas las pruebas hechas a las muestras

**Tabla 6. Resultados primer muestreo**

	Infuente	Gravilla y tezontle con <i>typha domingensis</i>	Gravilla y tezontle con <i>Eleocharis densa</i>
DQO (mg/l)	244	43	35
DBO (mg/l)	86.4	12.04	9.91
C.F (NMP/100ml)	2.3E+06	< 3000	< 3000
SST (mg/l)	145	51	48
C.E (μS/cm)	901	808	807
SDT (mg/l)	440	395	395
Sal (ppt)	0.4	0.4	0.4
T (°C)	18	18	18
pH	7.4	7.7	7.6
O.D (mg/l)	1.16	4.72	3.95
Ssed (ml/l)	0.9	0.05	0.05

En la tabla 7 se muestran los valores resultantes de los cálculos de sólidos en todas sus formas de este primer muestreo.

**Tabla 7. Sólidos en todas sus formas primer muestreo**

Muestra	Peso			Sólidos (mg/l)										Ssed (ml/l)
	inicial	evaporado	calcinado	ST	STF	STV	SDT	SDF	SDV	SSV	SSF	SST	ST	
Influente	52.5497	52.564	52.5607	572	440	132	427	341	86	46	99	145	572	0.9
<i>Typha</i>	50.5039	50.5148	50.5127	436	352	84	385	323	62	22	29	51	436	0.05
<i>Eleocharis</i>	43.2287	43.2399	43.238	448	372	76	400	325	75	1	47	48	448	0.05

En la tabla 8 se muestran los porcentajes de remoción en los 2 parámetros que son objeto de este trabajo que son DBO y SST, así como coliformes fecales para verificar información bibliográfica.

**Tabla 8. Porcentajes de remoción primer muestreo**

<b>%Remocion DBO</b>	86.07	88.52
<b>%Remocion SST</b>	64.83	66.90
<b>%Remocion C.F</b>	99	99

La remoción de DBO se puede observar que es muy alta. En 2 meses de operación se alcanzó casi un 90%, al llevar poco tiempo de operación aún no se pueden considerar resultados totalmente confiables. Los sólidos suspendidos totales se encuentran cerca de un 70%, esto se puede deber a 2 factores, uno es el poco tiempo de operación y el segundo es la posible aportación de sólidos del material de soporte, con los siguientes 2 muestreos programados para abril y Julio se espera mantener la línea de porcentajes de remoción altos.

Un parámetro que tuvo valores muy interesantes es el oxígeno disuelto en los efluentes de los humedales. Se observaron valores muy altos en ambos humedales, 4.72 mg/l en el humedal con *typha domingensis* y 3.95 mg/l en el humedal de *eleocharis densa*, al compararlo con el valor de O.D obtenido de la muestra de agua aireada en la prueba de DBO que fue de 5.86 mg/l se ve la cercanía de los valores. Este resultado indica el buen funcionamiento y adaptación de las plantas hidrófitas, ya que una de sus principales aportaciones a los procesos de remoción es el transferir oxígeno al agua para dar el ambiente adecuado a los microorganismos para que hagan la degradación de la materia orgánica.

En la figura 35 se puede observar la gráfica de comparación de los datos obtenidos en el influente de DBO y en la figura 36 los valores de SST del influente comparados al valor máximo permisible por la NOM-001-SEMARNAT-1996. en descarga para conservación de vida acuática.

## Segundo muestreo

Después de realizar los análisis, así como el cálculo correspondiente en los casos que se requirió, se presenta en la tabla 9 los resultados de cada parámetro tomado en las muestras del segundo muestreo.

**Tabla 9. Resultados segundo muestreo**

	Infuente	Gravilla y tezontle con typha	Gravilla y tezontle con Eleocharis
DQO (mg/l)	221	94	99
DBO (mg/l)	131	45	63
C.F (NMP/100ml)	2.3E+06	4.30E+03	2.60E+04
SST (mg/l)	168	60	68
C.E (µS/cm)	1598	2.11	2.1
SDT (mg/l)	796	1058	1054
Sal (ppt)	0.8	1.1	1.1
T (°C)	18	18	18
pH	8	7.8	8
O.D (mg/l)	0.37	4.51	3.34
Ssed (ml/l)	2.1	0.05	0.05

En la tabla 10 se muestran los valores obtenidos de los sólidos en todas sus formas en este segundo muestreo.

**Tabla 10. Sólidos en todas sus formas segundo muestreo**

Muestra	Peso			Sólidos (mg/l)										Ssed (ml/l)
	inicial	evaporado	calcinado	ST	STF	STV	SDT	SDF	SDV	SSV	SSF	SST	ST	
Influente	49.4128	49.4324	49.4263	784	540	244	616	486	130	114	54	168	784	2.1
<i>Typha</i>	43.3594	43.3793	43.3749	796	620	176	736	600	136	40	20	60	796	0.05
<i>Eleocharis</i>	53.9578	53.9765	53.9718	748	560	188	680	536	144	44	24	68	748	0.05

En este segundo muestreo se dieron algunas modificaciones, especialmente en DBO y algunos parámetros de campo.

En cuanto a DBO el porcentaje de remoción se vio disminuido, esto se puede deber al proceso de adaptación de los modelos, a que el medio de soporte está más colmatado que al inicio de la operación y al aumento de la carga orgánica en el efluente. En el color de las muestras de los efluentes se pudo observar una leve coloración amarillenta, esto puede deberse a procesos de crecimiento de la vegetación, lo cual también pudo a portar un poco más de materia orgánica dando como resultado esta disminución.

En cuanto a sólidos suspendido totales la disminución del porcentaje de remoción en el modelo con *typha domingensis* disminuyó un 0.54% y en el modelo con *eleocharis densa* disminuyó un 7.48%, esto se puede deber a la adaptación ya mencionada, en el modelo con *eleocharis densa* pudo deberse a que la planta tardó un poco más en comenzar su desarrollo.

En la tabla 11 se muestran los porcentajes de remoción de DBO, SST y coliformes fecales.

**Tabla 11. Porcentajes de remoción segundo muestreo**

%Remocion DBO	65.65	51.91
%Remocion SST	64.29	59.52
%Remocion C.F	99.81	98.87

El valor de DBO y SST en el efluente del humedal con *eleocharis densa* exceden a los límites máximos permisibles de la norma.

Revisando los valores de coliformes fecales puede observarse que se mantiene una remoción elevada, pero sin cumplir con los límites máximos permisibles para este parámetro que según la NOM-001-SEMARNAT-1996 es de entre 1000 y 2000 NMP/100ml.

### Tercer muestreo

**Tabla 12. Resultados tercer muestreo**

	Infuente	Gravilla y tezontle con typha	Gravilla y tezontle con Eleocharis
DQO (mg/l)	249	23	17
DBO (mg/l)	206	12	10
C.F (NMP/100ml)	1.1E+08	3.00E+03	1.10E+06
SST (mg/l)	207	36	8
C.E (μS/cm)	620	512	490
SDT (mg/l)	301	298	237
Sal (ppt)	0.3	0.3	0.2
T (°C)	21	21	21
pH	7.2	7.2	7.2
O.D (mg/l)	1.82	3.52	4.07
Ssed (ml/l)	15	0	0

En la tabla 13 se muestran los resultados de los sólidos en todas sus formas de este tercer muestreo.

**Tabla 13. Sólidos en todas sus formas tercer muestreo**

Muestra	Peso			Sólidos (mg/l)										Ssed (ml/l)
	inicial	evaporado	calcinado	ST	STF	STV	SDT	SDF	SDV	SSV	SSF	SST	ST	
Influnte	50.532	50.5479	50.5407	636	348	288	429	273	156	132	75	207	636	15
<i>Typha</i>	49.6333	49.6421	49.64	352	268	84	316	240	76	8	28	36	352	0
<i>Eleocharis</i>	46.2305	46.2381	46.2369	304	256	48	328	248	80	0	8	8	336	0

Después de 8 meses de operación se hizo el tercer muestreo programado para este trabajo de investigación, los resultados obtenidos en los parámetros fueron muy satisfactorios.

Se tuvieron los porcentajes más altos de remoción, acercándose a los esperados obtenidos con las fórmulas para obtener valores supuestos al estar en un 100% de funcionamiento. Estos porcentajes se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14. Porcentajes de remoción tercer muestreo**

<b>%Remocion DBO</b>	94.17	95.15
<b>%Remocion SST</b>	82.61	96.14
<b>%Remocion C.F</b>	99.99	99.00

La remoción de DBO fue muy alta, los valores obtenidos en los efluentes cumplen con los límites máximos permisibles para protección de vida acuática propuestos en la NOM-001-SEMARNAT-1996. En comparación con el valor de DBO obtenido en el primer muestreo se tuvo un aumento del 8.1% en remoción, mientras que en comparación con el obtenido en el segundo muestreo se tiene un aumento de 28.52% en el humedal con *typha domingensis* como vegetación y en cuanto al humedal con *eleocharis densa* como vegetación se tuvo un aumento del 6.63% en comparación con el primer muestreo y un aumento considerable de 43.24% en comparación con el segundo muestreo. Esto nos indica que los humedales están funcionando a un 100% en su capacidad de remoción o muy cercano a este, después de pasar la etapa de adaptación de los procesos en estos.

En la remoción de sólidos suspendidos también se tuvo un aumento en la remoción en comparación con los 2 muestreos anteriores, así como el cumplimiento de los valores máximo permisibles para protección de vida acuática propuesto en la NOM-001-SEMARNAT-1996. El humedal con *typha domingensis* de vegetación tuvo una variación de 17.78% en comparación con el primer muestreo y una diferencia de 18.32% en comparación con el segundo muestreo. El humedal con *eleocharis densa* como vegetación tuvo una diferencia de 29.24% en comparación con el primer muestreo y una diferencia del 36.62% en comparación con el segundo, la diferencia de porcentajes de remoción en este segundo arreglo se debe a que la planta se desarrolló de buena manera, es decir, creció en gran número y su zona radicular se expandió totalmente en la subsuperficie del humedal, teniendo una gran densidad de crecimiento.

La remoción de coliformes fecales tuvo muy poca variación entre muestreos, en el modelo con *typha domingensis* se tuvo una variación de entre 0.19 y 0.81 % entre muestreos y en el modelo con *eleocharis densa* se tiene una variación de 0.13%, a pesar de tener una remoción del 99%, los efluentes no cumplen con los límites máximos permisibles propuestos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, por lo que se debe tener en cuenta un tratamiento posterior de estos efluentes para una reutilización más segura del agua obtenida.

El oxígeno disuelto es un parámetro que nos indica el funcionamiento del sistema, para ambos arreglos se vio en los 3 muestreos que este parámetro se elevó en los efluentes en gran manera comparado con el influente, lo que nos indica que la vegetación cumple su función de oxigenar el agua para ayudar a la oxidación de la materia orgánica y al crecimiento de los microorganismos aerobios que ayudan a la desintegración de la misma y la fijación de otros elementos como el nitrógeno cumpliendo con la simbiosis necesaria para el tratamiento.

Al hacer la comparativa de ambos arreglos se puede observar que ambos cumplen con buena eficiencia a remoción de SST, DBO y coliformes fecales y cumplen con la norma en los 2 primeros, por lo que ambas plantas utilizadas son recomendables para utilizar, la *typha domingensis* tiene mejores resultados en cuanto a coliformes fecales y la *eleocharis densa* tiene mejores resultados en cuanto a SST y DBO.

En la figura 35 se muestra la gráfica comparativa de los valores obtenidos de DBO del influente, así como de los efluentes de los modelos y el límite máximo permisible de la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

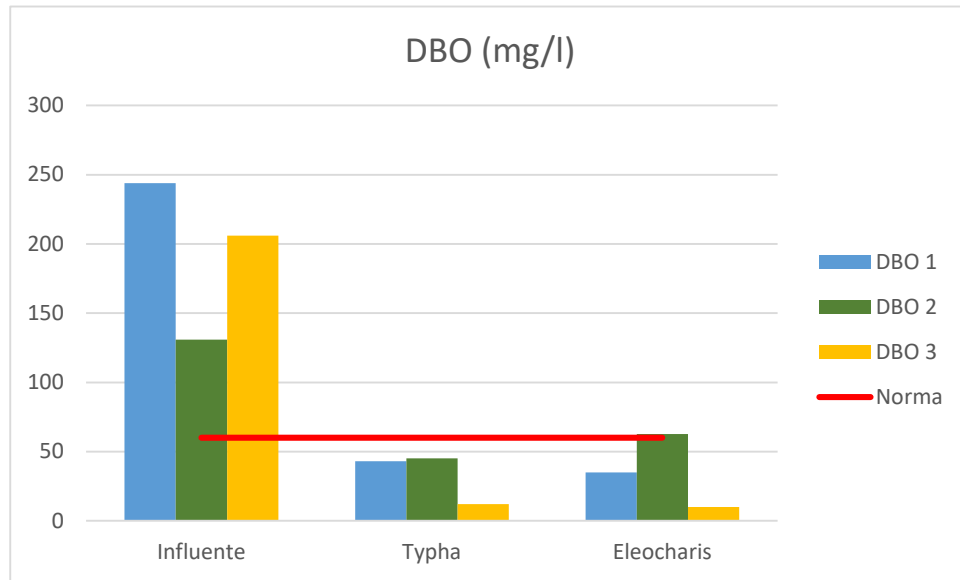


Figura 37. Comparativa de DBO

En la figura 38 se muestra la comparativa de los resultados obtenidos de los 3 muestreos en el influente y el efluente de ambos modelos, así como el límite máximo permisible propuesto por la normativa vigente.

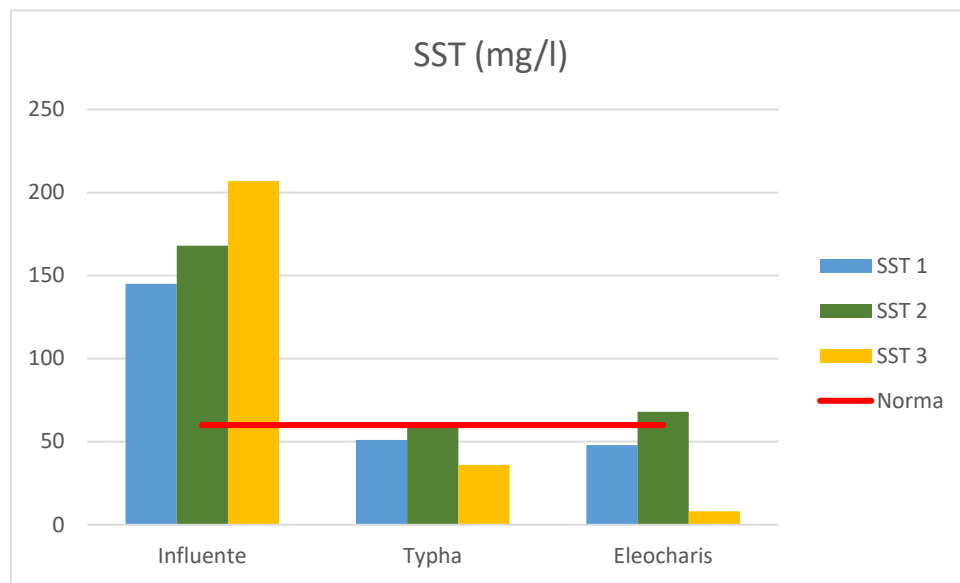


Figura 38. Comparativa de SST

Para un análisis más completo de los porcentajes de remoción en los 3 muestreos realizados, se muestra en la figura 39 la gráfica comparativa de porcentajes de remoción de DBO, SST y coliformes fecales de la *typha domingensis* y en la figura



40 la gráfica comparativa de la *eleocharis densa*, donde se puede observar la variación de valores.

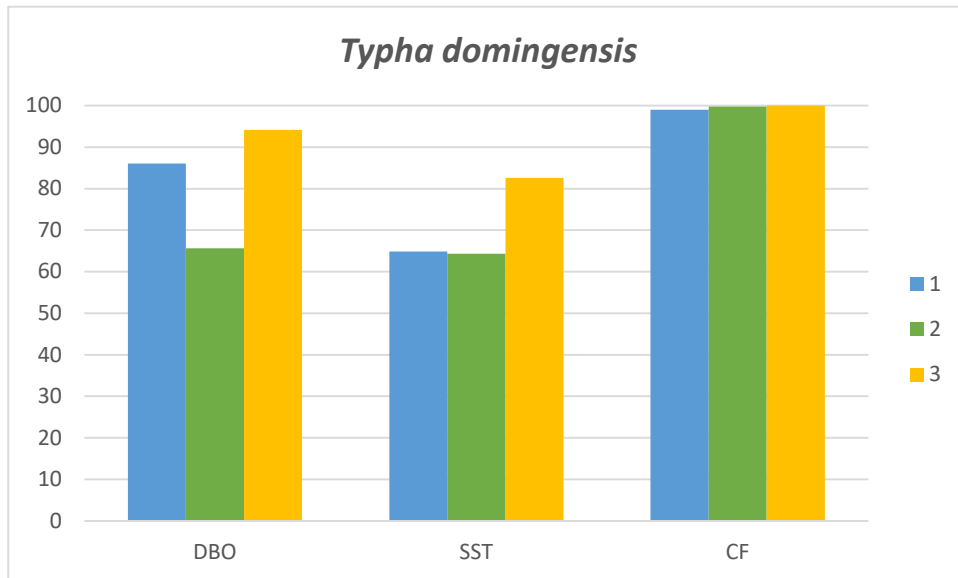


Figura 39. Porcentajes de remoción *typha domingensis*

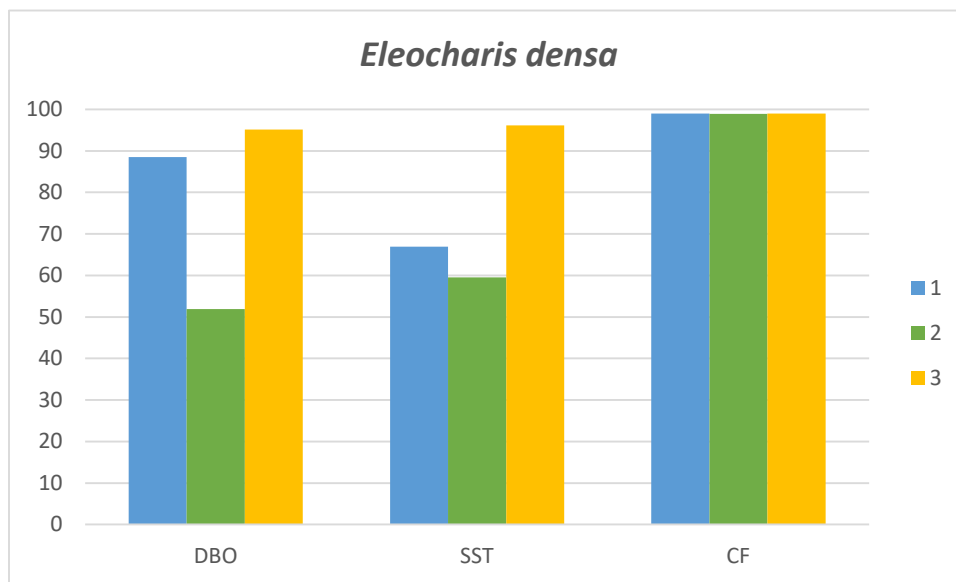


Figura 40. Porcentajes de remoción *eleocharis densa*

Los modelos se construyeron en condiciones reales, es decir el experimento se realizó en la intemperie con una variación de carga orgánica dependiendo de la utilización de los sanitarios del CIAC y todos los elementos que rodean en el ambiente del lugar de instalación del modelo como es fauna nativa, lluvia, lapsos de tiempo de mantenimiento de las instalaciones, entre otros, dando resultados

esperados en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales para poblaciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los muestreos, la planta más recomendable será la *Eleocharis densa*, aunque puede depender de la disponibilidad de cada una. Si en el lugar de construcción del humedal artificial se tiene disponible *Typha domingensis* y no *Eleocharis densa* puede utilizarse sin problema alguno, ya que su eficiencia también es buena y cumple con los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996 en DBO y SST.

Se hizo el análisis del crecimiento de las raíces de ambas plantas, durante este análisis se retiraron ejemplares de cada una para hacer la medición de estas.

### DESARROLLO DE LA RAIZ

Se debe mencionar que en el caso de la *typha domingensis* fue muy complicado obtener un ejemplar con raíces intactas, ya que cualquier movimiento con las herramientas disponibles para esta tarea dañaba las micorrizas que son muy delgadas. Por lo tanto, no pudo tenerse una medida representativa. Las medidas obtenidas fueron de 20 centímetros en el ejemplar obtenido, y se hizo una medición dentro de una pequeña zanja cavada en el modelo, obteniéndose una medida de 30 centímetros.



Figura 41. Medición de raíces *typha domingensis*

Por parte de la *eleocharis densa* se observó crecimiento en las raíces e hasta 36 centímetros, su crecimiento es mayor hacia el centro del cúmulo de raíces mientras que en las orillas su longitud es menor, de entre 10 y 20 centímetros.



Figura 42. Desarrollo de raíces *eleocharis densa*

## EVOLUCIÓN DE VEGETACION HIDRÓFITA

La *typha domingensis* se desarrolló en algunos especímenes hasta los 2.5 metros y en otros llegó a los 2 metros, se inició con ejemplares de apenas 30 a 70 centímetros.

La *eleocharis densa* se desarrolló de especímenes de 15 a 20 centímetros hasta alcanzar los 1.20 metros en la figura 43 se observa la etapa inicial y en la figura 44 se observa la etapa final y actual.



Figura 43. Etapa inicial de humedales 3/12/18

**Figura 44. Etapa final y actual 27/08/19**

## 9.-CONCLUSIONES

- Los humedales artificiales de flujo subsuperficial con flujo horizontal con *typha domingensis* y *eleocharis densa* como vegetación cumple con una remoción de sólidos suspendidos totales (SST) tal que los valores obtenidos de su efluente cumplen con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996.
- Los humedales de flujo subsuperficial con flujo horizontal tienen una buena eficiencia de remoción de coliformes fecales, sin embargo, se recomienda agregar un tratamiento posterior al efluente para cumplir con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996.
- La vegetación hidrófita cumple con la función de oxigenar el agua residual durante el tratamiento descrita en la bibliografía, esto se verifica con los valores de oxígeno disuelto obtenidos en los muestreos.
- Ambos especímenes de vegetación hidrófita seleccionados para este experimento siendo estos la *typha domingensis* y *eleocharis densa* son aceptables y recomendables para su uso en humedales artificiales en la zona de la ciudad de Morelia.
- Los humedales artificiales de flujo subsuperficial con flujo horizontal con *typha domingensis* y *eleocharis densa* como vegetación cumple con una remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) tal que los valores obtenidos de su efluente cumplen con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996.
- Los humedales en condiciones reales cumplen con los porcentajes de remoción de DBO, SST y coliformes fecales que se propone en la bibliografía.

## 10.- FUENTES CONSULTADAS

- Agricultures. (2016). *Agricultures*. Obtenido de <http://agriculturers.com/conoces-la-importancia-del-ciclo-del-nitrogeno/>
- Amarsoria, A. (2016). *A.M.A.R Soria*. Obtenido de <http://amarsoria.blogspot.mx/2016/02/humedales-sorianos.html>
- Aquaberri S.L. (2013). *Aquaberri*. Obtenido de <http://aquaberri.com/Dispositivos/Humedales-Artificiales/>
- Chavarria, J. (2001). Humedales artificiales de flujo vertical; estado del arte y propuestas experimentales para la obtención de parámetros de diseño.
- CNA. (2007). *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO. PAQUETES TECNOLÓGICOS PARA EL TRATAMIENTO DE EXCRETAS Y AGUAS RESIDUALES EN COMUNIDADES RURALES*. México D.F.: CNA.
- CONABIO. (2009). *Typhaceae*. Obtenido de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/typhaceae/typha-domingensis/fichas/ficha.htm>. Consultado 2/08/2018
- CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: humedales*. México: CONAGUA.
- Curt, M. D. (2004). Fitodepuración en humedales. Conceptos generales. *Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación*, 61-77.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia: Centro AGUA.
- EPA. (agosto de 1993). *Guía para el diseño y construcción de un humedal construido de flujos subsuperficiales*. Obtenido de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/40001CXS.PDF?Dockkey=40001CXS.PDF>
- EPA. (Septiembre de 2000). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial*. Obtenido de [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cs\\_00\\_023.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cs_00_023.pdf)
- Fernández, J. (2004). Humedales artificiales para depuración. *Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación*, 79-89.
- Fuentes, R. (2011). *Sistemas de depuración natural. Tecnología para la depuración sostenible del agua residual*. Obtenido de

[http://depuranatura.blogspot.mx/2011/05/humedal-de-flujo-subsuperficial\\_02.html](http://depuranatura.blogspot.mx/2011/05/humedal-de-flujo-subsuperficial_02.html)

- Fuentes, R. (2011). *Sistemas de depuración natural. Tecnología para la depuración sostenible del agua residual*. Obtenido de <http://depuranatura.blogspot.mx/2011/05/humedal-de-flujo-subsuperficial.html>
- González, O., & Deas, G. (2011). Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, 61-70.
- Hernández, D., Ramos, N., Castillo, J., & Orduña, J. (2015). Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales de flujo sub-superficial utilizando *Stipa ichu* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Ingenium* 9(25), 47-59.
- Madera, Peña, Peña, Rousseau, & Lens. (2015). Phytoremediation of Landfill Leachate with *Colocasia esculenta*, *Gynerum sagittatum* and *eliconia psittacorum* in Constructed Wetlands. *International Journal of Phytoremediation*, 16-24.
- Mburu, Tebitendwa, Rousseau, Bruggen, & Lens. (2013). Performance Evaluation of Horizontal Subsurface Flow–Constructed Wetlands for the Treatment of Domestic Wastewater in the Tropics. *Journal of environmental engineering*, 358-367.
- Orduña, M. (2012). Evaluación del suministro de nutrientes sobre la eficiencia de remoción de contaminantes de un humedal artificial a escala de laboratorio.
- Pérez, M. (2009). *Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango*. Chihuahua.
- Pérez, M., Gonzalez, M., López, C., Martínez, A., & Cuevas, G. (2009). Aquatic macrophytes tolerance to domestic wastewater and their efficiency in artificial etlands under greenhouse conditions. *Hidrobiológica*, 233-244.
- Rodríguez, J., & Durán, C. (2006). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales. *Tecnología, Ciencia, Educación vol. 21, núm 1*, 25-33.
- Rodriguez, Jácome, Molina, & Suárez. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 223-235.
- Romero, M., Colín, A., Sánchez, E., & Ortiz, M. (2009). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR UN SISTEMA PILOTO DE HUMEDALES

ARTIFICIALES: EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE LA CARGA  
ORGÁNICA. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 157-167.

- Rosado, L. (2010). Modelos de remoción y transformación de compuestos nitrogenados en humedales artificiales de flujo subsuperficial: panorama actual y propuesta para generar nuevos modelos.
- Rzedowski, G., & Rzedowski, J. (2001). *Flora fanerogámica del Valle de México*. Patzcuaro: Instituto de Ecología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- SEMARNAT. (1996). *NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. México.
- UMSNH, D. d. (2018). *Manual de prácticas: Pantas de tratamiento de aguas*. Morelia: UMSNH.
- WEF. (2009). *DESIGN OF MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS*. McGraw-Hill.



