
**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL
DE FLUJO HORIZONTAL PARA EL TRATAMIENTO
DE AGUAS SUPERFICIALES CONTAMINADAS
POR LA ACTIVIDAD PETROLERA.**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRIA EN INGENIERIA DE PROCESOS

PRESENTA:

JORGE JESÚS GARCÍA MORALES.

DIRECTOR:

M.I. JOSÉ REYES OSORIO.

VILLAHERMOSA, TAB. MEX. AGOSTO 2016





Instituto Tecnológico de Villahermosa

Maestría en Ingeniería de Procesos

AGRADECIMIENTOS

Diseño y evaluación de un humedal artificial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas superficiales
contaminadas por la actividad petrolera.

IBQ. JORGE JESÚS GARCÍA MORALES



Instituto Tecnológico de Villahermosa

Maestría en Ingeniería de Procesos

DEDICATORIA

**Diseño y evaluación de un humedal artificial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas superficiales
contaminadas por la actividad petrolera.**

IBQ. JORGE JESÚS GARCÍA MORALES



INDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
ARTÍCULOS BASADOS EN LA INVESTIGACIÓN.....	5
1. Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales	5
2. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica	6
3. Tratamiento de agua residual a través de humedales.	8
4. Tecnología experimental humedales artificiales.	9
5. Humedales artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas.	11
JUSTIFICACIÓN.....	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
OBJETIVOS.....	14
HIPOTESIS	15
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1 El agua.....	16
1.2 Contaminación del agua.....	18
1.3 Calidad del agua.	19



Instituto Tecnológico de Villahermosa

Maestría en Ingeniería de Procesos

1.4 Parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua.	21
1.4.1 Turbiedad.....	22
1.4.2 Sólidos o residuos.....	22
1.4.3 El color.....	22
1.4.4 Olor y sabor	23
1.4.5 La Temperatura	23
1.4.6 ph.....	24
1.5 Características Químicas	24
1.5.1 Aceites y Grasas.....	24
1.5.2 Agentes Espumantes.....	25
1.5.3 Alcalinidad	25
1.5.4 Metales	26
1.6 Principales contaminantes a eliminar.	27
1.7 Principales parámetros que deben controlarse.....	32
1.8 Necesidad de depuración de las aguas residuales.	33
1.9 Tratamientos de aguas residuales.	34
1.9.1 Métodos físicos.....	34
1.9.2 Procesos químicos.....	35
1.9.3 Procesos biológicos	35
1.10 Antecedentes “humedales”.....	35
1.11 Humedal natural.....	36
1.12 Humedal Natural o humedal artificial.....	37
1.13 Humedales Construidos	37
1.13.1 Clasificación de los humedales construidos.	38



Instituto Tecnológico de Villahermosa

Maestría en Ingeniería de Procesos

1.13.2 Elementos constituyentes de un humedal construido.	41
1.13.3 El material de relleno.	44
1.13.4 La vegetación.	45
1.13.5 Microorganismos.....	47
1.14 Consideraciones sobre la construcción de humedales.	48
1.15 Tratamiento preliminar del agua a depurar en los humedales.	49
2. METODO Y MATERIALES.....	50
2.1 Identificación de las descargas a la laguna el yucateco.	52
2.2 Diseño y construcción de unidades experimentales.....	52
2.3 CÁLCULOS BÁSICOS.....	54
2.4 Selección de la Vegetación	59
2.5 Recolección de las especies a utilizar.....	60
2.5.1 Establecimiento	60
2.6 Descripción del montaje experimental	61
Módulo 1 y 2	64
Válvulas.	64
2.7 Estabilización de la vegetación en los prototipos experimentales.	65
2.8 Operación del sistema experimental.	66
2.9 Análisis estadístico.....	67



Instituto Tecnológico de Villahermosa

Maestría en Ingeniería de Procesos

2.10 Determinación de parámetros físico-químicos (pH, Conductividad Eléctrica, Temperatura, Oxígeno disuelto, Sal, Sólidos Disueltos Totales)	68
3. RESULTADOS.....	72
3.1 Sistema de muestreo y Variable de Estudio	73
4. CONCLUSIONES	80
5. RECOMENDACIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	82



INDICE DE TABLAS

TABLA 1. TIPOS DE AGUA EXISTENTES EN LA TIERRA FUENTE: HERNÁNDEZ MUÑOZ 1990.....	16
TABLA.2 TIPOS DE METALES MÁS COMUNES EN EL AGUA. FUENTE PROPIA.....	26
TABLA 3. PARÁMETROS Y CONCENTRACIONES IDEALES BÁSICAS EN EL AGUA. FUENTE:	33
TABLA 4. TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL DE RELLENO. FUENTE PROPIA	45
TABLA 6. LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.	58
TABLA. 7 TIPO DE FLUJO Y VEGETACIÓN DE LOS PROTOTIPOS EXPERIMENTALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA LAGUNA EL YUCATECO.....	60
TABLA. 8 MÉTODOS ANALÍTICOS EMPLEADO	67
TABLA.9 ETAPA INICIAL DEL HUMEDAL ARTIFICIAL.	73
TABLA. 10 ANÁLISIS METALES PESADOS POR DEBAJO DE LOS LÍMITES PERMISIBLES.....	79



INDICE DE IMÁGENES

FIG. 1 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES. (SERRANO & HERNÁNDEZ, 2016).....	38
FIG.2 METODOLOGÍA DE ACTIVIDADES A REALIZAR DURANTE EL PROYECTO.....	50
FIG. 3 UBICACIÓN Y LUGAR DE INSTALACIÓN DEL HUMEDAL. (GOOGLE, 2016).....	51
FIG. 4 PROTOTIPO PROPUESTO DEL SISTEMA DE HUMEDALES EXPERIMENTALES. FUENTE: PROPIA	54
FIG. 5 ESPECIE TYPHA DOMINGENSIS.	59
FIG. 6 ESPECIE PONTEDERIA CORDATA.....	59
FIG.7 MEDIDAS Y DISTRIBUCIÓN DE LOS RAMALES DE TUBERÍAS HIDRAULICAS.....	62
FIG. 8 DIAGRAMA DE PROCESO DEL HUMEDAL ARFICIAL.	64
FIG. 9 OPERACIÓN INICIAL DEL HUMEDAL ARTIFICIAL.....	65



INDICE DE GRAFICAS

GRÁFICA.1 VARIACIONES DE OXÍGENO DISUELTO (DO) EN LOS PERIODOS NOV. 2015 A MAYO 2016 74

GRÁFICA. 2 VARIACIONES DE PH EN LOS PERIODOS DE NOV. 2015 A MAYO 2016..... 75

GRÁFICA. 3 VARIACIONES DE LA TEMPERATURA (T°C) EN LOS PERIODOS DE NOV. 2015 A MAYO 2016. 76

GRÁFICA. 4 VARIACIONES DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (C.E.) EN LOS PERIODOS DE NOV. 2015 A MAYO 2016. 77

GRÁFICA. 5 VARIACIONES DE LA TOTAL DE SOLIDOS DISUELTOS (TDS.) EN LOS PERIODOS DE NOV. 2015 A MAYO 2016. 77

GRÁFICA. 6 VARIACIONES DE SALINIDAD DURANTE LOS PERIODOS DE NOV. 2015 A MAYO 2016. 78



RESUMEN

La contaminación es uno de los principales problemas que impactan mundialmente en la sociedad del siglo XXI. Tabasco no es la excepción, ya que es un estado que se ubica en el sureste de México donde la actividad petrolera hace presencia constante en sus diversas zonas, derivándose el producto natural al cual llamamos petróleo. El hombre en su afán de alcanzar y explotar al máximo este recurso para tener una vida más fácil y llena de comodidades causa un daño grave en el medio ambiente. Una de las problemática muy constante es la contaminación de las aguas por hidrocarburos en los sistemas de almacenamiento, en las fuentes de abastecimiento subterráneas y superficiales. Este tipo de contaminación produce un cambio en las características organolépticas del agua que induce al rechazo de los consumidores, y su ingestión representa un riesgo para la salud; así mismo, el ecosistema puede sufrir afectaciones debidas al impacto negativo de estos contaminantes sobre sus diferentes componentes (Díaz & Pérez, 1993). El ser humano con el paso del tiempo siempre ha buscado alternativas que ayuden a subsanar los daños que ocasiona día a día al medio ambiente. Una de ellas fue definida en una ciudad de Irán en 1971 en la convención de Ramsar (reunión donde se hablan sobre la conservación y uso de los recursos naturales) como Humedales Naturales donde se estableció que:

"...son humedales aquellas extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros" (Vallejos, González, & Caballero., 2010).

Los Humedales Artificiales (H.A.) se definen como sistemas que simulan una zona de transición entre el ambiente terrestre y el acuático, pero que son específicamente contruidos para el tratamiento de aguas residuales bajo condiciones controladas de



Instituto Tecnológico de Villahermosa

Maestría en Ingeniería de Procesos

ubicación, dimensionamiento y capacidad de tratamiento (Romero, Cruz, Salinas, & Hernandez, 2009).

Teniendo en cuenta lo anterior primero se realizaron muestreos en diferentes puntos de la laguna el yucateco, donde se obtuvo información de cómo se encontraban los parámetros fisicoquímicos del agua. Posteriormente se llevó a cabo diseño y construcción de un humedal artificial sub-superficial de flujo horizontal para empezar con el tratamiento de las aguas de dicha región.

Con lo antes mencionado pudimos obtener rendimientos satisfactorio, basándonos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, la cual ayudo a evaluar las condiciones del agua después de la operación del sistema del HA. En este estudio se obtuvieron rendimientos satisfactorios en la eliminación de DQO, DBO, nitrógeno, ph ,salinidad, conductividad eléctrica y metales pesados.



ABSTRACT

Pollution is one of the major issues impacting our world in the XXI century. Tabasco is not an exception, as it is a state that is located in southeastern Mexico where oil activity makes constant presence in its various areas, being oil derived as the natural product. The man in an effort to reach and fully exploit this resource to have an easier and full of comfort cause serious damage to the living environment. A very common problem is the pollution of water by oil in both superficial and underground supply storage systems. This type of pollution causes a change in the organoleptic characteristics of water that leads to consumer rejection and also its ingestion can cause risks in humans' health; likewise, the ecosystem may suffer damages due to the negative impact of these pollutants on its different components (Díaz & Pérez, 1993). Human beings have always sought alternatives to reverse the damage caused by pollution to the environment. One of them was defined in a city of Iran in 1971 in Ramsar convention (meeting where they talk about the conservation and use of natural resources) and natural wetlands where it was established that :

" ... Those wetlands are areas of marsh, fen, peatland or water salted natural or artificial, permanent or temporary, static or flowing regime, brackish or including areas of marine water the depth of which at low tide does not exceed six meters" (Vallejos, González, & Caballero., 2010).

The Constructed Wetland (C.W.) are defined as systems that simulate a transition zone between terrestrial and aquatic environment, but they are specifically built for wastewater treatment under controlled location, sizing and treatment capacity (Romero, Cruz, Salinas, & Hernandez, 2009).



Instituto Tecnológico de Villahermosa

Maestría en Ingeniería de Procesos

Given the above, first samples were taken at different points of the Yucateco lagoon, where information on how the physicochemical parameters, in this water were obtained. Later an artificial wetland subsurface horizontal flow was designed and constructed to start with the treatment of water in this region.

With the above we could obtain satisfactory results, based on Mexican Official Standard NOM- 001- ECOL – 1996 which establishes the maximum permissible limits of pollutants in wastewater discharges into national waters and properties. This helped to evaluate water conditions after the operation of HA system. In this study satisfactory results were obtained by removing COD, BOD, nitrogen, pH, salinity, conductivity and heavy metals.



ARTÍCULOS BASADOS EN LA INVESTIGACIÓN.

1. Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales

Sintiendo la necesidad de corregir los daños ocasionados al medio ambiente surge la alternativa de crear un humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas negras en una industria cosmética y farmacéutica, como tecnología de bajo costo, utilizando un sistema de macrófitas enraizadas emergentes. El *Cyperus papyrus*, siendo una especie común y fácilmente adaptable a las condiciones climáticas del país en este caso costa rica, fue utilizada en la remoción de cargas orgánicas de los efluentes de aguas negras obteniendo porcentajes de remoción entre un 61% y un 90%. La calidad del agua vertida post-tratamiento resultó acorde con la legislación nacional vigente. Estos resultados obtenidos permitieron demostrar la efectividad de este tipo de sistemas para el tratamiento de aguas residuales en países con climas tropicales. Lo cual se concluyó que la construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas negras posterior a un sistema tradicional de tanque séptico demostró ser una alternativa viable para la aplicación de tecnologías limpias en la depuración de aguas. (Salazar, Chinchilla, Marín, & Pérez, 2012).



2. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica

Tomando en cuenta que los humedales artificiales son una alternativa de tratamiento con alta eficiencia de remoción de contaminantes y a su bajo costo de instalación y mantenimiento. La siguiente investigación evaluó el porcentaje de remoción de la carga orgánica de aguas residuales, en un sistema de tratamiento por humedales artificiales de flujo horizontal con dos especies vegetales. Se diseñó un sistema con tres módulos instalados de manera secuencial. En el primero se integraron organismos de la especie *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel, en el segundo, organismos de la especie *Typha dominguensis* (Pers.) Steudel y en el tercero las dos especies. Los módulos experimentales se instalaron a la salida de un tratamiento primario, el cual contenía aguas residuales municipales provenientes de un edificio de investigación. En el agua se analizaron los siguientes parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), los iones de nitrógeno ($N-NO_3^-$, $N-NO_2^-$ y $N-NH_4^+$) y el fósforo total. Se realizó también el conteo de bacterias asociadas al sistema. Los resultados de estas pruebas demostraron que el sistema es una opción para la remoción de la carga orgánica y de nutrimentos, de bajo costo de operación y mantenimiento.

Los resultados de esta investigación demostraron el establecimiento de bacterias en el sistema, tanto en el sustrato como en las raíces de las plantas, lo que ayuda a la remoción de la carga orgánica y de los nutrimentos del agua residual que está bajo tratamiento. Los microorganismos son la parte principal del funcionamiento de los humedales artificiales, ya que de estos depende la eficiencia en la remoción de los contaminantes. Los compuestos orgánicos, nitrogenados y fosforados son transformados a formas más simples y por lo tanto, más fáciles de eliminar del sistema. Es indudable que los humedales artificiales son ecosistemas que pueden ser utilizados para el tratamiento de aguas residuales de una manera segura, confiable, estética y económica.



Instituto Tecnológico de Villahermosa

Maestría en Ingeniería de Procesos

La remoción de contaminantes es eficiente y no se invierte en el suministro de energía adicional para su funcionamiento. Como se ha mencionado anteriormente, el funcionamiento de estos sistemas de tratamiento se basaron en la actividad combinada de plantas, microorganismos y sustrato, que en conjunto propician una depuración eficiente.

Recomiendan que para conocer con mayor precisión los procesos que ocurren en el sistema de tratamiento, se tiene que evaluar a detalle otros procesos bajo las condiciones del trabajo que realizaron, como el efecto del sustrato sobre la retención de materia orgánica y nutrimentos, las mejores condiciones de empaque de cada módulo, la distribución hidráulica a lo largo del sistema, las asociaciones de microorganismos con las dos especies de plantas y el control de la población de las plantas instaladas en el humedal, para que en conjunto se logre una mayor eficiencia de remoción. (Romero, Cruz, Salinas, & Hernandez, 2009, págs. 3-4)



3. Tratamiento de agua residual a través de humedales.

Al pensar en humedales como una alternativa para remover los contaminantes que afectan las condiciones óptimas del agua, se tiene que tener en cuenta que existen diferentes tipos de humedales, y el cual para esta investigación se optó por utilizar los de flujo subsuperficial que son los más usados para tratamiento de agua residual doméstica, debido particularmente a las ventajas que presenta en cuanto a evitar problemas de salubridad por las condiciones de exposición del agua residual.

Gracias a los resultados se comprobó que los humedales de flujo subsuperficial lograron mejores resultados en la remoción de contaminantes, operando dentro de un sistema, como tratamiento secundario o terciario, normalmente precedidos por algún tipo de pretratamiento o tratamiento primario de forma continua para garantizar su adecuado funcionamiento y evitar entre otros taponamiento en el humedal.

Las cargas orgánicas que soportaron los humedales de flujo subsuperficial fueron bajas, de tal forma que la vegetación y especialmente el medio poroso utilizado jugó un papel muy importante en la remoción de estas cargas, ya que los microorganismos que degradaban la materia orgánica se encontraban formando una bio-película alrededor del medio, y entre mayor fue la superficie del medio mayor será la remoción de carga orgánica. También mencionan que entre los medios porosos no convencionales se encuentra el carbón mineral y el plástico de material reciclable, que pueden ser utilizados con buenas propiedades de porosidad, conductividad hidráulica y absorción. (Acero, 2014)



4. Tecnología experimental humedales artificiales.

La investigación atendió la demanda planteada en la Convocatoria 2005 por el Fomix Campeche para el tratamiento de las aguas residuales del sector urbano. Para elegir el tipo de humedal adecuado a la Península y reducir los factores adversos, se consideraron las condiciones geográficas, climáticas y el tipo de agua residual a tratar. A partir de un diseño experimental, se analizó si los humedales son la alternativa para el control de residuos. Para efectos de esta investigación, el esfuerzo se concentró en el sistema de tratamiento de humedales construido (artificial) de flujo subsuperficial horizontal bajo condiciones climáticas tropicales de la Península de Yucatán, específicamente en el municipio de Campeche.

El objetivo fue evaluar el efecto que las condiciones de operación del humedal artificial, bajo condiciones climáticas tropicales, producen en la eficiencia de remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales del sector urbano. En las pruebas experimentales del proyecto se observó que la remoción de Sólidos (SST) y materia orgánica ocurre cerca de la entrada del agua debido a mecanismos físicos (filtración y absorción).

La eficiencia de dichos mecanismos se reflejó en la reducción de las concentraciones de SST, de la materia orgánica así como la turbidez del agua tratada. Pudo comprobarse que la eliminación de nutrientes se debió principalmente a la forma en que se operó el humedal. También se analizó la presencia de microorganismos patógenos en las aguas residuales urbanas y se constató que el sistema de humedales construidos permite lograr una reducción de éstos. La eliminación de dichos microorganismos se puede llevar a cabo gracias a un conjunto de procesos abióticos o bióticos que se realizan en el humedal. Se pudo constatar que, al aumentar el tiempo de operación o de permanencia del agua residual en el sistema, también se incrementó la eficiencia en la remoción de los parámetros de calidad del agua analizados. Han demostrado con investigaciones

Diseño y evaluación de un humedal artificial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas superficiales contaminadas por la actividad petrolera.

I.B.Q JORGE JESÚS GARCÍA MORALES



Instituto Tecnológico de Villahermosa

Maestría en Ingeniería de Procesos

que las plantas influyen para bien sobre la composición de las comunidades microbianas en el humedal, y, por lo tanto, sobre el metabolismo en la zona de la rizosfera. El tamaño del medio de soporte juega un rol importante en la eficiencia de los sistemas de humedales, al igual que los sistemas implementados con grava fina, que generaron mejor eficiencia en la remoción de materia orgánica.

Los resultados permiten concluir que los sistemas de humedales construidos de Flujo Subsuperficial son una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales del sector urbano, ya que no requieren de altos costos de inversión ni tampoco de operación.

Se logra, además, una apreciable reducción en los parámetros de control de contaminación, lo que beneficiaría ampliamente la calidad del agua de mar en la Bahía de Campeche, consolidando a esta zona como un mirador turístico. (Vallejos, González, & Caballero., 2010, págs. 7-8)



5. Humedales artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas.

El presente trabajo presenta la evidencia generada por el grupo de trabajo en los últimos quince años, sobre concentraciones de contaminantes y nutrientes provenientes de drenes agrícolas que descargan en humedales y bahías de Sonora. Las investigaciones se han realizado en el valle agrícola de Mexicali con 60 puntos de muestreo, en el valle del Yaqui con 30 sitios de colecta y en costas rocosas de Sonora y Baja California con 30 puntos de colecta, se muestreo agua, sedimento y biota. Los resultados indican niveles por encima de las normas establecidas de: coliformes fecales, nutrientes, algunos metales pesados como mercurio, plomo y selenio y plaguicidas organoclorados y endosulfán. Por lo anterior, estamos proponiendo que se considere como una opción viable, el uso de humedales artificiales como métodos para el tratamiento de drenes agrícolas en las zonas afectadas. Esta metodología ha probado ser eficiente para la remoción de nutrientes, DBO y sólidos suspendidos totales; en otros países y en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ya cuenta con casos de éxito utilizando humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales urbanas.

Los drenes agrícolas de Sonora que desembocan en la costa del Golfo de California sin tratamiento previo, constituyen un problema que no ha sido atendido adecuadamente y que cada vez afecta más a la salud del medio ambiente y sus pobladores. Se requiere de la integración de un equipo de trabajo interdisciplinario y con la participación de instancias gubernamentales, para coordinar un programa de tratamiento de agua de drenes agrícolas a nivel nacional. Proponemos que el uso de humedales artificiales, sea una parte central del programa de tratamiento de agua de drenes, así como el monitoreo y la restauración de humedales (Hernández, y otros, 2011).



JUSTIFICACIÓN

A diario se observa que la contaminación ambiental es obra principal del hombre, debido al desarrollo de la evolución industrial; generando de esta manera un empobrecimiento de los recursos naturales. Sin embargo, crece la necesidad de buscar alternativas, con el fin de preservar estos recursos como de evitar el incremento de dicha contaminación.

Por lo anterior, la importancia de la realización de este trabajo está enfocado a brindar una nueva alternativa que genere cambios ambientales, industriales y económicos, no reduciéndolos totalmente pero sí ayudando a que estos no se incrementen; con el diseño de un humedal artificial de flujo horizontal se pretende evaluar y tratar el agua en la zona del río el yucateco en Huimanguillo Tabasco, generando con esto una ayuda a esta localidad dando una mejor calidad y que sea de consumo para sus habitantes. Ya que las carencias que presenta dicho pueblo en cuanto al suministro de agua son notables, es por lo que se requiere de esta alternativa para el tratamiento del agua que ellos utilizan y por lo tanto, es necesario primero realizar los estudios pertinentes, que nos permitan determinar el índice de calidad que tiene esta agua.

En diversas partes del mundo, un amplio número de investigadores se ha dedicado a estudiar y a evaluar la eficiencia de los humedales construidos para el tratamiento de las aguas residuales de diversa procedencia, con resultados tan alentadores que su uso va en aumento (Fomixcampeche 2010).



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

¿Podrán los humedales artificiales disminuir los agentes contaminantes del agua, y brindar una mejor calidad del agua?



OBJETIVOS

Objetivo general:

- ✓ Diseñar y conocer por medio de un humedal artificial de flujo horizontal el índice de la calidad del agua que presenta la laguna el yucateco en Huimanguillo Tabasco.

Objetivos específicos:

- ✓ Determinar las concentraciones de metales pesados.
- ✓ Caracterizar fisicoquímicamente el agua de la laguna el yucateco con los parámetros de: pH, Conductividad Eléctrica, Temperatura, Oxígeno disuelto, Salinidad, Sólidos Disueltos Totales, color y turbiedad.
- ✓ Evaluar los resultados en base a Criterios Nacionales e internacionales (OMS) y de la NOM-127-SSA1-1994. "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".



HIPOTESIS

Los Humedales Artificiales (H.A.) como sistema de tratamiento de aguas, es una alternativa viable para mejorar las condiciones del agua en la región del yucateco en Huimanguillo Tabasco.



1. MARCO TEÓRICO

1.1 El agua

El agua que forma la hidrosfera, parte vital del planeta Tierra, es una sustancia esencial para que ocurran reacciones químicas que nos mantienen vivos y también afecta a la humanidad de muchas formas indirectas. Referirse al agua es tan común, y estudiarla parece tan trivial, que no se valoriza la importancia del estudio de sus propiedades y sus consecuencias. Tal es así que, casi todas sus propiedades físicas y químicas son inusuales cuando se contrastan con las de otros líquidos, y estas diferencias son esenciales para la vida tal como la conocemos (Vega kuyper, 2007). Se calcula que en la Tierra existen aproximadamente 1, 385, 000,000 km³ de agua, de los cuales el 97.3% es salada, el 2.08%, se encuentra congelada en los polos y solo una pequeña parte esta efectivamente para nuestras necesidades.

Tabla 1. Tipos de agua existentes en la tierra Fuente: Hernández Muñoz 1990.

Tipo de agua	Por ciento de la cantidad	Por ciento de la cantidad de agua dulce	Por ciento de la cantidad de agua dulce líquida.
Salada (mares y océanos, agua subterránea y logos.)	97.3		
Dulce	2.7	100.00	
Hielo (glaciares)	2.08	77.20	
Líquida	0.62	22.80	100.00
Agua subterránea y humedad del suelo		22.40	98.25
Lagos y pantanos		0.355	1.54
Ríos y corrientes		0.01	0.04
Atmosfera		0.04	0.17



La renovación natural del recurso se realiza a través del ciclo hidrológico. Por precipitación cae 28% de agua en la tierra y el 72% en el mar. Del agua que cae en la tierra.

- 7% se percola a los acuíferos
- 8% va al mar por escurrimientos y,
- El 13% restante, regresa a la atmosfera por evaporación (de los cuerpos de agua superficiales) evapotranspiración (de la cubierta vegetal).

De tal manera que solo el 7% del agua de lluvia se recupera en los diversos cuerpos de agua para su posible empleo como agua dulce, mientras que el 93% se pierde por medios físicos o biológicos (evapotranspiración).

Los recursos hidrológicos han tenido una importancia crítica para la sociedad humana desde que las personas descubrieron que podían producir alimentos cultivando plantas. Las ciudades y los pueblos que surgieron desde Egipto hasta Mesopotamia luego de la revolución agrícola que tuvo lugar alrededor del año 3500 a.C. requerían una provisión disponible de agua para sus necesidades domésticas y agrícolas. Con el tiempo, el agua corriente impulso maquinas que cortaban madera, molían granos y suministraban potencia motriz para muchos procesos industriales. La abundancia del agua la hacía ideal como disolvente universal para limpiar y arrastrar todo tipo de residuos de las actividades humanas. Hasta hace poco tiempo el enfoque del suministro de agua para cualquier propósito era sencillo: o bien ubicarse cerca del agua, como lo hicieron muchas ciudades, o almacenar y transportarse en ella hasta el lugar donde se necesitaba. Una vez utilizada, el agua se descargaba por lo general en el cuerpo de agua más próximo, en muchos casos en la misma fuente de la cual procedía.



1.2 Contaminación del agua.

El origen de la contaminación es muy variado pero se pueden citar como causantes a los desechos urbanos e industriales, los drenados de la agricultura y de minas, la erosión, los derrames de sustancias tóxicas (accidentales o intencionales), los efluentes de plantas depuradoras, los subproductos de los procesos de depuración, la ruptura de drenajes y el elevado de la atmósfera, entre otros. No hay duda de que el “solvente universal” no solo se disuelve, sino además arrastra y emulsiona a un gran número de compuestos con los que entra en contacto a lo largo de su ciclo y que modifican su calidad. El problema del agua es complejo; para poder hacer uso de ella se requiere que tenga la calidad adecuada y exista en cantidad suficiente durante un periodo y época del año determinados.

En general, se considera como “contaminante” el exceso de materia o energía (calor) que provoque daños a los humanos, animales, plantas y bienes, o bien, que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del agua. De esta forma no existe una división precisa entre las aguas contaminadas y las no contaminadas; este calificativo se atribuye en función del uso, las exigencias higiénicas y del grado de avance de la ciencia y tecnología a terminar los efectos y medir los contaminantes. A pesar de la dificultad para definir la contaminación, es claro que esto provoca el abatimiento o muerte de la flora y fauna, impide el uso del agua en industrias y ciudades y deteriora el medio ambiente e incluso, el paisaje.

En México, debido a la insuficiente infraestructura, los altos costos, la falta de mantenimiento y de personal capacitado, solo el 36% de las aguas residuales generadas reciben algún tratamiento (Hernández & Pérez, 2015), lo cual crea la necesidad de desarrollar tecnologías para su depuración.



Los Humedales Artificiales: son una alternativa de tratamiento debido a su alta eficiencia de remoción de contaminantes y a su bajo costo de instalación y mantenimiento. Se llevó a cabo la construcción, implementación y evaluación de los humedales de flujo sub-superficial con dos especies vegetales. El sistema fue diseñado con dos módulos instalados de manera secuencial en el primera se integraron organismos de la especie *Typha domingensis* (Espadaño) en el segundo, organismo de la especie *Pontederia cordata* y (*Espigas de agua*).

Los módulos experimentales fueron instalados a la salida de un tratamiento primario (Sedimentador), el cual contiene aguas residuales de la comunidad conocida como cinco presidentes de la laguna el Yucateco, dentro de los cuales igual se analizan parámetros como Temperatura, pH, Conductividad, Sulfatos, DQO, Dureza total, Dureza de calcio, Solidos suspendidos. Los resultados demostraron que el sistema es una opción viable para la remoción de la carga orgánica, tomando en cuenta que es de bajo costo de operación y mantenimiento (romero aguilar, Colín Cruz, Sanchez Salinas, & Ortiz Hernandez, 2009)

1.3 Calidad del agua.

El agua a diferencia del aire tiene una composición precisa (H_2O) y, por lo tanto es fácil identificar los compuestos ajenos a ellas. Sin embargo, la definición de cuáles son los contaminantes es difícil. Es un hecho que el agua rara vez se encuentre en forma pura y, afortunadamente, para fines prácticos no se le requiere así o no importa el que contenga otros compuestos; todo esto depende del uso que se le dé.

Para evaluar la cantidad disponible tomando en cuenta su calidad, se utilizan índices de calidad de agua. Jiménez y otros autores, en 1992, desarrollaron el cálculo de un índice conocido como potencial de uso (PU).



Con él se toma en cuenta la calidad del agua a partir de la información disponible, es decir por medio de la caracterización (actual y futura) de los cuerpo de agua, el empleo que se les va a dar en la cantidad disponible lo ideal, “ecológicamente disponible”. Determinando el promedio del número de veces que los parámetros, de los que se tiene información para una región dada, exceden el criterio de un uso determinado.

La disponibilidad del agua depende no solo de la cantidad, sino también de su calidad, aunque haya agua, si está contaminada y se encuentra en una condición tal que sea no acorde con el uso que se le quiere dar, su empleo se limita. En la antigüedad, la calidad del agua se calificaba solo por sus aspectos, sabor, color y olor. Actualmente, los avances científicos y tecnológicos han repercutido en el desarrollo de técnicas analíticas y procesos capaces de identificar y de remover una amplia lista de compuestos, a tal grado que es posible hacer agua “potable” mediante la depuración del agua residual.

Sin embargo, debido a su costo, tales conocimientos no se aplican en forma común; más aún, no se plasman en políticas integrales de administración del agua que busquen:

- La conservación de los recursos (agua superficial y subterránea).
- La preservación de su calidad y,
- Su uso eficiente (reusó, ahorro y recirculación del agua).



1.4 Parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua.

La presencia de sustancias químicas disueltas e insolubles en el agua que pueden ser de origen natural o antropogénicas define su composición física y química. Dadas las propiedades fisicoquímicas del agua, esta se comporta como un magnífico disolvente tanto de compuestos orgánicos como inorgánicos, ya sean de naturaleza polar o apolar; de forma que podemos encontrarnos en su seno una gran cantidad de sustancias sólidas, líquidas y gaseosas diferentes que modifican sus propiedades.

A su comportamiento como disolvente hay que añadir su capacidad para que se desarrolle vida en su seno, lo que la convierte en un sistema complejo sobre el que habrá que realizar análisis tanto cualitativos como cuantitativos con objeto de conocer el tipo y grado de alteración que ha sufrido, y consecuentemente como se encuentran modificadas sus propiedades para usos posteriores.

Puesto que la alteración de la calidad del agua puede venir provocada tanto por efectos naturales como por la actuación humana derivada de la actividad industrial, agropecuaria, doméstica o de cualquier otra índole, no es de extrañar que el análisis de los parámetros de calidad del agua se deba realizar a todo tipo de aguas, independientemente de su origen.

Las características físicas se llaman así porque impresionan a nuestros sentidos (vista, olfato y gusto) son parámetros que tienen directa incidencia sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad de agua. Los parámetros que se deben controlar son turbiedad, presencia de sólidos solubles e insolubles, color, olor y sabor, temperatura y pH.



1.4.1 Turbiedad

Es originada por la presencia en el agua por partículas en suspensión o coloidales (arcillas, limos, partículas de sílice, materia orgánica, etc.) la eliminación de la turbiedad influye en los costos de producción, pues se requiere del uso de coagulantes, acondicionadores de ph, y otros. La turbiedad se puede evaluar de diversos métodos que se practican en el campo o en el laboratorio, se recomienda efectuar la medición tan rápido como es posible después de la toma de muestra.

1.4.2 Solidos o residuos

La determinación de solidos permite estimar la cantidad de materia disuelta y en suspensión que tiene el agua, son la materia residual que queda cuando una muestra de agua se deseca a una temperatura establecida

- Disueltas, formado átomos y moléculas invisibles. No influyen físicamente en la turbiedad pero si podrán definir su color u olor.
- Formando sistemas coloidales, que son partículas visibles.
- En forma de partículas relativamente grandes, las cuales se precipitan rápidamente cuando el agua se somete al reposo

1.4.3 El color

El color natural del agua (excluidas las descargas industriales)

- La extracción acuosa de sustancias de origen vegetal
- La descomposición de la materia
- La materia orgánica del suelo
- La presencia de hierro, manganeso y otros compuestos metálicos
- Una combinación de los procesos descritos anteriormente.



Otros factores que pueden afectar el color son:

- El ph
- La temperatura
- El tiempo de contacto
- La disponibilidad y la solubilidad de los compuestos responsables del color

1.4.4 Olor y sabor

Aparte del color, los usuarios rechazan el agua por su olor y sabor, el agua destinada al consumo humano debe ser completamente inodora. Todo olor es signo de contaminación o de presencia de materia orgánica en descomposición por compuestos orgánicos.

Las principales sustancias generadoras de olor y sabor son:

- Compuestos orgánicos derivador de la actividad de los microorganismos
- Compuestos orgánicos generados por algas.
- Descargas de desechos industriales

1.4.5 La Temperatura

Es un parámetro físico que varía por las siguientes razones:

- Solubilidad de sales y gases
- Retardo o aceleración de la actividad biológica
- Absorción de oxígeno
- Precipitación de compuestos
- Desinfección



La temperatura también tiene influencia indirecta en procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración. La temperatura se mide en el momento de la toma de la muestra

1.4.6 ph

Es un factor que mide el grado de acidez. No tiene un efecto directo sobre la salud, pero si influye en los procesos de tratamiento de agua. Por lo general, las aguas naturales (no contaminadas) muestran un pH en el rango entre 5 y 9. Cuando las aguas son ácidas, es común adicionar un álcali (por lo general, cal), para mejorar el proceso de coagulación.

1.5 Características Químicas

El agua, por sus características químicas de enlace, se convierte en un excelente disolvente de muchos compuestos orgánicos e inorgánicos. Por ello es necesario saber que parámetros químicos es posible encontrar y si tiene alguna incidencia en la salud humana.

1.5.1 Aceites y Grasas

Los aceites y grasas no son disueltos por el agua. Su presencia en ella puede detectarse por la existencia de capas atornasoladas en su superficie; estas no necesariamente están relacionadas con una posible contaminación.

Este parámetro puede evaluarse en una muestra de agua por extracción con hexano de todo el material soluble. La cantidad de grasas y aceites se mide en mg/L de materia extraída.



1.5.2 Agentes Espumantes

El hecho de que el agua, por agitación, muestre la formación de espuma. Puede deberse a la presencia de residuos de detergentes. Estos residuos pueden interferir en los siguientes procesos.

- Coagulación
- Sedimentación
- Filtración

Las concentraciones menores de 0.5 miligramos de detergente por litro no afectan los procesos de tratamiento de agua ni la salud.

1.5.3 Alcalinidad

Es un parámetro que está relacionado con el contenido de aniones; carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato y oxhidrilo (OH^-). La alcalinidad está influenciada por el pH, la composición general del agua, la temperatura y la presencia de iones disueltos. La alcalinidad es necesaria en el tratamiento del agua porque reacciona con los coagulantes favoreciendo los procesos de eliminación de sólidos coloidales.



1.5.4 Metales

Tabla.2 tipos de metales más comunes en el agua. Fuente propia

Tipo de metal	Problema que pueden generarse	Valor máximo recomendado
Antimonio (Sb)	No hay datos sobre toxicidad	La OMS establece 0.005 mg/l para agua de consumo humano
Arsénico (As)	Es toxico. Si se consume agua con valores mayores de 0.3 mg/l. se sospecha que produce cáncer.	La EPA recomienda que la fuente de abastecimiento no exceda 0.05 mg/l. La Ms recomienda que para agua de bebida no exceda de 0.01 mg/l.
Bario (B)	No hay información sobre si afecta al hombre	La OMS establece un valor máximo de 0.3 mg/l.
Cadmio (cd)	Es toxico. Tiene efectos acumulativos en el hígado y en los riñones	La EPA establece un límite de 0.01 mg/l La OMS establece 0.003 mg/l para agua de bebida.
Cromo (Cr)	El cromo hexavalente (VI) es toxico.	La EPA establece que el valor no exceda de 0.05 mg/l como cromo total



1.6 Principales contaminantes a eliminar.

El agua que ha sido retirada, utilizada para algún propósito y retornada estará contaminada de un modo u otro. Es por ello que se necesitan conocer las fuentes donde se originan, las cuales se agrupan en amplias categorías.

Fuentes puntuales: Las aguas negras domésticas y los desechos industriales se llaman fuentes puntuales (localizadas o puntiformes) ya que en general se recolectan mediante una red de tubos o canales y se conducen hasta un solo punto de descarga en el agua receptora. Las aguas negras domésticas consisten en desechos de hogares, escuelas, edificios de oficina y tiendas. El término aguas negras municipales incluyen las aguas negras domésticas y los desechos industriales cuya descarga está permitida en los alcantarillados sanitarios. En general la contaminación de fuente puntual se puede reducir o eliminar mediante la minimización de los desechos y con un tratamiento adecuado del agua de desecho, antes de descargarla en un cuerpo natural de agua.

Fuentes no puntuales: A los escurrimientos urbanos y agrícolas los caracterizan múltiples puntos de descarga y se llaman fuentes no puntuales. Con frecuencia el agua contaminada pasa sobre la superficie del terreno o a lo largo de canales de drenado natural y llega hasta el cuerpo de agua más cercano. Aun cuando las aguas de escurrimientos urbanos o agrícolas se recolectan en tubos o canales, en general se transportan por la distancia más corta posible hasta la descarga, de modo que no es económicamente factible su tratamiento en cada descarga. Gran cantidad de la contaminación debida a fuentes no puntuales sucede durante las lluvias provocando un resultado con grandes flujos que dificultan su tratamiento, además del escurrimiento pluvial urbano (incluyendo las de las calles, estacionamientos, prados, talleres mecánicos, puestos comerciales) pueden transportar contaminantes como nitrógeno y fósforo de los fertilizantes, grasas, aceites, etilenglicol (producto usado en los



anticongelantes) de los talleres mecánicos, pasto cortado, así como otras basuras orgánicas de los puestos comerciales (Davis y Masten, 2005).

El agua se contamina cuando la descarga de residuos perjudica la calidad del agua o perturba el equilibrio ecológico natural. Dentro de los contaminantes que causan problemas se encuentran los organismos causantes de enfermedades (patógenos), materia orgánica, sólidos, nutrientes, sustancias tóxicas, sales, arsénico, pesticidas, compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros contaminantes (color, espuma, calor y materiales radiactivos). Es por ello que se explicara como repercuten estos cuando se encuentran cantidades considerables que alteran la calidad o los organismos existentes de las aguas receptoras.

Patógenos. Entre los microorganismos patógenos presentes en las aguas de desecho hay bacterias, virus y protozoarios que excretaron personas o animales enfermos. Cuando se descargan en aguas superficiales las hacen inadecuadas para beber (es decir, no son potables). Si la concentración de patógenos es suficientemente alta, el agua también será insegura para nadar y pescar. Algunos mariscos pueden volverse tóxicos porque concentran microorganismos patógenos en sus tejidos. Por tanto sus niveles de toxicidad serán muchos mayores que los del agua circundante.

Materia orgánica (DBO). Cuanto mayor es la DBO, esto es, cuanta más materia orgánica está presente, mayor es el problema que crea la descomposición de la misma. La actividad metabólica de las bacterias que necesitan oxígeno pueden reducir el contenido normal de oxígeno disuelto (OD) en una corriente o lago hasta menos de 1 mg/L, abajo del cual la mayor parte de los peces son incapaces de sobrevivir. Cuando todo el OD desaparece, se presentan condiciones anaerobias y se generan olores desagradables.



Puesto que la cantidad de oxígeno disuelto (OD) en agua disminuye al aumentar la temperatura, la cantidad de oxígeno en las corrientes es más crítica para la vida acuática en el verano (cuando los flujos son bajos y las temperaturas altas) que en el invierno.

Sólidos. Los particulados orgánicos e inorgánicos que arrastra el agua residual y que llegan a un agua receptora son sólidos sedimentables, flotantes, y en suspensiones capaces de formar depósitos de aspectos desagradables y bancos de lodo olorosos, y de reducir la penetración de la luz solar en el agua lo que destruye el hábitat de muchos organismos bénticos. Las partículas coloidales que no se asientan con facilidad, causan la turbiedad de muchas aguas superficiales. Los sólidos orgánicos suspendidos también pueden ejercer una demanda de oxígeno.

Nutrientes. Los nitratos y fosfatos procedentes de las aguas residuales municipales son nutrientes inorgánicos que favorecen el crecimiento de plantas y algas. Las cantidades necesarias para generar floraciones algáceas no están bien establecidas, pero concentraciones tan bajas como 0.01 mg/L de fósforo y 0.1 mg/L de nitrógeno pueden ser suficientes para ocasionar eutrofización cuando otros elementos se encuentran en exceso. Además de su efecto antiestético en los lagos o lagunas (olor, aspecto) las algas pueden ser tóxicas para el ganado, perjudicar el sabor del agua, obstruir las unidades filtrantes y aumentar las necesidades químicas en el tratamiento del agua.

Sustancias tóxicas y peligrosas. Concentraciones bajas de ácidos, cáusticos, cianuro, muchos metales pesados y numerosas sustancias químicas son tóxicas para los organismos vivos, incluso para los humanos y para la población microbiana que se utiliza en los procesos de tratamientos de aguas residuales. Dos de los metales más dañinos son el cadmio (Cd) y el mercurio (Hg), los cuales se bioacumulan. Las sustancias orgánicas tóxicas y persistentes, en particular los compuestos orgánicos clorados,



constituyen una serie de amenaza para la calidad del agua a causa de su uso industrial generalizado (Henry y Heinke, 1999).

Sales. El agua acumula de forma natural una diversidad de solidos disueltos, o sales, a medida que atraviesa suelos y rocas en su camino hacia el mar. Estas sales típicas incluyen cationes como el sodio, el calcio, el magnesio, el potasio, y aniones como el cloruro, el sulfato y el bicarbonato. Un análisis cuidadoso de salinidad daría como resultado una lista de las concentraciones de los aniones y cationes primarios, pero una manera más simple y más comúnmente empleada en la medición de la salinidad es la concentración del *total de los sólidos disueltos* (TSD). Como aproximación, el agua pura puede considerarse agua con menos de 1,500mg/L TSD; las aguas dulces puede contener valores TDS de hasta 5,000mg/L; las aguas saladas son aquellas con concentraciones superiores a 5,000mg/L. el agua del mar contiene de 30,000 a 34,000mg/L TSD. La concentración de solidos disueltos es un indicador importante de la utilidad del agua para diversas aplicaciones. Surge un problema cuando la concentración de sales en el agua dulce aumenta hasta el grado en que se amenaza la población de las plantas y animales o que el agua es útil para el abastecimiento público o la irrigación. Muchas industrias descargan altas concentraciones de sales, en algunas regiones áridas donde el agua se usa mucho para la irrigación, es de especial importancia que dicha agua recoja sales cada vez que atraviesa el suelo al regresar a su río. Además la evapotranspiración aumenta la concentración de sales. En consecuencia la concentración de sal aumenta en forma continua a medida que el agua baja por los ríos.

Arsénico. El arsénico es un elemento que existe en forma natural en el ambiente. Su presencia en el agua subterránea se debe sobre todo a que los minerales de rocas y suelos erosionados se disuelven en forma natural, más que nada en la forma de minerales de óxido de hierro o de sulfuros. El envenenamiento por arsénico debido al agua subterránea puede tener numerosos efectos sobre la salud cuando se encuentran concentraciones de $10\mu\text{g/L}^{-1}$, que incluyen cánceres internos de hígado, vejiga, riñón y



pulmones, perturbaciones circulatorias, trastornos gastrointestinales, neuropatías periféricas y lesiones cutáneas (L. Mackenzie & J. Masten, 2005).

Pesticidas. El termino pesticidas se utiliza para designar un abanico de sustancias químicas que matan organismos que los seres humanos consideramos indeseables. Los pesticidas pueden ser en la línea de insecticidas, herbicidas, rodenticidas, fungicidas. Hay tres grupos principales de insecticidas orgánicos sintéticos: los organoclorados (también conocidos como hidrocarburos clorados), los organofosforados y los carbomatos. Cada uno de estos grupos causa daños severos algunos de bioacumulación, cánceres, temblores, confusión, contracciones musculares en los organismos vivos y principalmente en seres humanos si se encuentran en cantidades en cuerpos de agua.

Compuestos orgánicos volátiles (COV). Los compuestos orgánicos volátiles se encuentran entre los contaminantes más comúnmente hallados en las aguas subterráneas. Se utilizan a menudo como disolventes en procesos industriales y varios de ellos son conocidos como presuntos cancerígenos o mutagenicos. La volatilidad significa que no solo se hallan en concentraciones por encima de unos pocos $\mu\text{g/L}$ en aguas superficiales, sino en corrientes subterráneas, las concentraciones pueden ser cientos de miles de veces más altas. Cinco COV son especialmente tóxicos y su posible presencia en el agua potable sobretodo es causa de atención especial: el cloruro de vinilo, el tetracloroetileno, tricloroetileno, 1,2-dicloroetano, y el tetracloruro de carbono.

El más toxico de los cinco es el cloruro de vinilo (cloroetileno), la exposición a altos niveles de todos estos son causantes de cáncer, tumores, daños al sistema nervioso, central, hígado y riñones, hasta el grado de provocar la muerte (Gilbert y Ela, 2008).



Otros contaminantes. El color, la espuma y el calor son otros contaminantes que causan problemas. El color (de la industria textil por ejemplo) y la espuma (residuos de fábricas de pulpa y papel) no son objetables solo por razones estéticas; también limitan la penetración de la luz y pueden reducir los niveles de OD, todo lo cual altera el equilibrio ecológico natural del agua. Las descargas térmicas, en primer término el agua de enfriamiento de las plantas de energía eléctrica, tiene un potencial de recuperación de calor, también causan un aumento en el régimen e utilización de oxígeno porque a una temperatura más alta el crecimiento de la vida acuática es más rápido y la descomposición orgánica se acelera.

Al mismo tiempo existe OD disponible en el agua a temperaturas más altas. Un aumento permanente de la temperatura puede dar por resultado la aclimatación de clases inferiores de peces y un estímulo al crecimiento de algas azules problemáticas. Los materiales radiactivos que también son dañinos para la vida biológica y bioacumulativos, se manejan con más cuidado que los residuos industriales, y son raros los casos de sistemas de abasto de agua que se han vuelto inadecuados a causa de la radiactividad (Henry y Heinke, 1999).

1.7 Principales parámetros que deben controlarse.

Las plantas depuradoras de aguas residuales urbanas se han diseñado corrientemente para eliminar materia en suspensión y materia orgánica. En los últimos años la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) también se ha ido introduciendo como objetivo a alcanzar. De hecho, en la actualidad los procesos de eliminación de nutrientes se podrían considerar ya como convencionales.



La eliminación de microorganismos fecales parece que en un futuro cercano también será un objetivo generalizado, especialmente en zonas como la Mediterránea donde la reutilización del agua va a tener un papel relevante dentro de la gestión integral de los recursos hídricos. A continuación se describen los mecanismos de eliminación de estos contaminantes en los humedales de flujo subsuperficial.

1.8 Necesidad de depuración de las aguas residuales.

En las poblaciones mexicanas de entre 2,500 y 10,000 habitantes, el volumen promedio de descargas es de 200 l/hab*d con las características que se presentan

Tabla 3. Parámetros y concentraciones ideales básicas en el agua. Fuente:

Parámetro	Concentración
pH	7.1
T (°C)	20
DBO	238
SS	5.9
Coliformes totales	7×10^6



De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CNA) se generan 3,600,000 ton de DBO/año (50% municipal y 50% industrial) y la infraestructura existente elimina el 9% de ella, lo que implica que los cuerpos de agua reciben una carga de 2,370,000 ton de DBO/año. Lo anterior, sin considerar la aportación de descargas no puntuales. Referente a la depuración, de acuerdo con los datos del Inventario Nacional de Plantas de Tratamientos Municipales (1996), existen de 615 plantas en operación (OCDE, 1998), se estima que el 93% del agua residual doméstica y el 92% de la industrial se vierten sin pasar por un tratamiento, solo una fracción pequeña es tratada en las 960 plantas de tratamiento.

1.9 Tratamientos de aguas residuales.

A lo largo de los años, se han desarrollado una gran variedad de métodos para el tratamiento del agua residual. En muchos casos, se combinan varios procesos dependiendo de la calidad del agua residual que se va a tratar y de las características que deba tener al final del tratamiento. El principal objetivo del tratamiento del agua residual es producir un efluente que pueda ser descargado sin causar daños al medio ambiente. Los contaminantes del agua residual pueden ser eliminados por medios físicos, químicos o biológicos.

1.9.1 Métodos físicos

Tratamiento en el cual se llevan a cabo cambios a través de la aplicación de fuerzas físicas. Las unidades típicas incluyen cribado, mezclado, adsorción, desorción, transferencia de gas, flotación, sedimentación y filtración.



1.9.2 Procesos químicos

Operaciones en las cuales la remoción o tratamiento de los contaminantes se realiza mediante la adición de reactivos que llevan a cabo diferentes reacciones químicas. La precipitación el ajuste del pH, la coagulación y la desinfección son los principales.

1.9.3 Procesos biológicos

La remoción de los contaminantes se realiza a través de la oxidación biológica de la materia orgánica. El principal uso de los tratamientos biológicos es la remoción de los compuestos orgánicos biodegradables nutrientes. El ejemplo más conocido es de lodos activados. Por otra parte, la disposición del material eliminado del agua residual (los lodos ya sean primarios, secundarios o químicas. ha representado problemas en la implementación de algunos sistemas.

1.10 Antecedentes “humedales”.

Históricamente, los humedales naturales fueron utilizados como sitios de descarga de las aguas residuales. Esto se dio principalmente como medio de eliminación, mas no como tratamiento. Esta tendencia fue llevando a muchos humedales, tales como pantanos, a saturarse de nutrientes y posteriormente a degradarse ambientalmente.

La primera investigación sobre la posibilidad de tratar aguas residuales en humedales artificiales fue realizada por Seidel (1952) en el Instituto Max Planck de Plön, Alemania. En la década del '90 hubo un mayor aumento del número de Humedales Artificiales de Flujo Horizontal (HAFH) debido a la ampliación de tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales (domésticas, industriales y aguas pluviales). El uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales es cada vez más aceptado en diferentes partes del mundo. Hoy en día los humedales de flujo subsuperficial son comunes en muchos países desarrollados (ej. Alemania, Inglaterra, Francia, Dinamarca,



Polonia, Italia, etc.), siendo también apropiados para los países en desarrollo, solo que aún faltan ser más conocidos (Hoener, 2003; Heers, 2006; Kamau, 2009).

El centro de investigaciones tecnológicas ambientales de la C.U.C (Corporación Universitaria de la Costa) ha construido un humedal artificial para verificar las ventajas del sistema en condiciones climáticas propias del trópico. Dada la sostenibilidad se propuso como una opción de tecnología para el tratamiento de aguas residuales municipales de la Región Caribe. Se construyó con flujo subsuperficial, opera con agua residual municipal que se almacena en un tanque de alimentación, el afluente se distribuye mediante una flauta, con un caudal de $0.33 \text{ m}^3/\text{d}$, el Tiempo de Retención en el Humedal es de 6 días y tiene un área superficial de 8 m^2 . Las macrófitas utilizadas, *Typha sp.*, crecen naturalmente en las riberas del Río Magdalena y el medio de soporte es grava fina ($10 \times 10^{-2} \text{ m}$). En la fase de arranque y estabilización, las eficiencias de remoción que se han obtenido llegan hasta: el 97% para SST, el 90% para DQO y el 92.3% para DBO5 a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Bernal et al., 2000.)

1.11 Humedal natural.

La primera vez que se utilizó el término humedal fue en la Convention on Wetlands of International Importance Especially as Waterflow Habitat, celebrada en Ramsar, Irán, en 1971. Fue el primer foro mundial en el que se trató el tema de la importancia, protección y valoración de estos ecosistemas. Los humedales son uno de los ecosistemas más productivos y tienen una amplia gama de funciones naturales.

No obstante, presentan en la actualidad una alta vulnerabilidad debido al inadecuado uso, deforestaciones a gran escala y amenazas por presiones de grupos económicos. Como dato soporte a tales afirmaciones tenemos que, según W. E. Frayer, desde 1950 hasta el presente, en los Estados Unidos se han afectado severamente alrededor de $40,000 \text{ km}^2$ de humedales de un total de $741,000 \text{ km}^2$.



1.12 Humedal Natural o humedal artificial.

El humedal natural fue definido en la Convención Ramsar (1971), donde se estableció:

"...son humedales aquellas extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros".

Los humedales, entonces, son áreas transicionales entre sistemas acuáticos y terrestres frecuentemente inundadas o saturadas por aguas superficiales y subterráneas. Independientemente de sus características, todos los humedales comparten una propiedad primordial: el agua, que juega un rol fundamental en el ecosistema, en la determinación de la estructura y en las funciones ecológicas del humedal.

1.13 Humedales Construidos

En diversas partes del mundo, un amplio número de investigadores se ha dedicado a estudiar y a evaluar la eficiencia de los humedales construidos para el tratamiento de las aguas residuales de diversa procedencia, con resultados tan alentadores que su uso va en aumento.

Al buscar alternativas para el tratamiento de las aguas residuales del sector urbano en la ciudad de Campeche se planteó un proyecto para evaluar la efectividad de dichos sistemas, basados en el funcionamiento de los humedales naturales.



Hay dos tipos de humedales construidos:

- Los de Flujo Superficial generalmente (A): son sistemas lagunares constituidos por zonas inundadas en las que se observa el nivel del agua y la vegetación es emergente o flotante.
- Los de Flujo Subsuperficial (B): que se forman por una capa de agua de baja profundidad (0.4-0.8 metros), aislada desde el fondo y usualmente rellena con grava, aunque a veces se pueden utilizar materiales granulares (piedra de río) de la localidad. Para la zona de entrada y salida, usualmente se usa grava gruesa para una mejor distribución y recolección del agua.

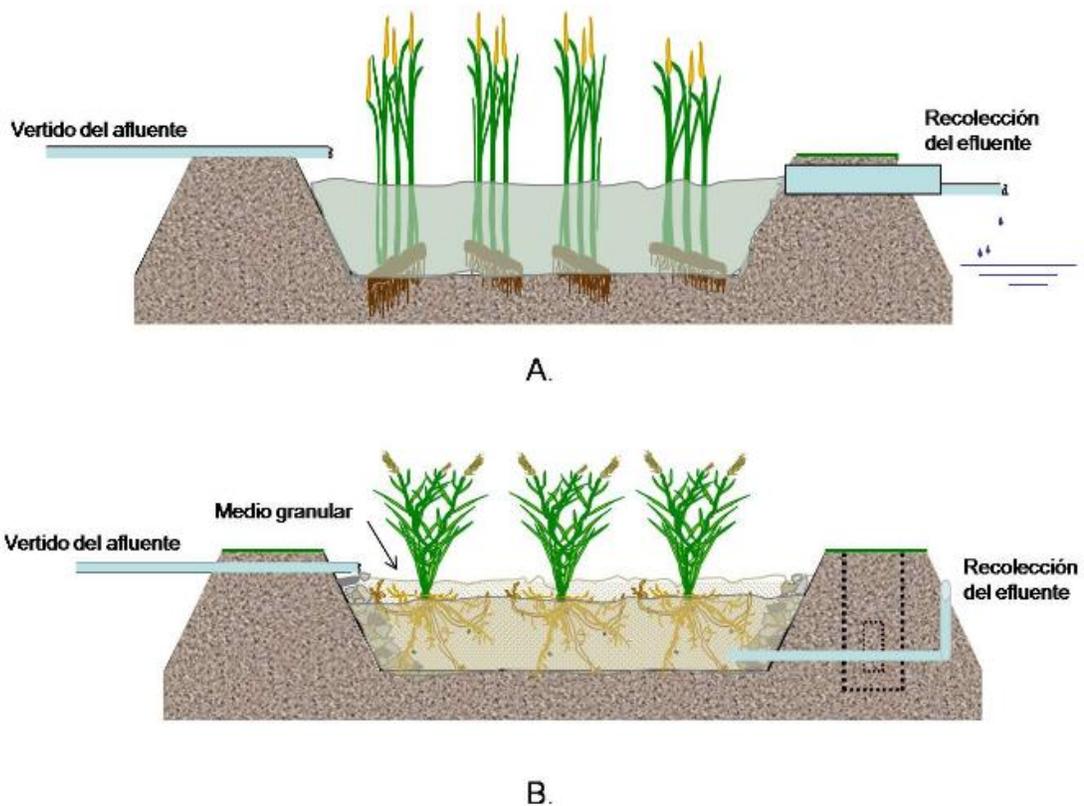


Fig. 1 Tipos de Humedales Artificiales. (Serrano & Hernández, 2016)

Diseño y evaluación de un humedal artificial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas superficiales contaminadas por la actividad petrolera.

I.B.Q JORGE JESÚS GARCÍA MORALES



1.13.1 Clasificación de los humedales construidos.

Estos sistemas son económicamente atractivos, con un diseño y operación adecuados, se obtienen altas eficiencias de tratamiento de agua residual, capaces aun de mejorar, o al menos mantener, la conservación de un área, particularmente en poblaciones aisladas. En países en desarrollo, tienen la ventaja adicional de representar una solución de baja tecnología para el tratamiento de agua residual producida por pequeñas poblaciones dispersas.

Estos sistemas se dividen de acuerdo a su diseño en:

- (1) sistemas de flujo superficial (Free Water Surface, FWS).
- (2) sistemas de flujo subsuperficial horizontal (Subsurface Flow, SF).
- (3) sistemas de flujo subsuperficial vertical (Vertical Subsurface Flow, VSF).

Así también, dada la variedad de plantas acuáticas útiles para la remoción de nutrientes, éstas se clasifican de acuerdo a su forma de vida en los lechos de hidrófitas en:

1. Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes: principalmente angiospermas sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos. El Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*) son las especies más utilizadas para este sistema.
2. Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas: comprenden algunos helechos, numerosos musgos y macrófitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente, *Littorella uniflora*, *potamogeton crispus*. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.



3. Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes: en suelos anegados permanente o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos, *thypha latifolia*, *phragmites australis*. (Delgadillo, Camacho, Perez, & Andrade, 2010)

Los Humedales Artificiales (H.A.) han sido definidos como “sistemas de ingeniería, diseñados y construidos para utilizar las funciones naturales de los humedales, de la vegetación, los suelos y de sus poblaciones microbianas para el tratamiento de contaminantes en aguas residuales”.

Otros sinónimos de "humedales artificiales" incluyen: lechos de hidrófitas, humedales construidos, pantanos artificiales, pantanos construidos, biofiltros, y otros sinónimos locales, aunque también se utiliza el nombre en inglés: “wetland” y el nombre más completo que es “constructed wetland”. Hay también términos diferentes para los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFS), que incluyen: · Filtros/ Biofiltros plantados. El término se refiere a la característica de los HA que siempre utilizan una vegetación de plantas macrófitas, que son naturales de humedales/o pantanales de la misma zona climática. Esta característica diferencia a los HA del grupo de "filtros no sembrados" (que también son llamados: biofiltros, lechos de percolación, lechos de infiltración o filtros intermitentes de arena).

En Europa son conocidos como “Reed Bed Treatment System” (RBTS) cuya traducción al español sería “Sistema de Tratamiento en Lecho de Caña”, debido a que una especie vegetal frecuentemente utilizada es el carrizo (*Phragmites australis*). En los EE.UU. estos sistemas también son denominados como “Lechos de Plantas Emergentes” (VS., por su siglas en ingles). "Plantas emergentes" son un tipo de macrófitas cuyas hojas están por encima del nivel del agua, y crecen en humedales naturales (Vymazal, 2008).



1.13.2 Elementos constituyentes de un humedal construido.

Es necesario que se cumpla con un conjunto de aspectos, de manera tal de garantizar su eficiencia de uso durante un tiempo significativamente largo. Los humedales establecidos artificialmente poseen mayor flexibilidad de uso, en razón de que en su diseño se toman en cuenta los factores mayormente predecibles.

Factores hidrológicos:

La hidrología es la variable más determinante en el diseño de un humedal. Las condiciones hidrológicas dependen del clima (precipitación, evaporación, viento, etc.), escorrentía superficial, la influencia de la mesa freática, las mareas (en caso de tratarse de ecosistemas costaneros) y los patrones de drenaje (natural o artificial). Dentro de los parámetros básicos de diseño tenemos: el hidroperíodo y los pulsos o eventos extraordinarios de inundación y sequía (obtenidos a través de datos estadísticos de más de 10 años continuos y cálculos de eventos extraordinarios de más 100 años), la profundidad de la lámina de inundación (niveles que oscilan entre 5 y 100 *cm*), el tiempo de residencia (entre 5 y 14 días en promedio), tasa de recarga hidráulica (promedio entre 5 y 50 *cm/día*), precipitación y la evaporación.

Es importante conocer el patrón de distribución de drenaje, la dirección y cantidad del flujo de agua subterránea, la profundidad de la mesa freática, los meses de mayor Precipitación, los datos extremos de evaporación del sector, la textura y características de los estratos edáficos, topografía, capacidad de carga y tiempo hidráulico de residencia. La flexibilidad para manejar la variante hidrológica se realiza a través de la aplicación de los sistemas en serie. Éstos se refieren a los datos de ingeniería: flujo, sistemas de trasvase, estructuras civiles, lagunas en serie y obras de drenaje que se realizan para mantener los tiempos de residencia, controlar los cambios de concentración (degradación de polutantes), reflujos y purificación de las aguas residuales.



Composición química del efluente:

Las concentraciones de ciertos compuestos químicos en un efluente pueden ser beneficiosas o perjudiciales a las funciones de un humedal. Aguas procedentes de agrosistemas incluyen ingentes cantidades de nitrógeno y fósforo, así como sedimentos y trazas de pesticidas. En tanto que las aguas de áreas urbanas contienen mayor presencia de aceites y sales disueltas. Las descargas industriales son mucho más particulares, aunque se puede indicar que las mismas conducen, en general, una significativa carga de metales pesados y/o compuestos cíclicos. De acuerdo con este perfil, la eficiencia de uso de un humedal destinado a tratar descargas de aguas depende altamente de la selección y clasificación del efluente, ya que la biota y el sustrato de suelo de un humedal metabolizan, remueve e inmoviliza compuestos de manera muy especializada. La caracterización del efluente estaría dirigida a conocer aspectos de concentración de metales pesados, concentración de compuestos no polares, toxicidad, patogenicidad, pH, turbidez, sólidos disueltos, y otras propiedades físicas, químicas y biológicas de interés sanitario.

Sustrato de suelo:

Es el medio de soporte para la vegetación, constituye el manto de sedimentos donde se retienen los compuestos recalcitrantes; es el sustrato donde se ubican los microorganismos encargados de metabolizar y transformar ciertas sustancias químicas. Incluye también la materia orgánica que promueve el intercambio iónico y constituye el medio responsable de los cambios de condiciones de óxido-reducción en los humedales. El establecimiento de un sustrato de suelo en los humedales artificiales representa uno de los factores más difíciles de configurar, ya que éstos poseen bajos niveles de materias orgánicas y nutrientes, tienen pH tendentes a la acidez y no ofrecen el soporte físico y químico requerido por las plantas. Es por esto que los humedales artificiales deben ser proveídos por sustratos enriquecidos con detritos, compost, turbas y microorganismos. Otras consideraciones importantes para el diseño son: la textura del



suelo, en cuyo caso las arcillosas favorecen la impermeabilización y mantenimiento de la lámina de agua; las limo-arcillosas facilitan la penetración de las raíces y rizomas del estrato vegetal y las franco-arcillo-limosas, permiten la acumulación de la materia orgánica. Se destacan también: el contenido de nutrientes que da el soporte para el desarrollo de las plantas y microorganismos, el contenido de materia orgánica destinada a actuar como matriz que ante y las concentraciones de oxígeno, hierro y aluminio que definen las condiciones de óxido reducción. Para conformar el suelo de un humedal artificial se mezclan y dispersan capas de arcilla, aserrín, heno, desechos de pulpa de papel, hojarasca, piedra caliza, limo, turba, y otros estratos similares, con los cuales se ofrece un soporte físico y orgánico a las plantas. Esto permite, en paralelo, el desarrollo de un cieno altamente enriquecido con materia orgánica capaz de reducir los niveles de contaminación de un efluente.

Vegetación:

Las especies de plantas que se introducen para crear o restaurar un humedal dependen del tipo de humedal que se desea establecer. En este sentido, el clima, salinidad, profundidad y régimen de uso son los factores que van a definir las especies van a ser introducidas. Desde el punto de vista ecológico, se debe tomar en cuenta el impacto que involucra la introducción de especies exóticas, la estabilización de un proceso de sucesión vegetal, el control de especies no deseadas, la adaptabilidad a las condiciones de uso, las estrategias de reproducción y las técnicas de siembra.

En cuanto a la selección de especies de plantas, observamos que numerosas plantas emergentes y flotantes son excelentes filtradoras y metabolizadoras de compuestos contaminantes.



Dentro de éstas se destacan *Typha dominguensis* (eneas), *Pontederia cordata*, *Juncus effusus* (juncos), *Scirpus validus*, *Panicum repens*, *Pontederia lanceolata*, *Eichhornia crassipes* (bora, lirio de agua), *Spirodela polyrhiza*, *Lemna minor* (lenteja de agua), *Phragmite communis* y otras.

1.13.3 El material de relleno.

En los sistemas de flujo subterráneo, la elección del sustrato es crítica, el medio usado se determina frecuentemente por la disponibilidad de material local. Sin embargo, éste necesita evaluarse cuidadosamente en términos de permeabilidad hidráulica y capacidad para absorber nutrientes y contaminantes.

El sustrato debe proporcionar un medio adecuado para el crecimiento de la planta y permitir la infiltración y movimiento del agua, esto requiere aproximadamente una conductividad hidráulica de 10^{-3} a $10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ de lo contrario resultará un flujo superficial y canalizamiento del agua que reducirán la efectividad del sistema.



En el cuadro se muestra las principales características de los sustratos empleados para el diseño y construcción de humedales verticales.

Tabla 4. Tipos y características del material de relleno. Fuente Propia

Tipo de material	Tamaño efectivo D_{10} (mm)	Porosidad (n)%	Conductividad hidráulica, K_s ($m^3/m^2/d$)
Arena gruesa	2	28-32	100-1000
Grava	8	30-35	500-5000
Grava media	32	36-40	10000-50000
Piedra	128	38-45	50000-250000

1.13.4 La vegetación.

La vegetación cumple en este tipo de tratamiento un papel fundamental, tanto en la eliminación de contaminantes como en la creación de las condiciones y ambiente idóneo para su desarrollo y regulación. Las plantas tolerantes al flujo del agua (hidrófilas), han desarrollado una serie de adaptaciones que le permiten tolerar un rango de stress que provocarían la muerte a la mayoría de plantas de tierra emergida.



Función de la vegetación

En los sistemas de flujo superficial las plantas actúan como base para el crecimiento de la biopelícula encargada de la biodegradación, así como la filtración mecánica de las partículas. En los sistemas flujo subsuperficial la biopelícula crece en las partes subterráneas de la plantas y en el medio granular. Además del valor intrínseco para el mantenimiento de la biodiversidad en los humedales, y de su indudable valor estético, la vegetación tiene otras funciones en estos sistemas:

Efectos físicos: La vegetación distribuye y ralentiza la velocidad del agua lo que favorece la sedimentación de los sólidos suspendidos y aumenta el tiempo de contacto con el agua y la vegetación. La vegetación origina un importante gradiente de luz, viento y temperatura desde el suelo hasta el límite superior de dicha vegetación, disminuyendo la velocidad del viento, la luz, y amortiguando los cambios de temperatura permitiendo temperaturas más cálidas en invierno y más frías en verano. En climas fríos la vegetación protege de la congelación, sobretodo en humedales subsuperficiales los cuales se han demostrado que pueden funcionar adecuadamente a temperaturas de -40°C [34].

Efectos sobre la conductividad hidráulica: Aunque inicialmente se proponía que las raíces de la vegetación favorecerían la conductividad hidráulica mediante su desarrollo y la creación de canales una vez las raíces.

La vegetación cumple en este tipo de tratamiento un papel fundamental, tanto en la eliminación de contaminantes como en la creación de las condiciones y ambiente idóneo para su desarrollo y regulación. Las plantas tolerantes al flujo del agua (hidrófilas), han desarrollado una serie de adaptaciones que le permiten tolerar un rango de stress que provocarían la muerte a la mayoría de plantas de tierra emergida.



1.13.5 Microorganismos.

La degradación de la materia orgánica y la desnitrificación del nitrógeno en los lechos de hidrófitas se llevan a cabo mediante los microorganismos. La diseminación de oxígeno por las raíces de las hidrófitas crea zonas oxigenadas alrededor de ellas, por lo que la mayoría del contenido orgánico en el agua residual se descompone en estas zonas en dióxido de carbono y agua.

Además, el amoníaco se oxida a nitrato por las bacterias nitrificantes presentes en estas zonas. El oxígeno se reduce en la superficie de las raíces, pero el nitrato permanece (zona anóxica). En este punto, la degradación de la materia orgánica puede tomar lugar por las bacterias denitrificantes, por medio de este proceso el nitrato se convierte en nitrógeno libre (N_2), el cual se evapora en la atmósfera.

Las aguas naturales contienen una amplia variedad de microorganismos los cuales forman un sistema ecológico balanceado. Las características biológicas de este se relacionan principalmente con la población residente de microorganismos y su impacto directo en la calidad del agua.

El mayor impacto es la transmisión de enfermedades por organismos patógenos presentes en el agua, además del desarrollo de sabor y olor en las aguas superficiales y subterráneas. De la corrosión y bioimpurezas que afectan la transferencia de calor en la superficie en los sistemas de enfriamiento y, en la facilidad para el abastecimiento de agua y manejo del agua residual. Por esta razón, es necesario conocer los principios básicos de la microbiología y así comprender como participan los microorganismos en el control de la calidad del agua.



1.14 Consideraciones sobre la construcción de humedales.

Los aspectos más importantes a tener en cuenta para la construcción de humedales son básicamente, la impermeabilización de la capa superficial del terreno, la selección y colocación del medio granular para el caso de los sistemas SFS, el establecimiento de la vegetación, y por ultimo las estructuras de entrada y salida. Estaciones de bombeo, instalación de desinfección y tuberías de conducción pueden ser también necesarias, como otras que pueden llegar a ser indispensables. Puesto que los niveles de oxígeno disuelto pueden llegar a ser bajos, en algunos casos pueden ser necesarias también unas instalaciones de pre-aireación. Donde la topografía lo permita, una caída en cascada cubierta de cemento para protegerla puede ser suficiente para este propósito.

Para el cálculo de la profundidad del humedal este debe ser acorde al crecimiento que alcanzan las raíces de la especie vegetal.

Los humedales FWS se diseñan y construyen con el fin de aprovechar los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren naturalmente para reducir la materia orgánica, los sólidos suspendidos totales, nutrientes y organismos patógenos.

La complejidad estructural y funcional de un humedal permite una serie de procesos físicos y bioquímicos capaces de minimizar el efecto de un sinnúmero de efluentes, los cuales son considerados perniciosos al ambiente sí estos son dispuestos directamente. La propiedad amortiguante se debe, entre otros aspectos, a la alta productividad de materia vegetal y microorganismos que inducen a la metabolización y conversión de compuestos xenobióticos, a la retención y biosorción en sedimentos, materia orgánica y estructura vegetal (incluyen manto de turba, raíces, rizomas, tubérculos, etc.).



Se adicionan también las condiciones matriciales de anaerobiosis y aerobiosis, decantación, floculación, evapotranspiración y fotoxidación. Tales propiedades son las que se toman en cuenta para diseñar un humedal artificial destinado a resolver los problemas de disposición de aguas industriales y domésticas. Según Russell James, presidente de la empresa Ecoscience, no existe duda sobre el éxito de esta modalidad en el tratamiento de efluentes de rellenos sanitarios, aguas municipales, minerías, pesticidas, y metales pesados como: Plomo (*Pb*) Zinc (*Zn*), Selenio (*Se*), Mercurio (*Hg*).

1.15 Tratamiento preliminar del agua a depurar en los humedales.

El pretratamiento y el tratamiento primario son tratamientos previos, y tienen como objetivo eliminar o reducir la presencia de materiales que obstruyan y desgastan tuberías y canales, y que pueden colmatar los humedales. Habitualmente los tratamientos previos de humedales constan de una etapa inicial de retirada de grandes sólidos seguida de otra de retención de materia en suspensión. Las principales tecnologías de pretratamiento que se pueden utilizar antes de filtrar el agua residual en el humedal artificial (HA) son las siguientes:

- Desarenador o sedimentador para la eliminación de arena y arenilla
- Trampa de grasa
- Filtro compostero (para sistemas a pequeña escala)
- Tanque séptico
- Tanque Baffled
- Tanque Imhoff

Reactor anaerobio de flujo ascendente, RAFA1 (el cual sólo se utiliza para sistemas a gran escala (Hoffmann & Platzer, 2011)



2. METODO Y MATERIALES

El proyecto está desarrollado como un sistema tecnológico que comprende diversas actividades de campo, laboratorio, construcción y operación como se describen en el siguiente diagrama.

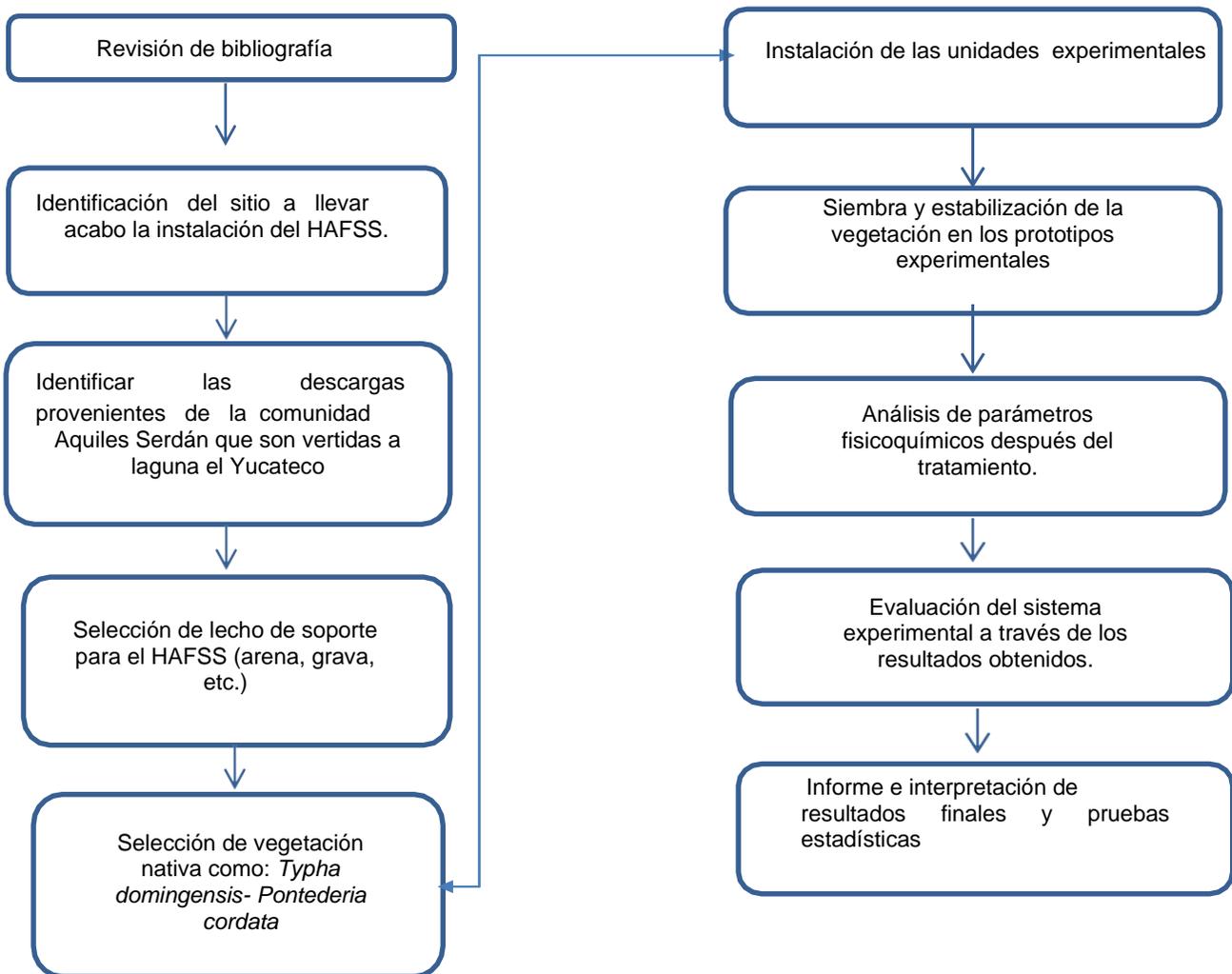


Fig.2 Metodología de actividades a realizar durante el proyecto.



2.1 Ubicación del lugar del proyecto.

El experimento se instaló en la Comunidad Aquiles Serdán, de Villa la Venta Tabasco, cerca de la Laguna el Yucateco se localiza en las coordenadas latitud, $18^{\circ}11'37.81''N$, Longitud $94^{\circ} 1'20.05''O$.



Fig. 3 ubicación y lugar de instalación del humedal. (google, 2016)



2.1 Identificación de las descargas a la laguna el yucateco.

Para iniciar con este proyecto empezamos por identificar las diferentes descargas de aguas residuales que se encuentran aproximadamente a 200 metros de la carretera principal, proveniente de la comunidad. Se ubicó cerca de una casa de familia, donde fue un lugar apropiado para su instalación así que la toma de descarga servirá como nuestra fuente de alimentación al sistema de humedal experimental propuesto en este estudio para el tratamiento del agua residual que generan la comunidad descrita anteriormente.

2.2 Diseño y construcción de unidades experimentales.

El diseño hidráulico de un humedal es crítico para obtener buenos rendimientos en la eficiencia de depuración. En los modelos de diseño se asume un flujo en condiciones uniformes y de tipo pistón. Para llegar a poder intentar acercarse al modelo ideal (flujo pistón) es muy importante realizar un cuidadoso diseño hidráulico y los métodos constructivos apropiados.

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. La energía para romper esta resistencia está dada por la pérdida de carga entre el ingreso y salida del humedal, para dar esta energía se le asigna al fondo del humedal una pendiente con una salida de altura variable. Para el diseño de humedales se deben considerar los siguientes criterios:

1. Se consideran reactores biológicos.
2. Se considera que el flujo a través del medio poroso es flujo pistón y en forma uniforme.
3. La ley de Darcy describe el flujo a través del medio poroso.

Diseño y evaluación de un humedal artificial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas superficiales contaminadas por la actividad petrolera.

I.B.Q JORGE JESÚS GARCÍA MORALES



Existen dos tipos de humedales de flujo subsuperficial:

- Humedal subsuperficial de flujo horizontal.
- Humedal subsuperficial de flujo vertical.

Existe poca información disponible sobre este tipo de humedales y hay numerosas ecuaciones descritas por investigadores para el cálculo del área superficial, pero generalmente el diseño está en función a las poblaciones equivalentes. La aplicación del agua residual se realiza en forma intermitente, a través de unas tuberías que se colocan encima del lecho de grava o arena. Para un mejor funcionamiento de estos humedales, se debe considerar siempre en el diseño la construcción de dos humedales para que operen en paralelo, es decir, que cada humedal tenga un periodo de reposo y un periodo de aplicación de agua. El periodo de reposo óptimo es que por cada periodo de alimentación se tenga dos periodos de reposo.

La frecuencia de aplicación del agua residual se calcula considerando que no quede agua en la superficie procedente de la aplicación riego anterior. Esta forma de operación favorece la oxigenación del interior del lecho filtrante. Este proceso se realiza de la siguiente manera: la lámina de agua aplicada empuja el aire existente en el sustrato (porosidad), una vez que el agua aplicada se drena totalmente deja un espacio vacío que se llenará con aire, el cual será arrastrado en la siguiente aplicación. El aporte de oxígeno por las raíces de las plantas es despreciable. (Hoffmann & Platzer, 2011)

Para el diseño de este tipo de humedales se deben seguir los siguientes pasos:

- Cálculo del área necesaria.
- Profundidad del humedal.
- Pendiente.
- Sustrato.

Diseño y evaluación de un humedal artificial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas superficiales contaminadas por la actividad petrolera.

I.B.Q JORGE JESÚS GARCÍA MORALES



En la figura 4 se muestra el prototipo del sistema del Humedal Artificial.

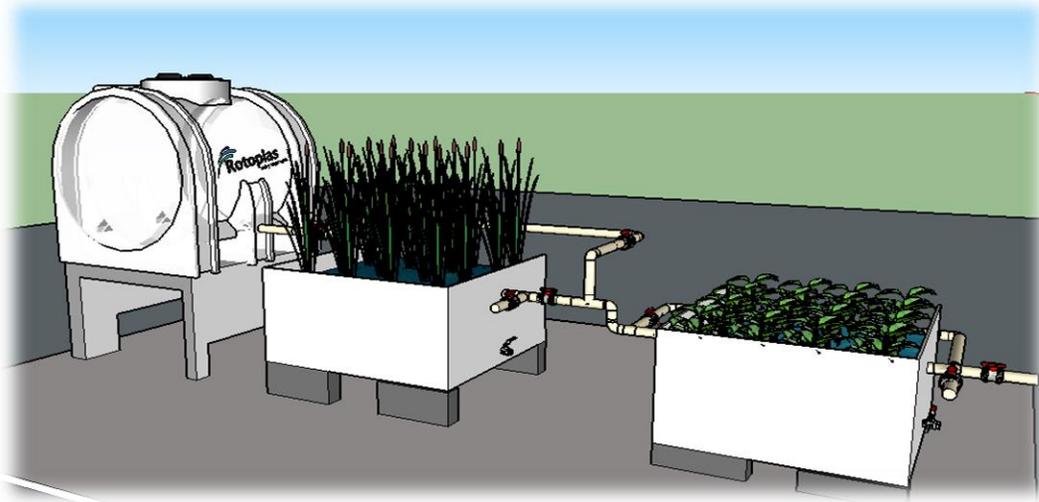


Fig. 4 Prototipo propuesto del sistema de humedales experimentales. Fuente: Propia

2.3 CÁLCULOS BÁSICOS.

Cálculo del área necesaria

El cálculo del área del humedal se realiza en función a:

- 1) la población equivalente
- 2) si el humedal trabajará como tratamiento primario o secundario.

Por su parte Crites y Tchobanoglous, (2000), calcula el área en base en la tasa hidráulica de aplicación (ver ecuación 1)

Cálculo del área superficial en humedal vertical

$$As= Q/THA \quad (1)$$

As= Área superficial del humedal (m²)

Diseño y evaluación de un humedal artificial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas superficiales contaminadas por la actividad petrolera.

I.B.Q JORGE JESÚS GARCÍA MORALES



Q= caudal en (m³/día)

THA= Tasa hidráulica de aplicación (m³/m² hab-día)

La tasa de aplicación se puede calcular de la siguiente manera:

$$Lw = Q / (L) (W) \quad (2)$$

Dónde:

Q = caudal, (m³ / d)

L = longitud, (m)

W= ancho, (m)

LW = índice de carga hidráulica, (m³ /m² ha-d) (Metcalf, 1991)

Relación Largo – Ancho

Para calcular el ancho del humedal consideramos la ley de Darcy (ecuación 3), para flujo en medio poroso.

El área de la sección transversal del flujo a través del lecho se calcula con la siguiente ecuación:

$$Ac= Q / (Ks S) \quad (3)$$

Dónde:

Ac = área de la sección transversal del subsuelo del lecho, perpendicular a la dirección del flujo, m²

Q = caudal, m³/día

Ks = conductividad hidráulica del medio, m³ / m² .d

Diseño y evaluación de un humedal artificial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas superficiales contaminadas por la actividad petrolera.

I.B.Q JORGE JESÚS GARCÍA MORALES



S = pendiente del lecho o gradiente hidráulico (como una fracción decimal) (Metcalf, 1991).

El ancho del humedal (m) se determina en función al área vertical y la profundidad del nivel de agua a tratar (ver ecuación)

$$W=Ac/h \quad (4)$$

Dónde:

A_c = área de la sección transversal del subsuelo del lecho, perpendicular a la dirección del flujo, m^2

W= ancho del humedal (m)

h=profundidad óptima del lecho en el humedal de 0.60 a 0.75m

El largo del humedal se determina en función al ancho y al área superficial como se muestra en la ecuación

$$L= As/W \quad (5)$$

Dónde:

L= Largo del humedal

A_s = Área superficial del humedal (m^2)

W= ancho del humedal (m)

Posteriormente se calcula la relación largo-ancho (L/A). Mientras mayor es la relación largo-ancho se tiene mejor depuración de las aguas, pero se tiene problemas de cortocircuitos, flujos preferenciales, presencia de agua sobre el lecho de grava y otros.

Por ello se recomienda relación largo – ancho de: 2 a 1, 3 a 1 y 4 a 1.



Profundidad del humedal.

La profundidad del humedal suele ser de unos 60 a 80 cm. El agua fluirá a través del medio poroso y se recogerá en una red de tuberías de drenaje situada en el fondo del lecho.

Pendiente.

La pendiente de la superficie del humedal es plana (0%), este debe ser realizado con mucho cuidado para evitar que se formen charcos de agua sobre la superficie.

La pendiente del fondo o lecho del humedal varía de 0.5 a 2% pero generalmente se utiliza una pendiente ligera del 1%.

Sustrato.

En los sistemas de flujo subterráneo, la elección del sustrato es crítica, el medio usado se determina frecuentemente por la disponibilidad de material local. Sin embargo, éste necesita evaluarse cuidadosamente en términos de permeabilidad hidráulica y capacidad para absorber nutrientes y contaminantes.

El sustrato debe proporcionar un medio adecuado para el crecimiento de la planta y permitir la infiltración y movimiento del agua, esto requiere aproximadamente una conductividad hidráulica de 10^{-3} a $10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ de lo contrario resultará un flujo superficial y canalizamiento del agua que reducirán la efectividad del sistema.

La condición principal de estos humedales es mantener una simetría ya sea rectangular o cuadrada, la cual permita que la superficie del humedal tenga una pendiente de 0%. En la tabla se presentan los diferentes valores e intervalos a utilizar en el sistema experimental.



Instituto Tecnológico de Villahermosa

Maestría en Ingeniería de Procesos

Tabla 6. Las principales características del sistema experimental.

Factor	Unidad	Intervalo	Valor usado
Medio filtrante			
Grava media	%	30--35	35
profundidad	cm	45--90	45
Arena	%	28--32	32
Profundidad	cm	5 --15	5
Coefficiente uniformidad	%	3--16	<4
Porcentaje finos	%	2--5	<4
Drenaje Clase (tubería)			
Tamaño	Pulg.	1--4	1
Pendiente	%	0.1--1	0.5
Grava de drenaje	%	30--35	35
Válvulas de drenaje	mm	1--4	1
Distribución agua			
Diámetro de tubería	Pulg.	1--2	1.5
Distancia entre tuberías	m	0.3--1.2	0.3
Orificio de distribución	mm	3--8	6
Distancia entre orificios	m	0.5--1.2	0.05
Parámetros de diseño			
Carga hidráulica	L/m ² *d	40--60	50<0.005
Carga orgánica	Kg/DBO/m ² *d	0.0025-0.01	
Dosificación			
Frecuencia	Veces /d	2--5	2
Volumen/orificio	L/orificios*dosis	0.6--1.1	0.9
Tiempo de aplicación	minutos	05--15	5

Diseño y evaluación de un humedal artificial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas superficiales contaminadas por la actividad petrolera.

I.B.Q JORGE JESÚS GARCÍA MORALES



2.4 Selección de la Vegetación

La selección de la vegetación se basó en la literatura de (Crites y Tchobanoglous, 2000), Manuales de la *Environmental Protection Agency* (EPA), 2000 y CONAGUA, 2007, en la cual se menciona que para los sistemas de flujo subsuperficial la vegetación es común incluye *Scripus* spp y *phragmites australis*. Durante la selección se consideraron dos especies (*Typha domingensis*-*Pontederia cordata*), existentes en el estado de Tabasco, principalmente en humedales naturales, pantanos y zonas bajas de la región como se muestra en la figura 4 y 5 respectivamente.



Fig. 5 Especie *Typha domingensis*.



Fig. 6 Especie *Pontederia Cordata*.



2.5 Recolección de las especies a utilizar.

Los ejemplares se colectaron el día 31 de Octubre de acuerdo a las técnicas de Matteuci 1982. Ambas especies fueron colectadas en un humedal natural ubicado sobre la carretera que conduce a la comunidad de Aquiles Serdán. Es importante Considerar las características a las cuales deben adaptarse que son típicas de la región:

- Adaptabilidad al suelo.
- Adaptabilidad al clima local.
- Tolerancia a la concentración de contaminantes.
- Capacidad para asimilar los contaminantes.
- Resistencia a fumigantes y enfermedades.
- Fácil de manejar.

La vegetación se colecto y se llevó al lugar destinado para su pronta trasplatación directa en los HAFSS.

2.5.1 Establecimiento

Una vez recolectadas las especies, se establecieron dentro de los prototipos experimentales, cada ejemplar fue colocado para cada módulo.

Tabla. 7 Tipo de flujo y vegetación de los prototipos experimentales para el tratamiento de aguas residuales de la laguna el Yucateco.

Modulo	Tipo de Flujo	Tipo de Vegetación
1	Flujo Subsuperficial	Espadaño (<i>Typha domingensis</i>)
2	Flujo subsuperficial	Espigas de Agua (<i>Pontederia Cordata</i>)



La raíz de la vegetación en el HFSS se estableció en medio de soporte de (Grava, Arena-Grava), las capas de grava corresponden tienen un espesor de 15 cm y la capa de arena de 5 cm. La grava con un diámetro alrededor de 19.05 mm y la arena con un diámetro de 2mm. El tamaño del tallo fue aproximadamente 25 cm y se colocó por debajo de la superficie de la segunda capa de grava. (Crites y Tchobanoglous, 2000).

2.6 Descripción del montaje experimental

La planta piloto está ubicada a las orillas de la laguna el Yucateco, conformada por dos humedales en serie de flujo vertical subsuperficial, construidos en tanques de plástico reforzado, los cuales tienen las siguientes dimensiones: 0.97 m * 1.20 m * 0,45 m (Ancho * Largo * Profundidad). Cada uno de éstos sistemas están compuesto de grava, la cual tiene un tamaño efectivo promedio D_{10} de 0.8 cm y una porosidad promedio de 35%, y arena la cual tiene un efectivo D_{10} de 0.8 cm y una porosidad promedio de 32% y están sembrados con las especies *Typha Domingensis* y *Pontederia Cordata* con una densidad inicial de 16 plantas por cada 0.20 m.

Para la distribución del agua residual hacia los tanques receptores se instaló una bomba de 0.25 de HP y PVC hidráulico de 1 pulg, para que descarguen las aguas residuales hacia las unidades de tratamiento, se colocó un tanque de almacenamiento con una capacidad 1000 litros, en una base de 70 cm, permitiendo así la distribución del agua residual por gravedad. Cuentan con una salida para desazolve de lodos causados por los sólidos sedimentables.

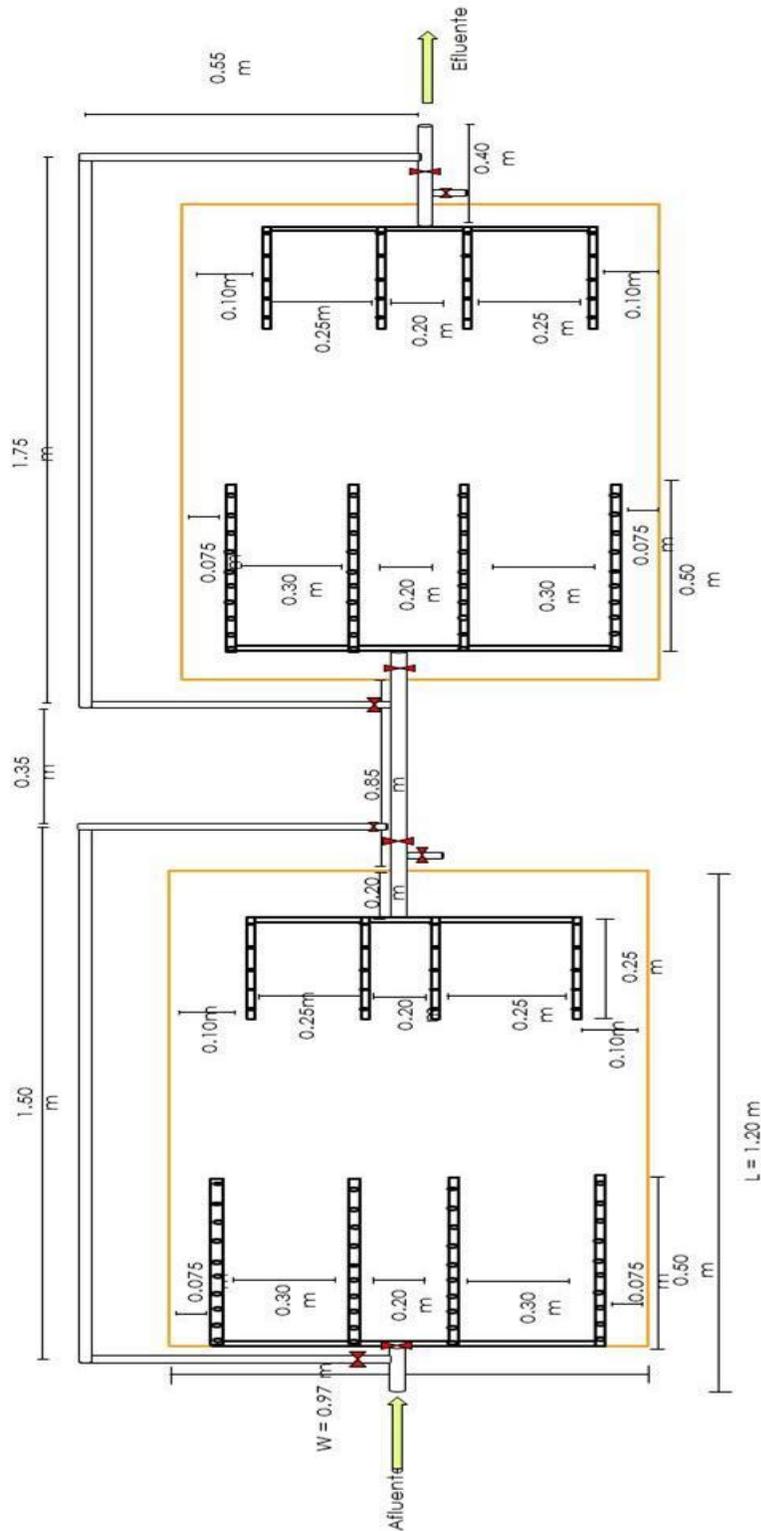


Fig.7 Medidas y distribución de los ramales de tuberías hidráulicas



Se procedió a la instalación de todos los accesorios y tuberías hidráulicas de PVC de 1 pulg, como válvulas, codos 45° Y 90°, conectores, T. La entrada de agua residual fue desde la parte inferior del reactor donde colocaron tuberías de 1 pulg con orificio para permitir la salida del agua, posteriormente se colocaron 3 capas (la primera capa fue de grava de 15 cm, la segunda capa de arena de 5 cm, y por ultimo de grava igual de 15 cm.

La distribución de los reactores del dispositivo experimental quedo de la siguiente manera:

Corriente 1: Alimentacion de agua Laguna El Yucateco.

L-100 Bomba de agua de .25 hp

F-120 tanque de almacenamiento 1000 litros

Corriente 2 circulacion de agua del tanque de almacenamiento al módulo F-121 (en este módulo se encuentra sembrada la *Typha domingensis*).

Corriente 3 circulacion directa al tanque F-122 (en este módulo se encuentra sembrada la *Pontederia Cordata*)

Corriente 4 Salida directa del sistema del módulo F-121.

Corriente 5 Salida directa del sistema del módulo F-122.

Corriente 6 salida para el mantenimiento del sistema para ambos módulos.

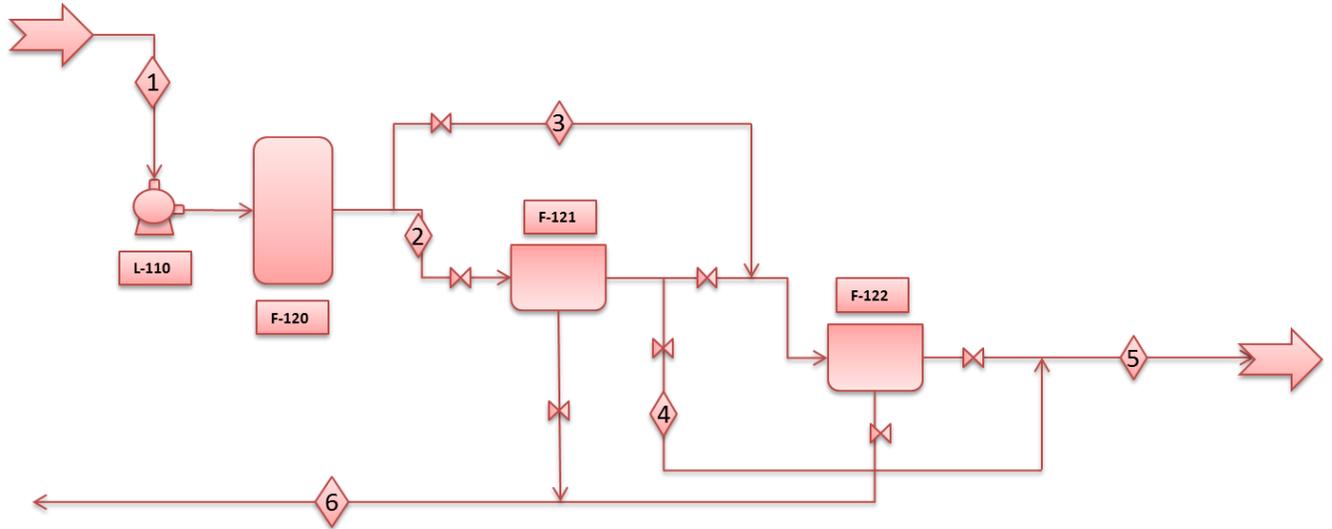
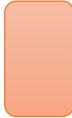


Fig. 8 Diagrama de Proceso del Humedal Artificial.

Simbología

Bomba de agua .25 hp.	
Módulo 1 y 2	
Válvulas.	
Corrientes (1 al 6).	
Tanque de almacenamiento.	



2.7 Estabilización de la vegetación en los prototipos experimentales.

Las plantas se sembraron en las unidades experimentales en el mes de Octubre 2015 los humedales se alimentan con agua residual procedente de la Laguna el Yucateco durante 4 semanas, con el fin de que las plantas crecieran, se adaptaran al medio y a las condiciones de trabajo. En el mes de Noviembre de 2015 (a los 30 días después de la siembra) se inicia la toma y análisis de datos; y la constante alimentación de los humedales con el agua residual; según las condiciones mencionadas anteriormente. En la figura 9 se puede observar el estado de crecimiento de los humedales en este punto de la investigación. El seguimiento a los humedales se siguió realizando hasta alcanzar bajas variaciones en las condiciones de operación.



Fig. 9 Operación inicial del humedal artificial.



2.8 Operación del sistema experimental.

Los humedales trabajaron bajo diferentes condiciones de caudal y carga contaminante proveniente del agua residual sin tratar para controlar los caudales de cada uno se utilizaron válvulas para controlar y estimar el tiempo y volumen de llenado en cada tanque.

Cada humedal tiene una válvula de toma de muestra a la salida y se colocó una válvula a la entrada del sistema (tanque Sedimentador) para un total de 3 puntos de muestreo. Se hizo la recolección de la muestra una vez por semana en cada punto de muestreo tomando un volumen representativo de muestra e inmediatamente se realizaron los análisis de campo con el medidor multiparamétrico HI-9828 Y HI 83200. En los tres meses de seguimiento a las unidades experimentales; se tomaron 15 muestras a las cuales se les realizaron diferentes análisis fisicoquímicos.



Los sistemas de fase estabilización se programaron de Octubre-Noviembre, las variables monitoreas se muestran en la tabla 8.

Tabla. 8 Métodos analíticos empleado

NOMBRE DE LA PRUEBA	NORMA DE REFERENCIA	OBSERVACIÓN
DQO	NMX-AA-030-SCFI-2001	Método a reflujo cerrado por titulométrico
OD	NMX-AA-012-SCFI-2001	Equipo analítico HI-9828
DBO5	NMX-AA-028-SCFI-2001	Método yodométrico.
SDT	NMX-AA-034-SCFI-2001	Equipo analítico HI-9828
SULFATOS	NMX-AA-074-SCFI-2014	Equipo analítico HI-83200
NITRATOS	NMX-AA-079-SCFI-2001	Equipo analítico HI-83200
DUREZA DE CALCIO	NMX-AA-072-SCFI-2001	Equipo analítico HI-83200
DUREZA DE MAGNESIO	NMX-AA-072-SCFI-2001	Equipo analítico HI-83200
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000	Equipo analítico HI-9828
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000	Equipo analítico HI-9828
C.E	NMX-AA-093-SCFI-2000	Equipo analítico HI-9828

2.9 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante la comparación de los resultados de eficiencia de remoción de materia orgánica obtenidos de los 2 humedales que fueron determinados mediante un análisis estadístico descriptivo básico el cual incluye: Media, Desviación estándar, Máximos y mínimos. La precisión de los métodos se determinó mediante el



uso de la desviación estándar la cual se calculó para los datos obtenidos y la inclusión de patrones para los ensayos de DQO, DBO, OD, SST, PT y NTK. Para calcular las eficiencias de remoción de los humedales evaluados se utilizó la siguiente expresión matemática ver ecuación 1:

$$\%R = (Co - Ce / Co) * 100 \quad (1)$$

Es decir la masa del afluente (Co) menos la masa en el efluente (Ce) dividido entre la masa del afluente (Co), por cien es igual al porcentaje de remoción. Para calcular la masa aplicada a cada humedal se realizaron cálculos estequiométricos con los datos obtenidos de concentración y el caudal correspondiente a cada día de operación.

2.10 Determinación de parámetros físico-químicos (pH, Conductividad Eléctrica, Temperatura, Oxígeno disuelto, Sal, Sólidos Disueltos Totales).

Para la determinación de los parámetros pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, sal, sólidos disueltos totales, se utilizó el equipo multiparamétrico HI 9828 HANNA, se tomaron 50 ml. De muestra de agua de la laguna el cual se colocaron en una probeta con capacidad de 1000 ml para su posterior análisis.

- **Calibración rápida**

La calibración rápida es una función que permite calibrar la sonda multiparamétrico en el campo con solo una solución, HI 9828-25. Se llena el vaso con la solución de calibración HI 9828-25. Posteriormente se atornilla el vaso de calibración en el cuerpo de la sonda. Se rebose un poco de solución. Se espera unos minutos hasta que se estabilice.

En el menú de calibración, se elige Quick calibration (calibración rápida) y se presiona ok. Aparecerá una pantalla de 3 ítems (pH, conductividad y oxígeno disuelto), la palabra pH comienza a parpadear y aparecerá el mensaje "Not ready".



Cuando la medición se estabiliza aparecerá el mensaje “Ready” (“Listo”); se presiona CONFIRM para aceptar el valor. Aparecerán los mensajes “Storing data on probe, please wait...” (“Almacenando datos en la sonda, espere por favor...”) y “Updating GLP data, please wait...” (“Actualizando datos GLP, espere por favor...”). Después de confirmar la calibración de pH, la palabra EC (Conductividad) parpadea. Cuando la medición se estabiliza, aparece el mensaje “Ready”; se presiona CONFIRM para aceptar el valor. El medidor se dirige a calibración rápida de OD y aparece el mensaje “Empty the beaker. Shake the probe and put it in the beaker again” (“Vacíe el vaso, agite la sonda y ubíquela en el vaso nuevamente”). Se desatornilla el vaso de calibración y se saca la solución. Se agita la sonda, al igual que a un termómetro clínico, para secarla.

Se verifica que no queden gotas en el sensor de OD. Seguidamente se atornilla nuevamente el vaso en el cuerpo de la sonda. Se espera que se estabilice la lectura y luego se presiona CONFIRM. Después de presionar CONFIRM, aparecen los mensajes “Storing data on probe, please wait...” (“Almacenando datos en la sonda, por favor espere...”) y “Updating GLP data, please wait...” (“Actualizando datos GLP, por favor espere...”). Luego aparecen nuevamente la pantalla de calibración de 3 ítems y la casilla de verificación estará llena o vacía de acuerdo con los parámetros calibrados. Se presiona ok para volver al menú de calibración.

- **Modo de medición**

Se conecta la sonda en el medidor, posteriormente se sumerge la sonda en la muestra. Se enciende el medidor presionando el botón On/Off. El medidor visualiza “Hanna HI 9828”, la versión del software y luego ingresa el modo de medición. El medidor visualiza las lecturas relativas a todos los parámetros habilitados. Una pequeña letra A anexa a $\mu\text{S}/\text{cm}$ y mS/cm se refiere a la conductividad real, es decir, la lectura de la conductividad sin compensación de temperatura.



Cuando una medición está fuera del rango, el valor máximo (o mínimo) para la medición parpadeará de manera lenta y continua. Antes de tomar las mediciones se debe configurar algunos parámetros. La configuración de medición permite configurar las lecturas visualizadas y sus unidades; la configuración del sistema permite establecer los parámetros del sistema; por ejemplo, interfaz de lenguaje, fecha y hora, contraste de LCD, señales acústicas, etc.

- **Mantenimiento de la sonda de O.D.**

Se desatornilla la membrana girándola en sentido contrario a las agujas del reloj. Se enjuaga la membrana de repuesto con una solución electrolítica mientras se bate suavemente. Se rellena con electrolito limpio. Posteriormente se golpea la membrana suavemente sobre una superficie para asegurar que no haya burbujas de aire. Con el sensor boca abajo, se atornilla la tapa en sentido de las agujas del reloj hasta que se acaben los hilos. Se derramará un poco de electrolito. Para que la sonda adquiera un rendimiento óptimo, se recomienda reemplazar la membrana cada 2 meses y el electrolito una vez al mes.

- **Mantenimiento de la sonda pH**

Se saca la tapa protectora. Posteriormente se agita el electrodo hacia abajo como se haría con un termómetro clínico para eliminar las burbujas de aire que pudieran quedar en el bulbo de vidrio. Si el bulbo y/o la unión está(n) seco(s), se remoja el electrodo en la solución de almacenamiento HI70300 durante una hora por lo menos. Para minimizar los atascos y asegurar un tiempo de respuesta rápido, se debe mantener húmedos el bulbo de vidrio y la unión, no se permite que se sequen. Se vuelve a colocar la solución en la tapa protectora con unas pocas gotas de solución de almacenamiento HI70300.



- **Mantenimiento de la sonda de EC**

Después de cada serie de mediciones, se enjuaga la sonda con agua corriente. Si se necesita una limpieza más minuciosa, se limpia la sonda con el cepillo (incluido en el paquete del multiparamétrico) o con un detergente no abrasivo. Después de limpiar la sonda, siempre se debe recalibrar el instrumento.

- **Mantenimiento general**

Después de utilizarla, se enjuaga la sonda con agua potable y se seca; se mantiene húmedo el bulbo del electrodo y secos los sensores de O.D. y EC.

- **Actividades de Gabinete**

Las actividades que se realizaron durante el proyecto fueron revisiones bibliográficas y electrónicas sobre los métodos experimentales de humedales artificiales de flujo subsuperficial. La revisión de manuales para la utilización de los equipos utilizados en la medición de los parámetros, para conocer su uso eficiente y poder tomar resultados congruentes. Revisión de artículos, tesis y normas que permitieron comprender la estructura del proyecto.



3. RESULTADOS

La estabilización es el periodo durante el cual el sistema alcanza valores estables de ph, temperatura (Temp), conductividad (CE) Solidos disueltos totales (SDT), OD (Oxígeno disuelto), Salinidad (Sal), potencial oxido reducción (ORP); estas son las principales variables que indican que las plantas y microorganismos dentro del sistema han llegado a una etapa en equilibrio.

La temperatura del agua residual presento variación, todos los tratamientos mostraron temperatura alrededor de los 24.5 a los 26.4 °C., la temperatura promedio fue de 25.5 °C, bajas temperaturas en el sistemas de humedales artificiales se ven reflejadas en bajas eficiencias de remoción, los microorganismos responsables de la remoción de nitrógeno funcionan óptimamente con temperaturas superior de 15°C, ya que a bajas temperaturas descomponen la biomasa microbiana y el fosforo el liberado de los precipitados, lo que da paso a la solubilizarían del fosforo en el agua (Akaratos y Tsihrintzis 2007).

Según el análisis de factores de temperatura es determinar por el ambiente sin que los tratamientos tengan influencia sobre estos valores. Kadlec (2009), menciona aspectos importantes en el comportamiento de la temperatura; el balance de energía de los humedales artificiales se centran en la temperatura del agua como modulador de los procesos microbiológicos, ya que un humedal artificial de cualquier variedad típicamente contienen dos regiones termales; una región de entrada u una región de salida en la que la temperatura del agua se ajusta a las condiciones ambientales. La temperatura no cambia con la distancia o el tiempo de retención. El valor alcanzado se determina por el equilibrio de los flujos de energía y se denomina balance de la temperatura. Las temperaturas del balance hídrico de los humedales artificiales son iguales a la temperatura del aire de acuerdo a la temporada del año.



3.1 Sistema de muestreo y Variable de Estudio

Antes de iniciar con el proceso se obtuvieron muestras para poder demostrar que nuestro humedal artificial esté operando de la forma correcta una vez que comience a funcionar, el ubicado en la venta Huimanguillo Tabasco.

Se puede observar como a partir del 31 de octubre del 2015 se inicia la operación de nuestro humedal con los parámetros que se presentan en esa fecha. Posteriormente de la recolección de los primeros datos se dio un lapso de 28 días lo es de vital importancia para la adaptación de todo el sistema. Una vez transcurrido el lapso de adaptación se obtuvieron los mismos parámetros, los cuales al compararse se resalta que se presentó un cambio significativo, siendo valores de progreso en esta investigación confirmando que el sistema está iniciando con factores positivos gracias a la operación del mismo. Observe la tabla 9.

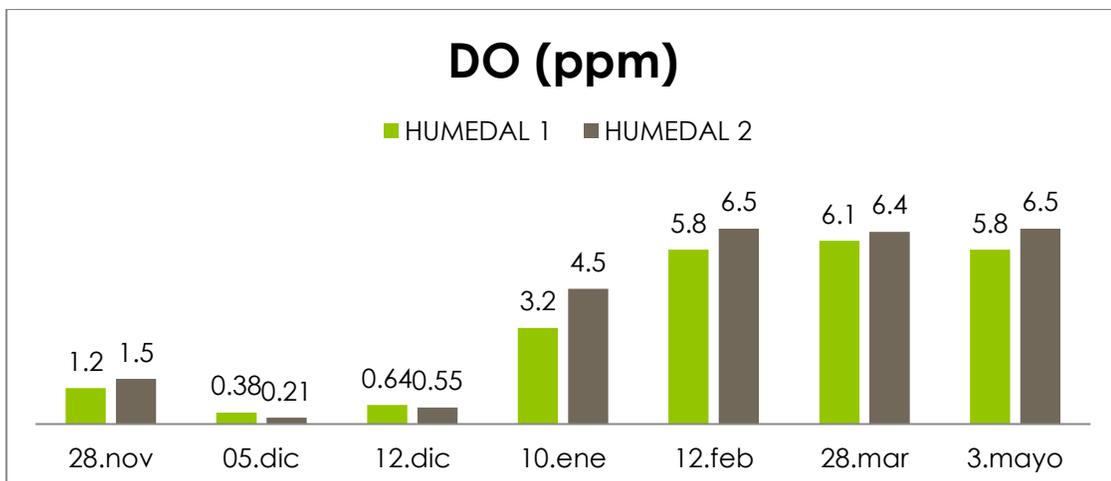
Tabla.9 etapa inicial del humedal artificial.

FECHA	DO (PPM)	pH	T °C	atm	C.E. (μ S/m)	tds (ppm)	SALINIDAD	DO %
31-oct	1.87	6.96	27	1	490.3	13860	0.37	62.3
28-nov	1.35	6.8	25.35	1	470.5	235	0.225	50.2

A partir de esta etapa se comenzaron a realizar los muestreos, los cuales se realizaron en un periodo de 7 meses presentando cambios significativos, comprobando que el sistema a través del tiempo pudo estabilizarse, dando resultados favorables a la presente investigación todos bajo los parámetros que aplica la NOM-001-SEMARNAT-1996.



Como podemos observar, la concentración promedio de oxígeno disuelto fue la más baja para el mes de diciembre, teniendo en el **humedal 2 Pontederia Cordata** 0.21 ppm como la concentración más baja, indicándonos que el agua se encontraba escasamente oxigenada de acuerdo al criterio que evalúa Gama *et al.*, 2010 Que comparado con el mes de mayo, en el punto más alto con 6.5 ppm del humedal 2 como un cuerpo de agua *oxigenada*. Esto nos indica que es viable para albergar vida acuática; y que las variaciones las podemos relacionar con el cambio de temperatura que podemos entender es razonable, ya que al haber un incremento de temperatura, la cantidad de oxígeno disminuyo como pasó en el mes de diciembre.



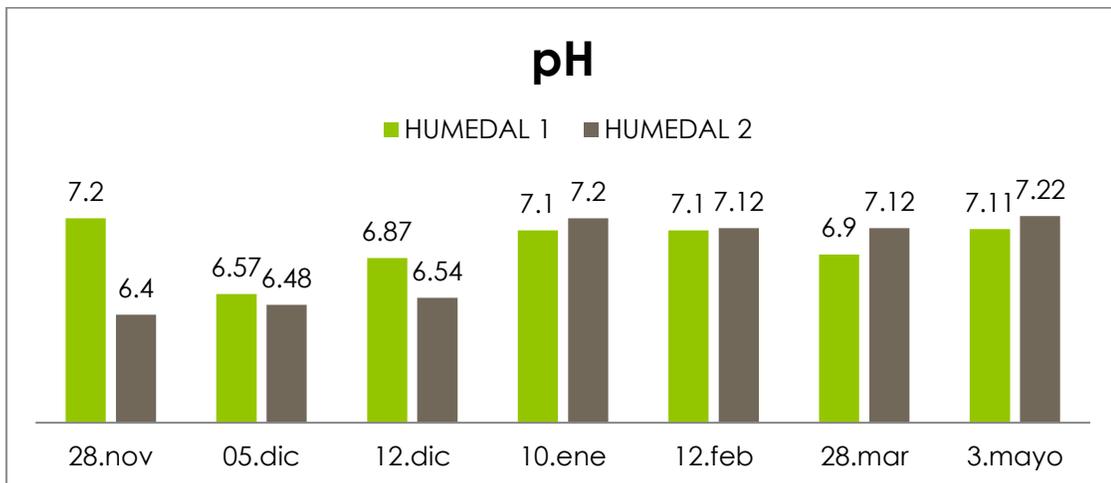
Gráfica.1 Variaciones de Oxígeno disuelto (DO) en los periodos nov. 2015 a mayo 2016

Por otra parte si el agua contaminada tiene muchos M.O. y materia orgánica la gran actividad respiratoria disminuye el oxígeno disuelto el cual podría ser otro factor en los cambios de DO en el agua.



Otro parámetro a investigar es el pH el cual en los meses de noviembre y diciembre del 2015 alcanzaron valores de 6.4 pH, clasificándolo fuera de los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994. Esto podría ser a una posible causa del aumento del CO₂, respiración, oxidación y degradación de materia orgánica durante esos meses.

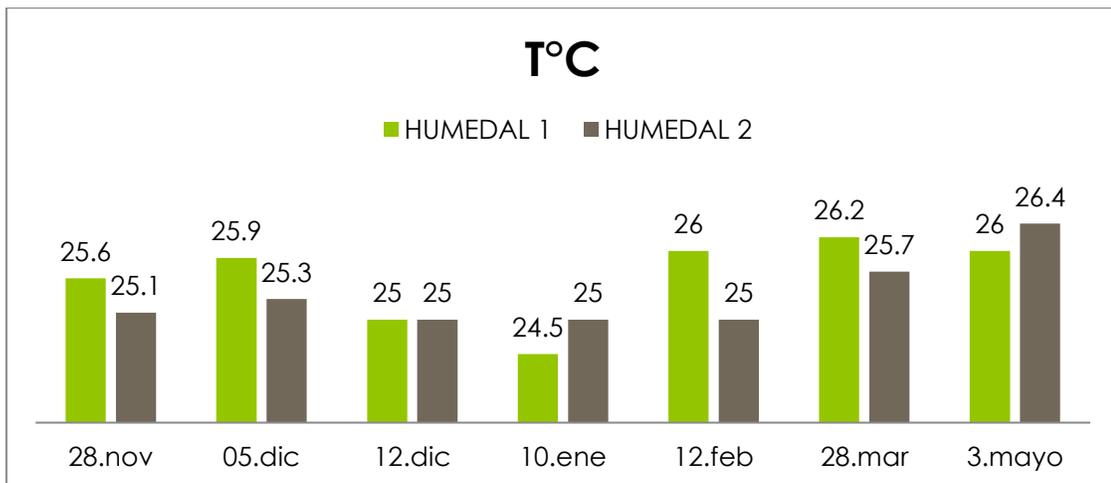
Mientras que para el mes de mayo el resultado obtenido fue de 7.22 pH en el humedal 2 y 7.11 en el humedal 1, cumpliendo con el límite máximo permisible que establece la NOM-127-SSA1-1994 en el rango de 6.5 a 8.5 como agua para uso humano y salud ambiental. Y que Gama *et al.*, 2010 clasifica como un agua *ligeramente alcalina*. Este cambio se vio influenciado ligeramente por la fotosíntesis del fitoplancton y plantas macrófitas que lo aumentan. Así como también el cambio en la concentración de iones hidrógeno, puede ser causado por la incorporación de sustancias, ya sea por el aporte de los escurrimientos, por filtración o por la actividad biológica.



Gráfica. 2 Variaciones de pH en los periodos de nov. 2015 a mayo 2016.

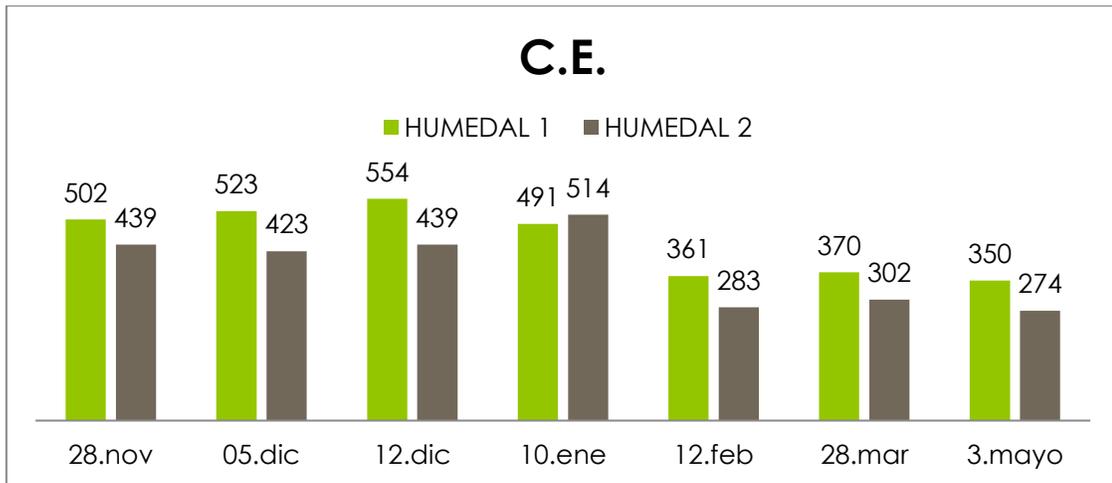


En la siguiente grafica se visualiza como durante el paso de los meses el cambio climático va afectando la temperatura del agua. La cual es un factor importante para la existencia de los microorganismos y del sistema, cumpliendo así con la NOM-001-SEMARNAT-1996, temperaturas no mayores a 40°C.



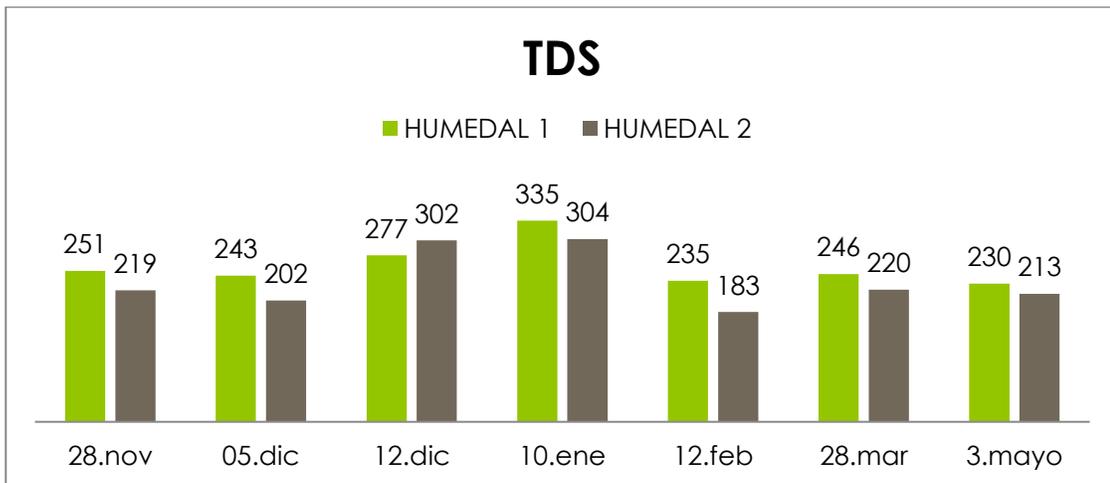
Gráfica. 3 Variaciones de la temperatura (T°C) en los periodos de nov. 2015 a mayo 2016.

A partir del mes de febrero se empieza a presentar una mejor eficiencia en la conductividad eléctrica la cual se observa un mejor resultado. cuanto al parámetro de conductividad eléctrica se obtuvo el valor más alto alcanzando 554 $\mu\text{S}/\text{m}$ en el mes de diciembre en el humedal 1, y en el mes de mayo del 2016 en el humedal 2 disminuye a 274 $\mu\text{S}/\text{m}$, que en base al criterio de Gama et al., 2010 clasifica el agua como salinidad baja la cual especifica una utilidad de riego en todo cultivo y tipo de suelo, así como baja probabilidad de formar salinidad.



Gráfica. 4 Variaciones de la conductividad eléctrica (C.E.) en los periodos de nov. 2015 a mayo 2016.

Se puede observar en la gráfica que durante los periodos de nov. 2015 a mayo 2016, los TDS están por debajo de los límites permisibles (1000 ppm) que marca la NOM-127-SSA1-1994. Esto se resalta más la eficiencia del humedal 2 durante el periodo de investigación.

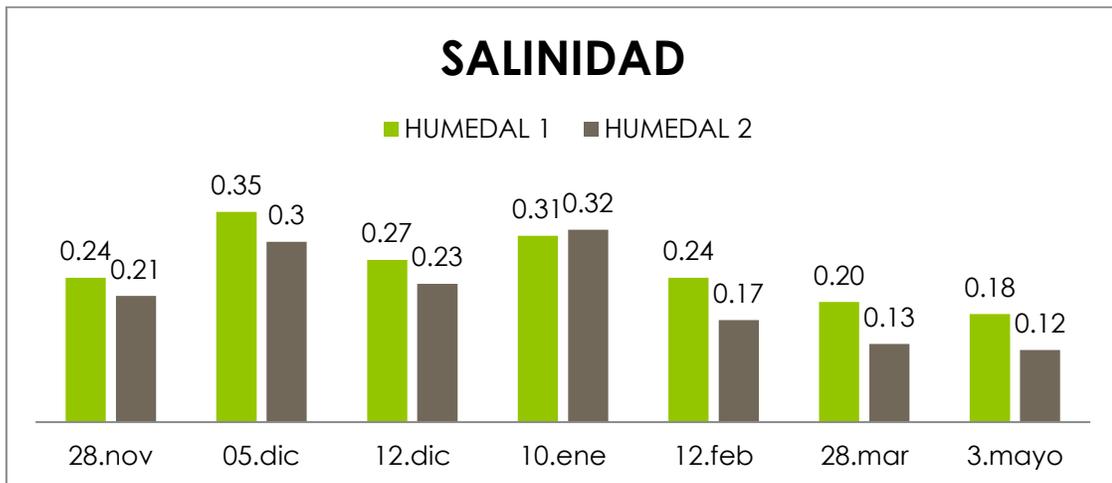


Gráfica. 5 Variaciones de la total de solidos disueltos (TDS.) en los periodos de nov. 2015 a mayo 2016.



Los valores se encuentran dentro del rango, el cual el más alto fue de 0.35 en el humedal 2 y el más bajo fue de 0.12 para cumplir con las especificaciones para riego agrícola y que aunado a otros análisis pudieran ser disponibles para riego de determinados cultivos se considera como salinidad baja.

En el periodo de febrero en el humedal 2 disminuye considerablemente la salinidad del agua



Gráfica. 6 Variaciones de salinidad durante los periodos de nov. 2015 a mayo 2016.



Instituto Tecnológico de Villahermosa

Maestría en Ingeniería de Procesos

Identificación de la muestra: Muestra Final

Identificación del punto de muestreo: muestra tomada a la salida del humedal Ubicado en la venta, Huimanguillo, poblado El Yucateco.

Fecha de muestreo: 2016 junio 03

Hora de muestreo: 11:00 hr.

DATOS DEL LABORATORIO:

Lapso de análisis: del 07 al 14 de mayo de 2016

Tabla. 10 Análisis Metales pesados por debajo de los límites permisibles.

Parámetro	Método	Resultado	unidad	L.M.P.	L.C.L
Cadmio	NMX-AA-051-SCFI-2001	< 0.0004	Mg/L	0.005	0.0004
Cromo	NMX-AA-051-SCFI-2001	< 0.0025	Mg/L	0.05	0.005
Plomo	NMX-AA-051-SCFI-2001	< 0.004	Mg/L	0.01	0.004
Níquel	NMX-AA-051-SCFI-2001	< 0.25	Mg/L	N.A.	0.2500

L.M.P.= Límite Máximo Permissible establecido por la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 y su modificación publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de Noviembre de 2000.

L.C.L.= Limite de cuantificación del laboratorio.

N.D.= No Detectable. **N.A.**= No Aplica < = Menor que

En la tabla 10 se observa los parámetro de metales pesados del agua tratada en el humedal, los cuales se encuentran debajo de los LMP.



4. CONCLUSIONES

Este trabajo concluye que los humedales artificiales son viables para la depuración de aguas residuales, teniendo como ventaja costos bajos en cuanto a instalación, energía, suministro, operación y su mantenimiento no requiere de un trabajo arduo. Posteriormente se observaron a las especies empleadas en el humedal artificial las cuales son nativas de la región. La *Pontederia Cordata* resulto más eficiente para el tratamiento de aguas residuales más que la *Typha domingensis*, todos los tratamientos que se realizaron en los dos recipientes del humedal se dieron con un tiempo de retención de 12 horas con temperaturas alrededor de 24.5 a 26.4 °C las cuales fueron las adecuadas para disminución de la carga orgánica y metales pesados en las aguas residuales tratadas. Estas especies antes mencionadas pueden dar mejores resultados con un mantenimiento adecuado, aunado a esto se recuerda que los especímenes de esa zona están acostumbradas al cambio de salinidad de la laguna, la cual está conectada al mar y en ciertas temporadas se presentan grandes cambios.

Cabe remarcar que todo lo anterior se trabajó bajo la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. La cual no aplican ciertos parámetros que la NOM-127-SSA1-1994 "salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". Esto con el fin de comparar resultados y tomar solo como referencia.

Es importante resaltar que el objetivo general planteado el cual es, **diseñar y conocer por medio de un humedal artificial de flujo horizontal el índice de la calidad del agua que presenta la laguna el yucateco en Huimanguillo Tabasco**, fue alcanzado junto con los objetivos específicos dando resultados satisfactorios para la investigación.



5. RECOMENDACIONES

Para esta investigación se hacen las siguientes recomendaciones que pudieran ser tomadas en cuenta para próximos proyectos a desarrollar semejantes al mismo:

Se deben de realizar más análisis en los diferentes procesos del sistema tomadas ya que consideramos que con más información obtenida a partir de las muestras podríamos encontrar mejores resultados.

Los sistemas de remoción como humedales artificiales necesitan un mantenimiento constante una vez establecidos. Es importante llevar un buen control especialmente durante los dos o tres primeros meses de adaptación, esto con el fin de asegurar un adecuado entorno que proporcione a las plantas un funcionamiento óptimo y una larga vida.

Para evitar bloquear los sistemas de cargas iniciales excesivas se recomienda ser revisado periódicamente para comprobar su buen funcionamiento y solucionar anomalías, como atascos a la entrada del flujo, flujo superficial excesivo, existencia de zonas preferentes al paso del agua.



Bibliografía

Acero, C. A. (2014). Tratamiento de aguas residuales a través de humedales. *Magíster en Ingeniería Civil*, 6.

Delgadillo, O., Camacho, A., Perez, L. F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Bolivia: Nelson Antequera.

Díaz, L. V., & Pérez, L. A. (1993). LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS POR HIDROCARBUROS:. *Rev Cubana Higiene Epidemiología*, 1.

Germán Giácoman Vallejos; Fedro Uriel Tapia González; María del Carmen Ponce Caballero. (s.f.).

google. (20 de Junio de 2016). *google maps*. Obtenido de <HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/MAPS/@18.184081,-94.028026,4315M/DATA=!3M1!1E3?HL=ES-419>

Hernández, J. G., Casillas, C. V., Cárdenas, L. C., Hernández, S. R., Mendizábal, S. S., Gamalíe González -Pérez, I., & García, G. L. (2011). "Humedales artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 109-110.

Hernández, M. A., & Pérez, D. D. (2015). EVALUACIÓN DE UN REACTOR ANAEROBIO Y HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. *Jovenes en la Ciencia*, 1(2), 1.

Hoffmann, D. H., & Platzer, D. C. (febrero de 2011). Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater. (D. E. Muench, Ed.) *GIZ Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN*, 19-22-23-25.



Instituto Tecnológico de Villahermosa

Maestría en Ingeniería de Procesos

L. Mackenzie, D., & J. Masten, S. (2005). *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Mc Graw Hill.

romero aguilar, m., Colín Cruz, A., Sanchez Salinas, E., & Ortiz Hernandez, M. L. (agosto de 2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Rev. Int. Contam. Ambiental.*, 25(3), 1-2.

Romero, M. R., Cruz, A. C., Salinas, E. S., & Hernandez, M. L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 2.

Salazar, R. P., Chinchilla, C. A., Marín, J. S., & Pérez, J. A. (2012). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Uniciencia*, 334.

Serrano, J. G., & Hernández, A. C. (19 de septiembre de 2016). <http://upcommons.upc.edu>. Obtenido de http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia_and_ACorzo.pdf;jsessionid=553F55B17C64CF015A2565D30F161458?sequence=1

Vallejos, G. G., González, F. U., & Caballero., M. d. (julio-septiembre de 2010). Tecnología experimental Humedales Artificiales. *Fomix campeche*, 5, 6.

Vega kuyper, J. C. (2007). *Química del medio Ambiente* (2 da ed.). Rama.

Vymazal, J. (2008). Constructed Wetlands for Wast. *World Lake Conference*, 1-2.