



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES
ARTIFICIALES**

VIVIANA MARIA ARTEAGA CORTEZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Viviana Maria Arteaga Cortez, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor David H. del Valle Paniagua, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Propuesta meteorológica para la construcción de humedales artificiales

y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 8 de febrero de 2018



Firma del
Alumno (a)



Dr. David H. del Valle Paniagua
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: PROPUESTA METODOLOGICA PARA LA CONSTRUCCION DE HUMEDALES ARTIFICIALES

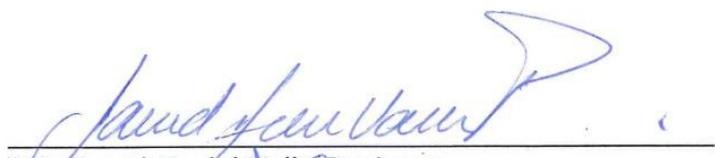
realizada por el (la) alumno (a): _Viviana Maria Arteaga Cortez

bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

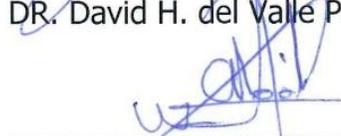
DOCTOR (A) O MAESTRO (A) EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

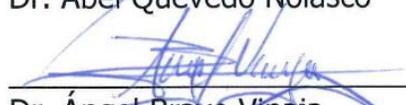
CONSEJERO (A)


DR. David H. del Valle Paniagua

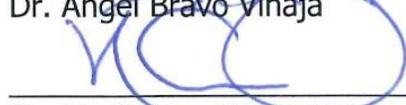
ASESOR (A)


Dr. Abel Quevedo Nolasco

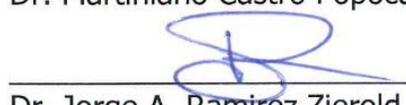
ASESOR (A)


Dr. Ángel Bravo Vinaja

ASESOR (A)


Dr. Martiniano Castro Popoca

ASESOR (A)


Dr. Jorge A. Ramirez Zierold

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2018

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Viviana Maria Arteaga Cortez, D. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales por medio de los humedales artificiales se utiliza como una tecnología verde, que surge de la necesidad de replicar los beneficios ecosistémicos de los humedales naturales, para tratar diversos afluentes de aguas residuales. Los humedales artificiales son sistemas depurativos que presentan ventajas técnicas, económicas y operativas en comparación con las plantas de tratamiento convencionales. Este estudio se llevó a cabo para comparar la eficiencia depurativa de dos humedales artificiales con respecto a las requeridas por los ajolotes, donde se evaluaron los parámetros de alcalinidad, dureza, amonio, nitritos, nitratos, fosfatos, silicatos, nitrógeno total y fosforo total. Mediante las pruebas realizadas en este estudio fue posible determinar la eficiencia de los Humedales, el HA-FS solo fue eficiente para la remoción de fosfatos, silicatos y en fosforo total, mientras que el HA-FSS fue superior en la remoción de amonio, nitritos, nitratos y nitrógeno total. En ambos humedales, los procesos responsables de la depuración difieren en magnitud, sin embargo, los modelos de una etapa como el modelo HA-FS no pueden lograr una alta eliminación de nitrógeno total, debido a su incapacidad para proporcionar condiciones tanto aerobias y anaerobias, al mismo tiempo.

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, humedales construidos, diseño, Nutrientes.

METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR THE CONSTRUCTION OF ARTIFICIAL WETLANDS

Viviana Maria Arteaga Cortez, D. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

The wastewater treatment using constructed wetlands has been applied as a green technology that arises from the need to replicate eco-systemic benefits of natural wetlands to treat various sources of wastewater for decades. Artificial wetlands are systems that show a technical, economic and operational advantages compared to the conventional water treatment plants. This study was got to compare the depurative efficiency of two artificial wetlands, for which the parameters of alkalinity, hardness, ammonium, nitrites, nitrates, phosphates, silicates, total nitrogen and total phosphorus were evaluated. Through the tests realized on this study, it was possible to determine the efficiency of the Wetlands, the HA-FS was only efficient for the removal of phosphates, silicates and in total phosphorus, while the HA-FSS was better to remove ammonium, nitrites, nitrates and total nitrogen. In both wetlands, the difference between in the both process responsible for the purification was magnitude, however, the one stage models such as the HA-FS model, can't achieve to get a high elimination of total nitrogen, due to their incapacity to provide both conditions: aerobic and anaerobic at the same time. Keywords: Wastewater treatment, constructed wetlands, design, operation, maintenance.

Keywords: Wastewater treatment, constructed wetlands, design, Nutrients.

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo mexicano, que gracias a su contribución y a través de la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología financió mis estudios de doctorado.

Al Colegio de Postgraduados que me acogió y me brindó la oportunidad de formarme académicamente.

A Hidrociencias que me dio las facilidades para culminar mis estudios y desarrollar esta tarea, así como a los profesores del programa por compartir sus conocimientos.

Al Dr. Abel Quevedo Nolasco y al Dr. David H. del Valle Paniagua por la dirección de este trabajo, consejos en la academia y su apoyo incondicional.

Al Dr. Ángel Bravo Vinaja por su enseñanza en clase, su valiosa revisión y aportación a este trabajo, por su apoyo y aprecio.

Al Dr. Jorge A. Ramírez Zierold, por su protección, confianza y su valiosa amistad.

A la Dr. Martiniano Castro Popoca, observaciones y aportaciones en la realización de este trabajo.

Al Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología por prestarme las instalaciones del laboratorio de biogeoquímica acuática.

Al Hidrobiólogo. F. Sergio Castillo Sandoval, por su amplia colaboración técnica y su asesoría para la realización de los análisis de esta investigación.

A la asociación de Restauración Ecológica y Desarrollo A.C. (REDES), que me dio las facilidades para

la construcción de los humedales en San Gregorio Atlapulco

A los productores de San Gregorio Atlapulco y a sus familias por su colaboración en la construcción de los humedales.

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen por darme la vida y la oportunidad de progresar.

A mi madre Ana Maria por su entrega incondicional, su amor, su apoyo, por escucharme en todo momento, y por su confianza y fe en mí. Por cuidar a mi hija cuando estoy ausente.

A mí es esposo Jorge por su confianza y apoyo incondicional durante esta aventura.

A mi hija Rebeca por ser mi alegría, mi orgullo y mi motor de vida.

A mi hermana Mariana por su apoyo y cariño.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.1.1 Objetivos particulares	3
1.2 HIPÓTESIS	4
1.2.1 Hipótesis particulares	4
II ESTADO DEL ARTE EN HUMEDALES ARTIFICIALES	5
2.1 HUMEDALES NATURALES Y ARTIFICIALES	5
2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	7
2.3 PROCESOS DEPURATIVOS	8
2.4 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES	11
2.4.1 Flujo libre (FL)	11
2.4.2 Flujo subsuperficial horizontal (FSSH)	12
2.4.3 Flujo subsuperficial vertical (FSSV)	13
2.4.4 Sistemas de humedales combinados o híbridos (HAC)	14
2.5 FACTORES QUE CONDICIONAN EL ESTABLECIMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES.	17
2.5.1 Dimensiones del humedal	17
2.5.2 Topografía y características del suelo	20
2.5.3 Inundabilidad del terreno	20
2.6 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES	21
2.7 COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	24
2.8 CONCLUSIONES	25
2.9 REFERENCIA BIBLIOGRAFICA	26
III. DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES.	30
3.1 INTRODUCCIÓN	30

3.1.1	Diseño.....	31
3.1.1.1	Metodología de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)	31
3.1.1.2	Metodología presentada por Alberta Environment en Canada	31
3.1.1.3	Metodología presentada por el Centro del Agua en Bolivia	32
3.1.1.4	Metodologia presentada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.....	32
3.2	CONDICIONES HIDRAULICAS	32
3.3	MÉTODOS Y MATERIALES	35
3.4	RESULTADOS	39
3.4.1	Comparación en la eficiencia de remoción	39
3.4.2	Alcalinidad	43
3.4.3	Dureza.....	43
3.4.4	Amonio	44
3.4.5	Nitritos (NO_2^-)	45
3.4.6	Nitratos (NO_3^-)	45
3.4.7	Fosfatos (PO_4^{3-}).....	45
3.4.8	Silicatos.....	46
3.4.9	Fosforo Total.....	46
3.4.10	Nitrógeno Total.....	46
3.5	CONCLUSIONES	47
3.6	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA	48
IV.	CONSTRUCCIÓN DE DOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN EJIDOS DE XOCHIMILCO Y SAN GREGORIO ATLAPULCO	51
4.1	INTRODUCCIÓN	51
4.1.1	Descripción de la zona	52
4.1.2	Suelos.....	52
4.1.3	Clima.....	52
4.1.4	Hidrología.....	53
4.2	MÉTODOS Y MATERIALES	54
4.2.1	Funcionamiento.....	59

4.3	RESULTADOS	61
4.3.1	Alcalinidad	61
4.3.2	Dureza.....	62
4.3.3	Amonio	62
4.3.4	Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	63
4.3.5	Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	63
4.3.6	Fosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	63
4.3.7	Silicatos.....	63
4.3.8	Fosforo Total.....	63
4.3.9	Nitrógeno Total	64
4.3.10	Ajustes al humedal	64
4.4	CONCLUSIONES	65
V.	CONCLUSIONES GENERALES	69
ANEXO A.	TABLAS DE RESULTADOS	70
ANEXO B.	ALBUM FOTOGRAFICO	74

LISTA DE CUADROS

Cuadro

2.1	Sistemas híbridos de humedales artificiales ambiental.....	16
	Diseño hidráulico de las metodologías propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), Alberta Environment en Canadá y el Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA, Bolivia)	34
3.1	Datos de diseño para los modelos a escala de humedales artificiales.....	38
3.2	Metodologías propuestas con modificaciones sugeridas por Kirkwood (1994) para su realización en un auto-analizador de flujo segmentado Skalar modelo San Plus.....	42
3.3	Resultados de los diseños de los humedales de Potrero y Tlapechicalli.....	56
4.1	Parámetros óptimos para los ajolotes.....	59
4.2	Metodologías propuestas.....	60
4.3		

LISTA DE FIGURAS

Figura

3.1	Diseño del modelo 1, Humedal artificial de flujo superficial (HAFS).....	36
3.2	Diseño del modelo 2, Humedal artificial de flujo sub superficial (HAFSS).....	36
3.3	Humedal artificial de flujo superficial (HAFS).....	41
3.3a	Humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS).....	41
4.1	Climograma Xochimilco.....	53
4.2	Esquema de la malla del filtro para el humedal artificial del paraje de Potrero.....	56
4.3	Diseño del humedal artificial del paraje de Potrero.....	57
4.4	Diseño del humedal artificial para el paraje de Tlapechicalli.....	58

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

Un grave problema en la actualidad es la contaminación de corrientes y cuerpos de agua, los cuales son receptores de vertidos de carácter doméstico, industrial y agrícola. Se estima que 12,000 km³ de recursos hídricos del planeta ya no están disponibles para su aprovechamiento, debido a su grado de contaminación. El volumen global anual de aguas residuales es de 1,500 km³, de los cuales se estima que por cada litro de agua residual se contaminan al menos 8 litros de agua dulce. En México, las aguas residuales se generan aproximadamente a una velocidad de 30 m³/s, donde cada persona contamina al menos 100 l de agua al día; 43,200 m³ por día; alrededor del 19% de éstas se vierten directamente sin ningún tipo de tratamiento a las corrientes naturales y cuerpos de agua. (Cloter *et al.*, 2006).

También, los contaminantes derivados de la industria, zonas rurales, urbanas y turísticas, así como el uso generalizado de pesticidas en la agricultura moderna, conllevan a una gran diversidad de aguas residuales, contribuyendo a la contaminación de fuentes no puntuales en los ríos y arroyos en todo el mundo, además de entrar en los cuerpos de agua a través de fuentes difusas y puntuales. Entre las principales fuentes de contaminación difusa se encuentran, la escorrentía superficial, la erosión, la dispersión, la lixiviación, así como la deposición atmosférica y el transporte atmosférico de suelo erosionado por el viento, lo que ocasiona la contaminación de los cuerpos de agua receptores, y los mantos freáticos en diferentes clase y grados de contaminación. Los lagos y embalses presentan niveles importantes de materia orgánica, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, nutrientes, compuestos tóxicos y microorganismos de interés sanitario. El problema es el detrimento de la calidad del agua debido al aporte de numerosas fuentes deferentes y sin una solución específica para resolver el problema. La reutilización de estas aguas para riego agrícola trae como consecuencia riesgos colaterales para la salud de la población en función de las concentraciones de contaminantes (Ramírez-Carrillo *et al.*, 2009). En este sentido, la gestión de aguas residuales tanto en zonas rurales como urbanas constituye un reto debido a la falta de infraestructura adecuada y la capacidad económica.

El tratamiento de las aguas residuales es vital y va encaminado al uso de ecotecnologías o tecnologías adecuadas que utilicen o imiten a la naturaleza, y así aprovechar algunos componentes de esta, como la biota y suelos, para la depuración de contaminantes presentes en el agua residual. Los humedales artificiales son sistemas específicamente diseñados y construidos por el hombre para el tratamiento de aguas residuales, en éstos se aumentan las capacidades depuradoras de la vegetación y con ello la eficacia del sistema, al optimizar los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los ecosistemas de humedales naturales (Vymazal, 1998), lo que contribuye de manera sustancial en la remoción de contaminantes, el control de la calidad del agua y la falta de adecuación de modelos extranjeros en el diseño de humedales artificiales.

Este trabajo presenta información acerca del estado actual de los humedales artificiales, sus procesos de remoción, los distintos tipos de humedales, así como los criterios utilizados para su diseño, operación, mantenimiento y costos de implementación. Además se probará la adecuación de un humedal artificial de flujo subsuperficial y un humedal de flujo de flujo libre a escala piloto, con la finalidad de beneficiar al ajolote o *Ambystoma mexicanum* especie endémica y en peligro de extinción, y el cual requiere una buena calidad del agua para su conservación.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, evaluar, y proponer una metodología para la construcción de humedales artificiales con base en los requerimientos de los ajolotes (*Ambystoma mexicanum*) de la zona lacustre de Xochimilco.

1.1.1 Objetivos particulares

- 1.1.1.1 Analizar y sintetizar sobre el desarrollo histórico y tecnológico de los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales domésticas y agrícolas.
- 1.1.1.2 Analizar las principales características de diseño y operativas de los diferentes tipos de humedales artificiales.
- 1.1.1.3 Analizar las características físico-químicas óptimas requeridas por los ajolotes.
- 1.1.1.4 Analizar y discutir las metodologías propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), Alberta Environment en Canadá, el Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA, Bolivia) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para la creación de Humedales artificiales, así como su aplicación en el tratamiento de aguas residuales domésticas y agrícolas, para la construcción de dos modelos a escala.
- 1.1.1.5 Evaluar las características de diseño hidráulico, biológico (vegetación y análisis Físicoquímico) y edafológico (sustrato) con base en las metodologías propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), Alberta Environment en Canadá, el Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA, Bolivia) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), presentes en el proceso de purificación del agua en el modelo a escala.
- 1.1.1.6 Diseñar una metodología de depuración de aguas residuales para la zona lacustre de Xochimilco con el fin de conservar los Ajolotes

1.2 HIPÓTESIS

Existen tecnologías sobre humedales artificiales que permiten mejorar la calidad del agua para el desarrollo y crecimiento de los ajolotes.

1.2.1 Hipótesis particulares

1.2.1.1 Las características físico – químicas del agua dureza general (GH) (Ca y Mg), nitritos (NO₂-), amonio, etc. son indispensables en el desarrollo óptimo de los ajolotes.

1.2.1.2 Existen diferencias en los humedales artificiales como en el tamaño del sustrato y tipo de vegetación que permiten aumentar su eficiencia depurativa y acreditaran su funcionalidad operativa, a través de sus tiempos de retención y determinaciones físico – químicas.

1.2.1.3 Los sistemas híbridos o combinados (HA-FSS) son más eficientes que los sistemas de una sola etapa en la remoción de amonio, nitritos, nitratos y nitrógeno total.

II ESTADO DEL ARTE EN HUMEDALES ARTIFICIALES

2.1 HUMEDALES NATURALES Y ARTIFICIALES

Se denomina humedal natural a todas aquellas áreas que están inundadas por aguas dulces o saladas, temporal o permanentemente y que presentan una vegetación típica adaptada para vivir en condiciones de suelo saturado (Vymazal, 1998). Son sistemas de transición entre zonas terrestres y acuáticas. En general, los humedales pueden clasificarse en marino-costeros, interiores o continentales, y artificiales. En México la combinación del clima, la topografía accidentada y la complejidad de las formaciones geológicas del país contribuyen a la producción de una gran diversidad de humedales, algunos de ellos son los pastos marinos y los arrecifes de coral como humedales marinos; los manglares, petenes, marismas salinas y salobres, y planicies salinas (que tiene que ver con la influencia de las mareas) los humedales marino-costeros y las ciénagas, como los humedales lacustres; dentro de los palustres están los pantanos, bosques y selvas inundables estacionalmente, pozas inundables temporal o permanentes, popales, bosques de galería, palmares y tasitales; por último existen también los humedales de origen kárstico como los cenotes (Congreso de la Unión, 2011). Los humedales ribereños son ecosistemas donde los suelos y la humedad del suelo, viven influenciados por la corriente o río adyacente. Ecosistemas ribereños actúan como sumidero de nutrientes para escurrimiento lateral de tierras altas y, por lo tanto, estos humedales son zonas de amortiguamiento importantes entre tierras agrícolas y arroyos.

Dentro de las técnicas de mitigación más comúnmente utilizadas en el campo para prevenir la entrada de plaguicidas en los cuerpos de agua, están los bordes de campo, barrera vegetativa (franja de vegetación densa, que funciona como una barrera porosa filtrante para el agua de esorrentía) (Vymazal & Březinová, 2015), zanjas con vegetación, y humedales artificiales (HA),

Los humedales artificiales tienen la finalidad de reducir los contaminantes y surgen de la necesidad de replicar los beneficios eco-sistémicos que nos brindan los humedales naturales, tales como la depuración de aguas residuales.

Se localizan en las zonas de transición entre los ecosistemas acuáticos y los terrestres. Su característica es la presencia del agua durante períodos prolongados lo cual ocasiona alteración de los suelos, sus microorganismos y las comunidades de flora y fauna (Llagas y Gómez, 2006), por lo cual se incluyen entre los llamados sistemas naturales de tratamiento del agua (Rodríguez, 2003). Los humedales artificiales proporcionan una superficie para el crecimiento de los microorganismos encargados de la filtración y adsorción de los contaminantes, además de inhibir el crecimiento de algas.

Los humedales artificiales se clasifican en:

Humedales de flujo libre o sistemas de plantas de libre flotación (FL) y Humedales subsuperficiales o sistemas de plantas con raíces emergentes (FSS), los cuales se dividen en: sistemas de flujo vertical (FSSV) y sistemas de flujo horizontal (FSSH).

Los humedales de flujo libre o superficial son estanques o canales en los que la superficie del agua se encuentra expuesta a la atmósfera y contienen plantas enraizadas flotantes. Por otro lado, los humedales de flujo subsuperficial son estanques en los cuales se coloca un sustrato poroso, el cual puede ser arena, grava o cualquier tipo de suelo de textura gruesa, el cual presenta vegetación emergente. Son de dos clases: humedales de flujo horizontal y flujo vertical, donde cambia la forma de suministro del afluente al humedal. La alimentación de los humedales de flujo vertical se realiza por intervalos de tiempo, para permitir la percolación del afluente en el sustrato.

Si bien el uso de los humedales artificiales es para diversos tipos de aguas residuales, el trabajo más antiguo que documenta a los humedales como cuerpos receptores en el tratamiento de aguas naturales por métodos naturales es de 1912. Existe el conocimiento de que el primer monitoreo de aguas residuales realizado por medio de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), fue entre el periodo comprendido de los años 1960 a 1970. Sin embargo, es hasta los años de 1952 a 1984 que ya hay la documentación probatoria de los monitoreos de la calidad del agua efectuados por la

EPA. De igual forma, también se documentan los proyectos realizados en todo el mundo de 1972 a 1983; a partir de 1970 se inician los estudios sobre la depuración de nitrógeno y fósforo (N y P) por medio de los humedales artificiales. Así mismo, es en la década de 1970 que se estudian los humedales construidos con la finalidad de depurar pesticidas. Durante la década de 1990, se estudió la depuración de nutrimentos por medio de humedales artificiales ubicados en ríos (Vymazal & Březinová, 2015).

El primer reporte del uso de vegetación emergente para la depuración de contaminantes en el agua residual pertenece a la Dra. Kate Seidel del Instituto Max Planck, de Alemania. En sus investigaciones planteó el uso de junco común (*Schoenoplectus lacustris*) para la remoción de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, así como para la desaparición de bacterias patógenas. Tiempo después la Dra. Seidel desarrolló un sistema conocido como Max Planck, cuyo diseño de humedales artificiales se implementó en etapas en donde combinaba humedales de flujo vertical con humedales de flujo horizontal (Miranda y Luna-Pabello, 2001).

En 1967 retoman los estudios de la Dra. Seidel en Holanda y desarrollan un sistema a escala de flujo libre. En Alemania en la década de 1970 el Dr. Kichuth creó un sistema llamado “Método de zona de raíces”, el cual consistía en un humedal de flujo horizontal en el que sembró *Phragmites australis*, añadiendo la combinación de calcio y hierro o aluminio para provocar la precipitación del fósforo. En el caso del estudio de los humedales en Estados Unidos de América el desarrollo de estos fue con base en los resultados de los trabajos europeos, mediante el estudio de los humedales naturales. Esta eco-tecnología también fue estudiada por la NASA, que desarrolló su propio sistema al cual llamaron “Sistema de tratamiento híbrido” debido a que utilizaba microorganismos anaerobios y plantas emergentes (*Phragmites communis*) (Rodríguez, 2003).

2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Los humedales artificiales presentan grandes ventajas técnicas, económicas, sociales y estéticas, sobre tratamientos convencionales de aguas residuales. Logrando una buena calidad del agua tratada conforme a la normatividad vigente, y resulta ser útil para el riego agrícola, debido a que elimina microorganismos patógenos.

Los costos de implementación, operación y mantenimiento en comparación a los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales son menores, ya que tienen una vida útil de 25 años y sus requerimientos energéticos de operación son mínimos, dado que la conducción del agua a los humedales es prácticamente por gravedad. Debido a las características de construcción de los humedales, es difícil que tengan desequilibrios por el cambio en las concentraciones de los contaminantes o la oscilación en el afluente del humedal (Miranda y Luna-Pabello, 2001). Además, en estos sistemas donde el agua fluye por debajo de la superficie del medio, no se presentan problemas con el desarrollo de mosquitos y no despiden olores, incluso proporciona protección térmica al sistema (vegetación, sustrato y agua), lo que hace posible la implementación de los humedales artificiales en lugares donde ocurren grandes heladas (Llagas y Gómez, 2006).

A pesar de todas las ventajas que proporcionan este tipo de sistemas de depuración de agua, tienen como desventaja requerir de grandes extensiones de terreno para su implementación. Cabe señalar que los humedales con flujo subsuperficial tienen también como desventajas el costo del medio de soporte que se utiliza, así como su traslado y colocación (Rodríguez, 2003).

2.3 PROCESOS DEPURATIVOS

Dentro de los humedales artificiales se efectúan procesos físicos, químicos, y biológicos, que remueven los contaminantes presentes en las aguas residuales. Entre dichos procesos se encuentran la sedimentación, la adsorción a las partículas del suelo, la asimilación por las plantas y la transformación microbiana (Rodríguez, 2003). Los procesos físicos de remoción en los humedales se asocian en particular al material particulado. La micro flora que se desarrolla dentro de un humedal es variada, abarca bacterias, protozoos y hasta pequeños animales, siendo las bacterias el grupo depurador fundamental en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

El agua se mueve lentamente por el humedal, debido al flujo laminar propio de estos sistemas y la resistencia proporcionada por las raíces y la vegetación, mismas que sirven como trampas de sedimento, pero su rol principal es la remoción de material particulado,

el cual es proporcional a la velocidad del flujo. El control de la velocidad en un humedal trae como consecuencia la resuspensión del material particulado y la deficiente remoción de este; además de presentarse como resultado la descomposición de materia orgánica, causada por los microorganismos que se encuentran en el sedimento, los cuales producen bioturbación a partir del desprendimiento de gases (de la fotosíntesis, oxígeno, metano y dióxido de carbono).

Los procesos biológicos de remoción en humedales es quizás el proceso más importante para la remoción de contaminantes; los cuales inician a partir de la captación de oxígeno por la planta. Algunos de los contaminantes son nutrimentos para las plantas, como los iones de nitrato, amonio, y fosfato, los cuales son absorbidos por la vegetación. Sin embargo, mucha de la vegetación macrófita puede llegar a captar y acumular significativamente metales tóxicos, como el cadmio y el plomo. La remoción de los contaminantes por la vegetación puede variar en función de la edad de la planta. Las bacterias y otros microorganismos del suelo también proveen, captan y almacenan nutrimentos a corto plazo, y algunos otros contaminantes. En la mayoría de los humedales el material de la planta muerta mejor conocida como detritus, se acumula en la superficie del suelo, algunos nutrimentos o metales eliminados previamente en el agua se pierden por descomposición y lixiviación, además de ser reciclados nuevamente dentro del humedal, en el agua y el sustrato. Los microorganismos presentes en los humedales remueven compuestos orgánicos. La depuración en este tipo de sistemas es por lo regular debido a la presencia de poblaciones microbianas adheridas a la superficie de las plantas y al medio de soporte. El metabolismo microbiano produce también la remoción de nitrógeno inorgánico, es decir, nitrato y amonio en los humedales.

El proceso químico de remoción más importante en el suelo es la absorción (transferencia de iones a partir del agua al suelo), dando lugar a la retención a corto plazo y a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes. Otro proceso importante dentro de los humedales es la adsorción, la cual se refiere a la unión de iones a las partículas del suelo a través del intercambio catiónico a la superficie de las partículas de la arcilla y de la materia orgánica del suelo.

Es a partir de la conjunción de los procesos de remoción y de los procesos metabólicos que se realizan en el humedal por la micro flora, que ocurre la remoción de los sólidos suspendidos totales (SST) y parte de la materia orgánica particulada, que es removida a partir de la sedimentación y filtración del agua. Mientras que la materia orgánica biodegradable (DBO) se depura gracias a la degradación microbiana (aerobia, anaerobia, y facultativa). Para la remoción del nitrógeno los mecanismos de remoción son la amonificación, seguida de la nitrificación-desnitrificación bacteriana, la volatilización del amoniaco, además de lo que la planta consume. El fósforo a su vez presenta reacciones de adsorción-precipitación con el aluminio, hierro, calcio y minerales propios de la arcilla, además de una parte que consume la planta. La remoción de los metales pesados es a través de la sedimentación y la adsorción sobre la superficie de la planta y los detritos. Los humedales artificiales propician la remoción de patógenos, mediante la sedimentación y filtración, la radiación ultravioleta, la excreción de antibióticos por las raíces de las plantas y la muerte natural (Rodríguez, 2003). La vegetación dentro de los humedales proporciona la superficie para el crecimiento microbiano, permite la filtración y la adsorción de los contaminantes presentes en el agua residual, inhibiendo el crecimiento de algas, y favorece la circulación del oxígeno, el cual es capturado por la vegetación a través de los tallos y las hojas y llevado a la zona radicular para su aprovechamiento.

De igual forma en los humedales artificiales ocurren varios procesos biogeoquímicos aeróbicos y anaeróbicos que regulan la retención y la eliminación de contaminantes. El carbono y la eficiencia de eliminación de compuestos orgánicos tóxicos es mediante la medición de oxígeno en el suelo o en el agua del efluente. Mientras que la eliminación del nitrato puede comprobarse mediante la medición del carbono orgánico disuelto; en este sentido la retención del fósforo también puede comprobarse a través de la disponibilidad del hierro reactivo y el aluminio en suelos ácidos; o bien Ca y Mg en suelos alcalinos (Reddy & D'Angelo, 1997).

Los humedales artificiales se diseñan para conseguir ventaja de los procesos que tienen lugar en los humedales naturales, pero en un ambiente más controlado. En la actualidad hay una mayor atención a los humedales artificiales, los cuales son muy eficaces en la

eliminación de plaguicidas. Estos productos son removidos en estos sistemas por procesos físicos (sedimentación, floculación, absorción, co-precipitación, precipitación), químicos (oxidación, reducción, intercambio de cationes, hidrólisis, fotólisis), biológicos (absorción y el metabolismo de la planta) o bioquímico (degradación microbiana) (Vymazal & Březinová, 2015).

2.4 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales (HA) pueden usarse para el tratamiento primario, secundario y terciario, de aguas residuales municipales, aguas pluviales, aguas residuales agrícolas e industriales, tales como lixiviados de vertedero, los productos petroquímicos, los desechos de alimentos, pulpa y papel, además de la minería, por lo general combinándolos con un adecuado tratamiento previo. Sin embargo, la aplicación de humedales artificiales es un tema delicado, debido a la variabilidad en la composición de las aguas residuales, variando con frecuencia las necesidades de tratamiento. La selección de la vegetación es un tema importante en este tipo de diseños, ya que deben sobrevivir a los posibles efectos tóxicos de las aguas residuales (Calheiros *et al.*, 2007).

2.4.1 Flujo libre (FL)

Los humedales de flujo libre son quizás los más antiguos, se utilizan como tratamiento secundario y para la depuración de pesticidas. Se diseñan para cargas superficiales bajas, y con una profundidad que oscila de entre 5 a 90 cm, sin embargo, es más común encontrarlos entre 30 y 40 cm, siendo usados por dos tercios del total de la población de Norteamérica; mientras que en Europa el desarrollo de los humedales de flujo libre es más lento. En Holanda se emplean desde hace más de 30 años, y los conforman por zanjas de 3 m de ancho y 100 m de largo, con una profundidad que oscila entre 0.30 y 0.40 m donde la vegetación usada es *Scirpus lacustris*. La efectividad de remoción en los humedales de flujo libre es del 96 % para SST, 96 % para DBO, 87 % para la DQO (demanda química de oxígeno) y 30 % para PT (fósforo total) (Rodríguez, 2003a).

2.4.2 Flujo subsuperficial horizontal (FSSH)

Los FSSH, surgen como una alternativa de tratamientos secundarios, son sistemas saturados de un medio poroso, donde se siembra con vegetación emergente.

Los FSSH se han utilizado para el tratamiento de aguas residuales por más de 30 años. Hoy en día, su uso abarca aguas residuales provenientes de la industria (productos farmacéuticos, productos químicos, refinerías de petróleo, fábricas de productos químicos, la producción de pulpa y papel, industrias de curtiembres y textiles, mataderos, destilerías e industrias) y son muy comunes para el tratamiento de las aguas residuales de procesamiento de alimentos (por ejemplo, producción y transformación de leche, queso, patatas, azúcar) (Vymazal, 2009).

Los FSSH son más utilizados en Europa. En este sentido la vegetación que más se usa en estos sistemas es *Phragmites australis*, *Scirpus spp.*, *Phalaris arundinacea*, en tanto que en Portugal las especies más usadas son las *P. australis*, *Iris pseudacorus*, *Cyperus spp.*, *Juncus effuses*, *Juncus spp.*, *Scirpus spp.*, mientras que en países mediterráneos son *Canna spp.*, *Iris spp.*, *Cyperus spp.*, *Typha spp.*, *Phragmites spp.*, *Juncus spp.*, *Poaceae spp.* y *Paspalum spp.*

Un FSSH presenta una alta remoción de materia orgánica, DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno medida a 5 días), DQO y sólidos suspendidos totales. Sin embargo, presentan una menor eliminación de nutrientes y en el caso de las aguas residuales procedentes de curtidurías, no son fácilmente biodegradables en sistemas cuyos tiempos de retención hidráulica son bajos. Por lo tanto, las plantas *T. latifolia* y *P. australis* son especies de vegetales que se adaptan mejor a las aguas residuales de curtidurías en términos de supervivencia y propagación. Los FSSH son una alternativa viable para reducir el contenido de materia orgánica de las aguas residuales, ya que toleran las fluctuaciones de flujo o intermitencias (Calheiros *et al.*, 2007). Así mismo, funcionan como protección contra la salinización secundaria del suelo; la vegetación que se utiliza para la desalinización de sustratos agrícolas es; *Typha spp.*, *Phragmites communis*, *Phragmites japonica*, *Medicago sativa* Linn., *Lemna minor* L. y *Potamogeton crispus*. *Typha spp.*, *Phragmites communis* y *Potamogeton crispus*. Las eficiencias de remoción

de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} puede llegar al 80 % con *Typha spp.* (Yang *et al.*, 2015).

Los suelos arcillosos, por tener capacidad de intercambio iónico, permiten la remoción temporal del nitrógeno presente en las aguas residuales, que depende del tiempo de estabilización del sistema. En el caso de los humedales de flujo horizontal, que emplean suelo, presentan un potencial de remoción adicional de fósforo y amonio. Mientras que en los sistemas de flujo vertical debido a la intermitencia del flujo favorece la restauración de las condiciones aerobias y el amonio es adsorbido. Al usar grava en humedales, la capacidad de remoción de fósforo es limitada.

En cuanto a la selección de la vegetación es muy importante considerar algunos factores, tales como la profundidad de las raíces, la productividad de la planta y la tolerancia a altas cargas de aguas, elementos y compuestos residuales. Por otro lado, *T. angustifolia* y *D. bicornis*, son adecuadas para la absorción de nitrógeno y la eliminación DBO_5 .

En cuanto a vegetación se refiere, las macrófitas son las más usadas en humedales artificiales, que morfológicamente se adaptan para crecer en condiciones de saturación y bajo la presencia de sedimento, su función es la toma de nutrientes, así como otros componentes de las aguas residuales. Las macrófitas más usadas para el tratamiento de aguas residuales en sistemas tipo estanque es de dos clases principalmente, plantas acuáticas flotantes, y sumergidas. Las plantas flotantes contienen y derivan del dióxido de carbono y las necesidades de oxígeno a la atmósfera, mientras que la vegetación sumergida se inhibe por la turbiedad (Yang *et al.*, 2015).

Hay varias causas que inhiben el crecimiento de las plantas, entre ellas la presencia de niveles tóxicos de contaminantes y la deficiencia de nutrientes para el desarrollo de estas.

2.4.3 Flujo subsuperficial vertical (FSSV)

La aplicación del agua en humedales subsuperficiales de flujo vertical (FSSV) se realiza de manera uniforme sobre el lecho. Comúnmente son utilizados como sistemas secundarios, y se componen de dos etapas, una con dos celdas de flujo vertical seguido

por una celda de flujo horizontal, estas últimas etapas tienen la finalidad de lograr la depuración de los efluentes. La principal ventaja de este tipo de sistemas radica en restaurar las condiciones aerobias durante periodos secos (Rodríguez, 2003a). La eficiencia del proceso de depuración depende en gran medida de la aireación del sustrato; además este tipo de sistemas son susceptibles a la obstrucción, por lo cual es recomendable limitar la alimentación de carga orgánica a 25g DQO/m² por día, además de utilizar el sistema en forma rotatoria, de este modo se logra la oxigenación del lecho, así mismo se permite que el sistema tenga un tiempo de descanso, en el cual se le permite al lecho secarse (Ramírez-Carrillo, 2009).

Los sistemas de humedales de flujo vertical con recirculación y de operación intermitente, aun operando bajo altas cargas, realizan una mejor mezcla en el lecho del humedal, acelerando la difusión del oxígeno y el aumento depurativo del DQO y NO₃⁻, reduciendo así la superficie que se utiliza en este tipo de sistemas, favoreciendo sobre todo a los humedales construidos en regiones montañosas donde la disponibilidad de espacio es limitada (Foladori *et al.*, 2013).

2.4.4 Sistemas de humedales combinados o híbridos (HAC)

Es debido a la combinación de los tipos humedales artificiales que se brinda una mayor eficiencia en la depuración de aguas residuales, y son llamados " humedales artificiales híbridos" (Vymazal, 2009), que son la combinación de diferentes tipos de humedales usados en diferentes etapas del tratamiento. El sistema híbrido más común es la combinación de VF y HF, donde cada etapa proporciona diferentes condiciones oxido-reducción. La inclusión de humedales de flujo libre en un humedal híbrido se utiliza con gran frecuencia (Vymazal & Březinová, 2015).

Los humedales artificiales suelen presentar falta de oxígeno en sus lechos filtrantes, por lo tanto, la eficiencia del proceso de nitrificación es baja, por lo que, para eficientar la eliminación de nitrógeno suelen combinarse con humedales de flujo vertical que tienen mayor capacidad de transporte de oxígeno, ofreciendo mejores condiciones para que se lleve a cabo la nitrificación, aunque son deficientes para la desnitrificación (Vymazal,

2009). Otro tipo de combinación es la realizada por los sistemas de flujo superficial con los de flujo sub-superficial, dependiendo de los contaminantes será la combinación óptima de estos sistemas híbridos. Pero es Vymazal en 2009 hace la recopilación de la información a cerca de las distintas combinaciones de sistemas híbridos, así como los diferentes tipos de afluentes usados para cada sistema (cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Sistemas híbridos de humedales artificiales. Sinopsis del prototipo de humedal que corresponde al tipo de afluente (Vymazal, 2009).

Tipo de humedal	País	Tipo de aguas residuales
VF-HF	Reino Unido, EE.UU., Estonia, Francia, Irlanda,	Aguas residuales
HF-VF	Túnez. Dinamarca, Polonia,	
FL-HF	México. Grecia	
HF-FL	Canadá, Kenia.	
HF-VF-HF	Polonia	
VF-HF-FL-P	Estonia	
VF-HF-FL-P	Tailandia	
HF-VF-HF-FL	Italia	
VF-HF	Eslovenia	Lixiviados de rellenos sanitarios
HF-FL	Noruega, Canadá.	
FL-HF	EE.UU.	
VF-HF-P	Portugal	
HF-VF	Nepal	Hospital
VF-HF	Japón	Industria Lechera
	Francia	Industria Quesera
	Tailandia	Granja de cerdo
HF-FL	Italia	Lagar
VF-HF-FL-P	Italia	
FL-HF	Taiwán	Acuicultura pescado
	Taiwán	Acuicultura del camarón
	Taiwán	Río contaminado
	China	Industrial
	Uganda	Minería
VF-HF	Francia	Lixiviados de composta
	Polonia	Rastro

VF = flujo vertical, HF = flujo horizontal, FL = superficie de agua libre o P = estanque.

2.5 FACTORES QUE CONDICIONAN EL ESTABLECIMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES.

Algunas ventajas que proporcionan los humedales artificiales son: flexibilidad en cuanto a la localización del sitio, optimización en el tamaño según la carga contaminante, y facilidad para tratar una mayor cantidad de aguas residuales (Rodríguez, 2003a).

Para realizar la adecuada selección del sitio para la instalación de un humedal artificial, es necesario considerar los siguientes factores:

- Dimensiones del humedal.
- Topografía.
- Características del suelo.
- Inundabilidad del terreno.

2.5.1 Dimensiones del humedal

Para el cálculo de las dimensiones del humedal, primero se determinan las condiciones existentes como DBO, SST del afluente, temperatura promedio de las aguas residuales en invierno, promedio del flujo diario del afluente; además de contar con la calidad que se desea obtener del efluente (DBO y SST).

En México se toman como referencia para el diseño de humedales normas oficiales

NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos y NOM-001-ECOL-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

En la profundidad del lecho filtrante se sugiere un máximo de 0.62 m, y para seleccionar el valor de la porosidad del sustrato la EPA (1993) sugiere un valor de porosidad de 0.35 con el uso de vegetación y 0.45 sin el uso de vegetación). La proporción largo-ancho debe medirse con base en el área calculada para alcanzar la reducción del DBO, por lo general se sugiere una proporción de largo-ancho de 2:1. Después calcula el área de la superficie a partir de las ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$As = (L)(W) = \frac{Q \left[\ln \left(\frac{Co}{Ce} \right) \right]}{Ktdn} \quad (2.1)$$

$$Kt = K_{20}(\theta)^{T-29} \quad (2.2)$$

Donde

As = Área de superficie del humedal (ft²) [m²]

L = Longitud (ft) [m]

W = Ancho (ft) [m]

Q = Gasto (ft³/día) [m³/día]

Co = DBO afluente (ml/l)

Ce = DBO efluente (ml/l)

Kt = Proporción de la constante de temperatura de las aguas residuales T °C

K₂₀ = Proporción de la constante de temperatura de las aguas residuales T = 20 °C

d = Profundidad promedio del agua en el filtro (% como decimal)

n = Porosidad promedio del agua en el filtro (ft) [m]

T=4.5 °C

Θ=1.6

K₂₀=1.104

Después se obtiene el largo-ancho (ecuación 2.3) del humedal, para igualarse con la ecuación 1:

$$LxW = \frac{Q \left[\ln \left(\frac{Co}{Ce} \right) \right]}{Ktdn} \quad (2.3)$$

A través de la ecuación de Darcy (ecuación 2.4) se determina la capacidad del diseño para conducir el flujo a través del humedal.

$$Q = K_s AS \quad (2.4)$$

Donde:

K_s = Conductividad hidráulica

S = Gradiente hidráulico

A continuación, se realiza el cálculo del tiempo de retención a partir de la ecuación 2.5 (EPA, 1993).

$$\text{tiempo de retención} = (\text{Volumen} \times n) \div (\text{flujo}) \quad (2.5)$$

A un mayor tiempo de retención, mayor será el porcentaje de remoción de contaminantes. (Ramírez-Carrillo *et al.*, 2009). La porosidad y la conductividad hidráulica tienen una influencia importante sobre el tiempo de residencia y la cantidad de agua a tratar. En los humedales artificiales, es mediante las ecuaciones de Darcy que se logra determinar la conductividad hidráulica óptima en estos sistemas. Por lo general, la mayor conductividad hidráulica del sustrato se alcanza con tezontle.

Con frecuencia se usan como sustrato, la grava y la escoria volcánica, para la rehabilitación de ríos contaminados. Con el uso de escoria como sustrato, se logra una mayor remoción de fósforo total (TP), y la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO). Sin embargo, la adsorción del TP (fósforo total) por escoria volcánica se ve limitada porque la escoria se satura rápidamente durante el período de seguimiento. (Ge *et al.*, 2015)

Es mediante la reducción de la conductividad hidráulica que sabemos que la porosidad disminuye, lo cual provoca un deterioro en el proceso depurativo del agua. Para obtener

un buen grado de tratamiento del agua residual será necesario reducir el canal de alimentación, recuperar la porosidad y mantener la misma densidad de vegetación.

2.5.2 Topografía y características del suelo

En cuanto a la topografía, se busca que sea llana con una pendiente ligera del 1%, ya que, a mayor pendiente, tendrá que realizarse una mayor excavación, lo cual incrementa los costos. Por otro lado, si el humedal se construirá en canales, y lo recomendable son suelos que tengan permeabilidad baja, de lo contrario se recomienda la impermeabilización del suelo para los sistemas de flujo superficial, los cuales se usan más para el tratamiento de ríos y corrientes de agua. En todos los casos, la compactación de las arcillas suele ser un método suficiente para preparar el área de canales o zanjas.

2.5.3 Inundabilidad del terreno

Es recomendable que la instalación de los humedales artificiales se realice en terrenos fácilmente inundables o instalarse en lugares donde llegue fácilmente el efluente por gravedad (Seoáñez, 1999).

La recirculación en sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial utilizados para el tratamiento de las aguas residuales domésticas o industriales, favorece el proceso de nitrificación y la eliminación de materia orgánica (Prost-Boucle & Molle, 2012)

Los humedales artificiales de recirculación de flujo vertical (FSSV) se desarrollan principalmente para casas habitación, donde las aguas residuales escurren a través del lecho a un depósito y luego se recirculan de nuevo a la parte superior del humedal, con el fin de prolongar el tiempo de contacto del agua en el sistema, mejorando así la difusión de oxígeno durante el goteo de las aguas residuales a través del humedal. En este sentido, también se utiliza la aireación artificial, empleada para mejorar los rendimientos de depuración en sistemas que sufren de oxígeno disuelto limitado. En humedales de flujo vertical la aplicación del sistema de recirculación casi no se usa, debido a la aireación producto del sistema de llenado y drenaje; en estos sistemas, una

permeabilidad natural y espontánea de aire está impulsada por la secuencia de llenado y vaciado.

Otro tipo de aireación utilizada es la aireación intermitente, la cual no sólo mejora el proceso de nitrificación, sino también la eliminación de nitrógeno total, debido a la alternancia de fases aerobias y anaerobias, además de la formación de zonas microaeróbica / anaeróbicas. En este sentido, si el tiempo de contacto entre las aguas residuales y la biomasa se incrementa, favorece los procesos de biodegradación en comparación con el flujo descendente P-FSSV. Además, la eliminación de DQO mejora debido a un mayor suministro de oxígeno que eleva la oxidación bioquímica de los residuos (Foladori *et al.*, 2013).

2.6 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES.

Los humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal (FSSH) son ejemplos del uso de la tecnología apropiada para el saneamiento de las pequeñas comunidades. El problema más común de FSSH es la obstrucción de la porosidad del sustrato. Los humedales artificiales de flujo horizontal se construyen para trabajar bajo estrictas precisiones de calidad de los efluentes que se asocian con el rendimiento hidráulico. Sin embargo, algunos humedales artificiales no son diseñados correctamente en términos de rendimiento hidráulico y muestran un cierto grado de encharcamiento cerca de la entrada, lo que indica que existe obstrucción del medio granular. Pero la obstrucción no sólo es causada por el diseño inapropiado, ya que el análisis de operación y mantenimiento como problema operativo de FSSH también causa obstrucción. Los mecanismos exactos y las consecuencias de la obstrucción en FSSH no están claros (Turón *et al.*, 2009)

El problema de obstrucción parcial o total de la matriz del suelo se produce con la acumulación de sólidos finos en los poros del sustrato, además de producir disminución en el suministro de oxígeno, favoreciendo la interrupción del flujo y, en consecuencia, la disminución de la conductividad hidráulica y el volumen eficaz que promueve la presencia de agua sobre el sustrato. Además de reducir la eficiencia en la eliminación de

contaminantes y, por consiguiente, tiene un impacto negativo en la comunicación del sistema de recepción, por la obstrucción progresiva que promueve la oclusión de los espacios intersticiales. Así mismo la formación de encharcamientos sobre la superficie del humedal, reduce potencialmente la eficiencia del FSS en términos de eliminación de contaminantes. En consecuencia, una alta carga de contaminantes que se derrama sobre el área de recepción aumenta el riesgo de eutrofización, anaerobiosis y turbidez, que favorecen la obstrucción. El origen del problema de la obstrucción se puede encontrar dentro de las características del afluente, un diseño inadecuado, la falta de mantenimiento, así como el proceso de purificación del propio humedal. Los depósitos sólidos orgánicos en la superficie de humedales construidos, o en los poros de la matriz, proceden tanto de los restos orgánicos de la vegetación del humedal, de la zona de los alrededores, o pueden proceder de un influente con una sobrecarga orgánica. La acumulación de sólidos en suspensión en el interior de los poros es una posible causa de la obstrucción de la matriz. Si los poros de la matriz son demasiado finos, se bloquean rápidamente por la acumulación de sólidos y biomasa en suspensión. La heterogeneidad del sustrato (e.g. diferentes diámetros) o el mismo lecho filtrante, puede conducir a patrones de dispersión flujo o no uniformes, causando variaciones en el tiempo de retención hidráulica, una heterogénea distribución del agua dentro del lecho de grava ocasionando su obstrucción y, por lo tanto, la mala eficiencia del tratamiento y de la distribución del agua dentro del lecho de grava ocasionando su obstrucción. Por otro lado, el crecimiento de microorganismos, la precipitación química y la deposición en los poros de la matriz, además de la interacción entre contaminantes, y el crecimiento de los rizomas favorecen la obstrucción de los poros. Esto afecta a la física de calidad hidráulica de los suelos. Por un lado, los rizomas reducen el tamaño de los poros y la capacidad hidráulica de la matriz, pero, por otro lado, el crecimiento de la raíz y la degradación microbiana de las raíces muertas causa la formación de nuevos poros del suelo.

Como medida de mantenimiento, para evitar la obstrucción de la porosidad, se deben eliminar los restos vegetales acumulados en la superficie del humedal, además de regular el nivel de agua y el control de inundaciones. Una medida efectiva es mediante el uso de un pre tratamiento de modo que el influente que llegue al humedal no tenga una alta carga de material orgánico o sólidos en suspensión. La dosificación del agua

debe tener un sistema de alimentación por etapas, seguido de una fase de drenaje. En este sentido, la recirculación se aplica con la finalidad de reducir la carga orgánica. Cuando la matriz del suelo no cumple con las especificaciones debe sustituirse, o cuando el grado de bloqueo del sustrato es alta. Se recomienda la adición de grava de tamaño mediano o grueso para las áreas donde se produce la obstrucción (principalmente en la zona de entrada para facilitar la distribución de agua a través de la matriz).

La limpieza de las tuberías de distribución de agua

Es necesario extraer los sólidos acumulados en los sistemas de distribución de agua para mantenerlo limpio, se recomiendan los siguientes pasos: (1) desbloquear los orificios del tubo tan pronto como se observen bloqueos o la interrupción total o parcial del flujo y (2) limpiar el interior del tubo, por lo general con un chorro de agua a presión para eliminar los materiales que puedan haberse acumulado en su interior. La acumulación de sólidos retirados de los tubos o material de desecho puede atraer roedores. La limpieza de los canales de distribución de agua consiste en la eliminación de los sólidos acumulados en ellos. Esta medida se puede realizar manualmente con rastrillos o palas, etc. La obstrucción puede ser considerada como el principal problema de un humedal: (1) es un problema propio de esta tecnología; (2) tiene un impacto negativo del medio ambiente, por la reducción de la eficiencia de remoción (siendo estos contaminantes derramados en los medios de recepción); (3) cuando el grado de obstrucción induce encharcamiento, hay impactos sociales importantes, tales como el aumento del riesgo de malos olores y el posible contacto con las aguas residuales debido a que propagan enfermedades y favorece la presencia de mosquitos y (4) la solución del problema de obstrucción es muy caro, debido a que se puede requerir (i) la mejora de las unidades de tratamiento (es decir, la operación y mantenimiento del tratamiento primario o rastrillar la superficie), (ii) la instalación de un nuevo tratamiento primario, una recirculación, un sistema de dosificación, etc., y (iii) en situaciones extremas de obstrucción, la sustitución de la matriz.

Diferentes causas de obstrucción pueden originar el mismo problema, las acciones correctivas universales por lo general no funcionan. Por el contrario, se logra una mejor operación y mantenimiento de humedales a través de estrategias correctivas que se

relacionan con cada causa, y a veces se integran diversas acciones complementarias (Turon *et al*, 2009).

Los sustratos deben tener una alta capacidad de adsorción, estar disponibles y ser económicos, características necesarias para la eliminación de contaminantes en humedales artificiales (HA).

2.7 COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Los costos de construcción de humedales son determinados por el costo acumulado de la tierra, movimiento de tierra, siembra, el diseño, monitoreo y mantenimiento. Los humedales artificiales de flujo libre en los Estados Unidos suelen costar entre \$ 10.000 y \$ 50.000 (US) por hectárea, dependiendo del tamaño y complejidad del sistema. Los costos de operación y mantenimiento dependen de la extensión de recolección de datos de monitoreo, el control de la planta, la penetración a la actividad animal (control de animales, reparación de la construcción del humedal), y gestión del agua (Environmental Service, 2000).

Con base en la escasez de agua en el futuro se contemplan dos soluciones: sin embargo, estas soluciones tienen obstáculos técnicos, legales y políticos significativos. Los humedales artificiales se reconocen como una eco tecnología robusta y económica capaz de responder a estos desafíos.

En la actualidad en los HA también se cultivan flores ornamentales como la *Canna flaccida*, *Zantedeschia aethiopica*, *Canna indica*, *Agapanthus africanus* y *Watsonia borbónica*, aun cuando la composición de las aguas residuales puede ser variada, la eficiencia de eliminación de DBO y DQO es del 90 % independiente de las condiciones de carga, además reducen PO_4^{3-} en un 92 %, NH_4^+ en un 84 % y bacterias Coliformes totales en un 99%. El policultivo ornamental proporciona un sistema de estética agradable con apariencia diferente a lo largo del año, además de aprovechar el corte de la vegetación de la cual se puede obtener un beneficio económico, demostrando que los sistemas de HA que incluyen plantas ornamentales, además de la función de tratamiento de agua, poseen varios beneficios adicionales, incluyendo la estética y la mejora de la biodiversidad (Calheiros *et al.*, 2015).

2.8 CONCLUSIONES

Los humedales artificiales son la mejor práctica de gestión para la mitigación de contaminantes (plaguicidas, fuentes no puntuales escorrentía agrícola y drenaje] en muchos países, sin embargo, faltan estudios comparativos sobre la eficiencia depurativa tanto de contaminantes como de humedales artificiales (Vymazal & Březinová, 2015).

Estos sistemas funcionan como un ecosistema eficiente, con la capacidad para reciclar la materia orgánica e idónea para atenuar o mitigar la contaminación química. Sin embargo, los efectos eco-toxicológicos causados por la presencia de contaminantes en los sedimentos es un tema poco estudiado (Lai *et al.*, 20013).

La remoción del fósforo también es deficiente cuando se utiliza grava, por lo cual es primordial utilizar un sustrato más poroso para aumentar la capacidad de retención de dicho mineral y tener mayor actividad para la degradación de materia orgánica presente en aguas residuales (Romero-Aguilar *et al.*, 2009).

2.9 REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- 1.- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). (1993). Guía de diseño y construcción de un humedal construido con flujo superficial. Dallas, Texas. U.S. EPA – Región 6.
2. – Calheiros, C., Rangel, A., y Castro, P. (2007). Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. *Water Research. Review article*, 41(8), 1790–1798.
3. – Calheiros, C., Bessa, V., Mesquita, R., Brix, H., Rangel, A., y Castro, P. (2015). Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. *Ecological Engineering*, 79(6), 1-7.
- 4.- Cloter, A., Mazari, H., y De Anda, S. (2006). Atlas de la cuenca Lerma Chapala construyendo una visión conjunta. México. Secretaria de medio ambiente y recursos naturales.
- 5.- Congreso de la unión. (2011). Ley de aguas nacionales. Marco legal. Estados Unidos Mexicanos. Título primero, capítulo único, fracción XXX: federal.
- 6.- Environmental Service. 2000. Guidelines for the approval and design of natural and constructed treatment wetlands for water quality improvement. [en línea]. Alberta, Canada. Disponible en:<http://www.gov.ad.ca/env/> Consultado el (197/03/2014)
7. –Francia, D., Cabrera, M., y Flores, A. (2012). Determinación de la conductividad hidráulica en pantanos artificiales experimentales de flujo superficial. Universidad de Guanajuato, Instituto de Ciencias Agrícolas. Sin publicar.
8. –Foladori, P., Ruaben, J., y Ortigara, A. (2013). Recirculation or artificial aeration in vertical flow constructed wetlands: A comparative study for treating high load wastewater. *Bioresource Technology*, 49, 398–405.

9. – Ge, Y., Wang, X., Zheng, Y., Dzakpasu, M., Zhao, Y., y Xiong, J. (2015). Functions of slags and gravels as substrates in large-scale demonstration constructed wetland systems for polluted river water treatment [en línea]. Alberta, Canada. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-015-4573-9>. Environmental Science and Pollution Research. 10p.
10. - Lai, D., Lam, K., Regueiro, J., Matamoros, V., Thibaut, R., Porte, C., y Bayona, J. (2013). Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving stormwater runoff. Ecological Engineering, 91(8), 1165–1175.
- 11.- Llagas, W., y Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Revista del instituto de investigaciones FIGMMG, 15(17), 85-96.
- 12.- Miranda, M., y Luna-Pabello, V. (2001). Estado del arte y perspectivas de aplicación de los humedales artificiales de flujo horizontal en México. Serie tratamiento Biológica de Aguas Residuales. México. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química.
13. - Norma Oficial Mexicana. NOM-001-ECOL-1996, Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. Junio 24 de 1996. México.
14. - Norma Oficial Mexicana. NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminación para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación. Septiembre 21 de 1998. México.
15. - Prost-Boucle, S., Molle, P. (2012). Recirculation on a single stage of vertical flow constructed wetland: Treatment limits and operation modes. Ecological Engineering. (43), 81–84.
16. – Ramírez- Carrillo, H., Luna-Pabello, V., y Arredondo-Figueroa, J. (2009). Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la agricultura. Revista mexicana de ingeniería química, 8(1), 93-99.

17. – Reddy, S., McDonald R., Maas, A., Rogers, A., Girvetz, E., North, J., Molnar, J., Finley, T., Leathersg, G., y DiMuro, J. (2015). Finding solutions to water scarcity: Incorporating ecosystem service values into business planning at The Dow Chemical Company's Freeport. TX facility Ecosystem Services, 12, 94–107.
18. - Reddy, K., y D'Angelo, E. (1997). Biogeoquimical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands. *Ciencia y Tecnología del Agua*. 35(5), 1-10.
- 19.- Rodríguez, C. (2003). Humedales construidos. Estado del arte (I). México. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 24(3).
- 20.- Rodríguez, C. (2003a). Humedales construidos. Estado del arte (II). México. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 24(3).
- 21.- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., y Sánchez-Salinas, E. Ortiz-Hernández, M. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de carga orgánica. *Revista internacional. Contaminación ambiental*, 25(3), 157-167.
- 22.- Seoáñez, M. (1999). Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales. *Fundamentos científicos. Tecnologías de diseño*. Madrid. Mundi-prensa.
23. - Turon, C., Comas, J., y Poch, M. (2009). Constructed wetland clogging: A proposal for the integration and reuse of existing knowledge. *Ecological Engineering*. 35(12). 1710–1718.
24. - Vymazal, J., y Brix, H., (1998). *Constructed Wetlands for waste treatment in Europe*. Ed. Backhuys publishers, Leiden, 1-15.
25. - Vymazal, J. (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, 35(1), 1-17.
26. –Vymazal, J., y Březinová, T. (2015). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater *Environment International*, 75(2), 11–20.

27. - Yang, Y., Sheng, Q., Zhang, L., Kang, H.Q., y Liu, Y. (2015). Desalination of saline farmland drainage water through wetland plants. *Agricultural Water Management*, 156(7), 19-29.

III. DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES.

3.1 INTRODUCCIÓN

Los humedales artificiales son sistemas que presentan grandes ventajas técnicas, económicas y operativas en comparación con las plantas de tratamiento convencionales (Luna-Pabello, Durán et al. 1997). Son considerados entre las mejores prácticas de gestión ambiental, ya que pueden eliminar el nitrógeno, el fósforo y los sólidos suspendidos de la escorrentía forestal (Postila, et al. 2015). El uso de humedales artificiales surge de la necesidad de replicar los beneficios eco-sistémicos que nos brindan los humedales naturales, tales como la depuración de aguas residuales, por lo cual se incluyen entre los llamados sistemas naturales de tratamiento (Rodríguez, 2003).

Los humedales artificiales proporcionan un medio para el crecimiento de los microorganismos encargados de la filtración y adsorción de los contaminantes, además de inhibir el crecimiento de algas. El tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales se ha utilizado para tratar diversos afluentes de aguas residuales. Para realizar un diseño adecuado de un humedal artificial es crucial conocer, el origen, calidad y volumen del agua a tratar (Luna-Pabello, 2014).

Existen un sinnúmero de metodologías para el diseño de humedales artificiales como las propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), Alberta Environment en Canadá, el Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA, Bolivia) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Los modelos a escala de humedales artificiales han sido diseñados y probados en laboratorio para estudiar su comportamiento (Hua et al, 2009). Este estudio se llevó a cabo para encontrar el diseño apropiado de un humedal artificial el cual servirá para la depuración de las aguas de la zona lacustre de Xochimilco, hábitat del ajolote (*Ambistoma Mexicanum*).

3.1.1 Diseño

3.1.1.1 Metodología de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)

La metodología propuesta por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) (1993), no incluye sistemas de flujo libre, hace referencia únicamente a Humedales de flujo superficial y subsuperficial utilizando para su diseño la Ecuación de Darcy. Realiza un análisis completo de la hidráulica de los humedales artificiales, su construcción, la siembra de vegetación, y su mantenimiento. El propósito del diseño de humedales es la reducción de Sólidos suspendidos totales (TSS) y de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) principalmente; sin embargo, no contempla la eliminación del nitrógeno amoniacal, los nitratos, ni tampoco la reducción de fósforo y de coliformes fecales.

3.1.1.2 Metodología presentada por Alberta Environment en Canada

La metodología propuesta por Alberta Environment (Alberta Environment 2000) considera, la carga hidráulica y de nutrientes para el diseño del humedal, y proporciona la información necesaria para el tratamiento de las aguas residuales. Esta metodología surge de la necesidad de evaluar los proyectos que se presenten para su aprobación y proporcionar una guía preliminar para el proceso de diseño. Está propuesta para la reducción de la Demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO5), Sólidos suspendidos totales (SST), Nitrógeno total (N_{total}), Fosforo total (P_{total}), Amonio ($NH_{4\pm}$ -N) y Nitrógeno orgánico (Norg) principalmente. Está diseñada para humedales de flujo superficial y subsuperficial sin contemplar tampoco sistemas de flujo libre. Realiza un análisis para la evaluación del sitio, además del diseño de humedales. Para el diseño hidráulico utiliza las ecuaciones propuestas por Kadlec y Knight en 1993.

3.1.1.3 Metodología presentada por el Centro del Agua en Bolivia

La metodología propuesta por el Centro del agua (Delgadillo, Camacho et al. 2010), hace referencia a todo tipo de humedales y al mismo tiempo, proporciona información técnica para el diseño y la construcción, abarcando tres aspectos importantes: Descripción técnica de los humedales, criterios de diseño hidráulico basados en la ecuación de Darcy, monitoreo e información para la clasificación de aguas residuales.

3.1.1.4 Metodología presentada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

La metodología presentada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, "s.a.") aduce a una revisión detallada de los humedales artificiales. Más que una metodología es un estado del arte, el cual sirve como guía al momento de diseñar un humedal. Debido a que realiza una minuciosa revisión sobre dos metodologías de diseño, la propuesta por la EPA y la de Kedlec y Knight, en la que se basa la metodología canadiense, señalando que la variabilidad en los diseños es el resultado del uso de constantes cambios, obtenidos para cada diseño.

Un aporte importante de este manual es que considera la geometría de los humedales y su relación con la remoción de contaminantes, además de proporcionar información para la aplicación de un tratamiento primario, con el uso de rejillas y desarenadores, evitando la colmatación, obstrucción y desgaste de los humedales, sus tuberías y las estructuras de entrada y salida del flujo al humedal.

3.2 CONDICIONES HIDRAULICAS

El diseño hidráulico de un humedal es crítico para el rendimiento, eficiencia de depuración y el buen funcionamiento del humedal. Las metodologías estudiadas asumen un flujo en condiciones uniformes y de tipo pistón. Para acercarse al modelo ideal es importante realizar un diseño hidráulico donde el flujo dentro del humedal rompa las

condiciones de resistencia que proporcionan el sustrato y los sólidos acumulados, además del sistema radicular. Asimismo, la energía necesaria para romper la resistencia está dada por la pérdida de carga entre el ingreso y la salida del humedal, por lo cual la pendiente debe ser pequeña (0.1 %).

Tanto la metodología boliviana como la de la EPA consideran la importancia de la profundidad aparente (h) del agua de los humedales, y la metodología canadiense considera a los humedales como reactores químicos con contaminantes conservativos. Las metodologías de la EPA y la canadiense hacen referencia solo a humedales de flujo superficial o subsuperficial y no consideran a los humedales de flujo libre, y es la metodología de Bolivia la que estudia todo tipo de humedales artificiales. Las metodologías canadiense y boliviana toman en cuenta la porosidad del medio de empaque, mientras que la EPA toma en cuenta la porosidad del sustrato con y sin vegetación.

La metodología canadiense ve a los humedales artificiales como reactores químicos (Amábilis, 2010) en condiciones de estado estacionario y flujo de pistón ideal, lo que permite predecir un perfil exponencial de las concentraciones de los contaminantes no conservativos. Al aplicar los parámetros encontrados en la zona lacustre de Xochimilco a esta metodología para el cálculo del área, el resultado muestra un comportamiento asintótico (tiende a infinito). Existe cierta dependencia entre la concentración del contaminante en el efluente y el tiempo de residencia del agua en el humedal, ya que, a mayor tiempo de concentración, mayor será la remoción que se logre, es decir menor será la concentración de contaminantes en el efluente. Aunque el tiempo de concentración tienda a infinito, la concentración de salida del humedal nunca será cero. A este concepto se le conoce como concentración residual o de fondo lo que da lugar al modelo establecido por Kadleck y Knight en 1996 (Amábilis, 2010). Así mismo la metodología canadiense al igual que la de boliviana realizan un análisis sobre los factores condicionantes en la elección del sitio.

El cuadro 3.1 se elaboró con base en las metodologías antes mencionadas en el se muestra un resumen comparativo de las ecuaciones de diseño correspondientes a las metodologías estudiadas, como se puede observar para el diseño de humedales se consideran los siguientes criterios:

Cuadro. 3.1. Diseño hidráulico de las metodologías propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), Alberta Environment en Canadá y el Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA, Bolivia).

PARAMETRO	METODOLOGÍA		
	EPA	ALBERTA ENVIRONMENT	CENTRO DEL AGUA
Determinación de parametros de diseño (Ce)	DBO, TSS	TSS, DBO ₅ , TP, TN, NH4 N, ORG-N, FC	DBO ₅
Determinación de la calidad del efluente (Co)	DBO, TSS	TSS, DBO ₅ , TP, TN, NH4 N, ORG-N, FC	DBO ₅
Profundidad del lecho	0.62 (m)	N/A	0.3 - 1 (m)
Diametro del sustrato	(granito) 50.8 - 127 (mm)	N/A	(grava, menor a) 30 (mm)
Porosidad con plantas (n)	0.35	N/A	
Porosidad sin plantas (n)	0.45	N/A	
Proporción inicial largo-ancho		02:01	
determinación de la pendiente	S=(Ks)(0.1)		S=(Ks)(0.1)
Límite de TSS (mg/l)		C*=7.8+0.063Ce	
Límite de DBO (mg/l)		C*=3.5+0.053Ce	
Determinación del área superficial	As=(L)(W)= Q[ln(Co/Ce)]+K _t hn	A= (0.0365*Q)/K (ln(Ce-C [*] /Co-C [*]))	As= (Q*ln(Co/Ce))/(K _t hn)
Determinación del ancho y la longitud	(L)(W)= Q[ln(Co/Ce)]+K _t hn		Ac=Q/(k _s *S), W=Ac/h, L=As/W
Determinación del flujo hidraulico	Q=K _s AS (ec. Darcy)		THA=Carga hidraulica (mm/día)/ frecuencia (dosis/día)
Determinación del tiempo de retención	Tr = (V)(n)/Flujo		
Cálculo de la población equivalente	N/A		Pe (hab)=(DBO ₅ (MG/L)*Q(M3/D))/(60grDBO ₅ /día*hab)
Cálculo del área maxima de concentración	N/A	Co=C*+(Ce-C*)exp[- (kA)/0.0365Q]	N/A
Determinaciones recomendadas para evaluar el humedal			DBO ₅ , DQO, CE, CL-, NHO ₃ -, NH ₄ +, NO ₂ -, ORG-N, pH, TSS, SALINIDAD, METALES

Una vez revisadas las metodologías, se eligió la metodología de la EPA y con la intención de verificar su funcionalidad se comprobó por medio de una prueba de escritorio considerando los datos de la zona lacustre de Xochimilco; cabe señalar que Xochimilco, tiene la categoría de Área natural protegida, además es un sitio, RAMSAR, (Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas) por lo que la elaboración de construcciones tiene diversas limitantes. Los humedales por construir se localizarán en la zona de ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco donde, entre los usos que se da al efluente en el área se encuentran el agrícola, además de ser hábitat de una especie endémica de la región el ajolote (*Ambistoma Mexicanum*) por lo que la eficiencia de los modelos se probara con base en los requerimientos de los ajolotes. En la zona no se cuenta con movimiento del agua, lo

que descarta un modelo de flujo libre, además, el espacio donde se construirán los humedales es restringido.

3.3 MÉTODOS Y MATERIALES

La geometría dentro de los humedales artificiales tiene influencia directa sobre el comportamiento hidráulico, afectando la eficiencia de estos. Existen un sinnúmero de tipos y formas de humedales artificiales, los cuales pueden aumentar o disminuir los tiempos de residencia. La geometría favorece la eficiente en la reducción de los flujos preferenciales. Los humedales rectangulares, con una mayor relación largo-ancho suelen ser más eficientes y, para evitar el aumento en el área de los humedales, se realiza la colocación de mamparas intercaladas, las cuales tienen la función de aumentar el caudal y el tiempo de residencia del agua dentro del humedal para efficientar el proceso de tratamiento (SEMARNAT, “s.a.”).

Por lo anterior, se propone la construcción de dos modelos con flujo controlado: el primero consta de un solo módulo dividido por mamparas (ver figura 3.1) y el segundo consta de cuatro módulos con un arreglo en paralelo (ver figura 3.2).

Los datos de diseño para los modelos a escala de humedales artificiales se obtuvieron a partir de la aplicación de la metodología propuesta por la EPA y se muestran en el cuadro 3.2.

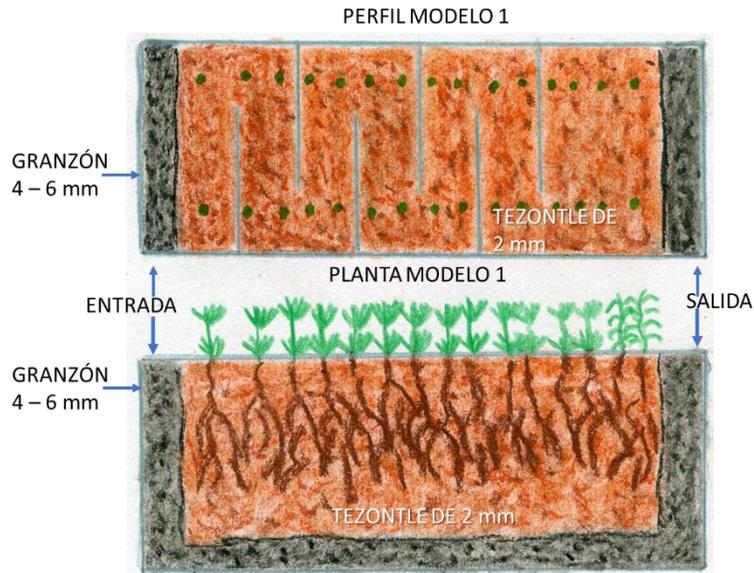


Figura 3.1. Diseño del modelo 1, Humedal artificial de flujo superficial (HAFS).

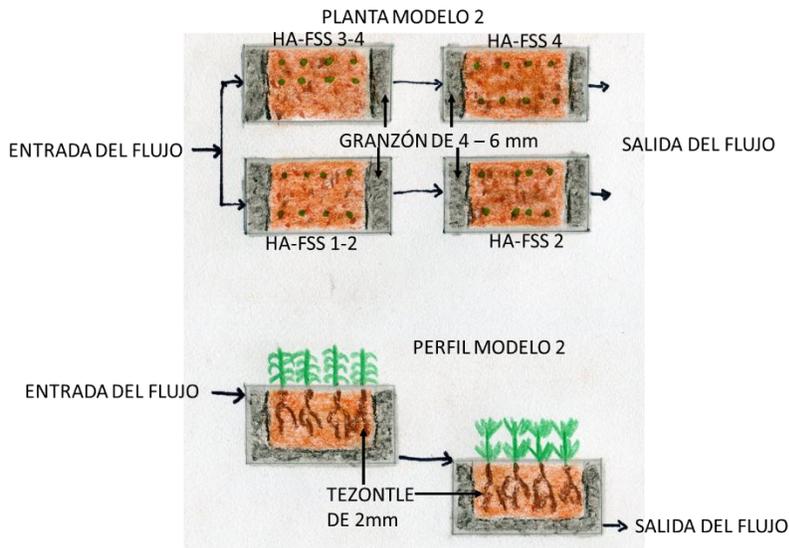


Figura 3.2. Diseño del modelo 2, Humedal artificial de flujo sub superficial (HAFSS).

La construcción de ambos modelos se efectuó con la metodología propuesta por la EPA (1993), el material utilizado para el modelo uno (HA-FS) fue: 3 placas de 15 X 60 cm, 2 placas de 8 X 15 cm, 6 placas de 5 X 15 cm, 2 aspersor de caudal ajustable por goteo, 1 bomba de recirculación de agua, 50 cm de manguera de 1 cm de diámetro, 1 llave de paso de 1 pulgada, Granzón de 4 – 6 mm, Tezontle de 2 mm. Mientras que para el modelo dos (HA-FSS) fue: 12 placas de 8 X 15 cm, 8 placas de 8 X 8 cm, 8 aspersor de caudal ajustable por goteo, 1 bomba de recirculación de agua, 100 cm de manguera de 1 cm de diámetro, 4 llave de paso de 1 pulgada, Granzón de 4 – 6 mm, Tezontle de 2 mm y Tezontle de 4 – 6 mm.

Cuadro 3.2. Datos de diseño depara los modelos a escala de humedales artificiales.

Parámetro	Modelo	Modelo 2				Unidades
	1	HAFSS				
	HAFS	Modulo HA-FSS 1-2	Modulo HA- FSS 2	Modulo HA- FSS 3- 4	Modulo HA- FSS 4	
Gasto (Q)	0.0072	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	m ³ /día
DBO5 afluente (Co)	103.3	103.3	103.3	103.3	103.3	mg/l
DBO5 efluente (Ce)	20	20	20	20	20	mg/l
TSS afluente (i)	653.66	653.66	653.66	653.66	653.66	mg/l
TSS efluente (f)	500	500	500	500	500	mg/l
Profundidad del humedal (d)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	m
KT a 20 °C	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Diámetro del sustrato rocoso	4	4	4	6 a 8	6 a 8	mm
Porosidad (n) con plantas	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	%
Porosidad (n) sin plantas	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	%
Ancho (W)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	m
Largo (L)	0.60	0.15	0.15	0.15	0.15	m
T de retención	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	hr
Q _{bomba}	150	150	150	150	150	l/hr

Una geometría rectangular presenta mayor eficiencia en la remoción de contaminantes, una manera de eficientar dicho proceso es el uso de mamparas, de esta forma se reduce

el ancho de los canales y se incrementa el caudal a tratar (SEMARNAT, “s.a.”). El modelo 1 (HA-FS 1) consta de cuatro celdas de 15 cm, unidas de forma lineal y con un largo total de 60 cm de largo por 8 de ancho y una altura de 15 cm, y cada celda con una mampara, mientras que el modelo dos (HA-FSS) consta de cuatro módulos cada uno con 8 cm de largo, 8 cm de ancho y una altura de 15 cm, con un arreglo en paralelo. Para suministrar el flujo de agua al humedal, en ambos modelos se utilizaron dos rociadores de caudal ajustable por goteo y una bomba de recirculación de agua para cada modelo, con el fin de alcanzar un tiempo de residencia de 42 min.

El sustrato recomendado para humedales artificiales debe tener suficiente permeabilidad para permitir el paso del agua a través de él; entre ellos se encuentran la arena, la grava, el tezontle, la grava de sílice, etc. El medio de soporte utilizado se relaciona directamente con cada componente de los humedales. Existen reportes que describen el efecto del tezontle en la remoción de nutrimentos, de sólidos disueltos y de DBO (Fenoglio, 2000).

Un humedal artificial puede funcionar normalmente, con una tasa de infiltración suministrada por goteo. Las partículas en suspensión fluyen en la capa profunda con el flujo de agua cuando los Sólidos Suspendidos (SS) pueden quedar atrapados dentro de los poros por las fuerzas de adsorción y de intercambio iónico (fuerzas de Van der Waals) (Hua et al, 2009).

3.4 RESULTADOS

3.4.1 Comparación en la eficiencia de remoción

Los humedales artificiales son sistemas que han sido diseñados y construidos para replicar los procesos de la vegetación, los suelos y los ensamblajes microbianos propios de los humedales naturales, que están asociados a los procesos de purificación de aguas residuales (Vymazal, 2007).

El primer ensayo de pruebas se realizó con la finalidad de comprobar los tiempos de residencia del caudal dentro del humedal, el tiempo de residencia de diseño es de 42 min. Se utilizó tezontle de 4 mm de diámetro, el volumen de agua utilizado en esta prueba

fue de 3.5 l, el volumen de salida del modelo fue de $V_{\text{salida}} = 26.2$ ml/hr, la duración total del experimento fue de 1.2 hr (tiempo de residencia).

Para el segundo ensayo solo cambio el diámetro del sustrato a 5 mm, con la finalidad de prolongar el tiempo de residencia del caudal. En este ensayo solo se alcanzó una altura del frente húmedo de 5 cm. El tiempo de duración fue de 17 min, el frente húmedo se estabilizó a una altura de 1 cm en un tiempo de 5 min, el V_{entrada} al modelo fue de 0.6 l y al minuto 17, la altura final fue de 2.5 cm.

En el tercer ensayo se utilizó una combinación de dos diámetros, en la parte inferior la altura del sustrato fue de 4 cm de sustrato de 5 mm, mientras que en la parte superior la altura fue de 8 cm de sustrato de 2 mm. El tiempo total de la prueba fue de 12 min, el volumen de agua dentro del modelo fue de 325 ml.

Con base en las pruebas realizadas en el primer experimento, se realizaron algunos ajustes al modelo HA-FS 1: se colocó tezontle entre 2 – 4 mm, se colocaron mamparas divisorias intermedias e intercaladas en el humedal HAFS, para eficientar el proceso depurativo, además de que se colocó vegetación con la finalidad de acercarnos al diseño propuesto para Xochimilco, incrementando el tiempo de residencia del agua dentro del humedal de 42 min a 1.2 hr.

Una vez realizado el primer ensayo de pruebas y con la finalidad de comparar la eficiencia de remoción de ambos sistemas, se colocaron 16 ejemplares de *Myriophyllum aquaticum* y 8 ejemplares de *Lepidium sativum* en ambos modelos (ver fig. 7 y 7a). El modelo 2 consta de cuatro módulos en los cuales se realiza una combinación de sustratos, en los módulos uno (HA-FSS 1-2) y dos (HA-FSS 2) se utiliza tezontle de 2 mm de diámetro con 2 cm de granzón al inicio, al final y en la parte inferior, esto con la finalidad de proporcionar una mejor distribución del flujo en el módulo. Además, el módulo HA_FSS 1-2 contiene vegetación de la especie *Lepidium sativum* y el módulo HA_FSS 2 dos contiene *Myriophyllum aquaticum*. Por otro lado, en los módulos tres (HA-FSS 3-4) y cuatro (HA-FSS 4) se utiliza tezontle de entre 4 -6 mm de diámetro con 2 cm de granzón al inicio, al final y en la parte inferior, esto con la finalidad de proporcionar una mejor distribución del flujo en el módulo. El módulo HA-FSS 3-4 contiene vegetación,

de la especie *Lepidium sativum* y el cuatro HA-FSS 4 contiene *Myriophyllum aquaticum*, de esta forma se puede estudiar mejor la eficiencia depurativa del modelo.

Los modelos terminados se muestran a continuación.

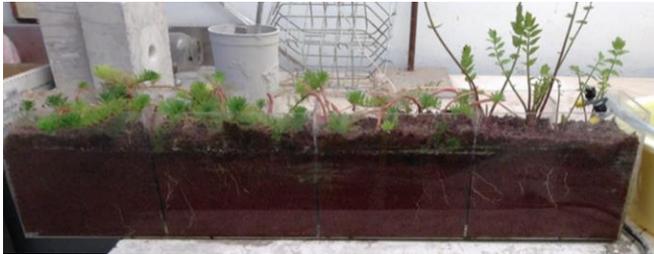


Figura 3.3. Humedal artificial de flujo superficial (HAFS).



Figura 3.3a. Humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS).

Con la finalidad de alcanzar una estabilidad en el modelo, se dejó reposando el humedal por el periodo de un mes. En la medida en que transcurre el tiempo de operación para ambos modelos, se desarrolla la biopelícula en las partículas del sustrato, dando lugar a la reducción del medio poroso, el inicio de la colmatación y, en consecuencia, la disminución de la velocidad.

Se realizaron determinaciones físico – químicas a cada uno en paralelo, realizando un análisis comparativo entre ambos modelos, bajo los criterios de diámetro de sustrato y tipo de vegetación.

Los parámetros realizados para cada una de las muestras tomadas en laboratorio fueron: alcalinidad, dureza, nutrientes (Amonio, Nitritos, Nitratos, Fosfatos y Silicatos), fosforo y nitrógeno total. La dureza y la alcalinidad se realizaron por titulación, mientras los

nutrientes y los totales se determinaron por medio de un auto analizador de flujo segmentado. El análisis de los parámetros físico – químicos en el laboratorio, se efectuó siguiendo los métodos del cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Metodologías propuestas. * con las modificaciones sugeridas por Kirkwood (1994) para su realización en un auto-analizador de flujo segmentado Skalar modelo San Plus.

PARÁMETRO	MÉTODO
Dureza general (GH) (Ca y Mg)	APHA, 1992
*Nitratos	Strickland y Parsons, 1972
*Nitritos (NO ₂ ⁻)	Strickland y Parsons, 1972
*Amonio	Solórzano, 1969
*Fosfatos	Strickland y Parsons, 1972
*Silicatos	Strickland y Parsons, 1972
Nitrógeno total	Valderrama, 1981
Fosforo total	Valderrama, 1981

Se efectuaron dos muestreos en paralelo uno en noviembre y otro en diciembre de 2015. Se tomaron en total 14 muestras de agua por duplicado del afluente y efluente de cada sistema a diferentes tiempos de retención de 1, 2 y 4 hrs, respectivamente. Para la determinación de nutrientes se filtraron las muestras con ayuda de un filtro Millipore de 0.22 micras con ayuda de un soporte de filtro swinnex para filtros de membrana. Las concentraciones de N y P en las muestras se determinaron de acuerdo con las técnicas establecidas para cada caso, en un auto-analizador de flujo segmentado Skalar modelo San Plus.

Durante el primer muestreo se realizó una comparación entre el modelo HA-FS 1 y cada uno de los módulos del modelo HA-FSS.

3.4.2 Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad que el agua posee para neutralizar ácidos contrarrestando sus efectos (Seoáñez, 1999); internacionalmente es aceptada una alcalinidad mínima de 20 mg CaCO₃ l⁻¹ para mantener la vida acuática; a valores menores las aguas se vuelven más sensibles a la contaminación. Niveles altos indican una mayor producción, la alcalinidad se clasifica de la siguiente forma (Kevern, 1989):

Clasificación	Alcalinidad
Baja	<75 mg/L
Media	75 – 150 mg/L
Alta	>150 mg/L

En ambos modelos la alcalinidad fue baja sin importar el diámetro del sustrato o el tipo de vegetación, el agua es apta para la sobrevivencia de los ajolotes (los resultados se muestran en el anexo 1a).

3.4.3 Dureza

Es una medida de la presencia de sales de los iones calcio y magnesio. La dureza es la responsable de la formación de incrustaciones en recipientes y tuberías (Secretaría de Economía, 2001). La dureza es consecuencia de la reacción de iones metálicos (Ca y Mg) divalentes con el jabón, formando precipitados o incrustaciones en el agua. Las aguas duras requieren más jabón para formar espuma depositando lodo e incrustaciones en los sedimentos (Seoanez, 1999). La dureza de las muestras en ambos modelos se consideran aguas muy duras. La dureza es un indicador de presencia de sales, una elevada concentración de sales provoca obstrucción, mientras que la falta de sales provoca corrosión, las aguas pueden clasificarse como:

<u>Clasificación</u>	<u>Dureza, mg CaCO₃ l⁻¹</u>
----------------------	---

Blandas	0 – 100
Moderadamente duras	101 – 200
Duras	200 – 300
Muy duras	> 300

Por otra parte, la dureza recomendada para la sobrevivencia de los ajolotes oscila entre 6 – 16 grados alemanes ($^{\circ}$ DH) o de 107.14 – 285.71 mg/L de CaCO_3 , por lo tanto, la clasificación correspondiente a los muestreos se encuentra en el Cuadro 7, la cual muestra los resultados de los modelos que contienen un sustrato de 2 mm de diámetro, podemos observar la presencia de aguas muy duras las cuales, normalmente precipitan a los carbonatos en los sistemas de tuberías a temperaturas altas (fenómeno conocido como sarro) (los resultados se muestran en el anexo 1b).

3.4.4 Amonio

La eliminación del amonio (NH_4^+) dentro del humedal es el resultado colectivo de la absorción y volatilización en las plantas. Debido a que la materia orgánica se elimina por el crecimiento y la respiración de los microorganismos. Por lo tanto, la nitrificación, las inmovilizaciones en las células microbianas y la adsorción en los humedales, están entre las principales vías de remoción del amoníaco en los humedales artificiales. (Sun et al, 2005).

El modelo HA-FS 1 presenta una remoción del 97.44 %, a diferencia del modelo dos en su combinación de Tezontle de 2 mm con vegetación *Lepidium sativum*, la mayor remoción se consiguió en el módulo HA-FSS 1-2 con una remoción del 97.65 %, a diferencia del HA-FSS 2 con *Myriophyllum aquaticum* que presento una remoción del 85.91 %.

En la combinación de Tezontle de 4-6 mm con vegetación *Lepidium sativum* la mayor remoción se consiguió en el módulo HA-FSS 3-4 con una remoción del 99.89 %, a diferencia del HA-FSS 4 con *Myriophyllum aquaticum* que presento una remoción del 61.72 %

3.4.5 Nitritos (NO_2^-)

En Tezontle de 2 mm sin importar el tipo de vegetación, no se consiguió remoción en ningún modulo, a diferencia del módulo HA-FSS 4 con la combinación de Tezontle de 4-6 mm y *Myriophyllum aquaticum* que presentó una remoción del 96.30 %, mientras que el módulo HA-FSS 3-4 que contiene la vegetación *Lepidium sativum* consiguió una remoción de solo el 20 %.

3.4.6 Nitratos (NO_3^-)

Exclusivamente el módulo HA-FSS 4 que presenta una combinación de Tezontle de 4-6 mm con *Myriophyllum aquaticum* presentó una remoción de 96.3 %.

3.4.7 Fosfatos (PO_4^{3-})

El modelo HA-FS 1 presenta una remoción del 68.6 %, a diferencia del modelo dos en su combinación de Tezontle de 4-6 mm con vegetación *Lepidium sativum* la mayor remoción se consiguió en el módulo HA-FSS 3-4 con una remoción del 88.9 %, a diferencia del HA-FSS 2 con Tezontle de 2 mm y vegetación *Myriophyllum aquaticum* que presento una remoción del 79.3 %.

3.4.8 Silicatos

El modelo HA-FS 1 presenta una remoción del 6.8 %, a diferencia del modelo dos en su combinación de Tezontle de 4-6 mm con vegetación *Myriophyllum aquaticum*, la mayor remoción se consiguió en el módulo HA-FSS 4 con una remoción del 80.6 %, a diferencia del HA-FSS que no presentó remoción en su combinación con Tezontle de 2 mm.

3.4.9 Fosforo Total

La eliminación del fósforo en todos los tipos de humedales construidos es baja (Vymazal et al 2007). Sin embargo, el modelo HA-FS 1 presenta una remoción del 86.8 %. En Tezontle de 4-6 mm la mayor remoción se consiguió en el módulo HA-FSS 3-4 con una remoción del 93.3 %. A diferencia del modelo dos en su combinación de Tezontle de 2 mm con vegetación *Lepidium sativum* la mayor remoción se consiguió en el módulo HA-FSS 1-2 con una remoción del 32.5 %.

3.4.10 Nitrógeno Total

La mejor remoción la presentó el modelo HA-FS 1 con un 85.4 %, a diferencia del modelo dos en su combinación de Tezontle de 2 mm con vegetación *Lepidium sativum* la mayor remoción se consiguió en el módulo HA-FSS 1-2 con una remoción del 31.1 %, a diferencia del HA-FSS 3-4 con *Myriophyllum aquaticum* que presentó una remoción del 48.8 %.

3.5 CONCLUSIONES

1.- Mediante las pruebas realizadas en este estudio fue posible determinar la eficiencia de los dos modelos. Se compara el modelo 1 (HA-FS) con los módulos HA-FSS 1-2 y HA-FSS 2 del segundo modelo cuales contienen tezontle de 2 mm. El modelo HA-FS solo fue eficiente para la remoción del nitrógeno total, mientras que el modelo HA-FSS fue superior en la remoción del amonio en su modulo HA-FSS 2.

2.- La comparación del modelo HA-FS 1, con el modelo 2, nos muestra mayor eficiencia en el modelo dos, para nitritos, fosfatos y fosforo total, el mejor fue HA-FSS 3-4; para nitratos y silicatos la mayor remoción se logró con el módulo HA-FSS 4. La mayor eficiencia depurativa se da en el módulo HA-FSS 3-4, con la combinación de tezontle de 4-6 mm y vegetación *Lepidium sativum*.

3.- Sin embargo, los procesos responsables de la eliminación difieren en magnitud entre los sistemas. Los modelos de una etapa, como el modelo HA-FS no pueden lograr una alta eliminación de nitrógeno total debido a su incapacidad para proporcionar condiciones tanto aerobias y anaerobias, al mismo tiempo (Vymazal, 2007), sin embargo, tienen un gran potencial para reducir tanto las concentraciones de nitrato de amoniac y, al mismo tiempo (Vymazal, 2011).

4.- Se demostró que la reducción del amonio en ambos modelos oscila de un 85 % a un 97 %, favoreciendo la sobrevivencia de los ajolotes.

3.6 REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- 1.- AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS (EPA), 1993. Guía de diseño y construcción de un humedal construido con flujo subsuperficial.

. EPA - Región 5 (Illinois, Indiana, Michigan, Minnesota, Ohio, Wisconsin).
- 2.- Amábilis S., Leonel E., 2010. Análisis del patrón de flujo en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial. MS Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de Mexico.
- 3.- ALBETA ENVIRONMENT, Marzo 2000, 2000-last update, Guidelines for the approval and design of natural and constructed treatment wetlands for water quality improvement. [Online]. Available: www.gov.ab.ca/env/ [3/5/ 2000, 2000]. (19/03/2014).
- 4.- Comisión Nacional del Agua. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México www.conagua.gob.mx
- 5.- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., Andrade, M. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Ed. Nelson Antequera Duran. Cochabamba, Bolivia.
- 6.- Fenoglio L. (2000). Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales de flujo vertical. México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.
- 7.- GF Hua, W. Zhu, L. F. Zhao, J.Y. Huang. Clogging processes caused by biofilm growth and organic particle accumulation in lab-scale vertical flow constructed wetlands. Journal of Environmental Sciences. 21(6): 750-757
- 8.- Jairo A. Potabilización del agua. Ed. Alfa Omega. 3ª. Edición. 2001.
- 9.- Kevern, R.N. 1989. Alkalinity water, classification systems. 1. Michigan U.S.A..

- 10.- Kirkwood, D.S. 1994. San-Plus segmented flow analyzer and its applications. Seawater analysis. Skalar. Amsterdam.
- 11.- Luna-Pabello, V.M., Durán, C., Ramírez, H., Fenoglio, F. and Sánchez, H., 1997. Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. Anuario Latinoamericano de Educación Química, ALDEQ., San Luis, Argentina., pp. 51-56.
- 12.- Luna-Pabello, Víctor M. Aburto-Castañeda, Sergio. Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico - Biológicas. Volume 17, Issue 1, June 2014, Pages 32-55
- 13.- Postila, Heini., Ronkanen, Anna-Kaisa. Kløve, Bjørn. 2015. Hydrology and hydraulics of treatment wetlands constructed on drained peatlands. Ecological Engineering, Volume 75: 232-241.
- 14.- Rodríguez, C. (2003). Humedales construidos. Estado del arte (I). México. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 24(3): 35-41.
- 15.- Secretaría de Economía. NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de Agua – Determinación de Dureza Total en Aguas naturales, Residuales y Residuales tratadas – Método de prueba (CANCELA A LA NMX-AA- 072-1981). [En línea]
http://lasa.ciga.unam.mx/monitoreo/images/biblioteca/45%20NMX-AA-072-SCFI-2001_Dureza.pdf
- 16.- Seoáñez, M. (1999). Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales. Fundamentos científicos. Tecnologías de diseño. Madrid. Mundi-prensa.
- 17.- Solórzano, L. 1969. Determination of Ammonia in Natural Waters by the Phenolhipochlorite Method.
- 18.- Strickland, J.H.D. y T. R. Parsons, 1972. A Manual of Sea Water Analysis. Fisheries Research. Board Canada. Bull. Vol. 167.

- 19.- Sun, G., Zhao Y., Allen, S. 2005. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system. *Journal of Biotechnology*. 115(2): 189-197
- 20.- Valderrama, J. C. 1981. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. *Marine Chemistry*. 10:109-122.
- 21.- Vymazal, Jan. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*. 380, (1–3): 48-65
- 22.- Vymazal, Jan, Kröpfelová, Lenka. A three-stage experimental constructed wetland for treatment of domestic sewage: First 2 years of operation *Ecological Engineering*. 37(1): 90–98.
- 23.- Zhao, L., Zhu, W., Tong, W. 2009. Clogging processes caused by biofilm growth and organic particle accumulation in lab-scale vertical flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Sciences*. 21(6): 750-757

IV. CONSTRUCCIÓN DE DOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN EJIDOS DE XOCHIMILCO Y SAN GREGORIO ATLAPULCO

4.1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano e industrial en el Valle de México trae como consecuencia la poca disponibilidad de agua. La sobre explotación de acuíferos acelerará el hundimiento del área del centro de la ciudad. La reutilización de aguas residuales para la industria y el riego ofrece buenas perspectivas. Los humedales artificiales son una ecotecnología basada en humedales naturales los cuales permiten tratar el agua de forma sustentable, presentando grandes ventajas técnicas, económicas y operativas en comparación con las plantas de tratamiento convencionales (Luna-Pabello, Durán *et al.*, 1997)

Un humedal artificial (HA) es una tecnología que su diseño es imitar los beneficios que brinda la naturaleza, que permite el tratamiento de aguas residuales de manera sustentable, son zonas de transición entre ecosistemas acuáticos y terrestres, los cuales sirven de enlace dinámico entre los dos (Llagas, Guadalupe *et al.*, 2006).

Los principales componentes de un humedal son el medio de soporte, la vegetación y los microorganismos. Dentro de los productos, resultado de un humedal artificial, están las plantas de ornato y el agua tratada (Luna-Pabello, Ramírez Carrillo *et al.*, 2004).

El área natural protegida conocida con el nombre de ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco es una zona lacustre poco profunda, inmersa en la Ciudad de México, importante tanto por su valor histórico y cultural, como por su valor turístico y agrícola. La expansión de la mancha urbana, la sobre explotación de acuíferos, la desecación de manantiales, las descargas de aguas residuales y la resuspensión de sedimentos, son algunos de los múltiples problemas que existen en la zona. Este estudio se llevó a cabo para comparar la eficiencia depurativa de dos humedales artificiales construidos en la zona lacustre de Xochimilco y hábitat del ajolote (*Ambistoma Mexicanum*).

4.1.1 Descripción de la zona

El Sistema Lacustre “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”, se localiza en las coordenadas geográficas extremas: 19° 15’ 11” y 19° 19’ 15” Latitud Norte y 99° 00’ 58” y 99° 07’ 08” Longitud Oeste. Coordenada Central aproximada: 19°17’N 99°04’W, con una altitud promedio de 2,240 m.s.n.m, y una superficie es de 2,657 ha. Colinda al Norte con las delegaciones Tlalpan, Coyoacán, Iztapalapa y Tláhuac; al Este con las delegaciones Tláhuac y Milpa Alta; al Sur con las delegaciones Milpa Alta y Tlalpan; al Oeste con la delegación Tlalpan. Xochimilco. En dicho lugar se han registrado 150 especies de aves silvestres, 180 especies de flora, 139 especies de vertebrados y el ajolote (*Ambystoma mexicanum*) especie endémica de la zona (RAMSAR, 2003), cuenta con las siguientes categorías: Área Natural de Protección de Flora y Fauna protegido por CONANP; sitio Ramsar.

4.1.2 Suelos

Los suelos son predominantemente lacustres y palustres, de composición geológica diversa, en algunos sitios están influenciados por la presencia de un manto freático cercano, mientras que en otros son profundos y discontinuos. En la zona lacustre predominan sedimentos arcillosos con arenas de grano fino, con alrededor del 50% de cenizas volcánicas, cuya textura va de arenosa hasta limo-arcillosa y retienen una alta cantidad de humedad. En la zona lacustre sur, los suelos son de tipo Feozem háplico (Hh) (clasificación de Köppen, modificada por García, 1988), con alto contenido de materia orgánica y nutrientes, y gleyico (Hg), pantanosos y saturados de humedad la mayor parte del año (RAMSAR, 2006 a).

4.1.3 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1988), el clima corresponde a C(W2) (w) b (i’), templado subhúmedo con lluvias en verano (RAMSAR, 2006 b). La precipitación pluvial media anual es de 620.4 mm, y la mayor parte se

concentra entre los meses de mayo y octubre (ver figura 4.1). La temperatura media anual oscila entre los 12° y 18°C, con poca variación de las temperaturas medias mensuales (entre 5° y 7°C); entre noviembre y enero pueden presentarse heladas. Durante la mayor parte del año los vientos dominantes provienen del Norte y Noreste, y de noviembre a febrero se presentan vientos dominantes del Sureste.

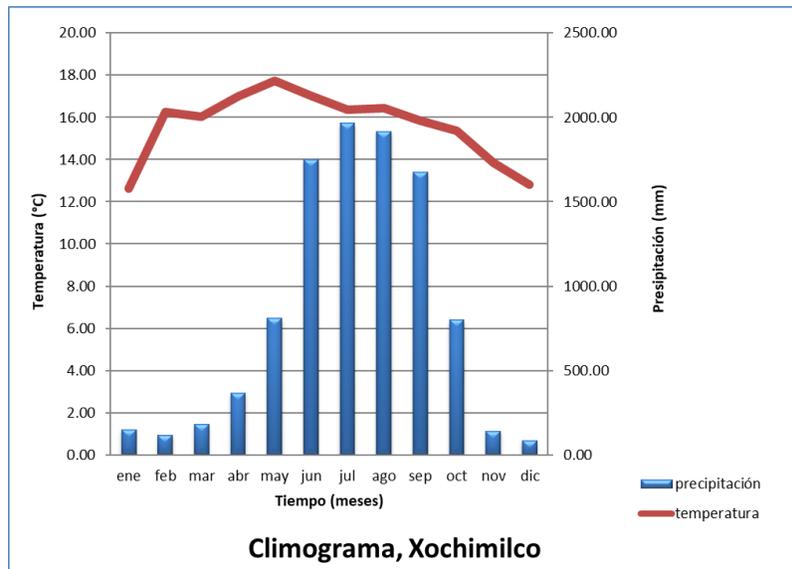


Figura 4.1. Climograma Xochimilco.

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (estaciones meteorológicas de la Ciudad de México).

4.1.4 Hidrología

El sistema lacustre se encuentra reducido a canales, apantles, lagunas permanentes y de temporal, cuya profundidad varía-desde 60 cm en algunos canales y zonas inundadas, hasta profundidades de 3 a 6 metros, como en el caso de algunas lagunas. Se estima una longitud aproximada de 203 km de canales interconectados, entre los más importantes se encuentran los de Cuemanco, Nacional, Chalco, Del Bordo, Apatlaco, San Sebastián, Apampilco, Tezhuilo y Japón. Las lagunas principales son Tlilac, del Toro, Huetzalin, Apampilco, Tezhuilo y el Lago de Conservación de Flora, Fauna y Acuacultura de San Gregorio Atlapulco (RAMSAR, 2006).

La zona Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco se consideran la última riqueza agrícola de nuestro pasado prehispánico, presentan tres problemas fundamentales: uno, los hundimientos diferenciales provocados por la excesiva extracción de agua mediante 120 pozos profundos instalados en la zona de Xochimilco-Mixquic-Tláhuac; dos, la creciente urbanización legal e ilegal de la zona chinampera y ejidal de la región lacustre; tres, la deficiente calidad del agua que aun alimenta los canales chinamperos y parte de la zona agrícola ejidal (Legorreta, 2006).

4.2 MÉTODOS Y MATERIALES

Los canales de la zona ejidal de San Gregorio Atlapulco son la única fuente de abastecimiento de agua para los chinamperos de la zona y se encuentran contaminados. Por ello, se planteó una alternativa ecológica, económicamente viable, para la remoción de contaminantes en los canales de cuatro parajes de la zona, Potrero y Tlapechicalli. Para este fin, se diseñaron dos humedales artificiales uno de flujo superficial y otro de flujo horizontal, utilizando como biofiltro, ejemplares de la especie *Zantedeschia aethiopica* (L.). el material utilizado se muestra a continuación.

Potrero; 13.6 camiones de tezontle, 13.6 camiones de granzón, 2 tablones de 8X1.5X10 de oyamel, 6 piezas de polines de pino de 3.25X3.25X8.25, 10 tiras de pino de 2X0.70X8.25, 25.8 metros de manguera de 1/2 ", 10 metros de malla sombra 70%, 0.5 kilos de clavo de 2", 0.5 kilos de clavo de 3 1/2", 0.25 kilos de clavo para concreto 1 1/2", 0.5 kilos de clavo para concreto 2", 0.25 kilos de clavo de 5", 0.5 kilos de clavo de 2", 0.5 kilos de clavo para concreto 2 1/2", 360 piezas de alcatraces.

Tlapechicalli; 3 camiones de tezontle, 1 camión de granzón, 4 tinas, 1 juego de corta círculos, 2 metros de manguera anillada, 5 metros de manguera especial de 19 mm, 10 metros de manguera de 1/8, 3 Tuercas de presión galvanizada de 51 mm, 3 empaques acoplados planos, 3 piezas de válvula esfera rosca de 19 mm, 1 niple 19 mm, 1 espiga 19 mm, 1 espiga 50 mm, 3 piezas de tuerca de presión galvanizada 19 mm, 1 empaque para válvula economizadora, 1 abrazadera 51 mm, 3 piezas de abrazadera 19 mm, 1 cinta teflón, 3 piezas de silicón, 1 niple de cuerda corrido 50 mm, 1 codo de 20 ", 1

reducción 1 A 1/2, 2 niples de 1/2 a 5 SCM, 3 piezas de conectores para llave, 1 pegamento PVC.

El diseño conceptual se planteó con base en las restricciones del terreno, la ubicación del sistema, su operación y mantenimiento. Se realizó la construcción de los humedales artificiales con ayuda del proyecto “Axolotl and Chinampas: preserving biodiversity at Conserancy Area, southern of Mexico City, 2016” capitalizado por el Servicio de Pesca y Vida silvestre de los Estados Unidos, elaborado por Restauración Ecológica y Desarrollo A.C., y apoyo de los productores de San Gregorio Atlapulco y sus familias que participaron en el proyecto.

El humedal de flujo libre se estableció en el paraje de Potrero, se utilizó la estructura de concreto de una esclusa ya establecida en el lugar, para la instalación del humedal flujo libre. Las dimensiones de la esclusa en el paraje de Potrero son 3.0 m de altura por 8.0 m de largo y 2.50 m de ancho.

El sitio de construcción del humedal se encuentra en la latitud Norte a 19.26244° y longitud Oeste -99.06154°, que cuenta con la construcción de una esclusa, dicha estructura proporciona las condiciones adecuadas, donde se estableció el humedal.

Una vez establecido el sitio se retoma la metodología propuesta por la EPA para realizar el HAFL (EPA, 2003) (ver tabla 4.1).

Los humedales artificiales se establecen por lo general como único proceso de tratamiento, sin embargo, dependiendo de los requerimientos de calidad del afluente, se pueden considerar otros procesos de tratamiento. El diseño del humedal establece un pretratamiento, el cual evitará que los humedales se colmaten y los canales se obstruyan o desgasten, apoyando en la remoción de sólidos suspendidos (SEMARNAT, “sin año”).

El agua entra al filtro por la parte superior de la compuerta, a 1.5 m de distancia se coloca una malla doble como se muestra en la figura 4.2, la cual retiene la grava y el granzón, material que conforma el filtro y cuya finalidad es la remoción de los sólidos suspendidos.

2.50 m ancho

Polines: 8

Malla 70 %



1.80 m altura

Figura 4.2. Esquema de la malla para filtro del humedal artificial para el paraje de Potrero.

Cuadro 4.1. Resultados de los diseños de los humedales de Potrero y Tlapechicalli.

Humedal	ks	1/3 ks	d (m)	L (m)	W (m)	S	0.1 S	A	Q (m ³ día ⁻¹)
Potrero	100	33.3	1.8	5	2.5	0.4	0.1	4.4	5.4
Tlapechicalli	100	33.3	0.6	1.6	0.8	0.4	0	0.5	0.6

Ks = Conductividad hidráulica, S = Gradiente hidráulico, L = Longitud, W = Ancho, Q = Gasto

Posterior mente el agua pasa por el humedal que cuenta con una celda, el material utilizado como sustrato fue tezontle, ya que existen estudios que describen los efectos del tezontle en la remoción de nutrimento (Fenoglio, 2000) y granzón, con un arreglo de tres cámaras, donde el granzón sirve como separación y cada columna mide 15 cm de ancho además de permitir que el flujo sea uniforme, mientras el tezontle ocupa el espacio restante, cada cámara mide 1.5 m de ancho y sirve de sustrato para la vegetación. Con la finalidad de comercializar la producción de flores ornamentales producto del humedal se utilizaron alcatraces (*Zantedeschia aethiopica*) tolerantes a la inundación. La eficiencia en la remoción de contaminantes con el alcatraz es similar a la obtenida con vegetación hidrofita (Hernández, 2016).

Se trasplantaron 360 alcatraces (*Zantedeschia aethiopica*) con una distribución de 8 X 12 ejemplares en cada celda como se muestra en la figura 4.3. Para finalizar la construcción se colocó una capa de granzón de aproximadamente 20 cm de altura en la parte superior, a lo largo del humedal. Algunos humedales artificiales al construirse son

revestidos en material impermeable para impedir la percolación y evapotranspiración (Marín, et al 2010).

Durante el establecimiento del humedal se encontraron 2 ajolotes pequeños, de aproximadamente 3 meses de vida.

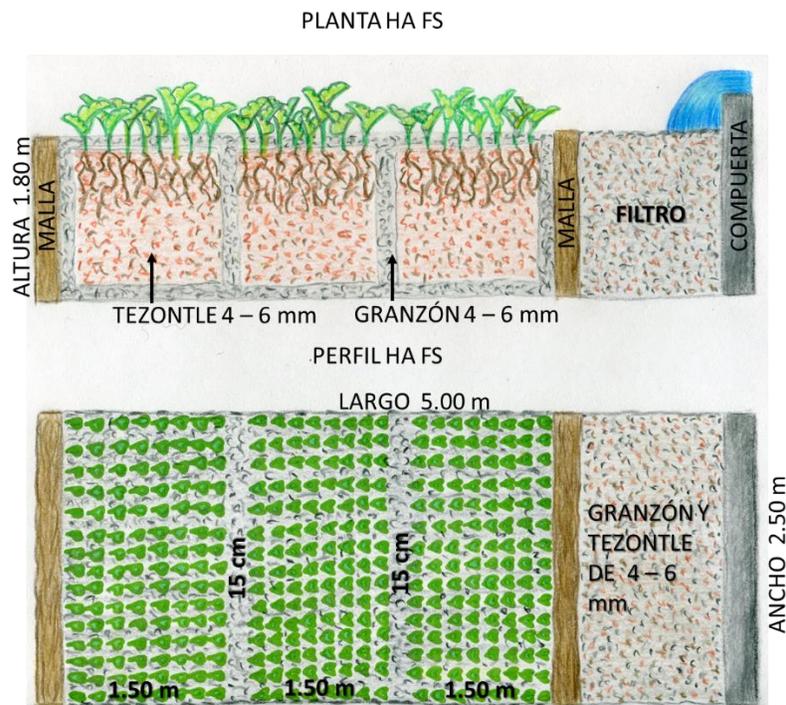


Figura 4.3 Diseño del humedal artificial del paraje de Potrero.

Una vez que el agua ingresa al humedal disminuye su velocidad en el filtro de pretratamiento, el cual retira los sólidos suspendidos de mayor tamaño, posteriormente ingresa al humedal disminuyendo su velocidad de circulación a medida que se distribuye, como resultado de la fricción con el área radicular, precipitando así los sólidos sedimentables restantes, además de los nutrientes asociados a la zona radicular.

El humedal de flujo subsuperficial se en el paraje de Tlapechicalli, este canal no cuenta con flujo de agua, y se encuentra en la latitud 19.259716° y longitud -99.049652°, el humedal se diseñó como tratamiento secundario. Una vez establecido el sitio se retoma

la metodología propuesta por la EPA para establecer las ecuaciones de diseño (EPA, 2003) (ver cuadro 4.1). Este humedal por ser de flujo subsuperficial debe cumplir con un tiempo de retención de 6.10 hrs

El diseño del humedal establece un modelo de flujo sub superficial de cuatro módulos, los cuales se encuentran repartidos dos en una chinampa y dos en un canal de tierra, el diseño final se muestra en la figura 4.

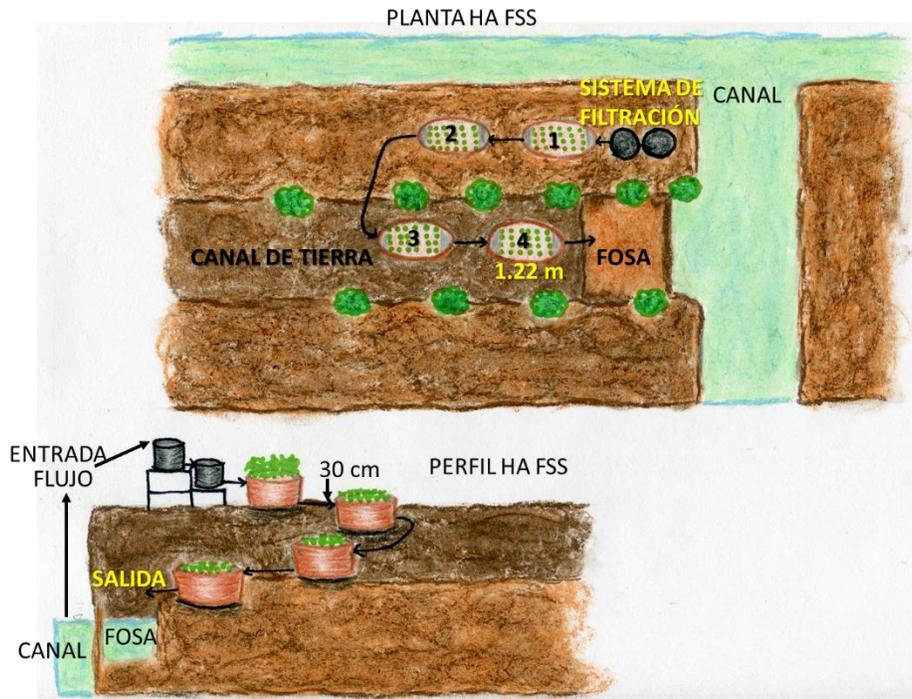


Figura 4.4 Diseño del humedal artificial para el paraje de Tlapechicalli.

Cada módulo debe contener 10 cm de ancho de granzón con un tamaño de 6-12 mm, en las paredes de entrada y salida, además de la parte inferior, el resto de la tina debe contener tezontle. Cada módulo del humedal debe contener 24 bulbos de alcatraces y solo un módulo con 24 carrizos.

4.2.1 Funcionamiento

El agua ingresa del canal a los tanques de filtración primaria el cual fue diseñado por la Maestra Gabriela Sandoval Andrade, por medio de una bici-bomba, después del proceso de filtrado el cual tiene un periodo de residencia de 24 hrs; posteriormente el agua ingresa al humedal en el cual el tiempo de residencia es de 6.10 hrs. por lo que opera una vez al día.

Una vez que el agua ingresa al humedal disminuye su velocidad de circulación a medida que se distribuye, como resultado de la fricción con el área radicular, precipitando así los sólidos sedimentables restantes, además de los nutrientes asociados a la zona radicular, este proceso se repite consecutivamente en cada uno de los cuatro módulos.

Las características fisicoquímicas óptimas requeridas por los ajolotes se muestran en el cuadro 4.2.

Cuadro 4.2. Parámetros óptimos para los ajolotes.

PARÁMETRO	VALOR IDEAL
pH	6.5 - 7
Cloro	0 mg/l
Dureza general (GH) (Ca y Mg)	6 – 16 °dh
Dureza carbono (KH)	3-10 °dh
Nitritos (NO ₂ ⁻)	> 3 mg/l
Amonia	0% ó 0 mg/l
Densidad	1
Concentración CO ₂	< 5 mg/l
O ₂ disuelto	>80% de saturación
Temperatura	10 - 18°C

Posteriormente se realizaron determinaciones físico – químicas a cada humedal en paralelo, realizando un análisis comparativo entre ambos.

Los parámetros realizados para cada una de las muestras tomadas en laboratorio fueron alcalinidad, dureza, nutrientes (Amonio, Nitritos, Nitratos, Fosfatos y Silicatos), fosforo y nitrógeno total. La dureza y la alcalinidad se realizaron por titulación, mientras los nutrientes y los totales se determinaron por medio de un auto analizador de flujo segmentado. El análisis de los parámetros físico – químicos obtenidos elaborados en el laboratorio, se efectuó siguiendo los métodos del cuadro 4.3.

Cuadro 4.3. Metodologías propuestas.

PARÁMETRO	MÉTODO
Dureza general (GH) (Ca y Mg)	APHA, 1992
Nitratos	Strickland y Parsons, 1972
Nitritos (NO_2^-)	Strickland y Parsons, 1972
Amonia	Kirkwood, 1994
Fosfatos	Strickland y Parsons, 1972
Silicatos	Strickland y Parsons, 1972
Nitrógeno total	Strickland y Parsons, 1972
Fosforo total	Strickland y Parsons, 1972

Posteriormente para alcanzar una estabilidad en los humedales, se dispuso de un periodo de cuatro meses de adaptación. En la medida que transcurre el tiempo de operación para ambos humedales, permitiendo la formación de la biopelícula en las partículas del sustrato dando lugar a la reducción del medio poroso y, en consecuencia, a la disminución de la velocidad.

4.3 RESULTADOS

Con el objetivo de comparar resultados en ambos humedales y observar la eficiencia de remoción de estos, se efectuaron cuatro muestreos los meses de octubre, noviembre y diciembre del 2016, y enero del 2017, en paralelo. Se tomaron en total 16 muestras de agua por duplicado del afluente y efluente de cada sistema. Para la determinación de nutrientes se filtraron las muestras con ayuda de un filtro Millipore de 0.45 micras con ayuda de un soporte de filtro swinnex para filtros de membrana. Las concentraciones de N y P en las muestras se determinaron de acuerdo con las técnicas establecidas para cada caso, en un auto-analizador de flujo segmentado Skalar modelo San Plus.

Las tablas de resultados se encuentran en el anexo al final del documento.

4.3.1 Alcalinidad

La alcalinidad, es la capacidad que el agua posee para neutralizar ácidos contrarrestando sus efectos, la acidez y la alcalinidad juegan un papel muy importante en tratamientos biológicos, debido a que los microorganismos que intervienen en estos procesos pueden morir (Seoáñez, 1999), internacionalmente es aceptada una alcalinidad mínima de 20 de $\text{mg CaCO}_2 \text{ l}^{-1}$ para mantener la vida acuática, a valores menores las aguas se vuelven más sensibles a la contaminación perdiendo la capacidad de oponerse, niveles altos indican una mayor producción, la alcalinidad se clasifica de la siguiente forma (Kevern,1989):

<u>Clasificación</u>	<u>Alcalinidad</u>
Baja	<75 mg/L
Media	75 – 150 mg/L
Alta	>150 mg/L

En ambos humedales la alcalinidad fue alta sin importar el tipo de humedal o el tipo de vegetación, el agua no es apta para la sobrevivencia de los ajolotes.

4.3.2 Dureza

La dureza, es consecuencia de la reacción de iones metálicos (Ca y Mg) divalentes con el jabón, formando precipitados o incrustaciones en el agua. Las aguas duras, requieren más jabón para formar espuma depositando lodo e incrustaciones en los sedimentos (Seoanez, 1999). La dureza de las muestras en ambos modelos se consideran aguas muy duras. La dureza es un indicador de presencia de sales, una elevada concentración de sales provoca obstrucción, mientras que la falta de sales provoca corrosión. Las aguas pueden clasificarse como:

<u>Clasificación</u>	<u>Dureza, mg CO₂ l⁻¹</u>
Blandas	0 – 100
Moderadamente duras	101 – 200
Duras	200 – 300
Muy duras	> 300

Por otra parte, la dureza recomendada para la sobrevivencia de los ajolotes oscila entre 6 – 16 grados alemanes (°DH) o de 107.14 – 285.71 mg/L de CaCO₃, podemos observar la presencia de aguas blandas, las cuales normalmente intervienen en el proceso de corrosión y son aptas para la sobrevivencia de los ajolotes.

4.3.3 Amonio

La desaparición del amonio (N-H₄[±]), es el resultado colectivo de la absorción y volatilización de las plantas, estos procesos aportan una contribución menor, debido a que una gran cantidad de materia orgánica se elimina por el crecimiento y la respiración de los microorganismos. Por lo tanto, la nitrificación, las inmobilizaciones en las células microbianas y la adsorción en los medios de comunicación de los humedales están entre las principales vías de remoción del amoníaco en los humedales construidos. (Sun et al, 2005).

En él HA-FS se presenta una remoción del 45 %, mientras que él HA-FSS presenta la mayor depuración con una remoción del 60 %.

4.3.4 Nitritos (N-NO₂⁻)

En él HA-FS se presenta una remoción del 35.9 %, la mayor remoción se presenta en él HA-FSS con una remoción del 76 %.

4.3.5 Nitratos (N-NO₃⁻)

En él HA-FS se presenta una remoción del 27.19 %, mientras que él HA-FSS obtuvo una remoción del 83 %.

4.3.6 Fosfatos (P-PO₄³⁻)

El HA-FS presenta una remoción del 24.64 %, a diferencia del HA-FSS con una remoción del 24.07 %.

4.3.7 Silicatos

El HA-FS presenta una remoción del 72 %, mientras que el HA-FSS solo presenta una remoción del 36.12 %.

4.3.8 Fosforo Total

La eliminación del fósforo en todos los tipos de humedales construidos es baja (Vymazal et al 2007). Sin embargo, el HA-FS presenta una remoción del 4.44 %, a diferencia HA-FSS que no presenta remoción.

4.3.9 Nitrógeno Total

La mejor remoción la presento el HA-FSS con un del 68.74 %, a diferencia del HA-FS el cual consiguió únicamente una remoción del 31.11 %.

4.3.10 Ajustes al humedal

Una de las problemáticas de la zona lacustre es la variabilidad en el flujo, debido al origen de su abastecimiento proveniente del bombeo de agua del lago de Xochimilco a San Gregorio y de la planta de tratamiento de San Luis Tlaxialtemalco, de San Pedro Atocpan y del Cerro de la Estrella.

Sin embargo, no existe una regulación establecida sobre la liberación o volúmenes de descarga de agua a la zona de canales, de ahí el establecimiento de las esclusas para el control del flujo. Esto aunado a la época de lluvias dieron como resultado que el humedal establecido en el paraje de Potrero presentara problemas en la malla (del 70 %) la cual se tapó, debido al gran arrastre de sólidos presentes en el flujo. Cabe mencionar que el mantenimiento de los humedales por parte de los beneficiados no ha sido el adecuado, sumado a las granizadas y tormentas presentes en la zona las cuales provocaron la variabilidad en el flujo y el colapso de las mallas. Se realizó un cambio de malla de 70 % (malla sombra) a uno de 50 % (malla antigranizo), permitiendo así el libre flujo de agua al humedal. Además, se reforzó la estructura de cada malla.

Así mismo, el humedal establecido en el paraje de Tlapechicalli no opera todos los días y el tiempo de residencia del agua dentro del humedal oscila de 30 minutos a 2 horas.

4.4 CONCLUSIONES

1.- La zona lacustre de Xochimilco por contar con la categoría RAMSAR y Área Natural Protegida presenta limitantes en el rubro de la construcción, por lo cual el diseño de los HA se estableció con base en los requerimientos de la zona y la poca disposición de espacio para la instalación de estos y no como originalmente lo plantean las metodologías existentes.

2.- Los procesos responsables de la depuración difieren en magnitud entre los humedales. Mediante las pruebas realizadas en este estudio fue posible determinar la eficiencia de los Humedales, el HA-FS solo fue eficiente para la remoción de fosfatos, silicatos y en fósforo total, mientras que el HA-FSS fue superior en la remoción de amonio, nitritos, nitratos y nitrógeno total.

Quedando demostrado que los modelos de una etapa como el modelo HA-FS tienen una eliminación deficiente en la eliminación de nitrógeno total, debido a su incapacidad para proporcionar oxigenación a los humedales (Vymazal, 2007).

3.- El efecto inmediato en ambos humedales fue la disminución del mal olor y los mosquitos, sin embargo, en el humedal de Potrero (HA-FS) es fundamental que exista la organización suficiente para turnarse la labor del mantenimiento del humedal. Se observó que en el caso del Paraje de Tlapechicalli existe la organización comunitaria y es viable que el humedal funcione a largo plazo. Sin embargo, la operación del humedal es deficiente.

4.5 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- 1.- Administración Pública del Distrito Federal Jefatura de Gobierno. (2006). Acuerdo por el que se Aprueba el Programa de Manejo del Área Natural Protegida con Carácter de Zona de Conservación Ecológica “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”. Gaceta oficial del distrito federal. [En línea]. en http://ramsar.conanp.gob.mx/docs/sitios/lineamientos_instrumentos/XOCHIMILCO.pdf (revisado 13 de junio de 2017), (26/03/2016).
- 2.- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), 1993. Guía de diseño y construcción de un humedal construido con flujo subsuperficial. U.S. A.: EPA - Región 5. (Illinois, Indiana, Michigan, Minnesota, Ohio, Wisconsin).
- 3.- Alcocer-Durand, J., Bernal-Brooks, F. (2010). Limnología en México. Hidrobiología, 644:15 – 68.
- 4.- Comisión Nacional del Agua. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México www.conagua.gob.mx
- 5.- Contreras, V., Martínez-Meyer, E., Valiente, E., Zambrano, L. (2009). Recent decline and potential distribution in the last remnant area of the microendemic Mexican axolotl (*Ambystoma mexicanum*). Biological Conservation. 142(12): 2881-2885.
- 6.- Fenoglio L. (2000). Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales de flujo vertical. México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.
- 7.- Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). (2003). Zona Lacustre “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”. [En línea]: <http://ramsar.conanp.gob.mx/documentos/fichas/45.pdf>. (consultado 13 de junio de 2017)

- 8.-Hernandez Alarcón, Maria E., (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*. 1(2), 01-12.
- 9.- Kevern, R.N. 1989. *Alkalinity water, classification systems*. 1. Michigan U.S.A.
- 10.- Luna-Pabello, V.M., Durán, C., Ramírez, H., Fenoglio, F. and Sánchez, H., (1997). Los humedales artificiales. Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales. *Anuario Latinoamericano de Educación Química, ALDEQ.*, San Luis, Argentina., pp. 51-56.
- 11.- Luna Pabello, V.M., Ramírez Carrillo, H.F. (2004). Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 20(1), 31-38
- 12.- Legorreta, Jorge. (2006). *El agua y la Ciudad de México de Tenochtitlán a la megalópolis del siglo XXI*. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. México.
- 13.- Llagas Chafloque, Wilmer Alberto., Guadalupe Gómez, Alberto. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. *Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*. 15(17): 85-96.
- 14.- Marín Montoya, Jhoan P. Correa Ramírez, Juan C. (2010). Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la *guadua angustifolia Kunth*. Colombia. Tesis de licenciatura Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de Pereira, Escuela de Tecnología Química.
- 15.-Romero-Aguilar, Mariana, Colín-Cruz, Arturo, Sánchez-Salinas, Enrique, Ortiz-Hernández, Ma. Laura. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 25(3): 157-167
- 16.- Seoáñez, M. (1999). *Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales. Fundamentos científicos. Tecnologías de diseño*. Madrid. Mundi-prensa.

17.- Sun, G., Zhao Y., Allen, S. (2005). Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system. *Journal of Biotechnology*, 115(2): 89-197

18.- Vymazal, Jan. (2007) Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*. 380(1–3): 48-65

19.- Vymazal, J, Kröpfelová, L. (2011) A three-stage experimental constructed wetland for treatment of domestic sewage: First 2 years of operation. *Ecological Engineering*. 37(1): 90–98.

V. CONCLUSIONES GENERALES

1.- Si bien el presente trabajo aborda el diseño de los humedales artificiales los resultados de los parámetros obtenidos en laboratorio son adecuados para el desarrollo y sobrevivencia de los ajolotes.

2.- Con base en los muestreos realizados en laboratorio tanto a los modelos a escala como a los construidos en Xochimilco, fue posible determinar que los Humedales, HA-FS son eficientes en la remoción la remoción de fosfatos, silicatos y fosforo total, mientras que HAC-FSS fueron superiores en la remoción de amonio, nitritos, nitratos y nitrógeno total.

3.- Los humedales artificiales de flujo subsuperficial combinado como el construido en el en el paraje de Tlapechicalli presentan mayor eficiencia en la remoción de contaminantes, a pesar de no cumplir con los tiempos de retención establecidos.

ANEXO A. TABLAS DE RESULTADOS

Tablas del primer muestreo realizado en noviembre del 2015 a los dos modelos a escala.

Sustrato de 2 mm

sustrato de 2 mm											
concentraciones micromol/L											
	Tiempo (hr)	Carbonatos	mg CaCO ₃ /L	N-NH ₄	P-PO ₄	Si-SiO ₂	NO ₃ +NO ₂	N-NO ₂	NO ₃	PT	NT
HA-FL 1	0	10.27	626.48	140.80	52.90	775.36	0.65	0.51	2.50	48.07	434.01
	1	8.61	493.02	59.90	41.80	1214.19	109.60	0.83	105.80	6.99	131.67
	2	7.98	481.14	26.60	33.30	1193.44	188.60	0.41	175.20	6.36	63.56
	4	11.75	770.61	3.60	16.60	722.97	97.40	1.15	89.60	45.46	333.53
HAFSS 1-2	0	10.27	626.48	140.80	52.90	775.36	0.65	0.51	2.50	48.07	434.01
	1	0.00	541.18	74.20	41.20	968.63	87.30	4.44	81.60	31.95	313.70
	2	9.97	555.95	10.30	50.30	862.35	169.00	1.12	161.20	40.72	299.01
	4	9.22	561.98	87.10	27.03	843.70	21.47	3.69	17.78	41.42	323.23
HAFSS 2	2	8.23837892	516.1844	92.2	40.5	1144.993774	148.5	7.33798579	139.1	40.7678989	371.722852
	4	7.58216172	631.8146	61.9	49.6	1025.180712	229	14.2248551	214.1	28.3463298	289.918035

Sustrato de 4-6 mm

Sustrato 4-6 mm											
concentraciones micromol/L											
	Tiempo (hr)	Carbonatos	mg CaCO ₃ /L	N-NH ₄	P-PO ₄	Si-SiO ₂	NO ₃ +NO ₂	N-NO ₂	NO ₃	PT	NT
HAFSS 3-4	0	10.27	626.48	140.80	52.90	775.36	0.65	0.51	2.50	48.07	434.01
	1	7.42	604.63	55.90	37.10	1120.52	348.90	8.33	332.30	53.07	528.47
	2	9.62	655.24	94.30	31.20	850.55	74.79	6.10	17.20	27.52	306.40
	4	9.31	860.41	51.64	22.59	1049.90	59.48	7.58	51.90	24.28	197.01
HAFSS 4	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	7.99	784.07	50.30	55.50	1318.08	31.50	14.96	29.40	41.50	667.18
HAFSS 4	4	8.28	892.27	95.60	45.70	1265.68	75.98	12.91	51.40	44.32	527.43

Tabla del segundo muestreo realizado en diciembre del 2015 al modelo dos HAFSS 2

Sustrato de 2 mm

2 mm												
concentraciones micromol/L												
	Tiempo (hr)	Carbonatos	mg CaCO3/L	N-NH4	P-PO4	Si-SiO2	NO3+NO2	N-NO2	NO3	PT	NT	
HAFSS 1-2	0	9.02	535.33	139.88	30.18	775.36	0.65	0.51	0.13	27.84	288.31	
	1	9.62	597.64	3.29	6.24	1214.19	21.54	0.83	20.71	18.81	218.57	
	2	9.80	590.82	55.36	26.91	968.63	71.91	4.44	67.47	36.93	340.46	
	4	9.19	551.67	81.30	28.65	1144.99	68.47	7.34	61.14	44.73	433.08	
HAFSS 2	0	9.02	535.33	139.88	30.18	775.36	0.65	0.51	0.13	27.84	288.31	
	1	9.24	564.69	66.27	27.40	862.35	25.28	1.12	24.16	34.26	292.42	
	2	8.96	557.18	25.78	25.51	1025.18	75.50	14.22	61.28	26.77	297.42	
	4	9.14	544.68	19.71	21.33	850.55	74.79	6.10	68.70	39.61	447.32	

Sustrato de 4-6 mm

4-6 mm												
concentraciones micromol/L												
	Tiempo (hr)	Carbonatos	mg CaCO3/L	N-NH4	P-PO4	Si-SiO2	NO3+NO2	N-NO2	NO3	PT	NT	
HAFSS 3-4	0	9.02	535.33	139.88	30.18	775.36	0.65	0.51	0.13	27.84	288.31	
	1	8.86	655.41	85.73	29.05	1120.52	74.66	8.33	66.34	49.12	611.25	
	2	8.87	383.69	61.12	26.77	1318.08	76.61	14.96	61.65	24.65	375.14	
	4	8.88	864.47	0.15	3.84	1193.44	8.86	0.41	8.45	23.56	178.44	
HAFSS 4	0	9.02	535.33	139.88	30.18	775.36	0.65	0.51	0.13	27.84	288.31	
	1	8.58	791.32	53.55	28.14	1265.68	75.98	12.91	63.07	42.01	400.42	
	2	8.74	863.25	87.78	26.63	739.35	12.27	1.34	10.93	41.42	323.23	
	4	9.47	924.91	81.36	27.55	907.85	39.84	6.47	33.38	42.57	337.62	

Tablas correspondientes a los dos humedales artificiales construidos en San Gregorio Atlapulco.

Muestreo realizado en octubre 2016

OCTUBRE						
concentraciones micromol/L						
Clave	Tiempo (hr)	mg CaCO ₃ /L	N-NH ₄	P-PO ₄	Si-SiO ₂	N-NO ₂
Potrero	entrada	0.0082	105.71	224.55	18.49	658.46
Potrero	salida	0.0082	57.75	169.21	5.00	766.90
Tlapechicalli	entrada	0.0072	40.81	83.73	7.39	403.59
Tlapechicalli	salida	0.0101	16.53	104.50	4.72	722.71

Muestreo realizado en noviembre 2016

NOVIEMBRE								
concentraciones micromol/L								
Clave	Tiempo (hr)	Carbonatos	mg CaCO ₃ /L	N-NH ₄	N-NO ₃	N-NO ₂	P-PO ₄	Si-SiO ₂
Potrero	entrada	0.0072	0.0072	173.14	58.24	8.38	49.94	1,297.12
Potrero	salida	0.0072	0.0072	141.53	83.94	7.30	59.82	1,371.85
Tlapechicalli	entrada	0.0078	0.0078	67.03	74.09	6.79	6.61	446.98
Tlapechicalli	salida	0.0069	0.0069	26.26	12.86	1.57	5.01	986.96

Muestreo realizado en diciembre 2016

DICIEMBRE										
concentraciones micromol/L										
Clave	Tiempo (hr)	mg CaCO ₃ /L	N-NH ₄	N-NO ₃	N-NO ₂	P-PO ₄	Si-SiO ₂	PT	NT	
Potrero	entrada	0.0071	252.85	27.51	6.63	36.20	557.63	60.06	373.45	
Potrero	salida	0.0074	180.35	20.02	4.25	35.65	500.85	57.39	285.47	
Tlapechicalli	entrada	0.0076	51.23	73.97	1.90	15.81	570.11	18.06	384.23	
Tlapechicalli	salida	0.0080	30.02	12.34	2.04	13.32	580.47	24.41	120.11	

Muestreo realizado en enero de 2017

ENERO									
Clave	Tiempo (hr)	mg CaCO ₃ /L	N-NH ₄	N-NO ₃	N-NO ₂	P-PO ₄	Si-SiO ₂	PT	NT
Potrero	entrada	0.0071	252.85	27.51	6.63	36.20	557.63	60.06	373.45
Potrero	salida	0.0074	180.35	20.02	4.25	35.65	500.85	57.39	285.47
Tlapechicalli	entrada	0.0076	51.23	73.97	1.90	15.81	570.11	18.06	384.23
Tlapechicalli	salida	0.0080	30.02	12.34	2.04	13.32	580.47	24.41	120.11

ANEXO B. ALBUM FOTOGRAFICO

Instalación del humedal artificial de flujo subsuperficial en el paraje de Tlapechicalli.

Fosa para la colocación del humedal en el paraje de Tlapechicalli.



Colocación de coples



Colocación válvulas.



Nivelación de las tinas.



Colocación de mangueras.



Colocación de mangueras.



Colocación del sistema y nivelación final de tinas.



Colocación del granzón.



Colocación de granzón.



Colocación de separaciones.



Colocación de tezontle.



Colocación del tezontle.



Humedal instalado.



Instalación del humedal artificial de flujo superficial en el paraje de Potrero.

Colocación de polines



Armado de marco.



Colocación de malla.



Malla terminada



Bombeo del canal para la colocación del humedal.



Colocación del granzón y el tezonle para la instalación del filtro.



Filtro terminado



Ajolote encontrado en el canal del paraje de Potrero, previo a la colocación del material.



Colocación del material en el humedal.



Colocación del material.



Colocación de los alcatraces en el humedal.



Humedal del paraje de Potrero terminado.

