

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA.

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PANTANO DE FLUJO VERTICAL A
ESCALA PILOTO.**

POR:

ELIGIO PÉREZ HERNÁNDEZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. MARZO DEL 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PANTANO DE FLUJO VERTICAL A
ESCALA PILOTO.

POR:

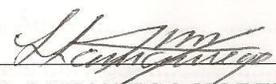
ELIGIO PÉREZ HERNÁNDEZ

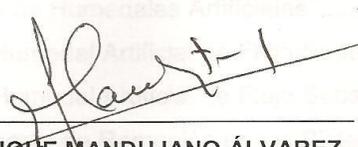
TESIS

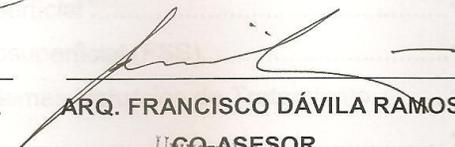
QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ PARTICULAR DE
ASESORÍA Y APROBADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL TÍTULO DE:

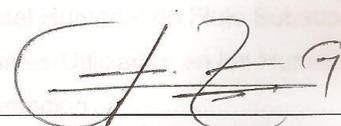
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN.

COMITÉ PARTICULAR:


DR. LUIS SAMANIEGO MORENO
ASESOR PRINCIPAL


ING. ENRIQUE MANDUJANO ÁLVAREZ
CO-ASESOR


ARQ. FRANCISCO DÁVILA RAMOS
CO-ASESOR


MC. LUIS RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"



División de
Ingeniería

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. MARZO DEL 2013

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE CUADROS	vi
RESUMEN	vii
I. INTRODUCCION	1
1.1 Objetivo.....	3
1.2 Hipótesis	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.	4
2.1.1. Tratamiento de Aguas Residuales en México.	6
2.1.2. Tratamiento de Aguas Residuales Municipales.....	7
2.2. Núcleos de Población	7
2.3.1. Panorama General del Agua.....	8
2.3.2. Clasificación de los Usos del Agua	8
2.3.3. Principales Usos del Agua en México.	9
2.4. Tipos de Humedales Artificiales.....	10
2.4.1. Humedal Artificial de Flujo Superficial	11
2.4.2. Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (FSS).	11
2.5. Eficiencia de Remoción en los Sistemas Naturales de Tratamiento	12
2.6. Procesos de Depuración.....	14
2.6.1. Componentes del Humedal de Flujo Subsuperficial.....	15
2.6.2. Plantas Frecuentes Utilizadas en los Humedales.	16
2.7. Mecanismos de Remoción.....	19
2.7.1. Posibles Usos del Agua Tratada	19
III. MATERIALES Y MÉTODOS	21

3.1. Localización del Sitio	21
3.2 Descripción del Sistema Natural de Tratamiento	22
3.3. Lista de Materiales	25
3.4. Rendimientos Esperados	26
3.5. Ventajas de los Humedales Artificiales	26
3.6. Desventajas de los Humedales Artificiales	26
3.7. Parámetros de Diseño	27
3.8. Diseño Hidráulico del Sistema	28
3.8.1. Ecuaciones de Primer Orden	28
3.8.2. Ecuaciones de Regresión Lineal.	31
3.9. Construcción del Sistema de Tratamiento	32
3.9.1. Operación y Mantenimiento.....	36
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	37
4.1. Modelo para la Remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno.	37
4.1.2. Modelo para la Remoción de Sólidos Suspendidos Totales.....	39
4.1.3. Modelo para la Remoción de Nitrógeno Total.	40
4.1.4. Modelo para la Remoción de Fósforo Total.....	42
V. CONCLUSIONES	45
VI. RECOMENDACIONES	46
VII. BIBLIOGRAFÍA	47

DEDICATORIA

A TI DIOS:

Por haberme permitido culminar esta etapa tan importante en mi vida, y te pido que con tu luz me guíes y me acompañes siempre a lo largo de mi vida profesional.

A mi “**ALMA MATER**” Gracias por abrirme sus puertas para la adquisición y desarrollo de conocimientos para mi formación profesional.

A MIS PADRES:

Refugia Hernández Porque gracias a su cariño, apoyo y confianza he llegado a realizar dos de mis más grandes metas en la vida. La culminación de mi carrera profesional y el hacerlo sentir orgulloso de esta persona que tanto lo ama. Porque jamás encontraré la forma de agradecer su apoyo, comprensión y confianza esperando que comprenda que mis logros son también suyos e inspirados en tí, hago de este un triunfo y quiero compartirlo por siempre contigo.

Eligio Pérez A ti padre por enseñarme hacer de mi una persona de bien.

A MIS HERMANOS:

Antonio, Vicente, Susana y Wences Gracias por vivir conmigo alentándome, corrigiéndome, comprendiéndome, apoyándome incondicionalmente y compartiendo logros y tropiezos, alegrías y tristezas, por sus esfuerzos y sacrificios que me han permitido crecer como persona y superarme cada día.

AGRADECIMIENTOS

A mi gloriosa "**ALMA TERRA MATER**" Por brindarme la oportunidad de realizar mi formación profesional en sus aulas.

Al Dr. Luis Samaniego Moreno Por su asesoría y por compartir sus conocimientos, por su apoyo incondicional en la realización de este proyecto por su amistad y sus sabios consejos que siempre tendré presente.

Al Arq. Francisco Dávila Ramos Por sus observaciones y recomendaciones en la revisión de este trabajo de investigación.

Al Ing. Enrique Mandujano Álvarez Por su valiosa asesoría y conocimientos compartidos en el salón de clases

A mis tíos Marcial y Georgina Por su apoyo incondicional que me brindaron en estos 4 años y medio de mi carrera les doy gracias por todo y este logro también se los debo a ustedes dos.

A todos mis amigos **Sandy, Carlitos, Lucy, José Ascensión, Roberto, Arturo, Ever, Edwin, Santiago, Erick, Paulino** gracias por todos los momentos compartidos, nunca los olvidaré.

A mi novia **Lety** gracias por estar conmigo y apoyarme en todo.

Y a todos mis compañeros de carrera fue un gusto y placer compartir estos últimos años con ustedes.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de Volúmenes Concesionados	9
Figura 2. Humedal Artificialde Flujo Superficial	11
Figura 3. Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial	12
Figura 4. Plantas Acuáticas Utilizadas	17
Figura 5. Scirpus Utilizada en Humedales Artificiales	17
Figura 6. Carrizos Utilizados en la Depuración de Aguas Residuales	18
Figura 7. Mecanismo de Remoción en los Humedales.	19
Figura 8. Localización del Sistema Natural de Tratamiento	21
Figura 9. Sistema de Tratamiento	22
Figura 10. Válvula para Toma de Muestras	23
Figura 11. Instalación de Crucetas	24
Figura 12. Tanque Imhoff	25
Figura 13. Instalación de Válvula reguladora de Gasto	33
Figura 14. Medio Granular Utilizado	33
Figura 15. Localización del Sitio de Instalación	34
Figura 16. Detalle de Ensamblado de los Toneles	34
Figura 17. Ensamble de Crucetas	35
Figura 18. Válvulas para Toma de Muestras.	35
Figura 19. Sistema de Tratamiento Terminado	36

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Porcentaje de remoción de los humedales artificiales.....	13
Cuadro 2. Procesos que permiten la depuración del agua residual.....	13
Cuadro 3. Accesorios utilizados para la construcción	25
Cuadro 4. Reglas de diseño para pantanos de flujo subsuperficial .	27

RESUMEN

Los sistemas de tratamiento naturales se caracterizan por su bajo costo de construcción, operación y mantenimiento, así como el nulo uso de energía, siendo utilizados para la remoción de cargas contaminantes en las aguas residuales. A pesar de los conocimientos que se tienen en la actualidad han llevado a proponer nuevos diseños, con la combinación de diferentes tipos de humedales artificiales en este caso de flujo vertical para el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN).

Utilizando tres toneles de 0.80 m de altura, con un diámetro de 0.60 m y una capacidad de 0.20 m³ por cada tonel, para el tratamiento de aguas residuales de la UAAAN, a los cuales se les instaló válvulas para la toma de muestras, válvulas reguladoras de gasto, crucetas para la uniforme distribución del agua en el interior de cada tonel de este modo tener las mismas condiciones de flujo, para mejorar la hidrodinámica del agua y ayudando al medio ambiente con la reducción de contaminantes.

Palabras clave: **Depuración, Pantanos Construidos, Filtros Verdes, Filtros Intermitentes, Fitodepuración.**

I. INTRODUCCION

El agua ha sido, desde su formación un elemento indispensable para los seres vivos, fuente y sustento de vida, base del desarrollo de muchas actividades importantes para los seres humanos. A medida que la población ha ido en aumento, la demanda y el uso de este recurso se han vuelto desordenados e insostenibles. Aunque la cantidad de agua existente ha sido la misma desde su origen, el que sea destinado a múltiples actividades trae como consecuencia su contaminación con diversas sustancias lo que provoca la pérdida de sus propiedades que la hacían utilizable, a estas aguas se les denomina aguas residuales. Es por eso que la cantidad de agua disponible para consumo va en disminución.

En México el año 2009, las 2,029 plantas en operación en el país trataron $88.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, es decir el 42% de los $209.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, recolectados del sistema de alcantarillado (Conagua, 2011). Lo que indica que se requiere de mayor infraestructura y recursos humanos para mejorar la calidad de este bien, además de propuestas innovadoras que permitan implementar el tratamiento en diferentes condiciones ambientales y socioeconómicas (Conagua, 2007).

La presión que se ejerce sobre los recursos hídricos es cada vez mayor, esta se produce como consecuencia del acelerado crecimiento en los últimos años de la población y de los sectores agrícola e industrial, los cuales demandan grandes cantidades de agua para el desarrollo de sus actividades. El agua utilizada retorna a las fuentes hídricas como agua residual sin tratar en la mayoría de los casos, generando contaminación y disminuyendo la calidad de vida de las comunidades con sus consiguientes impactos, sociales y ambientales (Galvis *et al.*, 2005).

Las aguas residuales son responsables del 80% de la morbilidad en los países en vía de desarrollo; esta situación se encuentra estrechamente relacionada con las bajas coberturas en el sistema de alcantarillado y el inadecuado tratamiento y disposición final de las aguas residuales.

Existen sistemas naturales de tratamiento que se definen como el proceso o técnicas que eliminan sustancias contaminantes presentes en las aguas residuales, sin el empleo de algún aditivo químico.

El efecto depurador se debe a la acción de la vegetación, suelo, microorganismos (terrestres y acuáticos) y, en menor medida, a la acción de animales superiores (Moreno *et al.*, 2003).

Los humedales artificiales son excelentes sistemas de tratamiento de aguas residuales, son económicamente viables, de gran capacidad para la remoción de contaminantes, reconocidos como sistemas adecuados para la depuración de demanda bioquímica de oxígeno y de sólidos suspendidos DBO₅ y SST, para los cuales se obtienen rendimientos superiores al 80%, siendo también eficientes en la remoción de metales, trazas orgánicas y patógenos (Sanabria, 2010).

Los humedales artificiales son sistemas de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos (de menos de 1 m) plantados con vegetales propios de las zonas húmedas y en los que los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna. Los humedales construidos también se denominan humedales artificiales (García y Corzo, 2008).

Lo anterior ha estimulado la realización de este proyecto a partir de procesos observados en la naturaleza, que permita diseñar proyectos

alternativos para el tratamiento de aguas residuales con menores costos de construcción, energía y explotación.

Así como la implementación de sistemas más compactos fáciles de operar, ya que no son muy comunes a diferencia de los demás humedales de flujo horizontal, este va tener combinación de los dos tipos lo que le permitirá un mayor aporte de oxígeno debido al flujo vertical y por consiguiente evitar zonas muertas que puedan afectar el proceso de depuración.

1.1 Objetivo

Diseñar y construir un humedal artificial de flujo vertical, como apoyo al tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

1.2 Hipótesis

Con materiales de bajo costo es factible la construcción de un sistema de tratamiento del agua residual de flujo vertical a escala piloto.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El agua constituye un recurso importante para la sociedad, con el crecimiento de la población se ha generado que el consumo del agua para las diferentes actividades vaya en aumento, trayendo como consecuencia que la calidad de este vital líquido se vea alterada por una serie de microorganismos patógenos y compuestos químicos, entre otros, denominándosele aguas residuales (Esponda, 2001).

2.1. Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.

En el medio ambiente natural, cuando interaccionan el agua, el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera, se producen procesos físicos-químicos y biológicos. Los sistemas de tratamiento natural se diseñan para aprovechar estos procesos con objeto de proporcionar tratamiento al agua residual (Metcalf y Eddy, 1998).

Para el tratamiento de las aguas residuales existen diversos procesos y operaciones unitarias, que con una adecuada selección y combinación, pueden resolver la mayoría de las necesidades de disposición final o reaprovechamiento de los vertimientos. En términos generales existen procesos físico, químicos y biológicos. Los primeros hacen uso de las diferencias en ciertas propiedades entre el contaminante y el agua (sedimentación y flotación) o mediante la adición de reactivos empleados para variar la forma del contaminante buscando condiciones de separación del líquido.

Los procesos biológicos utilizan microorganismos que se alimentan de la materia orgánica contaminante y con ello la eliminan del agua en forma de nuevas células o de gases (Crites y Tchobanoglous, 1998).

Los pasos básicos para el tratamiento convencional de aguas residuales incluyen:

- ✓ Pretratamiento
- ✓ Tratamiento primario
- ✓ Tratamiento secundario
- ✓ Tratamiento terciario o avanzado

Pretratamiento: Es el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia puede provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos y operaciones. El desbaste y la dilaceración son procesos utilizados para la eliminación de sólidos gruesos, la flotación para eliminar grasas y aceites y el desarenado para la eliminación de la materia en suspensión gruesa (Romero, 2000).

Tratamiento primario: Se refiere comúnmente a la remoción parcial de sólidos suspendidos y materia orgánica particulada mediante sedimentación o flotación, constituyendo una estrategia de preparar el agua residual para el tratamiento biológico. Por lo general el tratamiento primario en un sistema convencional, remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y hasta un 40% de la DBO₅, fundamentalmente particulada (Romero, 2000).

Tratamiento secundario: El tratamiento secundario convencional es biológico, se usa principalmente para remoción de DBO₅ soluble y sólidos suspendidos volátiles, se incluyen en estos los procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunaje y los humedales artificiales, además de otras opciones anaeróbicas o mixtas (Romero, 2000).

Tratamiento terciario y avanzado: Supone generalmente, la necesidad de remover nutrientes para prevenir la eutrofización de fuentes receptoras

ambientalmente más sensibles o para mejorar la calidad de un efluente secundario con el fin de adecuar el agua para su reúso (Romero, 2000).

En un desarrollo gradual de sistemas de tratamiento se pueden considerar, como objetivos iniciales y principales del tratamiento de aguas residuales, los siguientes:

- ✓ Remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)
- ✓ Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST)
- ✓ Remoción de Nitrógeno y Fósforo

2.1.1. Tratamiento de Aguas Residuales en México.

En las últimas décadas la población en México ha experimentado un crecimiento considerable, incrementándose de manera importante el consumo de agua y consecuentemente, la generación de una mayor cantidad de aguas residuales.

En México, un volumen considerable de aguas residuales es vertido sin previo tratamiento, contaminando el suelo y las aguas superficiales, tanto en zonas urbanas como rurales, creando un riesgo obvio para la salud humana y el medio ambiente.

Para el tratamiento de estas aguas, México cuenta con 2,186 plantas de tratamiento de aguas residuales en las cuales, el 24 % son conformadas por sistemas naturales.

2.1.2. Tratamiento de Aguas Residuales Municipales

Al cierre del año 2010 el registro de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación fue de 2,186 instalaciones de las cuales 298 contaban con un nivel de tratamiento primario, 16 con primario avanzado, 1,870 con tratamiento secundario y 2 con tratamiento terciario (Conagua, 2011).

La capacidad instalada fue de $126.85 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y el caudal tratado fue de $93.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, lo que permitió alcanzar una cobertura de tratamiento de aguas residuales municipales de 44.8%.

Los avances de la cobertura de tratamiento han venido incrementándose a lo largo del tiempo. En el año 2000 se contaba con una cobertura de 23%, cerrando en el año 2006 con una cobertura de 36.1% y como se mencionó anteriormente, en el último registro se contó con una cobertura de 44.8%.

La meta establecida en el Programa Nacional Hídrico 2007-2012 es llegar a una cobertura de 60% de las aguas residuales colectadas.

2.2. Núcleos de Población

El proceso de concentración de la población en las localidades urbanas ha dado como resultado su acelerado crecimiento, lo que ha implicado fuertes presiones sobre el medio ambiente y las instituciones, derivadas de la demanda incrementada de servicios como es el caso del agua. Viéndose cada vez más afectada por la falta de disponibilidad del recurso hídrico (Conagua, 2011).

Anualmente México recibe del orden de 1,489 miles de millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.1% escurre por los ríos o arroyos, y el 4.8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga

los acuíferos. Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con los países vecinos, así como la recarga incidental, anualmente el país cuenta con 460 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (Conagua, 2011).

2.3.1. Panorama General del Agua

El problema de la disponibilidad se incrementa, si la cantidad de agua se relaciona con la población, la disponibilidad de agua por habitante en metros cúbicos es de 10,900 para Canadá, 1,500 para Rusia, 10,000 para Estados Unidos, 5,200 para México y 160 para Arabia Saudita y Jordania.

El incremento constante en la demanda de agua se debe al incremento poblacional y la elevación de nivel de vida. Se espera que el total de agua consumida se incremente casi 10 veces, de 540 kilómetros cúbicos por año en 1990 aproximadamente 5400 kilómetros cúbicos por año para el año 2000 (FAO, 1994).

2.3.2. Clasificación de los Usos del Agua

El agua es empleada de diversas formas, prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para las prácticas habituales de subsistencia o para producir e intercambiar bienes y servicios.

En el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) se tienen registrados los volúmenes concesionados (o asignados, en el caso de volúmenes destinados al uso público urbano o doméstico) a los usuarios de aguas nacionales.

En dicho registro se tienen clasificados los usos del agua en 12 rubros, que para fines prácticos se han agrupado en cinco segmentos; cuatro de ellos corresponden a usos consuntivos, es decir el agrícola, el abastecimiento

público, la industria autoabastecida y las termoeléctricas, y por último el hidroeléctrico, que se contabiliza aparte por corresponder a un uso no consuntivo.

2.3.3. Principales Usos del Agua en México.

Los usos del agua para fines prácticos se han agrupado en cuatro grandes grupos corresponden a usos consuntivos el agrícola, el abastecimiento público, la industria y la generación de energía eléctrica, como se puede apreciar en la Figura 1. El principal uso agrupado del agua en México es el agrícola, el cual en términos de uso de aguas nacionales se utilizada para el riego de cultivos con un 76.7%.

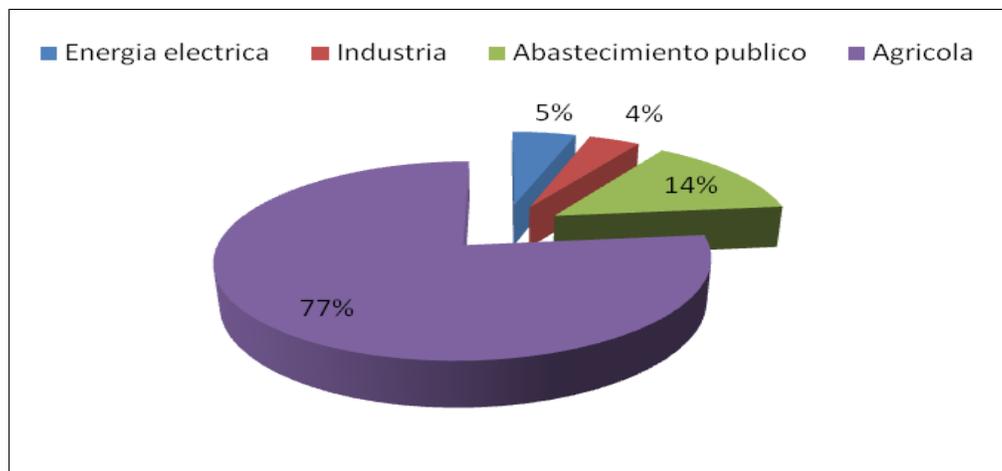


Figura 1. Distribución de Volúmenes Concesionados (Conagua, 2011)

En países en desarrollo como el nuestro, enfrentaremos una mayor competencia por el acceso al agua en las próximas décadas, debido al crecimiento demográfico, nuevos hábitos de vida y el desarrollo urbano e industrial sin una adecuada planificación. Es decir que se prevé un aumento en la demanda hacia las limitadas fuentes de agua. Así, la búsqueda de fuentes alternativas de agua, sobre todo para la agricultura, sector que demanda un mayor porcentaje, resulta de gran importancia.

Frente a este panorama, surge la necesidad de buscar nuevas alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales que sean de bajo costo y de requerimientos sencillos de operación y mantenimiento. Es decir, que sean acordes a nuestra realidad y sobre todo para los sectores urbanos y rurales, donde se concentran la mayoría de los puntos de descarga de aguas residuales y en los cuales la gestión sostenible de estas aguas se ha convertido en una demanda cada vez más urgente y que requiere una pronta respuesta tanto de los gobiernos municipales (Delgadillo *et al.*, 2008). Además, las características de estos sectores junto a la escasez de agua para riego, determinan que el reúso de aguas residuales para riego se convierta en una alternativa de actual y creciente importancia.

Entre las distintas tecnologías no convencionales existentes, los humedales artificiales son los que están experimentando un mayor grado de desarrollo e implantación, resultando una opción viable a la hora de obtener agua con una mejor calidad, debido principalmente a su elevada eficiencia en la disminución de materia orgánica, nutrientes y patógenos, reduciéndose los posibles efectos adversos de los vertimientos sobre los medios receptores (Llagas y Guadalupe, 2006).

2.4. Tipos de Humedales Artificiales

Existen dos tipos de humedales diseñados para el tratamiento de aguas residuales, humedales de flujo subsuperficial (SFS) y superficial (SF). En el denominado de flujo superficial, el agua circula por sobre la superficie del substrato y, en el de flujo subsuperficial, el agua circula a nivel de la superficie del lecho o por debajo del substrato (Llagas y Guadalupe, 2006).

2.4.1. Humedal Artificial de Flujo Superficial

Los sistemas de flujo superficial son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (0.1 m a 0.6 m) y tienen plantas (Figura 2).

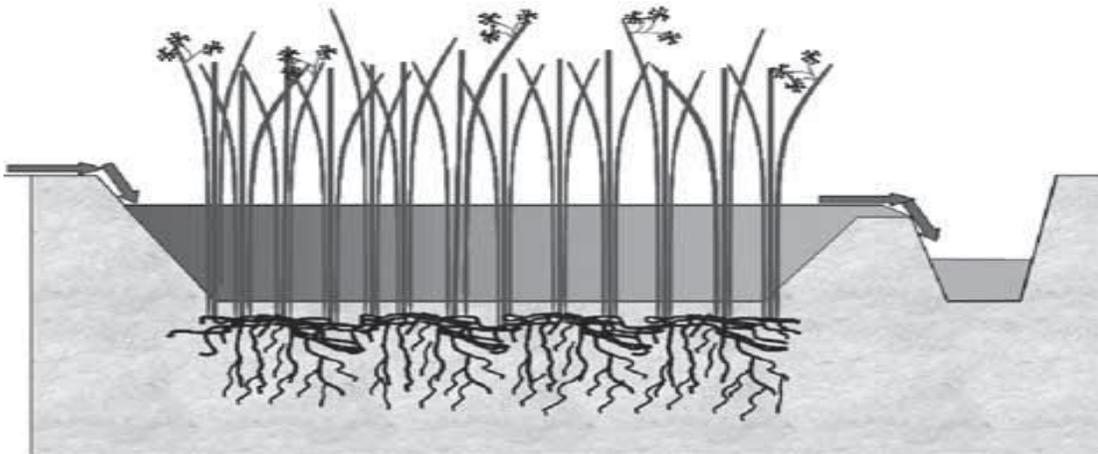


Figura 2. Humedal Artificial de Flujo Superficial

2.4.2. Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (FSS).

Los sistemas de flujo subsuperficial se caracterizan por que la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0.6 m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos: (a) en función de la forma de aplicación de agua al sistema: humedales de flujo subsuperficial horizontal y (b) humedales de flujo subsuperficial vertical como se muestra en la Figura 2. También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua.

Humedales flujo subsuperficial

1. Agua circula de forma subterránea
2. Agua circula entre los rizomas y raíces
3. Agua que trata es efluente primario



Figura 3. Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (Brix, 1994)

Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal.

La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias. La vegetación emergente se planta también en este medio granular (Kolb, 1998).

2.5. Eficiencia de Remoción en los Sistemas Naturales de Tratamiento

Estudios realizados en sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales indican que, con una buena operación de estos sistemas se consigue una elevada reducción de organismos patógenos de hasta el 99.9 por ciento (Lara, 2009).

El uso de estos sistemas también puede ser utilizado para el tratamiento de aguas residuales de industrias con elevada cantidad de materias biodegradables (lecheras, fábricas de conserva). Así también pueden generarse biomasa como son peces y plantas (Lara, 2009).

En el Cuadro 1 se puede observar los diferentes porcentajes de remoción de los humedales artificiales, mientras que en el Cuadro 2, se muestra los mecanismos de remoción.

Cuadro1. Porcentaje de Remoción de los Humedales Artificiales.

	HFH (Morel y Diener,2006)	HFV (Ridderstolpe, 2004)
DBO ₅	80-90%	90-99%
SST (Sólidos totales)	80-95%	90-99%
NT (Nitrógeno total)	15-40%	30%
PT(Fosforo total)	Las tasas de eliminación del fósforo dependen de las propiedades del material del filtro, de la longitud y del tiempo durante el cual el humedal ha estado operando.	

Cuadro2. Procesos que Permiten la Depuración del Agua Residual.

Contaminantes	Mecanismos de eliminación
Sólidos suspendidos	Sedimentación Filtración
Materia orgánica	Degradación microbiana aerobia Degradación microbiana anaerobia
Nitrógeno	Amonificación seguido por nitrificación microbiana y desnitrificación. Asimilación por parte de las plantas Adsorción principal Volatilización del amoniaco

Fósforo	Adsorción por parte del lecho Asimilación por parte de las plantas
Metales	Asimilación por parte de las plantas Intercambio iónico

2.6. Procesos de Depuración

Los humedales eliminan contaminantes mediante varios procesos que incluyen sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización (Stearman *et al.*, 2003).

El tratamiento de aguas residuales para depuración se realiza mediante sistemas que tienen tres partes principales: recogida, tratamiento y evacuación al lugar de restitución (Fernández *et al.*, 2004).

Los humedales construidos se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales tales como:

- ✓ Aguas domésticas y urbanas.
- ✓ Aguas industriales
- ✓ Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- ✓ Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.
- ✓ Tratamiento de fangos de depuradoras convencionales, mediante deposición superficial en humedales de flujo subsuperficial donde se deshidratan y mineralizan (García *et al.*, 2004).

El papel de las halófitas en los humedales artificiales se resume en los siguientes aspectos:

- ✓ Servir de filtro para mejorar los procesos físicos de separación de partículas (Valdés *et al.*, 2005).
- ✓ Asimilación directa de nutrientes (en especial Nitrógeno y Fósforo) y metales, que son retirados del medio e incorporados al tejido vegetal (LahoraCano, 2004).
- ✓ Actuar a modo de soporte para el desarrollo de biopelículas de microorganismos, que actúan purificando el agua mediante procesos aerobios de degradación (Valdés *et al.*, 2005).
- ✓ Transportar grandes cantidades de oxígeno desde los tallos hasta sus raíces y rizomas, donde es usado por dichos microorganismos (Lahora Cano, 2004).

2.6.1. Componentes del Humedal de Flujo Subsuperficial

Agua

La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal construido porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario decisivo en su éxito o fracaso.

Substrato.

En los humedales, el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava (Lara 1999).

Vegetación.

El principal beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (tallos, raíces y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de

manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión.

Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación (Arias, 2004).

Microorganismos.

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza y la desinfección (Arias, 2004).

Animales.

Los humedales construidos proveen un hábitat para una rica diversidad de invertebrados y vertebrados.

Los animales invertebrados, como insectos y gusanos, contribuyen al proceso de tratamiento del detritus al consumir materia orgánica. Los humedales construidos también atraen una gran variedad de anfibios, tortugas y mamíferos.

2.6.2. Plantas Frecuentes Utilizadas en los Humedales.

En la Figura 4 se pueden ver las plantas emergentes que frecuentemente se utilizan en los humedales:



Figura 4. Plantas Acuáticas Utilizadas

La espadaña es capaz de crecer bajo diversas condiciones medio ambientales, y se propaga fácilmente, por lo que representa una especie de planta ideal para un humedal artificial. Típicamente quitan cantidades grandes del nitrato y del fosfato. Los rizomas de espadaña plantados a intervalos de aproximadamente 60 cm (Mitch and Gosselink, 2000) como se muestra en la Figura 4.

La Figura 5 esquematiza la vegetación utilizada en humedales artificiales.



Figura 5. Scirpus Utilizada en Humedales Artificiales

Los *scirpus validus* pertenecen a la familia de las ciperáceas, son perennes y crecen en grupos. Son plantas que crecen en un rango diverso de aguas interiores y costeras, pantanos salobres y humedales. Los juncos son capaces de crecer bien en agua desde 5 cm a 3 m de profundidad. Se encuentran juncos creciendo en un pH de 4 a 9, la mayoría de las especies tienen un crecimiento moderado y pueden lograr un buen cubrimiento en alrededor de un año con separaciones de 30 cm (Mitch and Gosselink, 2000).



Figura 6. Carrizos Utilizados en la Depuración de Aguas Residuales

Phragmites australis son plantas altas con raíces profundas, que permiten más oxígeno a alcanzar la zona de raíz que las dos plantas descritas previamente (Mitch and Gosselink, 2000).

Los carrizos son muy usados para humedales artificiales porque presentan la ventaja de que tienen un bajo valor alimenticio, y por tanto, no se ven atacadas por animales como otros tipos de plantas (Figura 6).

2.7. Mecanismos de Remoción

Los mecanismos básicos de tratamiento son tamizado, sedimentación, precipitación química, adsorción y degradación microbiológica de la DBO_5 y del nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación (Mena *et al.*, 2008).

En la Figura 7 de puede observar detalladamente los proceso que se llevan a cabo para la eliminación de contaminantes de las aguas residuales.

Entre los principales mecanismos se encuentran los siguientes:

- ✓ Remoción de DBO_5
- ✓ Remoción de SST
- ✓ Remoción de Nitrógeno
- ✓ Remoción de Fósforo

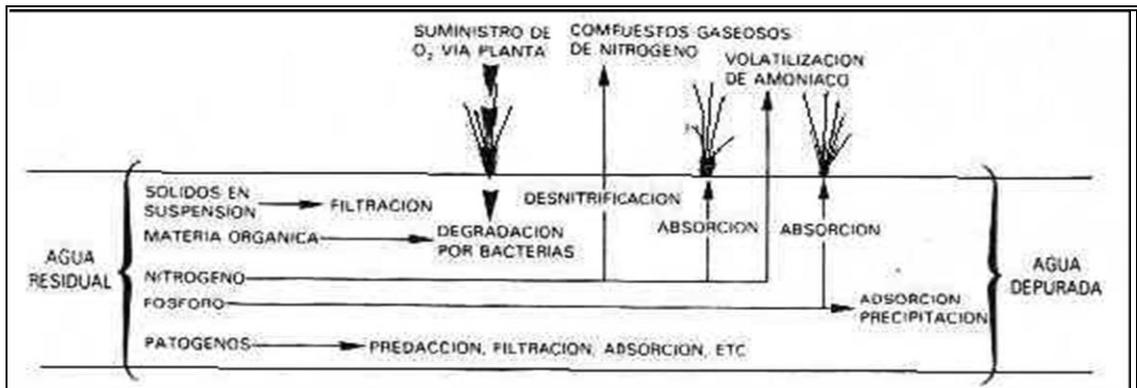


Figura 7. Mecanismo de Remoción en los Humedales.

2.7.1. Posibles Usos del Agua Tratada

La contaminación del agua hace que la disponibilidad del recurso sea limitada en muchas regiones del país principalmente para consumo humano y recreativo. La sobresaturación de carga orgánica desequilibra sobre los ecosistemas acuáticos genera condiciones anóxicas (sin oxígeno) de difícil recuperación que limitan la vida de las comunidades acuáticas y generan

procesos de eutroficación de lagos y lagunas por sobre-abundancia de nutrientes (nitrógeno y fósforo).

Una vez determinado los parámetros necesario para la utilización se procede a clasificar el tipo de reutilización del agua tratada tomando el grado de contaminación que estable los límites máximos permisibles. Ya sea para descarga a los cuerpos de agua o para la reutilización en cultivos como el maíz, forrajes entre otros.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del Sitio.

La instalación se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en Buenavista, Saltillo, Coahuila México, ubicada entre las coordenadas geográficas 25° 21'18" latitud Norte y 101° 25' longitud Oeste, con 1767 metros sobre el nivel del mar (msnm). El clima de la región es seco desértico. La temperatura media anual fluctúa entre 11.28 y 15.29 °C, siendo frecuente los frentes fríos en invierno. El sistema de tratamiento se encuentra ubicado a un extremo de la laguna de oxidación, entre prácticas de emprendedores y el jardín botánico como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Localización del Sistema Natural de Tratamiento

3.2 Descripción del Sistema Natural de Tratamiento

Para el tratamiento del agua residual estos sistemas se basan prácticamente en procedimientos naturales de depuración que no emplean aditivos químicos y que eliminan las sustancias contaminantes usando vegetación acuática, el suelo y microorganismos (Seguí, 2004).

El sistema de tratamiento consta de los siguientes componentes (Figura9).



Figura 9. Sistema de Tratamiento

1). Se utilizaron 3 toneles con dimensiones de 0.8 m de alto, 0.6 m ancho con un volumen de 0.2 m³ de capacidad por cada tonel (Figura 9), los cuales se instalaron en serie, que se conectaron mediante tubos de policloruro de vinilo (PVC) con diámetro de 0.0254 m, y una separación entre toneles de 1 m.

2). Se colocaron válvulas (Figura 10) para toma de muestras en la entrada y a la salida de cada módulo, además de válvulas reguladoras de gasto que ingresa al sistema. Para el flujo vertical, la alimentación se realizará

uniformemente sobre la superficie, y la recogida a lo largo y ancho de todo el fondo.



Figura 10. Válvula para Toma de Muestras

3). En cada tonel se instaló en la parte superior e inferior una cruceta (Figura 11) que consiste en tuberías ensambladas con una cruceta de PVC y un tapón al final de cada tubo; las cuales se les perforó a 5 cm de distancia. Permitiendo el flujo de agua uniformemente evitando zonas muertas que puedan afectar en el proceso de tratamiento.



Figura 11. Instalación de Crucetas

4). Los toneles se rellenaron con grava triturada (Figura 11) de 20 mm de diámetro a 0.8 m de altura posteriormente se le plantará alcatraz. Esto permitirá la entrada de oxígeno al sistema por medio del sistema radicular de la planta y de esta manera tener una mayor actividad aerobia.

5). El sistema de abastecimiento es un tanque Imhoff que se ubica a aproximadamente a 80 m de distancia con son aguas provenientes del Laboratorio de Calidad de Semillas, y del Departamento de Producción las cuales son aguas residuales con una mínima cantidad de carga orgánica. La carga hidráulica es de 4 metros a favor lo que permitirá un buen funcionamiento del sistema.

El tanque Imhoff (Figura 12) es una unidad de tratamiento primario que consta de las siguientes medidas 7.75 de largo y 4.45 de ancho. Es un sistema de tratamiento primario que utiliza la fuerza de gravedad para separar sólidos del agua residual en un proceso conocido como sedimentación primario (McLean, 2008).



Figura 12. Tanque Imhoff

3.3. Lista de Materiales

Para la construcción del humedal artificial fueron necesarios diferentes materiales como se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Accesorios Utilizados para la Construcción

Descripción	Unidad	Cantidad
Válvula Globo 1"	PZA	1
Codo 1"	PZA	5
Crucetas 1"	PZA	6
Adaptador macho 1"	PZA	6
Adaptador hembra 1"	PZA	6
Toneles C/ 200 L de capacidad	PZA	3
Manguera Polietileno 1"	M	1
Block	PZA	40
Grava	M ³	1
Cinta Teflón	PZA	2
Conector c/abrazadera 1"	MT	2
Pegamento	LT	1
Válvula de muestreo	PZA	2
Tee. Rosca 1" x 1/2"	PZA	2
Tubo Hid. Metr. c/c 1"	M	3

3.4. Rendimientos Esperados

Estos sistemas tienen altos rendimientos en la remoción de carga orgánica y de contaminantes si están bien diseñados, mediante varios procesos que incluyen sedimentación, degradación microbiana acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización.

De acuerdo a Knight *et al.* (1994), los rendimientos que se esperan obtener son:

- Remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) 80%
- Remoción de Sólidos Suspendedos Totales (SST) 96%
- Remoción de Nitrógeno Total (NT) 27%
- Remoción de Fósforo Total (FT) 38%

3.5. Ventajas de los Humedales Artificiales

Entre algunas de ventajas de estos sistemas se encuentran:

Altos rendimientos en la disminución DBO₅, sólidos en suspensión, nutrientes y patógenos.

Permite regular y almacenar agua que por sus características es sanitaria y agrícolamente apta para el riego.

La retirada de lodos se realiza cada 5-10 años, dependiendo del agua residual (Moreno, *et al.*, 2003).

3.6. Desventajas de los Humedales Artificiales

Las desventajas que se pueden mencionar es que estos sistemas, un buen diseño, contaminantes que se desean eliminar, así como también la producción de elevadas pérdidas de agua por evaporación.

Las aguas depuradas presentan una elevada concentración de algas y son de difícil adaptación a los cambios climáticos (Moreno, *et al.*, 2003).

3.7. Parámetros de Diseño

Las reglas de diseño aplicadas abundan en la literatura, sin embargo, muchas de las cuales son interpretaciones empíricas que no tienen el conocimiento de la física del movimiento del agua y es frecuente la aplicación incorrecta de las relaciones fundamentales entre la pérdida de carga y el gasto (Kadlec and Wallace, 2008). Así mismo, están basadas en observaciones de un amplio rango de sistemas, condiciones climáticas y tipos de agua residual, dando como resultado modelos de diseño muy conservadores que garantizan una buena calidad de agua en el efluente, sin embargo, tienden a incrementar los costos de inversión (Rousseau *et al.*, 2004) para el diseño de sistemas de humedales construidos por flujo sub y superficial. Algunos criterios para las reglas de diseño se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro4. Reglas de Diseño Para Pantanos de Flujo Subsuperficial (Halverson, 2004).

Criterio	Rango del valor			
	ITRC (2003) y Tchobanoglous y Burton (1991)	WPCF (1990)	Wood (1995)	Kadlec y Knight (1996)
<u>Pantano de flujo subsuperficial</u>				
Tiempo de retención hidráulico (d)	4 - 15	NA	2 – 7	2 – 4
Tasa de carga hidráulica (cm d ⁻¹)	NA	2 – 20	0.2 - 3.0	8 – 30
Profundidad (cm)	49 - 79	NA	ND	30 – 60
Requerimiento de área calculado (m ² m ⁻³ d ⁻¹)	4.05 - 32.37	4.05 - 40.47	8.09 - 68.80	3.23 - 12.14

Pantano de flujo

superficial

Tiempo de retención hidráulico (d)	4 - 15	ND	ND	7 - 10
Tasa de carga hidráulica (cm d ⁻¹)	NA	0.7 - 5	ND	1.5 - 6.5
Profundidad (cm)	9 - 60	NA	ND	15 - 45
Requerimiento de área calculado (m ² m ⁻³ d ⁻¹)	8.09 - 161.87	20.23-121.40	ND	16.19 - 80.93

NA, No Aplica; ND, No dado por la fuente

3.8. Diseño Hidráulico del Sistema

3.8.1. Ecuaciones de Primer Orden

Se asume frecuentemente que el funcionamiento de los pantanos construidos sea descrito por un modelo de diseño de cinética de primer orden para un reactor de flujo pistón (Ec. 1) (Rousseau *et al.*, 2004), el cual es un reactor sin mezcla a contra flujo, y de esta forma toda la fracción de flujo reside dentro de la unidad por un periodo de tiempo igual al tiempo teórico de detención hidráulico, esto corresponde al volumen de la unidad entre el gasto. Sin embargo, se ha demostrado que las limitaciones de estos modelos son debido principalmente a la alta dependencia de sus parámetros a la carga hidráulica y a las concentraciones iniciales (Kadlec, 2000).

Demanda Bioquímica del Oxígeno (DBO₅): Mide el oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia. El periodo de incubación tras el cual se realiza la medición suele ser de 5 días, comparándose el valor obtenido con el original presente en la muestra.

Para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) se utilizó una ecuación de primer orden que considera concentraciones de entrada y salida (E/S). Una constante de reacción (K_T) y el tiempo de retención hidráulico (t). Como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t} \quad \text{----- (Ec.1)}$$

Donde:

C_e = Concentración del contaminante en el efluente, mg L⁻¹

C_o = Concentración del contaminante en el influente, mg L⁻¹

T = tiempo de retención hidráulico, d

La constante de reacción de primer orden (Ec. 2) se calcula con:

$$K_T = K_{20} (1.06)^{(T-20)} \quad \text{----- (Ec.2)}$$

K_T = Constante de reacción de primer orden

K₂₀ = Constante 0.2779 cm d⁻¹

T = Temperatura media en °C

Para obtener el tiempo de retención hidráulica (t) se despeja de la ecuación 1 quedando de la siguiente forma:

$$t = \frac{\ln \frac{C_e}{C_o}}{-K_T} \quad \text{----- (Ec.3)}$$

Donde:

C_e = Concentración del contaminante en el efluente, mgL⁻¹

C_o = Concentración del contaminante en el influente, mgL⁻¹

K_T = Constante de reacción de primer orden

Una vez obtenido el valor aproximado de las concentraciones de entrada y salida y el tiempo de retención hidráulico del sistema de tratamiento, se calcula el gasto que se introducirá en el humedal artificial considerando un volumen real del sistema, y un tiempo de retención hidráulico para obtener el gasto utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\text{vol}}{t} \text{----- (Ec.4)}$$

Donde:

Vol = Volumen real del sistema de tratamiento, m³

T = tiempo de retención hidráulico, d⁻¹

La siguiente es la ecuación básica de los reactores de flujo a pistón para la remoción de fósforo total en la que se considera una constante de reacción K_P y una carga hidráulica CH.

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-\frac{K_P}{CH}} \text{----- (Ec.5)}$$

Donde

C_e = Concentración de fósforo en el efluente, mg L⁻¹

C_o = Concentración de fósforo en el influente, mg L⁻¹

K_P = 2.74 cm d⁻¹

CH = Carga hidráulica promedio anual, cm d⁻¹

Despejando la carga hidráulica de la ecuación original en este caso la Ecuación 3, queda de la siguiente manera.

$$CH = \frac{-K_P}{\ln \frac{C_e}{C_o}} \text{----- (Ec.6)}$$

Tomando en cuenta que las condiciones locales son diferentes a los que el autor menciona (Vymazal, 1998). Los cuales pueden variar pero en este caso se tomaron para calcular valores aproximados de los diferentes contaminantes (DBO₅, SST, NT, FT).

3.8.2. Ecuaciones de Regresión Lineal.

La mayoría de las investigaciones en pantanos construidos están enfocadas en datos de entrada y salida, más que en los datos del proceso de tratamiento dando lugar a modelos empíricos o ecuaciones de regresión que parecen ser una buena herramienta en la interpretación de los datos. Sin embargo, estos modelos de caja negra simplifican demasiado el complejo proceso de tratamiento en solo dos o tres parámetros y aquellos importantes como el clima, temperatura, precipitación, forma y tamaño del pantano no son tomados en consideración. Rousseau y colaboradores (2004), hacen una excelente revisión de modelos basados, entre otros, en demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno (N) y fósforo (P) total en pantanos construidos, basados en ecuaciones de regresión, las cuales se muestran algunos ejemplos (Ecs.5,6,7,8).

Ecuación utilizada para la remoción de DBO₅ (Vymazal, 1998)

$$C_{out} = (0.099 * C_{in}) + 3.24 \text{ ----- (Ec.7)}$$

Donde:

C_{out} = Concentración de salida mg L⁻¹

C_{in} = Concentración de entrada mg L⁻¹

Para la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) se utilizó la siguiente ecuación (Vymazal, 1998).

$$C_{out} = (0.099 * C_{in}) + 9.17 \text{ ----- (Ec.8)}$$

Donde:

C_{out} = Concentración de salida $mg L^{-1}$

C_{in} = Concentración de entrada $mg L^{-1}$

Ecuación para la remoción de nitrógeno total (NT) según (Vymazal, 1998)

$$C_{out} = (0.099 * C_{in}) + 7.68 \text{-----} \text{ (Ec.9)}$$

C_{out} = Concentración de salida $mg L^{-1}$

C_{in} = Concentración de entrada $mg L^{-1}$

Y en la remoción de fósforo total se utilizó la ecuación (Vymazal, 1998):

$$C_{out} = (0.099 * C_{in}) + 0.71 \text{-----} \text{ (Ec.10)}$$

C_{out} = Concentración de salida $mg L^{-1}$

C_{in} = Concentración de entrada $mg L^{-1}$

3.9. Construcción del Sistema de Tratamiento

La construcción de un pantano para el tratamiento del agua residual puede tener un buen funcionamiento si cada uno de sus componentes estén bien diseñados y construidos evitando fallas que se puedan presentar en la operación del pantano.

La construcción de humedales artificiales se realizó utilizando 3 toneles, los cuales se instalaron en serie; cada parte del sistema de tratamiento fue ensamblado minuciosamente, para evitar fugas o imperfectos que le puedan ocasionar un mal funcionamiento del sistema de tratamiento.



Figura 13. Instalación de Válvula Reguladora de Gasto

Para estos sistemas el medio granular es de suma importancia ya que en ellas es donde el agua va a tener flujo el agua residual y por consiguiente su depuración.



Figura 14. Medio Granular Utilizado

El sistema de abastecimiento debe estar ubicado en un punto estratégico ya que no se le suministra ningún tipo de energía en el funcionamiento del humedal artificial.



Figura 15. Localización del Sitio de Instalación



Figura 16. Detalle de Ensamblado de los Toneles



Figura 17. Ensamble de Crucetas



Figura 18. Válvulas para Toma de Muestras.

Para la toma de muestras se colocaron válvulas al inicio y al final del sistema.



Figura 19. Sistema de Tratamiento Terminado

3.9.1. Operación y Mantenimiento.

Entre los puntos más importantes a tomar en cuenta para un buen funcionamiento de los humedales artificiales se mencionan los siguientes puntos importantes:

- ✓ Asegurar que el flujo alcance todas las partes del humedal.
- ✓ Mantener un crecimiento vigoroso de la vegetación.
- ✓ Proporcionar una amplia oportunidad para el contacto del agua con la comunidad microbiana, con la capa de residuos de vegetación y con el sedimento.

Los pantanos construidos, como se ha discutido anteriormente, son sistemas de bajo costo en construcción, operación y mantenimiento. Sin embargo, para el óptimo desempeño de tratamiento, hay actividades de monitoreo y ajustes que deben de realizarse con frecuencia, entre las que destacan, evaluación del gasto de entrada y salida, niveles y calidad del agua, y parámetros biológicos (Kadlec and Knight, 1996).

IV.RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Modelo para la Remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno.

La remoción de la materia orgánica ocurre inicialmente de manera física por sedimentación debido a la baja velocidad que se maneja en el humedal, por retención y depositación gracias al proceso de filtración que sufre el agua residual al atravesar el medio poroso. La materia orgánica soluble en el agua es removida gracias a los microorganismos y al requerimiento de nutrientes por parte de las macrófitas del humedal (Sanabria, 2009).

Aplicación de la ecuación de primer orden a la remoción de DBO_5 . Tomando la ecuación básica (Ec.1) de reactores de flujo pistón y considerando que el valor aproximado de la DBO_5 es el 50% (Arce, *et al.*, 2007) del valor de la DQO; y según Guzmán (2013), la DQO a la salida del tanque imhoff, que es el influente del sistema vertical, la $DQO = 160.84 \text{ mg L}^{-1}$; $DBO_5 = 160.84 \text{ mg L}^{-1} * 0.5 = 80 \text{ mgL}^{-1}$; Los rendimientos esperados por el sistema vertical es de 80%; sin embargo la NOM-001-ECOL-1996, marca como límite 20 mg L^{-1} . La temperatura promedio del agua residual es de 19°C (Guzmán, 2013) se tiene la siguiente ecuación.

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t}$$

Despejando para el tiempo:

$$t = \frac{\ln \frac{C_o}{C_e}}{-K_T}$$

Donde:

$$K_T = K_{20} (1.06)^{19-20} \text{ (Henze y col., 1995)}$$

$$K_{20} = 0.2779 \text{ d}^{-1} \text{ (USEPA, 1993)}$$

$$\text{Por lo que } K_T = 0.2779 \text{ d}^{-1} (1.06)^{19-20}$$

$$K_T = 0.2621 \text{ d}^{-1}$$

Una vez determinado la constante de reacción de primer orden se sustituye valores en Ec. 8 tomado como límite mínimo permisible en la salida 20 mg L⁻¹ según la norma NOM-001-ECOL-1996.

$$t = \frac{\ln \frac{20 \text{ mgL}^{-1}}{80 \text{ mgL}^{-1}}}{-0.2621 \text{ d}}$$

$$t = 5 \text{ d}$$

Para calcular el gasto que se va a introducir al sistema primeramente se necesita conocer el volumen real del sistema de tratamiento así como también el tiempo de retención hidráulico.

$$Q = \frac{\text{Vol}}{t}$$

En donde el volumen real será:

$$\text{Vol} = \text{Área} * \text{Profundidad} * \text{Porosidad} * \# \text{ de toneles}$$

$$\text{Vol} = \frac{\Pi * d^2}{4} * 0.8 \text{ m} * 0.5 * 3$$

$$\text{Vol} = 0.3393 \text{ m}^3$$

Por lo que sustituyendo valores en (Ec.4)

$$Q = \frac{0.3339 \text{ m}^3}{5 \text{ d}} = 0.067 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \quad Q = 67 \text{ L d}^{-1}$$

4.1.2. Modelo para la Remoción de Sólidos Suspendidos Totales.

Las eficiencias de remoción de sólidos suspendidos totales son similares a las obtenidas para DBO₅. Eficiencias de remoción del 80 - 90% se reportan para cargas orgánicas. El tiempo de retención hidráulico crítico para lograr eficiencias de remoción mayores a 70% aparece sobre los 7 días. Niveles usuales de sólidos suspendidos (SS) en el efluente se encuentran por debajo de 10 mg L⁻¹. (Sanabria, 2009).

Tomando la ecuación básica (Ec.1) de reactores de flujo pistón y considerando un valor de 400 mg L⁻¹ de sólidos suspendidos (Guzmán 2013); a la salida del tanque imhoff. Los rendimientos esperados por el sistema vertical son de 96%; sin embargo la NOM-001-ECOL-1996, marca como límite 20 mg L⁻¹. La temperatura promedio del agua residual es de 19°C (Guzmán, 2013) se tiene lo siguiente.

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t}$$

Despejando el tiempo:

$$t = \frac{\ln \frac{C_o}{C_e}}{-K_T}$$

Donde $K_T = K_{20} (1.06)^{T-20}$ (Henze y col., 1995)

$K_{20} = 0.2779 \text{ d}^{-1}$ (USEPA, 1993)

Por lo que $K_T = 0.2779 (1.06)^{19-20}$

$K_T = 0.2621 \text{ d}^{-1}$

Sustituyendo los valores en la (Ec.3) tomando como la concentración de entrada 20 mg L⁻¹ tomado de la norma NOM-001-ECOL-1996 que marca como límite máximo permisible.

$$t = \frac{\ln \frac{20\text{mgL}^{-1}}{400\text{mgL}^{-1}}}{-0.2621\text{d}}$$

$$t = 11 \text{ d}$$

De igual forma que el parámetro anterior se determina el gasto del sistema de tratamiento una vez obtenido el tiempo de retención hidráulico utilizando la Ec.4.

$$Q = \frac{0.3339 \text{ m}^3}{11 \text{ d}} = 0.030 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \quad Q = 30 \text{ L d}^{-1}$$

4.1.3. Modelo para la Remoción de Nitrógeno Total.

La remoción de nitrógeno total está relacionada con el tiempo de retención hidráulico y decrece significativamente en diseños con tiempos de retención menores a 5 días (Sanabria, 2009).

Tomando la ecuación básica (Ec.1) de reactores de flujo pistón y considerando que el valor de 40 mg L⁻¹ de nitrógeno; tomado de análisis típico del agua residual municipal (Metcalf y Eddy, 1998). Los rendimientos esperados por el sistema vertical es de 27%; sin embargo la NOM-001-ECOL-1996, marca como límite 40 mg L⁻¹ para uso en riego agrícola. La temperatura promedio del agua residual es de 19°C (Guzmán, 2013) se tiene lo siguiente:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t}$$

Despejando para el tiempo:

$$t = \frac{\ln \frac{C_o}{C_e}}{-K_T}$$

Donde $KT = K_{20} (1.06)^{T-20}$ (Henze y col., 1995)

$$K_{20} = 0.2779 \text{ d}^{-1} \text{ (USEPA, 1993)}$$

Por lo que $KT = 0.2779 (1.06)^{19-20}$

$$KT = 0.2621d$$

En este caso como no se tiene datos sobre la cantidad de nitrógeno del tanque imhoff se tomo como referencia la concentración del contaminante en la entrada según la norma NOM-001-ECOL-1996 que marca como límite máximo permisible 40 mg L⁻¹ de nitrógeno.

$$C_{out} = (0.099 * C_{in}) + 7.68$$

$$C_{out} = (0.099 * C_{in}) + 7.68$$

$$C_{out} = (0.099 * 40) + 7.68 = 11.64 \text{ mg L}^{-1}$$

Para calcular la concentración a la salida del influente se utilizó la ecuación Ec.9 según (Vymazal, 1996)

Una vez despejado el tiempo en la ecuación de flujo a pistón se sustituyen valores en la Ec.3.

$$t = \frac{\ln \frac{11.64 \text{ mgL}^{-1}}{40 \text{ mgL}^{-1}}}{-0.2621 d}$$

$$t = 4.7 d \approx 5 d$$

Para el cálculo del gasto del sistema se utilizó la Ec.4 como en los demás parámetros utilizando el mismo volumen, pero diferente tiempo de retención hidráulico.

$$Q = \frac{\text{Vol}}{t} = \frac{0.3339 \text{ m}^3}{5 d}$$

$$Q = 67 \text{ L d}^{-1}$$

4.1.4. Modelo para la Remoción de Fósforo Total.

Basados en el análisis de los datos de la North American Data Base, (Kadlec, 2003) ha propuesto una constante de primer orden igual a 10 m año^{-1} para estimar la remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales. Los 10 m año^{-1} son equivalentes a un promedio diario de $2,74 \text{ cm d}^{-1}$ que es lo que se usa en la siguiente ecuación (Silva y Zamora, 2005).

Donde C_e y C_o son las concentraciones de fósforo en el efluente e influente respectivamente, es la carga hidráulica promedio anual (cm d^{-1}) y equivale a $2,74 \text{ cm d}^{-1}$.

Tomando la ecuación básica (Ec.1) de reactores de flujo pistón y considerando que el valor de 8 mg L^{-1} de fósforo total. Los rendimientos esperados por el sistema vertical son de 27%. La temperatura promedio del agua residual es de 19°C (Guzmán, 2013) se tiene lo siguiente.

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-\frac{K_P}{CH}}$$

Despejando la carga hidráulica se tiene:

$$\ln \frac{C_e}{C_o} = -\frac{K_P}{CH}$$

$$CH = \frac{-K_P}{\ln \frac{C_e}{C_o}}$$

Donde K_P es una constante de reacción equivalente a 2.74 cm.d^{-1} (Kadlec, 2003)

Como no se tiene datos de la concentración de fosforo en la salida del tanque imhoff se procede a estimarlos con la siguiente ecuación (Vymazal, 1988)

$$C_{out} = (0.099 * C_{in}) + 0.71$$

C_{out} = Concentración de salida mg L^{-1}

C_{in} = Concentración de entrada mg L^{-1}

$$C_{out} = (0.099 * 8 \text{ mg L}^{-1}) + 0.71$$

$$C_{out} = 1.50 \text{ mg L}^{-1}$$

Sustituyendo valores en la (Ec. 4).

$$CH = \frac{-K_P}{\ln \frac{C_e}{C_o}}$$

$$CH = \frac{-2.74 \text{ cm d}^{-1}}{\ln \frac{1.5 \text{ mg L}^{-1}}{8 \text{ mg L}^{-1}}}$$

$$CH = 1.63 \text{ cm d}^{-1}$$

Una vez calculada la carga hidráulica se procede a calcular el gasto del sistema con la siguiente ecuación:

$$A = \Pi * (0.30)^2 \qquad A = 0.2827 \text{ m}^2$$

$$Q = A * V$$

Donde:

$$Q = \text{Gasto } \text{m}^3$$

$$A = \text{Área del humedal } \text{m}^2$$

$$V = \text{Velocidad del flujo } \text{cm d}^{-1}$$

Sustituyendo valores en la ecuación anterior se tiene lo siguiente.

$$Q = 0.2827 * 0.0163$$

$$Q = 0.0046 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \approx 4.6 \text{ L d}^{-1}$$

Con el gasto y el volumen del sistema de procede a calcular el tiempo de retención hidráulica.

$$t = \frac{\text{vol}}{Q} \quad t = \frac{0.3339 \text{ m}^3}{0.0046 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}}$$

$$T = 72.5 \text{ d} \approx 73 \text{ d}$$

En este caso como el tiempo de retención hidráulico es demasiado grande, se determina que los humedales artificiales no son muy eficientes en la remoción de este contaminante ya que implica un proceso de depuración muy tardado y sobre todo compleja siendo muy difícil de remover.

Y también las concentraciones que se manejan son muy bajas es por eso que no pueden remover de manera natural.

De acuerdo a los resultados obtenidos la hipótesis se aprueba debido que es fácil, rápido y factible la construcción de un sistema natural de tratamiento y por último y el menos importante conocer de diseño de humedales artificiales que en la literatura abunda.

V.CONCLUSIONES

El sistema de tratamiento de aguas residuales propuesto es completamente natural, no habría ruidos por motores, consumo de energía eléctrica, contaminación del aire, entre otros.

Al realizarse el proyecto propuesto, se alcanzará un gran beneficio para el ecosistema y un aporte valioso para el desarrollo de la institución por la importancia que tiene la depuración y reutilización de las aguas residuales de la UAAAN.

Comprometiéndose cada vez con el cuidado del medio ambiente y haciendo un uso más eficiente del agua, ya que esta no puede considerarse como un recurso inutilizable ya que contiene algunos componentes que se podrían reutilizar como es el caso del agua.

Los humedales artificiales son una buena alternativa para el tratamiento del agua residual, a bajo costo en construcción, operación y mantenimiento, tratando el agua por medio de procesos físicos, químicos y biológicos.

A grandes rasgos la construcción y diseño de un sistema natural de tratamiento es muy factible, rápido ya que los materiales utilizados son muy comunes y fáciles de adquirir.

VI.RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar más estudios e investigaciones para adecuar los modelos de diseño a las condiciones locales y analizar sus comportamientos con otros factores aparte de la temperatura que pueden variar las eficiencias como lo son las plantas autóctonas, tipos de suelo, entre otros.

Es muy importante que exista una buena fase de operación y mantenimiento ya que por tratarse de un sistema poco común en el medio es preferible que no se presenten inconvenientes mantener un flujo constante del agua, verificar el lugar donde se instalará ya que no se le aplicará ningún tipo de energía para su funcionamiento.

En el caso de que se requieran para el riego de algunos cultivos se deben considerar las normas NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales.

La reutilización del agua tratada para el riego de cultivos así como jardinerías de la institución.

Llevar a cabo pruebas de laboratorio para evaluar las eficiencias de remoción.

Realizar pruebas de trazadores para calcular la hidrodinámica del sistema.

VII.BIBLIOGRAFÍA

- Arias, C. (2004). Phosphorus removal in constructed wetlands: Can suitable alternative media be identified. Vol.2. pp. 655-662. 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Avignon (France)
- Arce, V. Al., Calderón Molgora CG. y Tomasini, O. AC. 2007. Fundamentos Técnicos para el Muestreo y Análisis de Aguas Residuales. Serie Autodidáctica de Medición de la Calidad del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA y de la Subdirección General de Administración del Agua, CNA.
- Brix H. (1994). Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. *Wat. Sci. Tech.*, 30 (8), 209-223.
- Conagua. (Comisión Nacional del Agua). 2007. Identificación de Sistemas Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. Pág. 7-27.
- Conagua. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2011. Octubre de 2011. México, D. F. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, 2011. 96pp.
- Coleman, J., Hench, K., Garbutt, K., Sexstone, A., Bissonnette, G and Skousen, J. (2000). Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetland. Department of Biology, West Virginia University, Morgantown. 128: 283-295.
- Crites, R. W., Tchobanoglous G. (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*, McGraw Hill Co., New York, NY.
- Delgadillo, O., M. Andrade, A. Camacho, L. Pérez y R Argote 2008 "Zonas húmedas construidas, una tecnología natural para la depuración de aguas residuales con fines de riego en municipios rurales y periurbanos" ponencia presentada en la "Reunión sudamericana para manejo y sustentabilidad de riego en regiones áridas", Salvador, Bahía-Brasil, del 21 al 23 de octubre de 2008.
- Esponda. A. (2001) Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo artificial para el tratamiento de aguas residuales. Tesis de licenciatura. Facultad de Química, Universidad Autónoma Nacional de México, México. *Rev.Int.Contam.Ambient.*25 (3)157-167.

- Fernández, J. et al. 2004 Manual de fitodepuración, Ayuntamiento de Lorca, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- FAO, 1993 .El estado mundial de la agricultura y alimentación
- García, E et al. 2004. Tratamiento de aguas industriales: Análisis microbiológico de aguas residuales, Fundación Universitaria Iberoamericana. Barcelona.
- Galvis, A., Cardona, D., Bernal, D. (2005). Modelo conceptual de selección de tecnología para el control de contaminación por aguas residuales domésticas en localidades colombianas menores de 30.000 habitantes. Instituto Cianara. Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle. Cali. Colombia.
- García, J., Corzo, A. (2008) Depuración con humedales construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial.
- Halverson, N.V. (2004). Review of Constructed Subsurface Flow vs. Surface Flow Wetlands. WSRC-TR-2004-00509. Westinghouse Savannah River Com
- García, J., Corzo, A. (2008) Depuración con humedales construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial.
- Henze, M., Harremoës, P., LaCour Jansen, J. y Arvin, E. Wastewater Treatment, Biological and Chemical Processes. Springer, Heidelberg, 1995.
- Kadlec, R. H. (2003). The limits of phosphorus removal wetlands. *Wetlands ecol. Manag.* 7, pp 165-175.
- Kadlec, R.H., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. y Haberl, R. Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. IWA Specialist Group On use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing, 2000.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996). *Treatments Wetlands*. CRC Press, ISBN. 0-87371-930-1. Boca Raton, E.U.A. 893 p.
- Kadlec, R.H. and Wallace, S. (2008) *Treatment Wetlands*. CRC Press (2da ed.) Boca Raton, E.U.A. 1015 p.

- Mitsch, William J., and James G. Gosselink. Wetlands. 3rd Edition ed. New York: John Wiley and Sons, Inc, 2000.
- Kolb, P. 1998. Design of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós, Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur, Universität für Bodenkultur.
- Knight, R. L., R. W. Ruble, R. H. Kadlec, and S. C. Reed. 1994. Wetlands Treatment Database (North American Wetlands for Water Quality Treatment Database). USEPA, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH., The Database is available on 3.5" diskette, and requires DOS 3.3 or higher, 640k of memory, and 4MB of free disk space. To order, contact: Don Brown, USEPA (MS-3471), Cincinnati OH 45268; phone: (513) 569-7630; fax: (513) 569-7677; e-mail: brown.donald@epamail.epa.gov.
- Lara, B. J. A. 2009. Introducción a los Sistemas Naturales de Tratamiento de Aguas Residuales, Bogotá, D.C. Colombia. En línea: <http://www.slideshare.net/jalarab/introduccion-sistemas-naturales-presentation>.
- Moreno, M. L., Fernández J. M. A., Rubio C. J. C., Calaforra, Ch. J. M., López G. J. A., Beas T. J., Alcaín, M. G., Murillo, D. J. M. y Gómez L. J. A. 2003. La Depuración de Aguas Residuales Urbanas de Pequeñas Poblaciones Mediante Infiltración Directa en el Terreno Fundamentos y Casos Prácticos. http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/indice.htm consultado en septiembre del 2011.
- Mena, j., Rodríguez, L., Núñez, j., Fernández, F.J., y Villaseñor, J. Design of horizontal and vertical subsurface flow constructed wetlands treating industrial wastewater. Proceedings of the Ninth International Conference on Modeling, Monitoring and Management of Water Pollution. Witpress, 2008, 672pp.
- Norma Oficial Mexicana NOM-003- SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de septiembre de 1998. México. pp12
- U.S.EPA. Environmental Protection Agency. Design Manual Constructed Wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. U.S. Environmental Protection Agency. 1993, Cincinnati, USA.

- Seguí, A. L.A. 2004. Sistemas de Regeneración y Reutilización de Aguas Residuales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona España.
- Stearman, G. et al. 2003 "Pesticideremovalfromcontainernurseryrunoff in constructedwetlandcells en Journal of EnvironmentalQuality, No 32, pp. 1548-1556.
- Rousseau D., Vanrolleghem P. and Pauw N. (2004) Model-Based Design of Horizontal Subsurface Flow Constructed Treatment Wetlands: A review. Water Res., 38(6), 1484 – 1493.
- Romero, J. (2000). Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principio de Diseño. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá D.C, Colombia.
- Sanabria, O. (2009). Humedales Artificiales de Alta Tasa - HAAT- Reactoresde flujo horizontal subsuperficial para el tratamiento de aguas residualesdomésticas e industriales: Teoría y Práctica.
- Sanabria, O. (2010). Innovative Alternative of Low Cost to Purify Waterwasterin Countries in Vía of Development. Universidad de Pamplona. Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo.
- Silva, A., Zamora, H. (2005). Humedales Artificiales. Universidad Nacional deColombia. Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- Llagas, W., Guadalupe E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMM.
Disponibleen:http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9_n17/a11.pdf. [Recuperado: 20 de Noviembre de 2010].
- Lara, J. A.(1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Trabajo final de maestría. Universidad Politécnica deCataluña, Barcelona, España.
- Metcalf& Eddy.1998. Ingeniería de Aguas Residuales. Tomo 1. Mc. Graw-Hill, 1998.
- McLean, Robert C.Honduras wastewater treatment: chemically enhanced primary treatment and sustainable secondary treatment technologies for use with imhoff tanks. California StatePolytechnic. Pomona, 2008.

Lahora Cano, A. 2004 “Los humedales artificiales como tratamiento terciario de bajo coste en la depuración de aguas residuales urbanas” en www.gem.es/MATERIALES/DOCUMENT/DOCUMEN/g01/d01203/d01203.htm

Valdés, et al. M.D. Curt y J. Fernández 2005 “Tolerancia de Phragmites y Typha a la contaminación del agua” en Memoria del Encuentro Internacional en Fitodepuración, Lorca.

Vymazal, J. y Masa, M. (2003). Horizontal sub-surface flow constructed wetland with pulsing water level. Wat. Sci. Tech., 48(5), 143-148.