



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA REMOCIÓN
DE CONTAMINANTES DE UN EFLUENTE
HOSPITALARIO CON EL USO DE
HUMEDALES CONSTRUIDOS**

TESIS

**PRESENTADA POR
LIZBETH OCHOA CANO**

**A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE**

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

MORELIA, MICH.

MARZO 2007

RESUMEN

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE UN EFLUENTE HOSPITALARIO CON EL USO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS

Por

Lizbeth Ochoa Cano

Noviembre de 2006

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: M.C. Marco Antonio Martínez Cinco

Los humedales construidos de flujo subsuperficial son sistemas naturales que sirven para el tratamiento de aguas residuales. Sus constituyentes principales son un lecho de grava, plantas emergentes y agua residual que no está expuesta al medio ambiente sino que circula a través de la grava. Su funcionamiento básicamente consiste en la formación de una biopelícula adherida a la grava que degrada bioquímicamente los contaminantes que trae el agua residual. Aunado a lo anterior también se presentan otros procesos físicos como la retención de partículas por el medio granular

La presente investigación consistió en evaluar el comportamiento de tres humedales construidos de flujo subsuperficial instalados a un lado de la planta de tratamiento de aguas residuales del Hospital de la Mujer de la ciudad de Morelia Michoacán.

El agua residual fue captada del carcamo de la planta de tratamiento mediante una bomba y tubería hacia un tanque y de ahí se distribuyó a los tres humedales sembrados con Chuspata (*Typha*), Tule (*Scirpus*) y Carrizo (*Phragmites*). Los humedales se operaron con flujo subsuperficial vertical. El medio poroso de los pantanos estaba constituido por substratos de grava. El monitoreo del desempeño del sistema de tratamiento se llevó a cabo durante los meses de noviembre del 2005 a mayo del 2006, con muestreos semanales y quincenales.

El trabajo experimental se centró en el análisis del influente y efluentes mediante la medición de la temperatura, ph, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, nitrógeno total kjeldahl, nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, sólidos

sedimentables, suspendidos, disueltos y coliformes fecales. Al hacer un análisis del comportamiento de la DBO_5 , en los humedales con chuspata, carrizo y tule, se obtuvo una remoción al rededor del 92%. El nivel de eficiencia en la remoción de DQO en promedio fue del 65%, en el caso de NTK, N_{NH_3} y N_{ORG} el promedio de remoción alcanzado fue por encima del 70%. El nivel de remoción de sólidos sedimentables y sólidos suspendidos alcanzó porcentajes de 84.08%, 86% y 89% respectivamente, y finalmente, el nivel de eficiencia en la remoción de coliformes fecales en los sistemas de tratamiento fue significativo alcanzando remociones del 99% en promedio.

DEDICATORIA

A Dios, por todo lo que me ha dado a lo largo de mi vida;

A mis padres, Ramón y Ma. Concepción por sus esfuerzos y sacrificios en mi formación;

A mis hermanos Pedro, Bertha, Ramón, Estela y Alejandra por su amor y apoyo;

A mis sobrinos, Claudia, José, Michelle, Periquín, Jessi, Citlalli, Daniel, Monchis, Rene, Maryfer y Pau, por a compartir conmigo los momentos más felices de mi vida.

ÍNDICE

Resumen	iii
Lista de Tablas	viii
Lista de Figuras	ix
Acrónimos	xi
Agradecimientos	xii
Glosario	xiii
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.1.1 Objetivos específicos	3
1.2 Justificación	3
1.3 Hipótesis	4
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Humedales	5
2.1.1 Humedales naturales	5
2.1.2 Humedales construidos	6
2.1.2.1 Flujo libre superficial	7
2.1.2.2 Flujo subsuperficial	7
2.1.2.2.1 Flujo subsuperficial horizontal	8
2.1.2.2.1 Flujo subsuperficial vertical	8
2.2 Componentes del humedal	10
2.2.1 Agua	10
2.2.2 Sustrato, sedimento y restos de vegetación	11
2.2.1 Medio granular	11
2.2.3 Vegetación	13
2.2.3.1 Criterios de selección de vegetación	15
2.2.3.2 Funciones de la vegetación	15
2.2.3.3 Raíces	15
2.2.3.4 Características de la vegetación utilizada	15
2.2.3.4.1 Typha	15

2.2.3.4.2 Scirpus	16
2.2.3.4.3 Phragmites	17
2.2.4 Microorganismos	18
2.2.4.1 Bacterias	19
2.2.4.2 Hongos	19
2.2.4.3 Algas	19
2.2.4.4 Protozoos	19
2.2.4.5 Biopelícula	20
2.3 Mecanismos de eliminación de los contaminantes	21
2.3.1 Materia en Suspensión	21
2.3.2 Materia Orgánica	22
2.3.3 Nitrógeno	24
2.3.4 Patógenos	27
2.4 Ventajas	27
2.5 Desventajas	28
2.6 Aplicaciones	29
2.7 Operación y mantenimiento de humedales	29
2.7.1 Hidrología	30
2.7.2 Vegetación	30
2.7.3 Mosquitos	30
2.7.4 Control	31
2.8 Antecedentes	31
Capítulo 3. METODOLOGÍA	35
3.1 Construcción del humedal	35
3.2 Muestreo	39
3.3 Determinación de temperatura	39
3.4 Determinación de pH	40
3.5 Determinación de DBO ₅	40
3.6 Determinación de DQO	41
3.7 Determinación de nitrógeno	41
3.7.1 Nitrógeno total kjeldahl (NTK)	41

3.7.2 Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃)	42
3.7.3 Nitrógeno orgánico (N _{ORG})	42
3.8 Determinación de sólidos	43
3.8.1 Sólidos sedimentables	43
3.8.2 Sólidos suspendidos	43
3.8.3 Sólidos disueltos	44
3.9 Determinación de coliformes fecales	44
3.10 Análisis estadístico de datos	45
3.10.1 Análisis de varianza	45
3.10.2 Prueba de hipótesis con respecto a las medias mediante la distribución t de student	46
Capítulo 4. RESULTADOS	49
4.1 Parámetros cuantificados en campo	49
4.1.1 Temperatura	49
4.1.2 pH	50
4.2 Parámetros cuantificados en laboratorio	50
4.2.1 Demanda bioquímica de oxígeno	50
4.2.2 Demanda química de oxígeno	53
4.2.3 Nitrógeno total kjeldahl	55
4.2.4 Nitrógeno amoniacal	57
4.2.5 Nitrógeno orgánico	59
4.2.6 Sólidos sedimentables	60
4.2.7 Sólidos suspendidos	62
4.2.8 Sólidos disueltos	64
4.2.9 Coliformes fecales	66
4.3 Análisis estadístico	68
Conclusiones	73
Recomendaciones	75
Referencia Bibliográfica	76
Anexos	80

LISTA DE TABLAS

Capítulo 2 MARCO TEÓRICO

Tabla 2.1 Intervalo de eficiencias de remoción de contaminantes reportados para humedales construidos	10
Tabla 2.2 Características para el desarrollo de la vegetación	18
Tabla 2.3 Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales construidos	21

Capítulo 3 METODOLOGÍA

Tabla 3.1 Variables involucradas en el sistema	38
Tabla 3.2 Diluciones recomendables para la determinación de DBO_5	41
Tabla 3.3 Análisis de varianza para un experimento de un solo factor, modelo de efectos fijos	46

Capítulo 4 RESULTADOS

Tabla 4.1 Niveles de eliminación y remoción de DBO_5	52
Tabla 4.2 Niveles de eliminación y remoción de DQO	54
Tabla 4.3 Niveles de eliminación y remoción de NTK	56
Tabla 4.4 Niveles de eliminación y remoción de $N-NH_3$	58
Tabla 4.5 Niveles de eliminación y remoción de N_{ORG}	60
Tabla 4.6 Niveles de eliminación y remoción de sólidos sedimentables	62
Tabla 4.7 Niveles de eliminación y remoción sólidos suspendidos	64
Tabla 4.8 Niveles de sólidos disueltos en el influente y efluente	65
Tabla 4.9 Niveles de eliminación y remoción de coliformes fecales	67
Tabla 4.10 Resumen de los análisis estadísticos ANOVA	68
Tabla 4.11 Diferencia de medias	71
Tabla 4.12 Diferencia entre medias en el porcentaje de remoción, efectos estacionales	71

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2 MARCO TEÓRICO

Figura 2.1 Humedal de flujo libre superficial	7
Figura 2.2 Humedal de flujo libre subsuperficial horizontal	8
Figura 2.3 Humedal de flujo libre subsuperficial vertical	9
Figura 2.4 Typha	16
Figura 2.5 Scirpus	16
Figura 2.6 Phragmites	17
Figura 2.7 Procesos de remoción de los Humedales Construidos	26

Capítulo 3 METODOLOGÍA

Figura 3.1 Vista panorámica de las tinas usadas para la construcción	36
Figura 3.2 Vista lateral de las tinas usadas para la construcción	36
Figura 3.3 Sistema de distribución del influente	37
Figura 3.4 Humedales construidos después de 4 meses de adaptación	37
Figura 3.5 Toma del efluente	38

Capítulo 4 RESULTADOS

Figura 4.1 Concentración de DBO_5 en el influente y efluente	51
Figura 4.2 % Remoción de DBO_5 de los humedales	52
Figura 4.3 Concentración de DQO en el influente y efluente	53
Figura 4.4 % Remoción de DQO de los humedales	54
Figura 4.5 Concentración de NTK en el influente y efluente	55
Figura 4.6 % Remoción de NTK de los humedales	56
Figura 4.7 Concentración de $N-NH_3$ en el influente y efluente	57
Figura 4.8 % Remoción de $N-NH_3$ de los humedales	58
Figura 4.9 Concentración de N_{ORG} en el influente y efluente	59
Figura 4.10 % Remoción de N_{ORG} de los humedales	60
Figura 4.11 Concentración de SSED en el influente y efluente	61
Figura 4.12 % Remoción de SSED de los humedales	61

Figura 4.13 Concentración de SS en el influente y efluente	62
Figura 4.14 % Remoción de SS de los humedales	63
Figura 4.15 Concentración de SDIS en el influente y efluente	64
Figura 4.16 % Incremento de SDIS de los humedales	65
Figura 4.17 Concentración de coliformes fecales en el influente y efluente	66
Figura 4.18 % Remoción de coliformes fecales de los humedales	67

ACRÓNIMOS

°C	Grados centígrados
cm	Centímetros
d	Día
DBO₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
FWS	Flujo libre superficial (Free Water Surface)
Kg	Kilogramos
L	Litro
m	Metro
mg	Miligramos
min	Minutos
mL	Mililitros
NMP	Número Más Probable
pH	Concentración de iones Hidrógeno expresado como logaritmo negativo
ppm	Partes por millón (mg/L)
ppt	Partes por trillón
N-NH₃	Nitrógeno Amoniacal
N_{ORG}	Nitrógeno Orgánico
NTK	Nitrógeno Total Kjeldahl
SFS	Flujo subsuperficial (Subsurface Flow Systems)
SST	Sólidos Suspendidos Totales
T	Temperatura
TRH	Tiempo de retención hidráulico

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de todo corazón a Dios, por darme la posibilidad de haber entrado a este programa de maestría y haberme acompañado hasta llegar a la meta.

Mi agradecimiento a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Al Hospital de la Mujer por permitirme construir los humedales en sus instalaciones.

A mi asesor M.C. Marco Antonio Martínez Cinco, por su dedicación, paciencia, entrega y valiosos consejos que me permitieron alcanzar los objetivos de esta tesis.

Al I.Q. Virgilio Ledesma Yturry, por las facilidades de su laboratorio, asesoría, comentarios e incondicional colaboración.

Al M.C. Gerardo Medina Heredia, por su ayuda en la construcción de los humedales, por su apoyo incondicional, mil gracias.

Al M.C. Roberto García Acevedo, por facilitarme material de laboratorio.

A M.C. José Apolinar Cortes por permitirme trabajar en su cubículo.

A Laura Nelly Rodríguez Cantú, por su amistad.

En especial a mis padres, hermanos y sobrinos, quienes siempre creyeron en mí.

Finalmente, a todos mis amigos, disculpándome al no señalar a cada uno por temor a omitir alguno por error. Por su amistad incondicional y las experiencias que juntos hemos vivido, gracias.

GLOSARIO

Absorción

Concentración selectiva de sólidos disueltos en el interior de un material sólido, por difusión.

Adhesinas

Son estructuras de los microorganismos que facilitan la adherencia de estos.

Adsorción

Transferencia de una masa gaseosa, líquida o de material disuelto a la superficie de un sólido.

Aerobio

Un proceso que ocurre en presencia del oxígeno.

Agua cruda

El agua cruda es el agua que se encuentra sin tratamiento.

Agua residual

Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, hospitalarias, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticas, incluyendo fraccionamientos, y en general cualquier otro uso, así como mezcla de ellas.

Anaerobio

Un proceso que ocurre en ausencia de oxígeno.

Anóxico

Ausencia de oxígeno.

Bacterias facultativas

Son bacterias capaces de funcionar bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas.

Bacterias heterótrofas

Son aquéllas que necesitan materia orgánica como fuente de energía.

Bienes nacionales

Son bienes cuya administración está a cargo de la Comisión Nacional del Agua en términos del artículo 113 de la Ley de aguas nacionales.

Biodegradación

Es el resultado de los procesos de digestión, asimilación y metabolización de un compuesto orgánico llevado a cabo por bacterias, hongos, protozoos y otros organismos.

Biomasa

Masa total de la materia viva de una parte de un organismo, población o ecosistema.

Biopelícula

Película biológica adherida a un medio sólido que lleva a cabo la degradación de la materia orgánica.

Ciperáceas

Es una familia de hierbas generalmente perennes, que se encuentran por todo el mundo pero preferentemente en las regiones templadas y frías. Son propias en general de sitios húmedos.

Componentes abióticos

Componentes no vivos de un ecosistema, incluyen los factores físicos y químicos. Los factores físicos que tiene efecto sobre el ecosistema son: luz solar, temperatura, precipitación, viento, altitud, longitud, corrientes de agua.

Componentes bióticos

Componentes vivos de un ecosistema.

Composta

Humus obtenido de manera artificial por descomposición bioquímica de residuos orgánicos. Los residuos orgánicos son restos de plantas y animales.

Concentración

La cantidad de material disuelto en una unidad de solución.

Contaminación del agua

Cualquier cambio en el equilibrio de los componentes del agua pura y que afecte las propiedades físicas y químicas del agua.

Depuración de agua

Depuración del agua generalmente significa liberar al agua de cualquier clase de impureza que contenga.

Desnitrificación

Eliminación de productos nitritos y nitratos del agua.

Detritos

Residuos, generalmente sólidos, que provienen de fuentes orgánicas y minerales. Es materia muerta.

Enzimas extracelulares

La secreción de un amplio rango de enzimas capaces de degradar componentes de la pared celular de plantas vasculares y otros componentes celulares, tienen un papel importante en enfermedades bacterianas como las podredumbres blandas y también en bacterias que causan necrosis o marchitamiento vascular.

Estanque

Es una extensión de agua artificial construida para proveer al riego, criar peces etcétera o con fines meramente ornamentales.

Estuario

Es la parte más ancha y profunda en la desembocadura de los ríos, en los mares abiertos o en los océanos, en aquellas áreas donde las mareas tienen mayor amplitud.

Eutrofización

Sobrenriquecimiento de un cuerpo de agua con nutrientes que trae como resultado un crecimiento excesivo de vegetación acuática, por lo tanto el agotamiento de la concentración de oxígeno.

Evapotranspiración

Pérdida de agua del suelo a través de la vaporación, por vaporación directa y por la transpiración de las plantas.

Factores medioambientales

Conjunto de elementos abióticos (energía solar, suelo, agua y aire) y bióticos (organismos vivos) que integran la delgada capa de la Tierra, sustento y hogar de los seres vivos.

Fermentación metánica

Es la digestión anaerobia de la biomasa por bacterias.

Gramíneas (Poáceas)

También conocidas como poáceas son una familia de plantas herbáceas o muy raramente leñosas.

Helófitos

Planta anfibia, que enraíza en el suelo sumergido o encharcado y asoma sus tallos en el aire.

Hidrófilas

Que tiene afinidad por el agua.

Hidrófilo

Planta herbácea, que requiere del medio acuático en forma permanente o temporaria para completar su ciclo vital. Planta perenne con brotes bajo el agua y con hojas sumergidas o flotantes.

.Higrófito

Planta que vive en medios húmedos.

Hidrófobas

Que repele al agua.

Lago

Es un cuerpo de agua dulce o salada, más o menos extensa, sin conexión con el mar. El aporte de agua a los lagos viene de los ríos y el afloramiento de aguas freáticas.

Laguna

Denominación que recibe cualquier extensión natural de agua estancada, sea esta dulce o salada. La diferencia con los lagos no es muy precisa, salvo que se supone que una laguna tiene menor extensión y profundidad.

Limite máximo permisible

Valor o rango asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en la descarga de aguas residuales.

Nitrificación

Proceso biológico, durante el cual bacterias nitrificantes convierten el amoníaco tóxico en nitrato para disminuir su efecto dañino. Esto es comúnmente utilizado para eliminar sustancias de nitrógeno de las aguas residuales.

Nutriente

Cualquier sustancia que promueve el crecimiento de organismos vivos. El término es generalmente aplicado para el nitrógeno y el fósforo en aguas residuales, pero es también aplicado a otros elementos esenciales y elementos traza.

Macrófita

Planta macroscópica grande, comprende por lo general las formas acuáticas como las algas marinas.

Metanogénesis

Proceso que implica la producción biológica de metano (CH₄) por parte de un grupo de microorganismos anaerobios.

Muestra simple

La que se toma en el punto de descarga, en día normal de operación que refleje cuantitativa y cualitativamente el o los procesos mas representativos de las actividades que generan la descarga, tomando un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer su composición.

Parámetro

Variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad física, química y biológica del agua.

Perifiton

Conjunto de organismos que viven adheridos sobre materiales o plantas sumergidas.

Planta perenne

Planta que vive durante más de dos años.

Raíz principal

Es la raíz mas gruesa

Raíz secundaria

Raíz que sale de la raíz principal y no son tan gruesas como la principal

Cofia

Protección con la que terminan las raíces. Sirve para que estas puedan perforar el suelo. Actúa, por lo tanto, como una especie de taladro natural.

Pelos absorbentes

Filamentos diminutos que recubren las raíces y tiene la función de absorber agua.

Respiración microbiana

Se define como la absorción de oxígeno o la liberación de dióxido de carbono por bacterias, hongos, algas y protozoos

Río

Es una corriente natural de agua que fluye con continuidad. Posee un caudal determinado y desemboca en el mar, en un lago o en otro río.

Rizoma

Tallo subterráneo grueso y horizontal que sirve como órgano de almacenamiento. Presenta nudos, entrenudos, hojas escamosas y raíces adventicias.

Saprotitos

Seres vivos que viven en agua estancada, pantanos que se alimentan de materia orgánica muerta (putrefacta).

Simbiosis

Asociación íntima de dos organismos diferentes, los que obtienen beneficios mutuos de la misma. Vida en común de dos o más organismos.

Sustrato

Es el estrato o materia sólida sobre la cual se mueve un organismo o al cual esta sujeto.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso cada vez más apreciado, tanto para uso doméstico, como industrial o agrícola. Por su escasez, se sitúa como prioridad vital para el desarrollo de las poblaciones: "*si no hay agua, no hay vida*". Sin embargo, aunque la tierra esta cubierta en un 70% por agua, el 98% es salada y sólo el 2% es agua dulce pero la mayor parte de esta se localiza en los casquetes polares o en los acuíferos. El agua dulce de los lagos, arroyos y ríos de la superficie terrestre representa el 0.014% (Maurtis, 1990).

La contaminación del agua es un problema que se presenta en la actualidad y ocupa la atención de muchos de los habitantes del planeta. La escasez de este líquido vital, obliga a la moderación de consumo por parte de la población a nivel mundial. Analizando esta problemática desde otra perspectiva, es posible que en los próximos años el agua sea la causa de guerras incluso mucho más grandes que las provocadas por el petróleo (Postel S., 1993).

En la actualidad uno de los problemas mas importantes, es la generación de aguas residuales y su tratamiento, ya sea para evitar un impacto negativo en los ecosistemas o para lograr su recuperación y reuso, ya que una gran variedad de contaminantes se encuentran presentes en las aguas residuales, tales como materia orgánica, nitrógeno, metales pesados (como cadmio, mercurio, arsénico), por mencionar algunos, de los cuales muchos son considerados como tóxicos o de impacto negativo sobre los cuerpos receptores. Por lo anterior, es importante desarrollar sistemas de tratamiento, efectivos y económicamente rentables. Para el tratamiento de aguas residuales se han implementado varias tecnologías, una de ellas, los humedales construidos, que cuando son bien diseñados presentan ventajas significativas tales como: no generar lodos, ruido, ni malos olores, son estéticos y amigables con el ambiente.

Dentro del numeroso grupo de métodos para el tratamiento de aguas residuales, catalogados como sistemas de tratamiento natural se encuentran los humedales construidos, que son un procedimiento eficaz para el tratamiento de aguas residuales.

A pesar del corto periodo de experiencia del que gozan estos sistemas en comparación con otras tecnologías de tratamiento, se han convertido en una alternativa atractiva para el tratamiento de aguas residuales en pequeños núcleos de población con espacio suficiente para su construcción debido a la simplicidad de su diseño y construcción, eficiencia y beneficios económicos debido a su bajo costo de operación y mantenimiento.

El objetivo principal de los humedales construidos es mejorar la calidad del agua a través de la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales. El tratamiento del agua se consigue con la eficiente combinación de diferentes procesos físicos, químicos y biológicos en el interior del medio granular.

Con este tipo de sistemas de tratamiento se obtiene una muy buena calidad del agua tratada. Los mecanismos de remoción que se dan en el interior del humedal aun no son del todo conocidos, sin embargo durante los últimos 20 años se ha intentado el funcionamiento de los humedales, estimar y cuantificar estos medios de remoción que se producen y dejar de verlo como “caja negra” (Arias T. O., 2004).

Estos sistemas se encuentran entre los más eficientes del mundo y en su mayor parte son el resultado de la combinación del agua, la grava y la vegetación, junto con la radiación solar y una alta concentración de nutrientes.

Los humedales se dan en la naturaleza sin la intervención del hombre; son zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres. Los humedales como sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas se ha generalizado en Europa, América del Norte y Australia desde mediados de los años 80 (U.S. Environmental Protection Agency, 1993).

1.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño de humedales construidos de flujo subsuperficial, a través de un análisis comparativo en la remoción de contaminantes de un efluente hospitalario tratado con tres tipos de vegetación: Chuspata (*Typha*), Tule (*Scirpus*) y Carrizo (*Phragmites*).

Objetivos específicos

- Evaluar la influencia del flujo en el funcionamiento del humedal.
- Evaluar el efecto estacional en la capacidad de remoción de la DBO en el humedal.
- Evaluar la vegetación utilizada en función de la capacidad de remoción de la DBO en el humedal construido de flujo subsuperficial.

1.2 Justificación

Los efluentes provenientes de centros hospitalarios representan un impacto sobre la salud pública, cuya magnitud ha comenzado a evaluarse en los últimos años en ámbitos científicos (Moretton, 2003).

Las aguas residuales provenientes de los centros hospitalarios de la Ciudad de Morelia son vertidas a la red de drenaje con un mínimo tratamiento, y en ocasiones nulo, posteriormente son descargados al río Grande de esta Ciudad y este a su vez en el lago de Cuitzeo, este río es la principal fuente de contaminación del lago.

El Hospital de la Mujer de la Ciudad de Morelia cuenta con un proceso de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo es poco eficiente, ya que está en operación pocas horas durante algunos días de la semana, debido a que el hospital se encuentra en un programa de ahorro de energía.

El proceso de lodos activados es un proceso biológico en el que se agita y airea una mezcla de agua residual y un lodo de microorganismos, de la cual los sólidos se remueven y se recirculan posteriormente al proceso de aireación, según se requiera. Reduce la DBO y sólidos en suspensión alrededor del 80 a 95% (Gómez, V. F., 2004), sin embargo, los costos de operación, mantenimiento y gastos de energía son altos.

Se han realizado comparaciones entre humedales construidos y sistemas de lodos activados. En este trabajo de investigación se encontró que el humedal fue más eficiente en la remoción de nitrógeno amoniacal a pesar de que en el humedal había escasez de vegetación, en este caso *typha* (Watson, 1986).

Los humedales construidos reducen la DBO₅ entre el 50 al 90%, son menos costosos, gastan menos energía. Al ser un proceso subterráneo tiene ausencia de mosquitos (Lara B. J. A., 1999).

Por lo descrito anteriormente en este trabajo, busca lograr una nueva forma de eliminación de los contaminantes de un efluente hospitalario, que sea a la vez más económica y eficiente que los sistemas de tratamiento mecanizados, por medio del uso de humedales construidos de flujo subsuperficial.

1.3 Hipótesis

Gracias a las investigaciones que han sido realizadas en los humedales construidos de flujo subsuperficial, se ha demostrado que poseen una alta capacidad en remoción de contaminantes del agua residual. Esto llevo a establecer la siguiente hipótesis: “Existe diferencia en la capacidad de remoción de la DBO, debido el al tipo de planta utilizada: Chuspata (*Typha*), Tule (*Scirpus*) y Carrizo (*Phragmites*)”.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

Los problemas asociados a los líquidos residuales generados en centros de salud, han sido motivo de preocupación internacional debido al peligro de estos ocasionan en la propagación de enfermedades y a los riesgos ambientales derivados de la ausencia de tratamientos adecuados. Es por ello que estos problemas trascienden en el campo técnico sanitario e involucra aspectos sociales, económicos, políticos y ambientales, entre otros (Ferreira La Rosa y col., 2000).

La composición de las aguas residuales procedentes de los centros de salud presenta variaciones más o menos evidentes en su descarga a la red de drenaje debido a la gran diversidad de sustancias químicas y materiales biológicos eliminados en los mismos (Paz M., y col., 2004).

2.1 Humedales

Los humedales naturales, que durante siglos han sido considerados como un nido de enfermedades y de malos olores hoy en día se les considera "los riñones del mundo" por su función de filtro de las aguas que pasan a través de ellos, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y, en algunos casos, productos químicos tóxicos (Lahora A., 1998).

2.1.1 Humedales naturales

Los humedales naturales pueden definirse como, áreas que permanecen inundadas o saturadas de agua durante un tiempo suficiente para mantener condiciones saturadas. Se reconocen fácilmente por un conjunto de características generales, como son la presencia de agua poco profunda y la existencia de vegetación, ya sean plantas que viven en el agua (hidrófitos) o las que se desarrollan en terrenos permanentemente inundados o al menos saturados de agua con bastante frecuencia (higrófitos). Uno de los rasgos más característicos de la vegetación de los humedales, es su adaptación a vivir con una fuerte limitación de la disponibilidad del oxígeno en el

suelo, es decir, en condiciones anaerobias que normalmente no soportan las plantas terrestres (Fernández G. J. y col., 2005).

La importancia de los humedales naturales radica en las funciones que desempeña la vegetación en el ciclo del agua y de la materia orgánica, reciclado de nutrientes y estabilización de sedimentos. Tienen un importante papel como depuradoras naturales, contribuyendo al mantenimiento de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales, esto debido a la gran cantidad de luz, agua, nutrientes y presencia de vegetación que desarrollan adaptaciones biológicas y se encuentran entre los sistemas más eficientes del mundo. Es importante señalar que el aprovechamiento de humedales naturales para el tratamiento de aguas residuales no es aconsejable, ya que supone un grave impacto medioambiental y la posibilidad de contaminar los acuíferos y ecosistemas circundantes (Torres L. A. y col., 2005), esto ha promovido a la construcción de humedales para utilizarlos en el tratamiento de aguas residuales.

2.1.2 Humedales construidos

Un humedal construido se define como aquel dispositivo que se diseña para simular los sistemas de humedales naturales es por esto que están integrados por componentes similares a los naturales y tienen como propósito el control de la contaminación y manejo de desechos, están diseñados para aumentar la degradación de materia orgánica con mecanismos que se dan de forma espontánea en la naturaleza.

Los humedales tienen tres funciones básicas (U.S. Environmental Protection Agency, 1993) que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales; estas son:

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.
- Utilizar y transformar los elementos por medio de los microorganismos.
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

Los humedales se han clasificado en dos tipos según la circulación del agua:

- Flujo libre superficial (Free Water Surface, FWS).
- Flujo subsuperficial (Subsurface Flow Systems, SFS).
 - Flujo subsuperficial horizontal.
 - Flujo subsuperficial vertical.

2.1.2.1 Flujo libre superficial (FWS)

Este sistema consiste en canales donde el nivel del agua está sobre la superficie de la tierra y la vegetación emerge hacia la superficie, el agua circula a través de los tallos de los macrófitos, en realidad este tipo de humedales se puede entender como una modificación de sistemas lagunares convencionales con menor profundidad y vegetación. Las bajas velocidades y la presencia de plantas proporcionan las condiciones propicias para la sedimentación y la filtración. La mayoría de los humedales de flujo superficial tienen una profundidad del agua de 10 a 50 cm. La Figura 2.1 ilustra un humedal construido de flujo libre superficial.

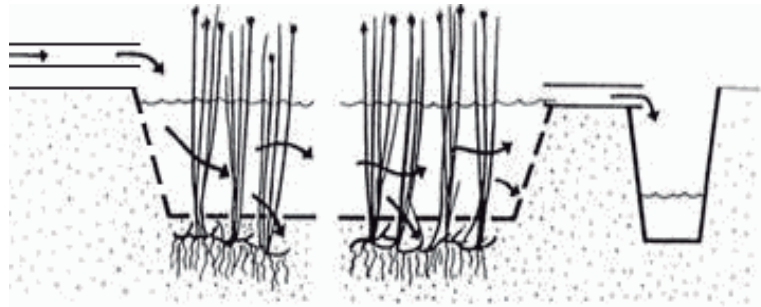


Figura 2.1 Humedal de flujo libre superficial

2.1.2.2 Flujo subsuperficial (SFS)

Los humedales construidos de flujo subsuperficial son sistemas naturales que sirven para el tratamiento de aguas residuales. Sus constituyentes principales son un lecho de grava, plantas emergentes y agua residual; esta última no está expuesta al ambiente sino que circula a través de la grava sin estar expuesta a la superficie. Su funcionamiento básicamente consiste en la formación de una biopelícula adherida a la grava que degrada bioquímicamente los contaminantes que trae el agua residual.

Aunado a lo anterior también se presentan otros procesos físicos como la retención de partículas por el medio granular. Estos sistemas se diferencian de los sistemas tradicionales de tratamiento por que requieren grandes extensiones de tierra para su uso y una precisión en el diseño que permita la eliminación eficaz de los contaminantes (García, 2004).

La eliminación de los contaminantes sucede gracias a los procesos físicos, químicos y bioquímicos, aunque los principales son los bioquímicos asociados a la biopelícula que crece adherida al medio granular y a las partes subterráneas de las plantas (García, 2004).

Este sistema ofrece algunas ventajas sobre los humedales de flujo superficial como son: menos área requerida, ya que las áreas superficiales para la absorción, filtración y la biopelícula son mucho más altos; y se reduce el problema de los insectos y del olor, puesto que las aguas residuales permanecen debajo de la superficie de la grava (EPA, 1993).

Los humedales de flujo se clasifican según el sentido de la circulación del agua, en horizontales y verticales.

2.1.2.2.1 Flujo subsuperficial horizontal

Los sistemas con flujo horizontal funcionan permanentemente inundados, tal como se muestra en la Figura 2.2.

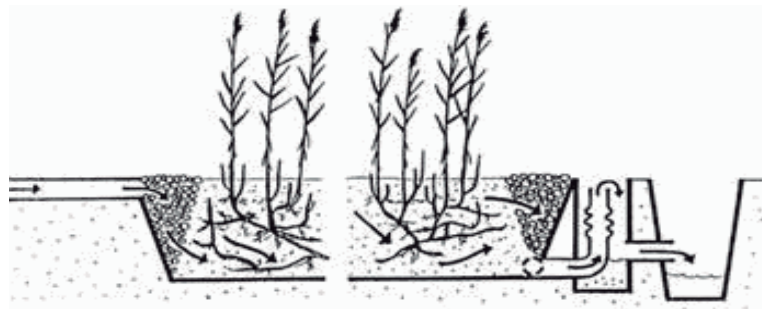


Figura 2.2 Humedal de flujo subsuperficial horizontal

2.1.2.2.2 Flujo subsuperficial vertical

La Figura 2.3 muestra el humedal con flujo vertical, estos se diseñan con un funcionamiento intermitente, es decir, tiene fases de llenado, reacción y vertido. La

intermitencia y la inundabilidad permanente dan propiedades muy diferentes a los sistemas verticales y horizontales respectivamente (García, 2004).

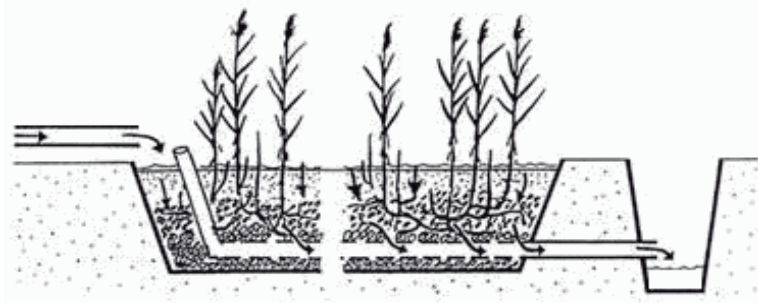


Figura 2.3 Humedal de flujo subsuperficial vertical

La mayoría de los humedales naturales son sistemas de flujo libre superficial en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera (U.S. Environmental Protection Agency, 2000). Un humedal construido de flujo subsuperficial está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. La grava es el medio más utilizado en Estados Unidos y Europa, aunque también se ha utilizado roca triturada, arena y otro tipo de materiales del suelo. El medio se planta normalmente con los mismos tipos de vegetación emergentes presentes en las praderas inundadas y, por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio. Las principales ventajas de mantener un nivel subsuperficial del agua son la prevención de mosquitos y olores y la eliminación del riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada. En contraste, la superficie del agua en los pantanales naturales y en los humedales artificiales de flujo libre superficial está expuesta a la atmósfera, lo cual conlleva los riesgos de los mosquitos y de acceso del público. Además el lecho de grava tendrá mayores áreas de reacción, por lo tanto pueden tener un área menor, además se evitan problemas en climas fríos, ya que esta capa presta una mayor protección térmica (U.S. Environmental Protection Agency, 1993).

La mejora en la calidad del agua con humedales naturales ha sido observada por científicos e ingenieros durante muchos años, y ha llevado al desarrollo de humedales

artificiales para duplicar en ecosistemas construidos los beneficios de calidad del agua y hábitat de los humedales naturales. Se considera que las reacciones biológicas se deben a la actividad de los microorganismos adheridos a las superficies disponibles de sustrato sumergido (Álvarez S. 2005). En humedales SFS el sustrato sumergido disponible incluye las raíces de las plantas que crecen en el medio, y la superficie misma del medio.

En relación a rendimiento de los humedales, estos pueden tratar con eficiencia niveles superiores al 80% de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno (N) (Tabla 2.1), así como niveles significativos de metales, trazas orgánicas y patógenos. No ocurre lo mismo con la eliminación de fósforo que es mínima en estos sistemas (Lara Borrero J., 1999).

Tabla 2.1 Intervalo de eficiencias de remoción de contaminantes reportados para humedales construidos.

Parámetro	Remoción (%)
DBO ₅	50 – 90
Sólidos Suspendidos	40 – 94
Nitrógeno	30 – 98

(Moshiri, 1993)

2.2 Componentes del humedal

Los humedales construidos consisten en el diseño correcto de una cubeta que contiene agua, sustrato, y la mayoría plantas emergentes. Estos componentes pueden manipularse construyendo un humedal. Otro componente importante de los humedales es la comunidad de microorganismos e invertebrados acuáticos que tienden a desarrollarse naturalmente (U.S. Environmental Protection Agency, 1993).

2.2.1 Agua

La hidrología es el factor más importante en un humedal construido porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario en el éxito o fracaso del humedal. Mientras que la hidrología de un humedal construido no es muy

diferente que la de otras aguas superficiales y cercanas a superficie, difiere en aspectos importantes:

- Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad de tratamiento.
- Debido al área superficial del agua y poca profundidad, el sistema interacciona con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (pérdida de agua por evaporación de la superficie del agua y a través de la transpiración de las plantas).
- La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, primero, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces y rizomas, y segundo, bloqueando la exposición al viento y al sol.

2.2.2 Sustrato, sedimentos y restos de vegetación

Los sustratos en los humedales construidos incluyen el medio granular y materia orgánica como la composta. Los sedimentos y restos de vegetación, se acumulan en el humedal debido a las bajas velocidades del agua.

2.2.2.1 Medio granular

La principal característica del medio granular es que debe de tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente gravas finas.

El medio granular utiliza mecanismos directos e indirectos para la eliminación de contaminantes del agua residual que circula por su interior, es el responsable de algunas formas de eliminación de sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas. Para esta eliminación la distribución del tamaño de partículas tiene un papel importante: la fracción fina del medio tiene mucha capacidad de asimilar contaminantes y la fracción arenosa que funciona como filtros de grava. De forma indirecta el medio granular también contribuye a la eliminación de contaminantes, ya que sirve de soporte para el crecimiento de las plantas (otra característica que deben cumplir los suelos utilizados como medio es que han de permitir el crecimiento de las

plantas aunque el tipo de planta utilizada son especies que tienen la capacidad de crecer en gran variedad de suelos) y también, de superficie para el desarrollo de la biopelícula.

El tamaño del medio granular afecta al régimen hidráulico del humedal, y por tanto, al caudal de entrada que es capaz de tratar. Si el lecho granular está constituido en gran porcentaje de arcillas, se consigue una mayor capacidad de adsorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño, pero estos materiales presentan una resistencia hidráulica mayor y necesitan velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal del influente capaz de tratar. En cambio, si el medio granular está compuesto por grava y arena, disminuye la capacidad de adsorción y el poder filtrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica. Esta conductividad no depende únicamente de la granulometría del material sino que se ve influenciada a lo largo del transcurso del tiempo disminuyendo debido al desarrollo de raíces y de la biopelícula adherida, la acumulación de sólidos en los huecos y la formación de precipitados.

Los sustratos, sedimentos y restos de vegetación son importantes por varias razones:

- Se retiene la materia en suspensión y los microorganismos patógenos.
- Se produce la sedimentación de sólidos en suspensión en sus espacios intergranulares.
- Se absorbe la materia orgánica disuelta, los patógenos, los nutrientes en la superficie de los granos y en la biopelícula.
- Sustento para el crecimiento de las plantas y los microorganismos: factores esenciales para elevar la calidad del agua dentro del humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (especialmente microbianas) tienen lugar dentro el sustrato.
- La acumulación de restos de vegetación incrementa la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, la fijación de microorganismos, y es una fuente de carbón, que es fuente de

energía para algunas de las reacciones biológicas más importantes en el humedal.

- Un factor que influye en la naturaleza del suelo del humedal es la concentración de oxígeno disuelto.
- Existen gradientes verticales de oxígeno por:
 - La respiración bacteriana.
 - La oxidación química.
 - La difusión de oxígeno dentro de los suelos saturados.

Las características físicas y químicas del suelo y otros sustratos se alteran cuando se inundan. En un sustrato saturado, el agua reemplaza los gases atmosféricos en los poros y el metabolismo microbiano consume el oxígeno disponible y aunque se presenta dilución de oxígeno de la atmósfera, puede darse lugar a la formación de un sustrato anóxico, lo cual será importante para la remoción de contaminantes como el nitrógeno y metales.

2.2.3 Vegetación

La principal función de la vegetación es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia en los humedales (los tallos, raíces y rizomas) permite la penetración a la tierra o al medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la difusión. La vegetación en los humedales no solo disminuye la velocidad del flujo y sedimentación de partículas. Además, la parte sumergida proporciona sustrato para el desarrollo de las películas de microorganismos los cuales son los responsables de de gran parte del tratamiento. Por otro lado, los tallos y hojas cerca de la superficie del agua en los humedales, proveen sombra lo cual limita la penetración de rayos de sol y controla el crecimiento de algas. La vegetación emergente es la más utilizada en la construcción de humedales de flujo superficial. Las hojas, los tallos, y las raíces de estas plantas se adaptan con facilidad en suelos con agua o saturados. La vegetación emergente más utilizada en humedales construidos son chuspata (*Typha*), tule (*Scirpus*) y los carrizos (*Phragmites*). En Europa los *Phragmites* son las plantas preferidas para esta aplicación. Esta planta tiene varias ventajas debido a que se trata de una planta durable de rápido crecimiento que no es

una fuente alimenticia para aves o la vida silvestre. Sin embargo, en algunas partes de los Estados Unidos el uso de *Phragmites* no está permitido porque esta es una planta de crecimiento agresivo, por lo cual se tiene la preocupación de que infeste humedales naturales. En estos casos la chuspata y el tule pueden ser utilizados. En México las especies más utilizadas en la construcción de humedales construidos son la *Phragmites* y *Scirpus* ya que son especies que crecen en humedales naturales. La vegetación en un humedal SFS no es un factor significativo en la remoción de nutrientes y no se requiere su poda. En climas fríos, la acumulación de detritus vegetales sobre el lecho de grava proporciona un aislamiento térmico que es útil durante los meses de invierno. Las raíces de las plantas sumergidas proporcionan sustrato para los procesos microbiológicos y dado que la mayoría de las macrófitas emergentes pueden transmitir oxígeno de las hojas a las raíces, se presentan microzonas aeróbicas en la superficie de las raíces y los rizomas. El resto del medio sumergido de los humedales SFS tiende a carecer de oxígeno. Esta falta general de oxígeno limita la remoción biológica del amoníaco por nitrificación en los humedales SFS, pero aún así el sistema es efectivo en la remoción de DBO, SS, metales y algunos contaminantes orgánicos prioritarios, dado que su tratamiento puede ocurrir bajo condiciones aeróbicas y anóxicas (Hauenstein E., 2002). La remoción de nitratos por desnitrificación biológica también puede ser muy efectiva dado que las condiciones anóxicas requeridas están siempre presentes y se cuenta con suficientes fuentes de carbono. Por esta razón, se requieren tiempos largos de retención en un área extensa de humedal para producir los niveles bajos de nitrógeno en el efluente, con la calidad típica de influentes de agua residual doméstica a menos que se adopten algunas modificaciones del sistema. Estos cambios han incluido la instalación de tuberías de aireación en el fondo del lecho del sistema para oxigenación mecánica, el uso de un filtro percolador integrado para la nitrificación del amoníaco en el agua residual, y lechos de humedales de flujo vertical. Estos humedales de flujo vertical normalmente contienen grava o arena gruesa y reciben cargas intermitentes desde la superficie. La aplicación intermitente del agua residual y el drenaje vertical en el lecho permiten que las reacciones aeróbicas se produzcan con rapidez.

2.2.3.1 Criterios de selección de la vegetación

Para la selección de la vegetación se requiere que:

- Ser una especie nativa.
- Tener transporte de oxígeno eficiente dentro de la zona de raíz.
- Tener buena producción de densidad de tallos para tener una mejor asimilación de nutrientes.

2.2.3.2 Funciones de la vegetación

- Sirve de soporte para el desarrollo de películas bacterianas
- Estabilizan los sedimentos.
- Ayudan a la infiltración y mantienen la permeabilidad del sustrato.
- Transfieren oxígeno a la columna de agua.
- Controlan el crecimiento de las algas al restringir la penetración de la luz solar.

2.2.3.3 Raíces

La raíz esta compuesta por la raíz principal, raíz secundaria, cofia y los pelos absorbentes, estos pelos se difunden en los sitios porosos permitiendo que el oxígeno se difunda aun más.

- Son una fuente de oxígeno del suelo.
- Crean microzonas aerobias.
- Contribuyen a estabilizar los sedimentos.
- En conjunto con las zonas anaerobias y anóxicas permiten la nitrificación y desnitrificación.
- Ayuda a la infiltración y mantienen la permeabilidad del sustrato.

2.2.3.4 Características de la vegetación utilizada en los humedales

2.2.3.4.1 *Typha*

La *typha* (Figura 2.4) cuyo nombre vulgar es **chuspata** es una especie de planta acuática, nativa del hemisferio norte, y hoy distribuida en buena parte del mundo. Son frecuentes en humedales, ya que crece en medios acuáticos y se propaga con gran facilidad, es de las plantas acuáticas más resistentes, soporta un amplio rango de

temperaturas de 10 a 30°C, se distribuyen ampliamente bajo diversas condiciones ambientales a un pH óptimo de 4-10.



Figura 2.4 *Typha*

La *Typha* es una planta perenne, de 1 a 3 m de altura, la penetración de sus raíces en grava es de aproximadamente 0.3 m. La chuspata tiene otros usos ya que sus hojas se utilizan en la fabricación artesanal de sillas y sillones, canastos, etc. (<http://www.infojardin.com>).

2.2.3.4.2 *Scirpus*

El *scirpus* mejor conocida como **tule** es una planta perenne acuática, perteneciente a la familia de las ciperáceas, crece a orillas de canales y lagunas, tal como se aprecia en la Figura 2.5, son capaces de crecer en agua con profundidades desde 5 cm a 3 m, el tule crece en pH entre 4 a 9. Su tallo mide entre 1 a 2 m de altura, las hojas miden 3 cm de ancho en la base y de 2 a 4 mm en el extremo. La profundidad de penetración de la raíz en grava es aproximadamente 0.6 m.



Figura 2.5 *Scirpus*

Se distribuye desde Norteamérica, hasta Argentina y Chile, El tule se utiliza para cestería, construcción de techos; refugio y alimento de aves; elaboración de petates y artesanía (<http://www.infojardin.com>).

2.2.3.4.3 *Phragmites*

En la Figura 2.6 se muestra el **carrizo** cuyo nombre científico es *phragmites*, es una planta perteneciente a la familia de las gramíneas o poáceas. Es una planta perenne, con un rizoma rastrero con capacidad para crecer en la superficie buscando agua. Puede alcanzar los 4 m de altura y 2 cm de diámetro. La raíz penetra a una profundidad de 0.4 m en grava, son mas profundas que la chuspata. Suele habitar suelos húmedos y orillas de lagunas. En ríos se encuentran fundamentalmente en los tramos más bajos, en los que la velocidad del agua les permite enraizar.



Figura 2.6 *Phragmites*

Puede soportar niveles moderados de salinidad en el agua y en el suelo, necesitando suelos encharcados hasta profundidades de medio metro, por lo que es posible encontrarlo en las proximidades de costas y zonas más salobres. El Carrizo ha sido utilizado tradicionalmente para techar chozas y hacer cercas en algunos lugares (<http://www.infojardin.com>).

En la Tabla 2.2 se muestran algunas de las características de la vegetación utilizada en la construcción de los humedales.

Tabla 2.2 Características para el desarrollo de la vegetación

Nombre científico	Nombre vulgar	Temperatura °C		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de pH
		Deseable	Germinación de las semillas		
<i>Typha</i>	Chuspata	10 - 30	12 - 24	30	4 - 10
<i>Scirpus</i>	Tule	18 - 27		20	4 - 9
<i>Phragmites</i>	Carrizo	12 - 23	10 - 30	45	2 - 8

(Lara Borrero J., 1999).

2.2.4 Microorganismos

Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, hongos y algas. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes. Los microorganismos transforman un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.

Algunas transformaciones microbianas son aeróbicas (es decir, requieren oxígeno libre) mientras otras son anaeróbicas (tienen lugar en ausencia de oxígeno libre). Muchas especies bacterianas son facultativas, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas en respuesta a los cambios en las condiciones medioambientales.

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega, cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y pueden permanecer inactivos durante años.

La comunidad microbiana de un humedal construido puede ser afectada por sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados, y debe tenerse cuidado para prevenir que tales sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales.

La comunidad microbiana funciona en un amplio intervalo de condiciones físicas y químicas. Gracias a ello, los humedales funcionan consistentemente en el tratamiento de aguas residuales.

2.2.4.1 Bacterias

Los procesos esenciales para la depuración de agua efectuados por las bacterias son la solubilización de sólidos orgánicos, remoción de la DBO, nitrificación y desnitrificación.

La mayoría de las bacterias no toleran niveles de pH por debajo de 4, ni mayores de 9.5, el pH óptimo para el crecimiento bacteriano se sitúa entre 6.5 y 7.5.

2.2.4.2 Hongos

Utilizan compuestos orgánicos como fuente de carbono, son saprofitos, obtienen carbono y energía a partir de materia orgánica muerta (hojarasca, plantas y animales muertos) son importantes en el reciclaje de nutrientes en el manto acuático y suelo.

Los hongos viven de simbiosis con algas y plantas superiores, incrementan la eficiencia del huésped para la adsorción de nutrientes del agua, aire y suelo. Cuando llegan a ser inhibidos por el efecto de metales pesados la circulación de nutrientes dentro del humedal puede reducirse, limitando la productividad primaria de algas y plantas superiores.

Los hongos pueden crecer con muy poca humedad y toleran ambientes con pH relativamente bajos. El pH óptimo para la mayoría de las especies es 5.6, mientras que el intervalo de tolerancia esta entre 2 y 9.

2.2.4.3 Algas

Se encuentran en dos formas;

- Fitoplancton: Organismos unicelulares de nado libre.
- Perifiton: Asociación de algas filamentosas con otros microorganismos como hongos, bacterias, algas de nado libre y protozoarios.

La mayor parte de la biomasa de algas en los humedales se encuentra en forma de perifiton y llega a ser importante aportador de la productividad primaria.

2.2.4.4 Protozoos

Los protozoos son unicelulares, la mayoría heterótrofos aerobios, aunque algunos son anaerobios. Los protozoos suelen ser mayores que las bacterias, y se

suelen alimentar de ellas para la obtención de energía. Al consumir bacterias y materia orgánica, actúan como purificadores de los efluentes de los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales.

2.2.4.5 Biopelícula

La microbiología de los procesos con biopelícula no está muy bien definida, ya que son procesos relativamente nuevos (Crites R. y col., 2004). En la biopelícula se absorben sólidos orgánicos finos, suspendidos y disueltos, en ella ocurre la oxidación biológica de la materia orgánica, esta conversión biológica se consigue gracias a la comunidad de microorganismos dentro de los que se incluyen bacterias aerobias, anaerobias y facultativas, hongos, algas y protozoarios.

La biopelícula se desarrolla a partir de los organismos presentes en las aguas residuales, solo necesitan un entorno hidratado y una mínima presencia de nutrientes, porque pueden desarrollarse sobre superficies hidrófobas o hidrófilas, bióticas o abióticas (Kraigsley J. W., y col 2002). La clase de material de la superficie parece que tiene poca influencia sobre el crecimiento de esta.

Una biopelícula empieza a formarse cuando alguna célula individual se une inicialmente a una superficie. La capacidad de la célula para unirse a la superficie depende de factores ambientales como la temperatura y el pH, y de factores genéticos que codifican las funciones motrices, la sensibilidad ambiental, las adhesinas y otras proteínas (Costeron A., 1995). Después de la unión inicial, la célula empieza a crecer y esparcirse sobre la superficie, mientras forma micro colonias. Mientras la biopelículas va creciendo y si las condiciones ambientales lo permiten, se puede extender a otras áreas.

La formación de una biopelícula se ha identificado en cinco fases: una adsorción de la bacteria a la superficie, una unión irreversible, una primera fase de maduración con crecimiento y división, la segunda fase de producción del exopolímero y el desarrollo final de la colonia con dispersión de células colonizadoras.

2.3 Mecanismos de eliminación de los contaminantes

El tratamiento de aguas residuales en humedales se logra por una compleja combinación de mecanismos físicos, químicos y biológicos, de la vegetación, la profundidad de agua, sustratos y poblaciones microbianas (Hammer, D. A., 1989).

Uno de los mecanismos de eliminación de contaminantes en los humedales construidos es la asimilación de nutrientes por las plantas. Sin embargo, este mecanismo, no es el más importante. Existen una gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos que participan en esta eliminación tales como: filtración, degradación aerobia y anaerobia, nitrificación y desnitrificación, asimilación por las plantas y adsorción por la matriz. Algunos de los mecanismos de remoción más importantes en los humedales construidos se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales construidos

Contaminante	Mecanismo de remoción
DBO	Degradación microbiana
	Sedimentación
SST	Sedimentación
	Filtración
Nitrógeno	Nitrificación y Desnitrificación
	Asimilación de la planta
	Volatilización de amonía
Patógenos	Muerte natural
	Sedimentación
	Filtración
	Radiación UV

(Hammer, D. A., 1989)

2.3.1 Materia en suspensión

La eliminación de sólidos en un humedal de flujo subsuperficial se puede producir por la baja velocidad del flujo en algunos puntos, las fuerzas de adhesión entre partículas y la resistencia que opone el medio granular, fenómenos que en conjunto se

denominan filtración del medio granular. Las raíces también colaboran en esta retención física de las partículas sólidas.

En los humedales también se puede producir sólidos. Los mecanismos que los producen son varios como: la descomposición de la materia orgánica depositada en la superficie del medio granular (hojas y tallos de los macrófitos), la descomposición de las partes subterráneas de los macrófitos (rizomas y raíces) y la muerte de algas, hongos y bacterias existentes en el medio.

Según estudios realizados, la mayor parte de eliminación de sólidos se lleva a cabo en los primeros metros del humedal y la concentración va disminuyendo de forma exponencial a medida que se recorre el humedal. Por lo anterior se puede concluir que en las zonas cercanas a la entrada del lecho se encuentra una mayor concentración de sólidos.

La carga superficial de sólidos que llega al humedal no debería ser superior a los $20 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ para evitar la saturación y asegurar la vida del sistema.

Su rendimiento de eliminación por los humedales de flujo subsuperficial oscila entre 85-95%, y depende de la composición del agua residual y las condiciones de funcionamiento del humedal (Píriz, 2000).

2.3.2 Materia Orgánica

Los mecanismos de eliminación de la materia orgánica son actualmente poco conocidos y el concepto de “caja negra” para diseñar los humedales es el más utilizado.

En los humedales la remoción de materia orgánica sedimentable es muy rápida debido a que se puede sedimentar y filtrar, esta materia orgánica es descompuesta aeróbica y anaeróbicamente. La DBO_5 soluble es removida al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema, esta actividad biológica se da cerca de las raíces y rizomas (Lahora, 2005). Los humedales obtienen muy buenas reducciones de la DBO_5 , sin embargo, no alcanzan la eliminación completa de la materia orgánica, ya que siempre tienen una concentración de fondo de esta debido a que los mismos humedales la producen.

La principal vía para la eliminación de materia orgánica en un humedal de flujo subsuperficial es la descomposición, es decir, la conversión de moléculas orgánicas

complejas a simples. Este proceso se produce en tres pasos: la fragmentación abiótica, la hidrólisis mediante enzimas extracelulares y procesos aerobios y anaerobios de los microorganismos adheridos al sustrato.

El primer proceso es físico y los dos restantes son reacciones que producen los microorganismos por lo que están afectados por factores ambientales y la disponibilidad de nutrientes (Reddy y col., 1997).

La degradación aerobia de la materia orgánica disuelta se produce por acción de las bacterias aerobias heterótrofas. Un ejemplo es la reacción simplificada 2.1.



Esta reacción se lleva a cabo por la presencia de oxígeno, por lo tanto mientras en el medio exista suficiente oxígeno se producirá la degradación aerobia, cuando este no es suficiente las bacterias disminuyen su desarrollo, predominando entonces la degradación anaerobia.

La degradación anaerobia en el humedal se realiza en varias etapas en las zonas donde no hay oxígeno, esta se realiza en varias etapas. En la primera se produce la fermentación, la cual da origen a ácidos grasos como el acético (2.2a) y láctico (2.2b), alcoholes como el etanol (2.2c) y gases como el CO_2 y H_2 .

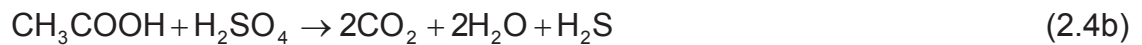


El ácido acético es el más abundante en los humedales de flujo subsuperficial, a partir de este ácido las bacterias continúan el proceso de degradación pudiéndose dar pueden dar los procesos de metanogénesis (2.3), sulfato reducción (2.4), nitrato reducción (2.5) y reducción del hierro (2.6).

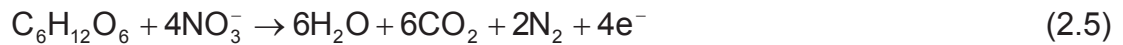
➤ Metanogénesis



- Sulfato - reducción



- Nitrato – reducción



- Reducción del hierro



Las bacterias que transforman la glucosa en ácidos grasos pueden adaptarse mejor a las diferentes condiciones ambientales de pH y temperatura que las bacterias que producen la metanogénesis las cuales son muy sensibles y únicamente actúan cuando el pH se encuentra entre 6.5 y 7.5.

La degradación anaerobia es mucho más lenta que la aerobia y predomina en profundidad donde el oxígeno disuelto es limitado y cuando existen cargas orgánicas altas.

2.3.3 Nitrógeno

El principal mecanismo de eliminación de nitrógeno en los humedales construidos de flujo subsuperficial, es la nitrificación y la desnitrificación, sin embargo hay otros procesos como son la volatilización, la absorción y la asimilación realizada por las plantas. La nitrificación se produce mediante un proceso microbiano de dos fases que acaba convirtiendo el nitrógeno amoniacal en nitratos mediante oxidación. En la primera el amonio es transformado en nitrito por unas bacterias denominadas *nitrosomonas*. En la segunda etapa el nitrito es convertido a nitrato mediante unas bacterias denominadas *nitrobacter*. Toda la nitrificación se realiza en condiciones aerobias y requiere por lo tanto de una cantidad de oxígeno. Las bacterias nitrificantes son organismos muy sensibles al pH y a la temperatura. El pH óptimo de funcionamiento se encuentra entre 7.5 y 8.6. Algunos reportes han establecido que para humedales de profundidad menor a 0.3 m se obtiene una disminución del amonio del orden de 35% al 66% y en humedales de profundidad mayor a 0.6 m una eliminación de

entre el 11 y 40% (Aguirre, 2004). El proceso de nitrificación total puede resumirse en una sola ecuación (2.7):



De acuerdo a la ecuación de equilibrio químico anterior son necesarios 4.6 mg de O_2 para oxidar 1 mg de nitrógeno amoniacal a nitrato.

La desnitrificación consiste en eliminar nitrógeno en forma de nitrato mediante su conversión a nitrógeno gas. Este mecanismo tiene lugar en condiciones anaerobias y se produce en dos etapas. En la primera el nitrato es convertido a nitrito y en la segunda el nitrito es convertido a NO , N_2O y nitrógeno gas (N_2). Estos tres productos finales son gaseosos por lo que son liberados a la atmósfera, pero en muchos sistemas el NO y el NO_2 son transitorios por lo que el principal compuesto liberado es el nitrógeno gas. Como en el caso de la nitrificación, en la desnitrificación es dependiente de la temperatura y del pH.

La naturaleza química del nitrógeno en forma de nitrato es químicamente estable por lo que los nitratos persistirían en el agua del humedal sino tuviese lugar un proceso de eliminación. El proceso de desnitrificación total puede resumirse en una sola ecuación (2.8):



La asimilación es un proceso realizado por las plantas. En éste, el nitrógeno es incorporado a la biomasa, por acción de las raíces, sin embargo, al morir la planta el nitrógeno retorna al humedal, razón por la cual se recomienda podar la vegetación, no obstante en la práctica esta actividad no se realiza.

La volatilización del nitrógeno amoniacal sólo se produce en sistemas donde el pH sea mayor a 9.3. Estos niveles de pH no son frecuentes en los humedales, donde estos están alrededor de 3 y 7.5 por lo que raramente se da este mecanismo. Esta vía de eliminación solo es importante en el caso de lagunas de estabilización pero no en humedales construidos y menos aún en el caso de ser humedales de flujo subsuperficial (Corzo H. A., 2004).

La absorción del nitrógeno amoniacal se puede llevar a cabo cuando éste se encuentre en condiciones estables, de esta forma el lecho granular lo puede absorber.

Sin embargo, este es un proceso reversible, puesto que cuando cambian las condiciones que lo estabilizan, el nitrógeno amoniacal puede regresar al agua.

El rendimiento de eliminación del nitrógeno en un humedal de flujo subsuperficial es difícil de establecer debido a que depende de las concentraciones de nitrógeno en el influente, las condiciones ambientales y el tipo de planta presente en el humedal. Además, en los procesos de eliminación del nitrógeno, la volatilización y la asimilación por las plantas no son significativas, por lo cual los mecanismos que mayor rendimiento tendrían serían la nitrificación y la desnitrificación. Sin embargo, al analizar que la nitrificación se presenta en condiciones aerobias y que en los humedales de flujo subsuperficial la concentración de oxígeno es baja, este proceso estaría muy reducido.

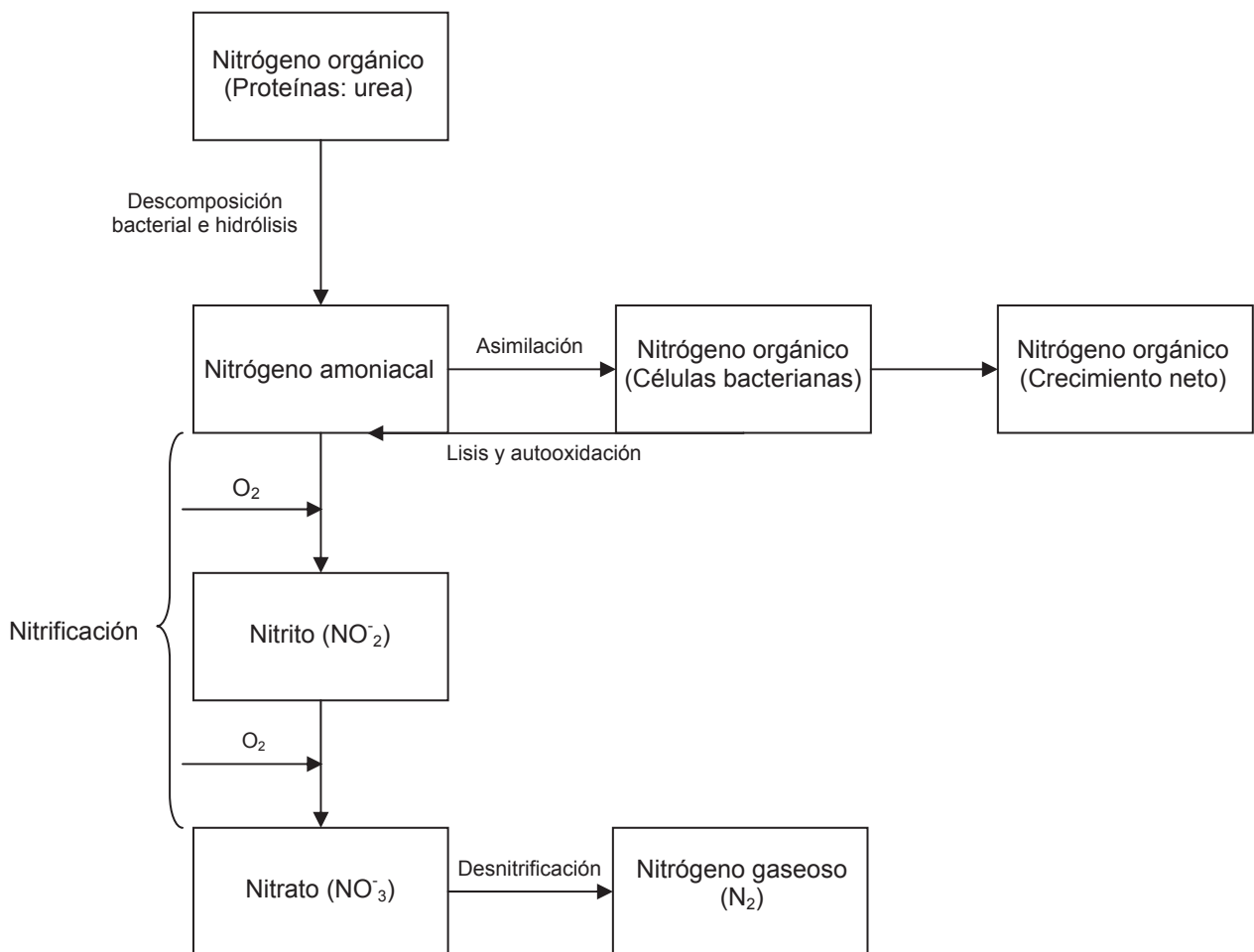


Figura 2.7 Esquema para la transformación de nitrógeno en los proceso de tratamiento biológico

2.3.4 Patógenos

La eliminación de patógenos se logra por diferentes mecanismos, destacando entre ellos la adsorción sobre partículas del sustrato, sedimentación, radiación ultravioleta, reacciones químicas, muerte natural, la toxicidad que ejercen los antibióticos producidos por las raíces de las plantas en los organismos patógenos y la acción de predadora de bacteriófagos y protozoos. La reducción de coliformes va desde un 82% hasta cerca del 100%. La remoción de patógenos por humedales construidos es superior a los procesos de tratamiento convencionales, que típicamente tienen una reducción del 90%.

La desinfección por cloración puede reducir los niveles de bacterias coliformes, en un efluente de un humedal hasta los niveles estándares de agua potable o menores 2.2NMP/100mL. A este nivel, el riesgo asociado con la descarga o reuso del agua residual son muy bajos (Hammer, 1989).

2.4 Ventajas

Al igual que otros sistemas naturales de depuración, los humedales construidos presentan algunas ventajas frente a los sistemas convencionales mecanizados, entre las cuales cabe destacar:

- Bajos costos de construcción.
- Son menos costosos que otras opciones de tratamiento.
- Los costos de operación y mantenimiento son bajos (energía y suministros).
- Simplicidad en la operación. Requieren un tiempo bajo de operarios. Pueden ser operados por operarios con poca experiencia en el tratamiento de aguas residuales.
- La operación y mantenimiento no requiere un trabajo permanente en la instalación.
- Facilitan el reciclaje y reutilización del agua.
- El humedal proporciona un hábitat para muchos organismos.
- Además proporcionan beneficios ambientales en términos de vida silvestre, ampliación del hábitat y una oportunidad de educación ambiental de la población.

- Son sistemas con tiempo de residencia hidráulicos muy altos por lo que soportan las variaciones de caudal o carga de contaminantes.
- Pueden construirse en armonía con el paisaje.
- Son una aproximación sensible con el medio ambiente que cuenta con la aceptación del público.

En el caso de humedales de flujo subsuperficial:

- Disminuye la incidencia de malos olores debido a la naturaleza subterránea.
- Bajo riesgo de exposición directa de las personas y de aparición de insectos.
- Protección térmica debido al flujo subterráneo.

2.5 Desventajas

Algunas de las desventajas de los humedales frente a sistemas convencionales son las siguientes:

- Grandes extensiones de terreno, comparado con los otros tratamientos convencionales.
- Relativamente mas barato que otras opciones, solo en el caso de tener terreno disponible.
- La puesta en marcha, desde algunos meses o un año.
- El rendimiento del sistema puede ser menos constante que el de un proceso convencional.
- El rendimiento del sistema puede ser estacional en respuesta a los cambios en las condiciones ambientales, incluyendo lluvias y sequías.
- Los componentes biológicos son sensibles a sustancias tóxicas como el amoníaco y los pesticidas que llegan a ser tóxicos.
- Se requiere una mínima cantidad de agua para que sobrevivan, pero no soportan estar completamente secos.
- El uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales es de reciente desarrollo y no existe aun un consenso sobre el diseño óptimo del sistema y no se cuenta con suficiente información sobre el rendimiento a largo plazo.
- Falta de conocimiento y consenso general sobre los factores de diseño.

2.6 Aplicaciones

Los humedales construidos se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales que se resumen a continuación.

- Aguas domésticas y urbanas.
- Aguas industriales, incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos y alimentación. En la mayoría de los casos los humedales se utilizan como una etapa posterior al tratamiento convencional como pueden ser lagunas aireadas.
- Lixiviados de vertederos.
- Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.

Actualmente, se está evaluando el nivel de eliminación de fármacos. Los resultados preeliminares indican que estos sistemas tienen una buena capacidad de eliminación de analgésicos como el ibuprofeno y también, aunque con menor medida, de reguladores lipídicos como el ácido clofíbrico (fármacos para adelgazar).

2.7 Operación y mantenimiento de humedales

Aunque la operación y control de los humedales es prácticamente nula, estos son muy importantes si se desea obtener buenos resultados en la remoción de contaminantes. La operación y mantenimiento debe enfocarse a los factores más importantes para el rendimiento del tratamiento:

- Proporcionar una gran oportunidad de contacto del agua con la comunidad microbiana y sedimentos.
- Asegurar que el flujo alcance todas las partes del humedal.
- Mantener un ambiente saludable para los microorganismos y un buen crecimiento de la vegetación.

Los humedales deben controlarse periódicamente para observar las condiciones generales del sitio y para descubrir cambios importantes que pueden ser adversos, como erosión o crecimiento de la vegetación indeseable.

El aumento de los sedimentos acumulados así como la capa de residuos, disminuye la capacidad de almacenamiento de agua, afectando la profundidad de está en el humedal y posiblemente alterando los caminos de flujo. Los sedimentos, la capa de residuos y la profundidad del agua deben observarse de vez en cuando.

2.7.1 Hidrología

En humedales SFS, el agua debe cubrir todas las partes de la superficie del humedal, se debe de monitorear periódicamente para asegurar que el agua pase por todas las partes de este, que el aumento de residuos no bloqueen caminos de flujo ya que estos aumentan la probabilidad de la existencia de mosquitos. Además de lo ya mencionado se deben de monitorear el nivel del agua.

2.7.2 Vegetación

El nivel del agua es clave para el crecimiento de la vegetación, mientras las plantas del humedal pueden tolerar cambios temporales en la profundidad del agua, se debe tener cuidado de no exceder los límites de tolerancia de las especies usadas durante periodos largos.

La vegetación debe ser inspeccionada y deben quitarse especies invasoras, también es importante observar si presenta signos de alguna enfermedad o daños por insectos además se deben reemplazar las plantas muertas cuando sea necesario. Mantener que la densidad de la vegetación no cubras mas del 60% del humedal.

Algunos expertos creen que es necesaria la poda por dos razones:

- La remoción de nutrientes es mayor cuando las vegetación esta creciendo.
- Cuando las plantas se secan se descomponen y liberar sales, además aumenta la DBO dentro del agua. Esto ocasionaría problemas de calidad del agua.

2.7.3 Mosquitos

Los mosquitos son comunes en humedales naturales y pueden esperarse en humedales construidos. La mejor forma de evitar problemas con mosquitos en humedales construidos es crear condiciones que no sean atractivas para los mosquitos

y que no se desarrollen larvas, esto sería evitando bloqueos de flujo, ya que el movimiento minimiza el desarrollo de estos.

El control de mosquitos con insecticidas, aceites, etc., es a menudo difícil en los humedales construidos. El uso de insecticidas en humedales construidos con grandes cantidades de materia orgánica es ineficaz porque la materia orgánica los absorbe y se diluyen rápidamente. Los tratamientos químicos deben ser usados con precaución porque corre el riesgo de contaminar el humedal.

2.7.4 Control

El control es una operación importante que:

- Proporciona datos para mejorar el tratamiento del sistema.
- Identifica problemas.

El control permite identificar los problemas a tiempo, cuando la intervención es más eficaz.

2.8 Antecedentes

La construcción de humedales de flujo subsuperficial surgió como una tecnología para el tratamiento de aguas residuales en el Este de Europa basada en investigaciones por Seidel (Seidel, 1966) a principios de los 60's, y por Kickuth (Kickuth, 1977) a finales de los 70's y principios de los 80's. En Estados Unidos el desarrollo del trabajo comenzó a principios de los 80's, con investigaciones de Wolverton (Wolverton y col., 1983) y Gersberg (Gersberg y col., 1985).

El concepto de humedales de flujo subsuperficial desarrollado por Seidel (Seidel, 1966), consiste en una serie de camas compuestas de arena o grava soportando vegetación acuática como la chuspa (*Typha*), tule (*Scirpus*) y carrizo (*Phragmites*), siendo el carrizo el más usado. Seidel obtuvo excelentes remociones de DBO₅, SST, fósforo, nitrógeno y complejos orgánicos.

Kickuth (Kickuth, 1977) propuso el uso de suelos cohesivos en vez de la arena o grava, la vegetación de preferencia carrizo y con flujo horizontal. La teoría de Kickuth sugiere que el crecimiento, desarrollo y muerte de las raíces de las plantas y rizomas puede abrir la parte superior de los canales de flujo hasta una profundidad de

aproximadamente 0.6 m en suelos cohesivos, de modo que la conductividad hidráulica de un suelo arcilloso puede convertirse gradualmente al equivalente de un suelo arenoso. Esto permite que el flujo a través del medio tenga velocidades razonables y también aumenta la capacidad de adsorción de fósforo y otros materiales. En 1990 se alcanzó una remoción muy efectiva de DBO₅, SST, fósforo, nitrógeno y complejos orgánicos, en aproximadamente 500 de estos sistemas construidos en Alemania, Dinamarca, Austria y Suiza. Los sistemas en operación se incluyeron desde los familiares hasta grandes sistemas de tratamiento de aguas municipales e industriales (Boon, 1985).

A principios de 1985, un número de sistemas de humedales con carrizo fueron construidos en Gran Bretaña basados en los conceptos de Kickuth, pero en muchos casos se utilizó grava en lugar de suelos cohesivos ya que tiene una mayor conductividad hidráulica. Muchos de estos humedales fueron construidos con una pendiente en el fondo de 0.5 a 1%. El propósito de la pendiente en el fondo es que tenga un gradiente hidráulico suficiente para asegurar el flujo del agua a través del humedal.

Wolverton (Wolverton y col., 1983) comenzó su trabajo en Louisiana con una bandeja experimental en un invernadero que contenía roca y grava como medio granular, soportando vegetación acuática emergente. La bandeja se llenó con agua residual y se vaciaban después de un cierto número de horas (en un rango de 12 a 48 horas). En esencia el procedimiento era llenar y tirar en un proceso por lotes. La remoción de DBO₅, SST y NH₃ fue excelente mientras que la remoción de fósforo fue moderada, con un día de tiempo de retención hidráulico (TRH).

El trabajo realizado por Gersberg (Gersberg y col., 1985) durante varios años en Santee, CA, fue en sistemas a gran escala y flujo continuo, con lechos de grava con una profundidad de 0.76 m. La remoción de DBO₅, SST y NH₃, fue relacionada con la profundidad de la penetración de la raíz para las variedades de la planta (*Typha*, *Scirpus*, *Phragmites*), los mejores resultados se dieron con la raíz más profunda (*Scirpus* y *Phragmites*). El TRH en el sistema fue de 6 días, comparado con un día de trabajo efectuado por Wolverton (Wolverton y col., 1983).

A mediados de los 80's The Tennessee Valley Authority (TVA) comenzó un programa de investigación y asistencia técnica sobre humedales construidos para el tratamiento de una gran variedad de aguas de desecho (aguas residuales municipales, drenajes ácidos de minas, desechos agrícolas, etc.). El criterio de diseño para humedales de flujo subsuperficial para aguas residuales originalmente era derivado del trabajo de Kickuth, y han sido modificados al paso de los años. Hacia 1991 había en operación probablemente 80 humedales de flujo subsuperficial en diferentes estados, basados en estos criterios y con la asistencia proporcionada por TVA. Estos sistemas varían en tamaños de unidades individuales a grandes sistemas municipales.

Este tipo de tratamiento de depuración se ha difundido en Europa, Australia y América del Norte en los últimos 25 años, por lo cual hoy día existen más de 10,000 instalaciones en todo el mundo, con superficies entre 200 m² y 400m² (Arias, 1998). Estas cifras revelan que son una buena alternativa y que una mejora en sus características y condiciones de funcionamiento permitirán un progreso en el área ambiental (U.S. Environmental Protection Agency, 1993).

En México, este proceso se indujo desde 1990 a escala piloto, y desde 1993 a escala real. Fermín Rivera y Arturo Calderón de la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala (UNAM), realizaron estudios de biotratamiento de aguas negras con lechos de carrizos (Rivera y col., 1993). Esperanza Robles y colaboradores llevaron a cabo una evaluación de la remoción de materia orgánica por el método de la zona de la raíz en cinco humedales a escala de laboratorio, en la planta de tratamiento de aguas residuales del Parque de Tangamanga I de la ciudad de San Luis Potosí, utilizando carrizos y tules (Robles y col., 1993).

A finales de los 90's (Laber J., y col., 1999), se construyó una planta de tratamiento para el efluente del hospital Dhulikhel, de Nepal, esta planta consistía de un tanque de abastecimiento, un humedal horizontal de flujo subsuperficial como primer etapa y como segunda etapa un humedal de vertical de flujo subsuperficial. Las dimensiones eran de 140m², con una profundidad de 60 cm para el humedal horizontal, y de 120m² para el vertical con una profundidad de 90cm. La remoción de carbono orgánico disuelto fue del 66% para el humedal horizontal y del 78% para el humedal vertical.

En México, el uso de humedales artificiales no está muy explorado, encontrándose solo 20 prototipos de humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal, en los estados de Oaxaca y Michoacán. En Yucatán a nivel de microescala se está trabajando con humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de agua residual porcícola; en la Trinitaria y en los Altos de Chiapas, se está utilizando estos humedales para el tratamiento de aguas porcícolas y de alberges para comunidades indígenas (Figuroa G. J. A., 2005).

En Michoacán, durante 2004, se elaboró el proyecto para la instalación de humedales en la localidad de Cucuchucho, perteneciente al municipio de Tzintzuntzan Michoacán a las orillas del lago de Pátzcuaro, esta comunidad descargaba directamente sus aguas residuales al lago. El lago presenta una condición eutrófica (IMTA 2001), básicamente por la descarga de aguas residuales municipales y de retorno agrícola. Este proyecto se realizó como parte del programa para la recuperación ambiental de la cuenca del lago de Pátzcuaro. Se obtienen altas eficiencias de tratamiento y se cumple con los límites establecidos en la normativa mexicana (Rivas, A., 2006). Con la instalación del humedal se eliminaron áreas pantanosas, así como olores fétidos y riesgos a la salud de animales y personas, además se están generando beneficios ambientales, sociales y de salud (Rivas, 2006).

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

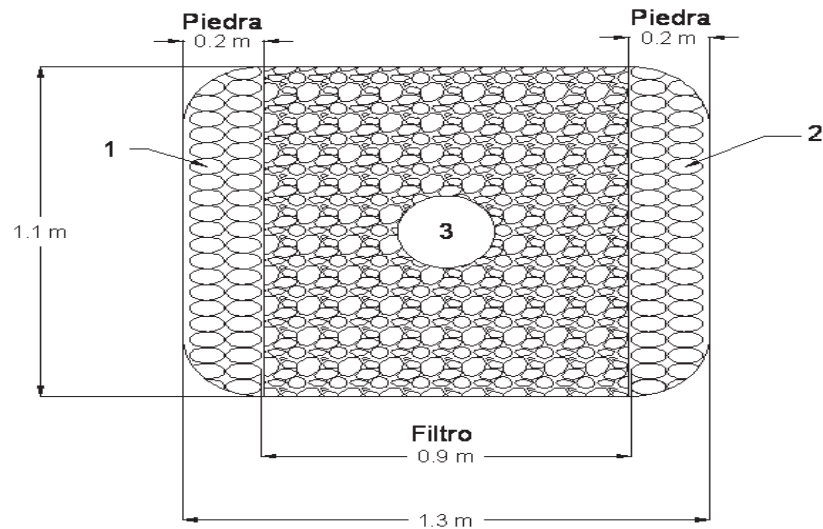
En el diseño de la construcción de humedales, se deben considerar aspectos muy importantes como son las características del agua residual, la calidad requerida del efluente, tipo de sistema acuático, mecanismos de operación de remoción de contaminantes, factores ambientales locales, parámetros de diseño del proceso y características físicas del diseño.

La calidad del efluente depende del cuerpo receptor (río, lago, estuario, estanque, laguna, etc.), esta calidad esta bajo los criterios de descarga permisible de las Normas Oficiales Mexicanas: NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, para más detalles de las normas ver el ANEXO I.

Para determinar el área del humedal a construir, se realiza una caracterización del agua residual y se establece la calidad de efluente que deseamos obtener de acuerdo a las normas antes mencionadas. En la construcción de nuestro humedal no fue necesario determinar el área, ya que esta estaba definida por las dimensiones de las tinas utilizadas, por lo que el diseño se hizo al contrario, a partir del área se definieron la profundidad del lecho del medio granular, profundidad del agua, el volumen, tiempo de residencia y el caudal.

3.1 Construcción del humedal

Los humedales se construyeron a un lado de la planta de tratamiento de agua del Hospital de la Mujer de la Ciudad de Morelia, para el tratamiento de sus aguas residuales, se utilizaron tres tinas con dimensiones de 1.30 m de largo por 1.10 ancho y 0.9 m de profundidad tal como se observa en la Figura 3.1. El área superficial de cada tina es de 1.132 m². Con la finalidad de evitar canalizaciones de flujo y facilitar la salida del agua tratada, a los extremos de la tina se colocaron 0.2 m de piedra de 5,08 cm (dos pulgadas) de diámetro, en el espacio restante de la tina (0.9 m) se colocó grava de 1.9 cm (tres cuartos de pulgada) de diámetro con una profundidad de 0.35 m y con una pendiente del uno por ciento. La Figura 3.2 muestra una vista lateral de los humedales construidos.



1. Entrada del humedal
2. Salida del humedal
3. Medidor de nivel

Figura 3.1 Vista panorámica de las tinas usadas del humedal construido

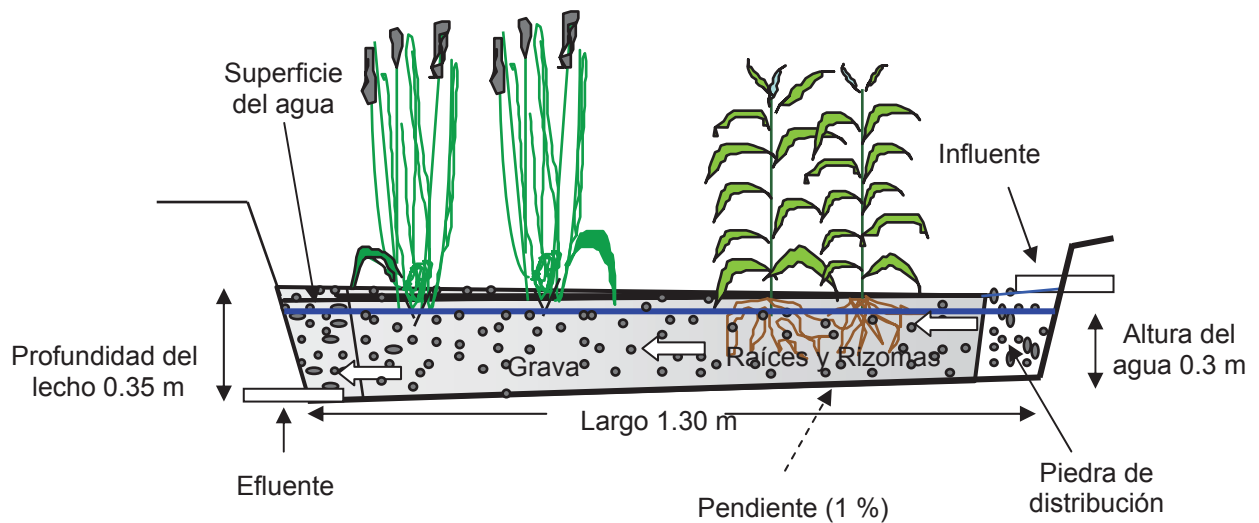


Figura 3.2 Vista lateral de las tinas usadas del humedal construido.

El agua residual es impulsada desde el carcamo de la planta de tratamiento de aguas por medio de una bomba y conducida por tuberías a un depósito de PVC de 250 litros, tal como se muestra en la Figura 3.3. Los flujos de entrada a los humedales se distribuyen desde el depósito a través de mangueras de hule, para la salida se utilizó tubería de PVC hidráulico de 1.27 cm (media pulgada) de diámetro.



Sistema de bombeo



Deposito de PVC

Figura 3.3 Sistema de distribución del influente

Se trasplantaron especies nativas de la región las cuales fueron, chuspata, tule y carrizo, la chuspata y tule (ver Figura 3.4) se recolectaron a las orillas del lago de Pátzcuaro, el carrizo fue recolectado de las orillas del río chiquito de esta ciudad. Los humedales se mantuvieron por lotes durante cuatro meses con el objeto de que se establecieran las poblaciones de microorganismos y se adaptara la vegetación. En la Figura 3.4 se muestran los humedales después de cuatro meses. La operación del humedal por lotes, es de gran importancia, debido a que existe una buena distribución de las aguas residuales y suministro de oxígeno (Laber J., y col., 1999).



Humedal construido (Carrizo)



Humedal construido (Tule)



Humedal construido (Chuspata)

Figura 3.4 Humedales construidos después de 4 meses de adaptación.

Al término de la adaptación se siguió operando por lotes manteniendo el nivel del agua a 0.30 m, 5 cm debajo de la profundidad del lecho y un tiempo de retención hidráulico (TRH) de siete días, lo que corresponde a un flujo de 11.5318 mL/min, posteriormente se procedió a la caracterización fisicoquímica del agua cruda y tratada. Para determinar el TRH óptimo se realizaron pruebas preliminares con 2, 7 y 14 días, encontrando 7 días como el mejor. En la Figura 3.5 se muestra en lugar donde se toma el efluente para su caracterización. La toma de datos se realizó durante el periodo Noviembre del 2005 a Mayo de 2006 (8:00 am – 11:00 am).



Figura 3.5 Toma del efluente

Las variables que van a influenciar en el resultado de las variables de respuesta (concentración de DBO, DQO, NTK, N-NH₃, N_{ORG}, SSED, SS, SDIS y coliformes fecales), la cuales son las que se quieren minimizar se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Variables involucradas en el sistema

Variables	
Demanda bioquímica de oxígeno	Demanda química de oxígeno
Oxígeno disuelto	Nitrógeno total
Nitrógeno amoniacal	Nitrógeno orgánico
Sólidos en todas sus formas	Tiempo de retención hidráulico
Temperatura	Flujo volumétrico

Cabe señalar que aunque todas las variables afectan al sistema, en este tipo de humedal el tiempo de retención hidráulico y el flujo se trataron de mantener constantes

3.2 Muestreo

El muestreo de agua residual se realizó a partir del 16 de noviembre del 2005 al 24 de mayo del 2006, siendo estos muestreos simples. Los parámetros de campo cuantificados fueron temperatura (T, °C), pH, y conductividad eléctrica (CE). Los parámetros cuantificados en laboratorio fueron demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total kjeldahl (NTK), nitrógeno amoniacal (N-NH₃), nitrógeno orgánico (N_{ORG}), sólidos sedimentables, sólidos disueltos, sólidos suspendidos y coliformes fecales. Las muestras fueron tomadas del influente y efluente de cada humedal. El volumen recogido por muestreo para determinar los parámetros cuantificados en el laboratorio fue de tres litros. Estas muestras se almacenaron en botes de plástico, limpios y etiquetados para su transportación. El traslado de las muestras al laboratorio es muy importante, ya que es necesario mantener condiciones similares al momento del muestreo.

3.3 Determinación de la Temperatura

La temperatura ejerce una gran influencia en algunos procesos químicos y biológicos que hacen parte de la depuración de aguas residuales. Los contaminantes disueltos en el agua son eliminados por acción de las reacciones bioquímicas producidas en el humedal, estas reacciones son muy sensibles a la temperatura, de tal forma que al ser favorables las condiciones ambientales habrá una gran actividad microbiológica, la cual es responsable de la eliminación de los nutrientes presentes en el agua residual (Corzo H. A., 2004).

La medición de la temperatura se realizó con un equipo multiparamétrico marca HANNA en el influente y efluente de cada humedal. Para la medición, el electrodo del multiparamétrico se sumerge por unos minutos a la muestra a valorar y se obtiene directamente el valor de temperatura de la muestra. Entre muestra y muestra es necesario limpiar el electrodo con agua destilada.

3.4 Determinación del pH

Los aspectos químicos y biológicos del agua de los humedales están afectados por el pH. Muchas bacterias no pueden sobrevivir fuera de un rango de pH. Las bacterias desnitrificantes tienen su mejor rendimiento entre el rango 6.5 y 7.5 mientras que las que realizan la nitrificación en 7.2. Esto mismo se podría decir de otras bacterias existentes en los humedales (Arias T. O., 2004).

Los humedales construidos utilizados para el tratamiento de aguas residuales normalmente tienen un pH cercano al neutro o ligeramente ácido. Los humedales de flujo subsuperficial, al igual que los de flujo superficial, tienen la capacidad de amortiguar las variaciones de pH del agua residual entrante (Kadlec R.H., y col., 2000).

El pH se midió con un equipo portátil provisto con un electrodo de pH (multiparamétrico HANNA) en el influente y efluente de cada humedal. Para calibrar el equipo se utilizaron soluciones buffer para pH 4, 7 y 10. El electrodo se sumerge en la muestra a valorar, se esperan unos minutos para estabilizar y posteriormente se toma la lectura de pH. Entre lectura de cada muestra es necesario limpiar el electrodo con agua destilada.

3.5 Determinación de DBO₅

Mediante el análisis de DBO₅ se determina la cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas. Si en el medio existe suficiente cantidad de sustancias orgánicas, muchas bacterias presentes estarán trabajando para descomponer estas sustancias. Este es un parámetro indispensable cuando se necesita determinar el estado o la calidad del agua. Cuanto mayor cantidad de materia orgánica contiene la muestra, más oxígeno necesitan sus microorganismos para degradarla, el proceso de descomposición varía según la temperatura, este análisis se realiza en forma estándar durante cinco días a 20°C.

Para determinar el DBO se utilizó el método de dilución (APHA, AWWA, WPCF, 1985), este método se basa en el concepto fundamental de que la velocidad de degradación bioquímica orgánica es directamente proporcional a la cantidad de materia orgánica oxidada. Este consiste en seleccionar una dilución en por ciento de volumen

de la muestra para siembra como se describe en la Tabla 3.2. Se recomienda usar agua de dilución e incubar a 20°C.

Tabla 3.2 Diluciones recomendables para la determinación de DBO₅

Tipo de desecho	DBO ₅ (mg/L)	% Dilución
Desecho industrial concentrado	500 – 5000	0.1 – 1.0
Aguas residuales domésticas	100 – 500	1.0 – 5.0
Efluentes tratados	20 – 100	5.0 – 25
Aguas superficialmente contaminadas	5 – 20	25 – 100

3.6 Determinación de DQO

La DQO se usa para comprobar la carga orgánica de aguas residuales que pueden ser o no biodegradables o bien contienen compuestos que inhiben la actividad de los microorganismos. La determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), proporciona la medida del oxígeno que es equivalente a la porción de materia orgánica, presente en una muestra de agua, capaz de oxidarse por procedimientos químicos.

La DQO es un parámetro importante y rápido para determinar el grado de contaminación de corrientes y aguas residuales industriales y para el control de las plantas de tratamiento de aguas de desecho. Junto con la prueba de DBO, la DQO es útil para indicar la presencia de sustancias tóxicas y de sustancias orgánicas resistentes biológicamente. El método que se utilizó en la determinación de DQO fue el Método del dicromato de potasio (APHA, AWWA, WPCF, 1985).

3.7 Determinación de Nitrógeno

El análisis del nitrógeno ha sido practicado desde que el hombre comprobó que el agua puede transmitir enfermedades. Se sabe que el agua contaminada puede autopurificarse en un periodo determinado de tiempo. Trabajos químicos muestran que mucho del nitrógeno se encuentra en forma orgánica (proteínas) y amoniacal.

3.7.1 Nitrógeno Total Kjeldahl

El nitrógeno que entra al sistema de humedales puede medirse como nitrógeno orgánico y amoniacal (la suma de estas se representa como Nitrógeno Total Kjeldahl).

El método utilizado para determinar analíticamente el nitrógeno total fue el método Kjeldahl (APHA, AWWA, WPCF, 1985). Su procedimiento consiste en tomar una muestra de agua, adicionar la solución de digestión y aplicar el procedimiento para nitrógeno orgánico. El principio de este procedimiento está basado en que el nitrógeno de muchos compuestos orgánicos, amoníaco libre y nitrógeno amoniacal es convertido a sulfato de amonio.

3.7.2 Nitrógeno Amoniacal (N-NH₃)

El amoníaco está presente en agua superficial y agua residual. Su concentración generalmente es baja en agua subterránea, debido a la adsorción en las partículas del suelo y arcillas, y no es fácilmente lixiviado por los suelos. Es producido en gran cantidad durante la desaminación de compuestos que contienen nitrógeno orgánico y por la hidrólisis de la urea. La nitrificación seguida de la desnitrificación, es la principal vía para la remoción de amoníaco, la nitrificación se lleva a cabo en condiciones aeróbicas. La oportunidad de nitrificar existe cuando se tienen condiciones aerobias y después de que la mayoría de la DBO₅ ha sido removida, para que los organismos nitrificantes puedan competir con los organismos heterótrofos por el oxígeno disponible.

El método seleccionado para la determinación de nitrógeno amoniacal es el método de titulación precedido de una destilación (APHA, AWWA, WPCF, 1985). Se basa en una operación de destilación de la muestra de agua, en condiciones alcalinas (pH=9.5). El nitrógeno amoniacal del destilado es recibido en una solución de ácido bórico indicador mixto y cuantificado por titulación con solución de ácido sulfúrico.

3.7.3 Nitrógeno Orgánico (N_{ORG})

El nitrógeno orgánico es definido funcionalmente como el nitrógeno orgánicamente combinado en el estado de oxidación trivalente, no incluye todos los compuestos de nitrógeno orgánico, pero sí los siguientes: materiales naturales como proteínas y peptinas, ácidos nucleicos y urea, y numerosos materiales orgánicos sintéticos (Cuevas C. J., 1997). El nitrógeno orgánico presente está asociado a la materia en suspensión presente en el agua residual y por tanto se elimina mediante filtración. Se trata del nitrógeno que conforma las proteínas, los carbohidratos

complejos y las ligninas. Parte del nitrógeno orgánico se hidroliza para formar aminoácidos que se pueden descomponer adicionalmente para producir iones amonio. Se puede dar tanto en la zona aerobia como en la anaerobia.

El método para la determinación de nitrógeno orgánico es el método Kjeldahl (APHA, AWWA, WPCF, 1985). Se basa en una etapa de digestión de la muestra de agua, en presencia de H_2SO_4 , K_2SO_4 y $HgSO_4$, para convertir el nitrógeno de muchos compuestos orgánicos a sulfato de amonio, durante la digestión se forma un complejo de amonio mercúrico el cual es posteriormente descompuesto con $Na_2S_2O_3$, esto indica que el nitrógeno orgánico ha sido convertido a nitrógeno amoniacal, el cual es destilado en condiciones alcalinas en una solución indicadora de ácido bórico, para ser cuantificado por titulación con ácido sulfúrico.

3.8 Determinación de sólidos

3.8.1 Sólidos sedimentables

Los sólidos sedimentables están formados por partículas más densas que el agua, por esta razón sedimentan rápidamente. La determinación de sólidos se usa para el diseño de tanques de sedimentación primaria en plantas de tratamiento biológico, además en la operación de plantas de tratamiento de aguas residuales para determinar la eficiencia de las unidades de sedimentación.

El método estándar para medir los sólidos sedimentables consiste en la decantación de la muestra en un cono Imhoff, en el se coloca un litro de muestra y se deja en reposo 45 minutos posteriormente se agita para que los sólidos depositados en las paredes del cono sedimenten, se deja en reposo 15 minutos mas y se lee directamente del cono Imhoff en mL/L (APHA, AWWA, WPCF, 1985).

3.8.2 Sólidos suspendidos

Los sólidos suspendidos en agua residual se puede definir como la fracción de la materia sólida que queda retenida en un filtro de características establecidas (tamaño efectivo de poro de $0.2 \mu m$ o inferior (Chico, 2002)).

La determinación de sólidos suspendidos es extremadamente valiosa, es uno de los mejores parámetros usados para valorar la concentración de las aguas residuales y para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento.

La determinación de sólidos se lleva a cabo colocando un disco de fibra de vidrio en un crisol Gooch, colocar el crisol con el filtro en un aparato de filtración y aplicar vacío, después que el agua se ha filtrado, desconectar el vacío y pasar el disco a una estufa a 103°C por una hora, enfriar el crisol y pesar. (APHA, AWWA, WPCF, 1985)

3.8.3 Sólidos disueltos

Los sólidos disueltos consisten principalmente en sales inorgánicas, pequeñas cantidades de materia orgánica y gases disueltos.

La cantidad de sólidos disueltos en el agua se puede medir en base a conductividad eléctrica, tal medida indica la capacidad de una muestra para conducir la corriente eléctrica, no hay agua que tenga cero de conductividad eléctrica, el agua potable tiene por lo general una conductividad entre 800 y 1200 μS .

En los humedales también se pueden producir sólidos disueltos. Los mecanismos que la producen son varios son varios, entre ellos: la descomposición de las partes subterráneas de los macrófitos (rizomas y raíces), la descomposición de la materia orgánica depositada en la superficie del medio granular (hojas y tallos de los macrófitos) y la muerte de algas, hongos y bacterias existentes en el medio.

Además de usar la conductividad eléctrica para la determinación de sólidos disueltos puede ser obtenido por evaporación de una muestra filtrada de la siguiente manera: se miden 20 ml de la muestra, se pasan a una cápsula de porcelana, posteriormente evaporar la muestra, y esperar a que enfríe y pesar (APHA, AWWA, WPCF, 1985).

3.9 Determinación de Coliformes Fecales

Los organismos coliformes son bacterias en forma cilíndrica, presentes en el tracto intestinal humano. Una persona descarga entre 0.1 y 0.4 billones de organismos coliformes por día, además de otras especies de microorganismos, algunos no causan daño en condiciones normales y otros pueden incluso ocasionar la muerte.

La presencia de coliformes en el agua, indica contaminación por excretas fecales de organismos de sangre caliente, como es el hombre.

Los coliformes fecales son bacilos cortos, no esporulados que fermentan lactosa con producción de acidez y gas a temperatura entre 35 ± 0.5 y 44.5°C en 48 horas.

Es importante señalar que estos organismos están relativamente ausentes si la contaminación no es de origen fecal.

La determinación de coliformes se llevo a cabo en placas Petrifilm (MR) de 3M que son medios de cultivo para realizar pruebas microbiológicas rápidas y tienen un formato listo para usarse.

3.10 Análisis estadístico de datos

Para estudiar la variación en la concentración en todo el periodo de los parámetros ensayados se realizó análisis estadístico por grupos pareados con el estadístico de prueba "t" de student y análisis de varianza (ANOVA) con el estadístico de prueba "f" para determinar la variación entre grupos y dentro de grupos (error $\alpha \leq 5\%$).

3.10.1 Análisis de Varianza

El análisis de varianza (**ANOVA**, según terminología inglesa Analysis of Variance) es una colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados. El análisis de varianza sirve para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos.

El procedimiento para comparar estos valores está basado en la varianza global, observada en los grupos de datos numéricos a comparar. Típicamente, el análisis de varianza se utiliza para asociar una probabilidad a la conclusión de que la media de un grupo de puntuaciones es distinta de la media de otro grupo de puntuaciones.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots \dots \dots = \mu_K$$

$$H_a : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \dots \dots \dots \neq \mu_K$$

Procedimiento

Los datos para el análisis de varianza se obtienen tomando una muestra de cada población y calculando la media y la varianza en el caso de cada muestra.

Suposiciones

- Las muestras deben ser del tipo aleatorio independiente.
- Las muestras deben ser obtenidas de poblaciones en las que sus datos sigan una distribución normal.
- Las poblaciones deben de tener varianzas iguales, es decir:

$$\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \dots = \sigma_k^2 \quad \text{Donde } k \text{ es el número de muestras.}$$

Se utilizó el software estadístico JMP ® y los resultados se dan en forma de una tabla de Análisis de Varianza, para el caso de un solo factor de variación.

Tabla 3.3 Análisis de varianza para un experimento de un solo factor, modelo de efectos fijos

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	F ₀
Tratamiento	SS _{Tratamientos}	a – 1	MS _{Tratamientos}	$\frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E}$
Error	SS _E	a(n – 1)	MS _E	
Total	SS _T	an – 1		

3.10.2 Prueba de Hipótesis con respecto a las medias mediante la distribución t de Student

La distribución t de student es una distribución que para muestras con tamaño N=30 se aproxima estrechamente a la curva normal tipificada, es por ello que para muestras que siguen una distribución normal se puede realizar un ensayo de hipótesis y significación mediante su estadístico t.

El estadístico “t” permite comparar dos distribuciones distintas que tienen media y desviación típica diferentes, con las siguientes hipótesis:

- H₀ : $\mu_1 = \mu_2$ no hay diferencia esencial entre las dos distribuciones
- H_a : $\mu_1 \neq \mu_2$ en la que hay diferencia esencial entre los dos grupos

Bajo la hipótesis nula H₀ se tiene que el estadístico “t” sigue la ecuación:

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (1)$$

De aquí se asume que las varianzas son iguales

Donde

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (2)$$

Y

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

El grado de libertad de las muestras corresponde a $(n_1 + n_2 - 2)$ para el estadístico t de student.

Si se asume que las varianzas son diferentes, en este caso, el valor estadístico de prueba está dado por la Ecuación (4):

$$t_0^* = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (4)$$

Los grados de libertad ν para $t_{\alpha/2}$ se obtienen con:

$$\nu = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)^2}{\frac{(S_1^2/n_1)^2}{n_1 + 1} + \frac{(S_2^2/n_2)^2}{n_2 + 1}} - 2 \quad (5)$$

Prueba de Varianzas: F de Fisher.

Para determinar si las varianzas entre dos poblaciones son iguales o diferentes se utiliza la prueba de varianzas, o prueba de Fisher a las 2 muestras. La primera prueba de hipótesis a probar está dada por la ecuación 6a y 6b:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \quad (6a)$$

$$H_a: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \quad (6b)$$

Donde H_0 es la hipótesis nula que representa la igualdad de la varianza de la población 1 (σ_1^2) y de población 2 (σ_2^2), mientras que la hipótesis alterna, representada por H_a , significa que las varianzas de ambas poblaciones son diferentes. El estadístico F dado por la Ecuación (7) donde S_1^2 y S_2^2 son las varianzas de la muestra, sigue una distribución tipo F con n_1-1 y n_2-1 grados de libertad en el numerador y denominador de la Ecuación (7) se acepta la hipótesis nula.

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (7)$$

Entonces, la hipótesis nula se rechaza si

$$F > F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1} \quad (8)$$

$$F < F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$$

Donde $F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$ y $F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$ son los porcentajes superior e inferior de los porcentajes $\alpha/2$ y estos valores se obtienen de tablas estadísticas.

CAPITULO 4

RESULTADOS

El análisis de los resultados inicia con el estudio de los parámetros cuantificados en campo como son: temperatura y pH. En seguida se realiza el análisis de los parámetros cuantificados en el laboratorio como son: demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, nitrógeno total kjeldahl, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, nitrógeno orgánico, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, sólidos disueltos y coliformes fecales.

Para la elección del tiempo de retención hidráulico óptimo, se realizaron caracterizaciones del agua tratada con 2, 7 y 14 días, obteniendo en 7 días los mejores resultados, en el caso de las caracterizaciones con un tiempo de 2 días, el único parámetro cuantificado que se redujo de forma significativa fue la DBO, esto nos hace rectificar los estudios realizados en USA, donde indican que la DBO es eliminada rápidamente, siendo suficiente un tiempo de retención de aproximadamente dos días (U.S. Environmental Protection Agency, 2000a), sin embargo esto no ocurre en la eliminación de nitrógeno y coliformes fecales, debido a que estos necesitan alrededor de 8 días para lograr bajos niveles de degradación. Al hacer la caracterización por un periodo de 14 días, el humedal se ve afectado por la evapotranspiración, ya que el volumen del sistema es insuficiente para cubrir este fenómeno, lo cual no permite obtener muestra suficiente para realizar los análisis correspondientes.

Influyente (Cruda), Efluente (tratada en el sistema con: Chuspata, carrizo y tule)

4.1 Parámetros cuantificados en campo

Siempre que se toma una muestra, se debe anotar la temperatura y el pH del agua de donde se tomó la muestra. Para la mayoría de los análisis, será necesario enviar las muestras a un laboratorio.

4.1.1 Temperatura

Las variaciones de temperatura del influente y del efluente de cada uno de los humedales durante el periodo de muestreo coinciden con los cambios estacionales

invierno-primavera, observando que a partir del mes de marzo se tuvieron las temperaturas más altas. Además se pudo observar que las temperaturas del efluente de los humedales son menores que las del influente debido al flujo subsuperficial. La temperatura mínima y máxima en el influente fue de 22°C y 25°C respectivamente. Para el efluente de los humedales se encontró en un intervalo de 14 y 20°C, en general la temperatura no tuvo variaciones importantes que pudieran influir en los procesos de metabólicos que se dieron en el humedal.

4.1.2 pH

El pH del influente osciló en el rango de 6.99 y 7.63, el efluente del humedal con chuspata entre 7.41 y 7.7, para el tule 7.21 y 7.78 y finalmente el humedal con carrizo 7.50 y 7.89. Los aspectos químicos y biológicos del agua están afectados por el pH, muchas bacterias sobreviven únicamente en determinados rangos de pH. Los humedales construidos utilizados para el tratamiento de aguas residuales normalmente tienen un pH próximo al neutro o ligeramente ácido. Los humedales de flujo subsuperficial, al igual que los de flujo superficial, tienen la capacidad de amortiguar las variaciones de pH del agua residual entrante (Arias T. O., 2004). Generalmente en los intervalos de pH en los que se trabajó se dan diferentes procesos como son la nitrificación, que requiere pH iguales o superiores a 7.2, la desnitrificación que requiere pH comprendidos entre 6.5 y 7.5 (Cuevas C. J., 1997). El pH se mantuvo dentro del límite máximo permisible para descargas de efluentes hospitalarios establecidos en la norma NOM-CCA-029 ECOL/1993 que se encuentran entre 6 y 9.

4.2 Parámetros cuantificados en laboratorio

- Se realizaron muestreos simples, en los cuales las variaciones de los parámetros tanto del influente como del efluente se deben a las actividades propias del hospital tales como: Tococirugía, lavandería, cocina, patología, entre otras.

4.2.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno

La DBO₅ es uno de los parámetros más frecuentemente medidos en las plantas tratadoras de aguas residuales y en sus descargas. En la Figura 4.1 y Tabla 4.1 se

muestra la concentración máxima de materia orgánica en el influente expresada como DBO_5 que fue de 883.49 mg/L y la mínima de 222.90 mg/L. Debido a la actividad de biodegradación que se lleva a cabo en el interior de los humedales esta concentración de carga orgánica se ve reducida en el efluente de los humedales. En el efluente del humedal con chuspata, la máxima concentración que se obtuvo fue de 68.52 mg/L y la mínima de 13.79 mg/L, en el caso del humedal con tule la máxima concentración fue de 66.87 mg/L y la mínima de 10.08 mg/L y finalmente en el humedal con carrizo las concentraciones máximas y mínimas fueron de 68.90 mg/L y 9.57 mg/L respectivamente.

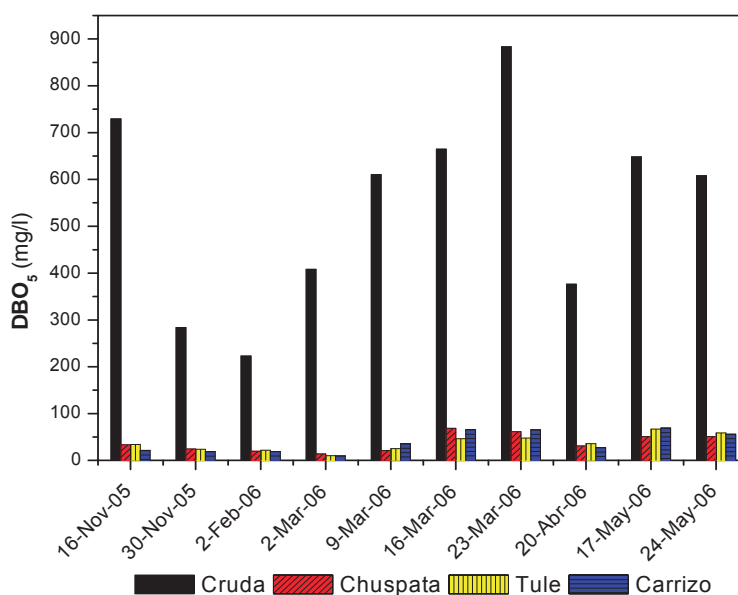


Figura 4.1 Concentración de DBO_5 en el influente y efluente

Las variaciones en la remoción de DBO_5 , fueron mínimas como se aprecia en la figura 4.2 y Tabla 4.1, estas variaciones se deben a que la concentración de los contaminantes del agua alimentada a los humedales no era constante, por lo que en algunos casos era necesario más oxígeno para que se llevara a cabo la degradación de materia orgánica. El por ciento de remoción en promedio para el DBO_5 , en el caso del humedal con chuspata fue del 92.98%, para el humedal con tule del 92.89% y finalmente para el humedal con carrizo del 92.96%. La remoción de DBO están por encima del 90 %, y esto puede lograrse sin tener en cuenta la concentración de entrada.

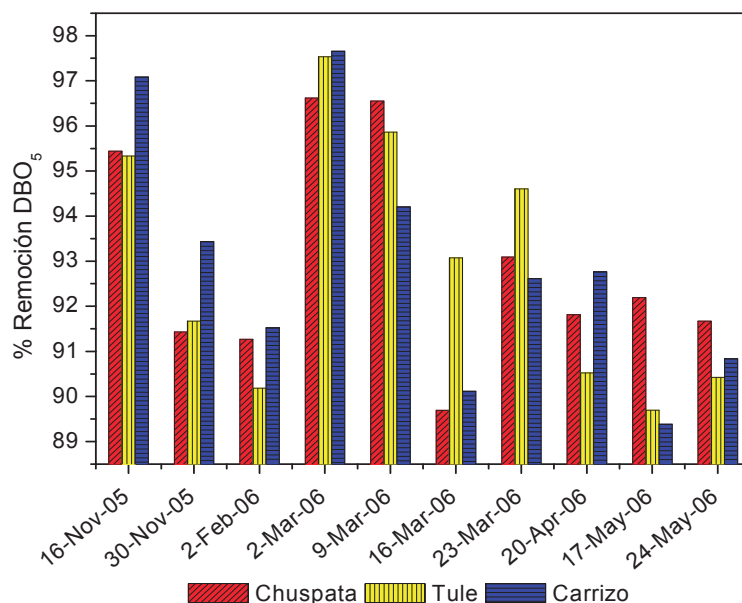


Figura 4.2 % Remoción de DBO₅ de los humedales

Tabla 4.1 Niveles de Eliminación y Remoción de DBO₅

Fecha	Cruda (mg/L)	Chuspata (mg/L)	Tule (mg/L)	Carrizo (mg/L)	% Remoción		
					Chuspata	Tule	Carrizo
16-Nov-05	729.48	33.23	34.04	21.28	95.44	95.33	97.08
30-Nov-05	283.69	24.32	23.64	18.64	91.43	91.67	93.43
2-Feb-06	222.90	19.45	21.88	18.91	91.27	90.18	91.52
2-Mar-06	407.85	13.79	10.08	9.57	96.62	97.53	97.65
9-Mar-06	610.33	21.03	25.26	35.37	96.55	95.86	94.20
16-Mar-06	664.64	68.52	46.04	65.71	89.69	93.07	90.11
23-Mar-06	883.49	61.03	47.71	65.25	93.09	94.60	92.61
20-Abr-06	376.09	30.80	35.66	27.23	91.81	90.52	92.76
17-May-06	648.43	50.66	66.87	68.90	92.19	89.69	89.38
24-May-06	607.90	50.66	58.26	55.72	91.67	90.42	90.83

Con los resultados que se obtuvieron, podemos determinar que tanto la chuspata, el carrizo y tule tienen un alto potencial en el tratamiento de aguas residuales, ya que los valores de DBO₅ resultaron más bajos que los valores establecidos en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, donde se establecen los límites máximos permisibles, siendo de 150 mg/L para riego agrícola y de 75 mg/L para abasto público, por lo que se cumple con esta normatividad aun vigente.

La vegetación juega un papel muy importante en los procesos de remoción de DBO, debido a que la vegetación actúa como bomba de oxígeno atmosférico, para

luego descomponer microorganismo. La remoción de DBO_5 nunca podrá ser del 100% ya que existe producción de DBO_5 debido a la descomposición de los residuos de las plantas y otra materia orgánica natural presente en el humedal, esto hace únicos a este tipo de sistemas.

4.2.2 Demanda Química de Oxígeno

La evolución del influente y efluente a lo largo de la experimentación se puede observar en la Figura 4.3 y la Tabla 4.2. El contenido de materia orgánica en el influente expresada como DQO presentó variaciones significativas con una concentración máxima de 2246.4 mg/L y una mínima de 561.6 mg/L. Respecto al efluente en el humedal con chuspata, se observó un valor máximo de 1048.32 mg/L y un valor mínimo de 124 mg/L. En el humedal con tule la máxima concentración fue de 998.4 mg/L y la mínima de 187.2 mg/L y finalmente en el humedal con carrizo las concentraciones máximas y mínimas fueron de 1198.08 mg/L y 187.2 mg/L respectivamente.

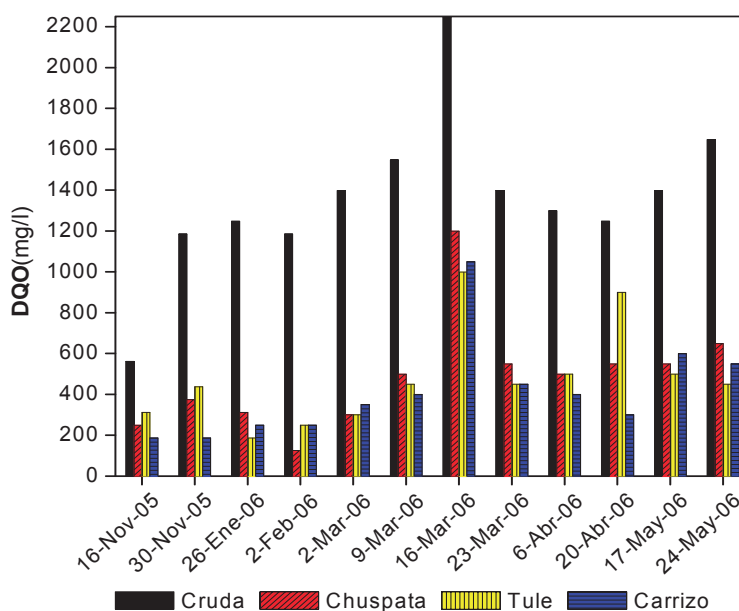


Figura 4.3 Concentración de DQO en el influente y efluente

Las eficiencias de remoción de DQO variaron entre 56 y 89.47% para el humedal con chuspata, 28 y 85% con tule y para el humedal con carrizo entre 44.44 y 84.21% como se muestra en la Figura 4.4 y la Tabla 4.2. Las bajas eficiencias en algunos de los muestreos se puede deber a la variación de las cargas orgánicas en el influente. La

DQO tiene valores más altos que la DBO_5 , debido a que más compuestos pueden ser oxidados químicamente que biológicamente.

La norma NOM-CCA-029 ECOL/1993 establece los límites máximos permisibles en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de hospitales, donde el límite máximo permisible en descargas diarias es de 80mg/L, en los efluentes la concentración estuvo por encima de este límite, esto indica que existe una carga importante de componentes orgánicos que no son degradados biológicamente, por lo cual la estancia de estos componentes en el ambiente será mayor.

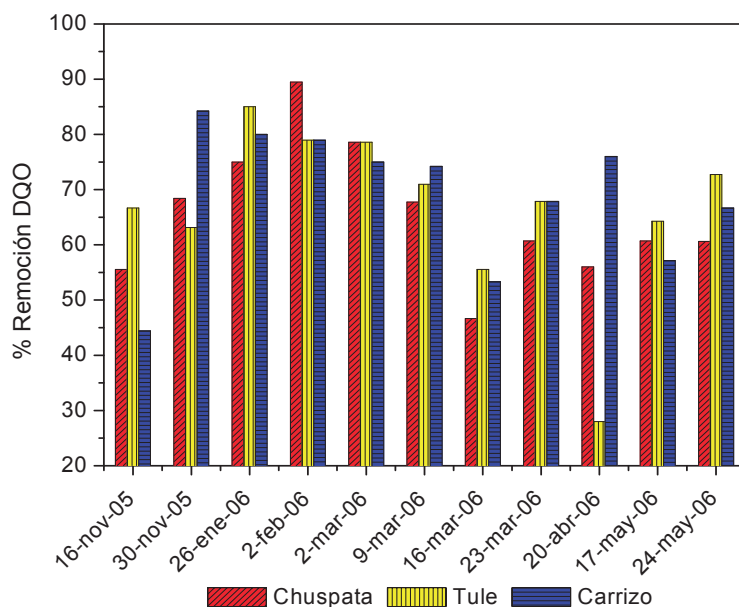


Figura 4.4 % Remoción de DQO de los humedales

Tabla 4.2 Niveles de Eliminación y Remoción de DQO

Fecha	Cruda (mg/L)	Chuspata (mg/L)	Tule (mg/L)	Carrizo (mg/L)	% Remoción		
					Chuspata	Tule	Carrizo
16-Nov-05	561.6	249.6	187.2	312	55.55	66.67	44.44
30-Nov-05	1185.6	374.4	436.8	187.2	68.42	63.15	84.21
26-Ene-06	1248	312	187.2	249.6	75	85	80
2-Feb-06	1185.6	124.8	249.6	249.6	89.47	78.94	78.94
2-Mar-06	1397.76	299.52	299.52	349.44	78.57	78.57	75
9-Mar-06	1547.52	499.2	449.28	399.36	67.74	70.96	74.19
16-Mar-06	2246.4	1198.08	998.4	1048.32	46.66	55.55	53.33
23-Mar-06	1397.76	549.12	449.28	449.28	60.71	67.85	67.85
20-Abr-06	1248	549.12	898.56	299.52	56	28	76
17-May-06	1397.76	549.12	499.2	599.04	60.71	64.28	57.14
24-May-06	1647.36	648.96	449.28	549.12	60.60	72.72	66.67

4.2.3 Nitrógeno Total Kjeldahl

El contenido de NTK en el influente registró un valor máximo de 97.94 mg/L, un valor mínimo de 39.64 mg/L. Aunque las concentraciones del influente tienen un rango de variabilidad grande, la capacidad de los sistemas para remover este compuesto es notable. Respecto al efluente, el humedal con chuspata tuvo una concentración máxima de 36.57 mg/L y una mínima de 0.112 mg/L, para el humedal con tule la concentración máxima de NTK fue de 33.83 mg/L y la mínima de 1.23 mg/L y finalmente para el humedal con carrizo la máxima fue de 41.58 mg/L mientras que la mínima concentración fue de 1.28 mg/L tal como indica la Figura 4.5. La concentración de NTK en el efluente en todos los muestreos, estuvo por debajo de 40 mg/L que es el límite máximo permisible de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales establecidos en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

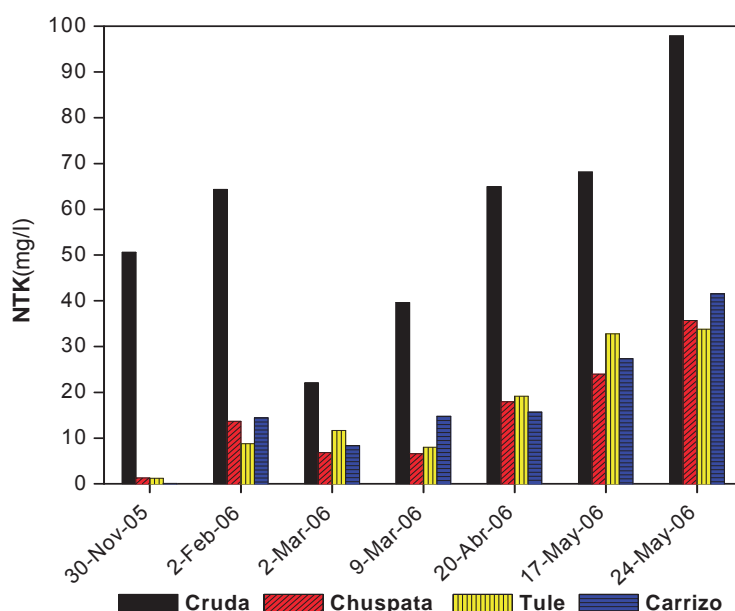


Figura 4.5 Concentración de NTK en el influente y efluente

Al comparar el influente con el efluente, se puede concluir que hay un descenso en el contenido de NTK, lo cual indica que se puede lograr eliminar en promedio un 75.93% de la concentración inicial en el humedal con chuspata, un 71.21% con el tule y 70.39% con el carrizo como se aprecia en la Figura 4.6 y en la Tabla 4.3, este

porcentaje esta en el rango de eficiencias de remoción de contaminantes para humedales construidos (Moshiri, 1993).

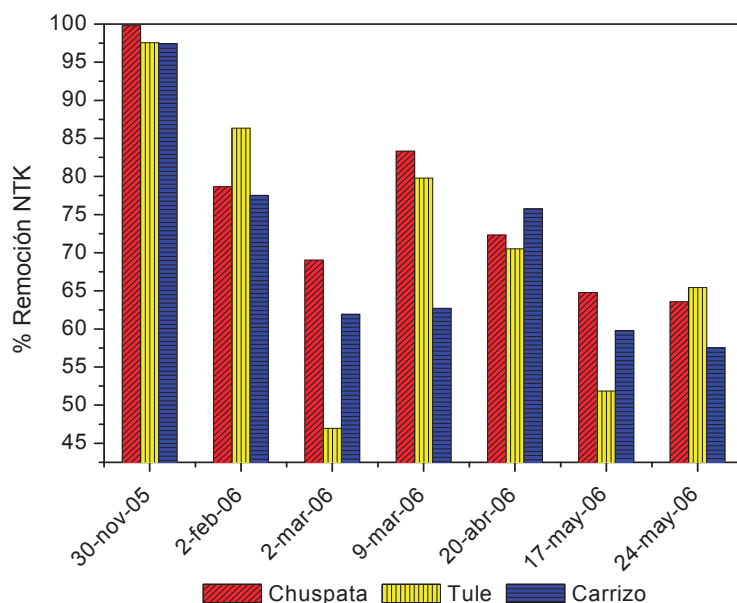


Figura 4.6 % Remoción de NTK de los humedales

La mayor eficiencia en los tres humedales se presentó durante el primer muestreo por arriba del 97% como se puede apreciar en la Tabla 4.3 y las menores variaron para cada humedal, en el caso de la chuspata y carrizo fue en el mes de mayo siendo estas apenas del 63% y 57% respectivamente. La eliminación del nitrógeno total en algunas ocasiones fue baja (46%), debido a la insuficiencia de oxígeno, ya que el contenido de oxígeno disuelto se consumió en la oxidación la materia orgánica, limitando de esta forma la nitrificación.

Tabla 4.3 Niveles de Eliminación y Remoción de NTK

Fecha	Cruda (mg/L)	Chuspata (mg/L)	Tule (mg/L)	Carrizo (mg/L)	% Remoción		
					Chuspata	Tule	Carrizo
30-Nov-05	50.62	0.112	1.23	1.28	99.78	97.57	97.46
2-Feb-06	64.34	13.72	8.79	14.44	78.68	86.34	77.55
2-Mar-06	22.06	6.83	11.70	8.4	69.04	46.95	61.93
9-Mar-06	39.64	6.60	8.00	14.78	83.33	79.80	62.71
20-Abr-06	64.96	17.97	19.15	15.73	72.33	70.52	75.78
17-May-06	68.18	24	32.81	27.41	64.80	51.87	59.79
24-May-06	97.94	35.67	33.83	41.58	63.58	65.45	57.54

Para aumentar la remoción de nitrógeno en los humedales se utiliza la poda de la vegetación. La mayor remoción de nitrógeno se da durante el crecimiento de la vegetación, ya que en esta etapa es cuando necesita una mayor cantidad de nutrientes (Celis y col., 2005). Aunque hay que destacar que la remoción de nutrientes por asimilación es apenas del 12% de la remoción total.

4.2.4 Nitrógeno Amoniacal

La medición del contenido de nitrógeno amoniacal en el influente registró un valor máximo de 56.42 mg/L, un valor mínimo de 18.87 mg/L. Respecto al efluente del humedal con chuspata, se tuvo una concentración máxima de 17.94 mg/L, una mínima de 0.06 mg/L, en el caso del humedal con tule la concentración máxima de nitrógeno amoniacal fue de 22.52 mg/L y la mínima de 1.18 mg/L y para el humedal con carrizo la máxima fue de 18.96 mg/L mientras que la mínima concentración fue de 1.12 mg/L como se observa en la Figura 4.7.

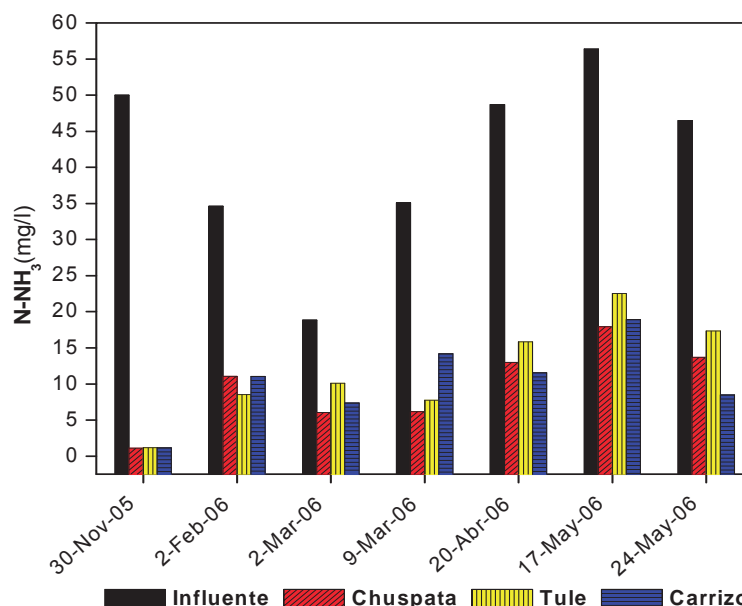


Figura 4.7 Concentración de N-NH₃ en el influente y efluente

Al comparar el influente con el efluente, se puede observar que hay un descenso en el contenido de nitrógeno amoniacal, lo cual indica que se puede logra eliminar en promedio un 75.75% de la concentración inicial en el humedal con chuspata, un 69.60% con el tule y 72.90% con el carrizo como se ilustra en la Figura 4.8 y en la Tabla 4.4.

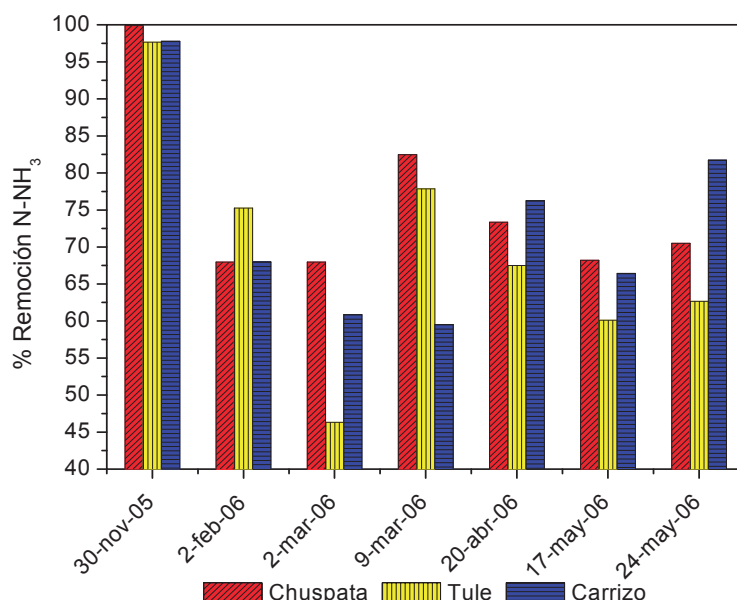


Figura 4.8 % Remoción de N-NH₃ de los humedales

Tabla 4.4 Niveles de Eliminación y Remoción de N-NH₃

Fecha	Cruda (mg/L)	Chuspata (mg/L)	Tule (mg/L)	Carrizo (mg/L)	% Remoción		
					Chuspata	Tule	Carrizo
30-Nov-05	50.01	0.06	1.18	1.12	99.89	97.65	97.76
2-Feb-06	34.61	11.09	8.57	11.09	67.96	75.24	67.96
2-Mar-06	18.87	6.05	10.14	7.39	67.95	46.29	60.83
9-Mar-06	35.11	6.16	7.78	14.22	82.46	77.83	59.49
20-Abr-06	48.72	12.99	15.85	11.59	73.33	67.47	76.21
17-May-06	56.42	17.94	22.52	18.96	68.21	60.08	66.40
24-May-06	46.48	13.72	17.36	8.51	70.48	62.65	81.69

La variación en el comportamiento de remoción de nitrógeno amoniacal se puede deber a que el mecanismo que permite la eliminación es la nitrificación y para que ésta se lleve a cabo, es necesario una concentración mínima de oxígeno, lo que nos hace suponer que en algunas ocasiones no hubo suficiente oxígeno en los humedales para que se llevara a cabo una mejor nitrificación, ya que para que exista la nitrificación se requiere una remoción previa de la DBO hasta niveles de 20mg/L o menos. En la fecha donde se obtuvieron menores remociones fue en mayo 17, donde la concentración de DBO también fue menor, lo que nos hace confirmar que la eliminación de nitrógeno depende de la cantidad de oxígeno disponible en el humedal.

4.2.5 Nitrógeno Orgánico

La medición del contenido de Nitrógeno Orgánico en el influente registró un valor máximo de 51.47 mg/L, un valor mínimo de 0.62 mg/L. En la Figura 4.9 se muestran los niveles de descenso en los tres humedales, en el caso del efluente del humedal con chuspata, se tuvo una concentración máxima de 21.95 mg/L, una mínima de 0.06 mg/L, en el humedal con tule la concentración máxima de Nitrógeno Orgánico fue de 16.48 mg/L y la mínima de 0.06 mg/L y para el humedal con carrizo la concentración máxima que se obtuvo fue de 33.07 mg/L y la mínima fue de 0.17 mg/L.

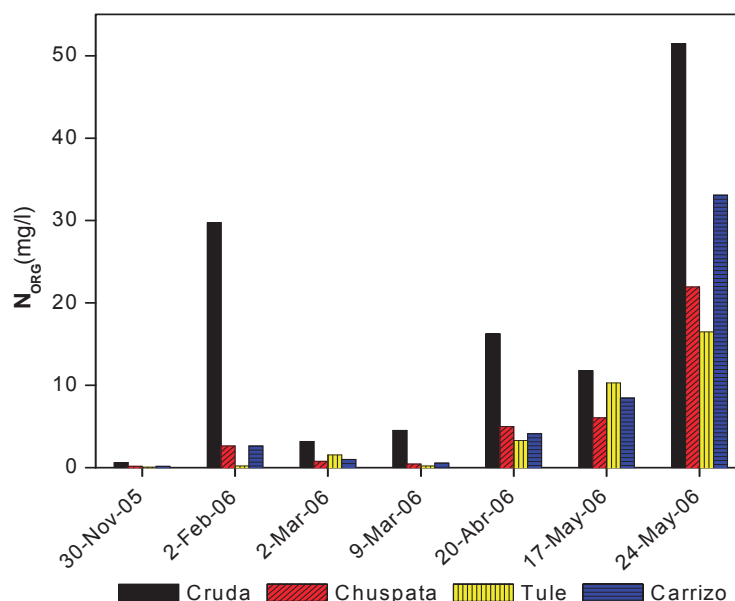


Figura 4.9 Concentración de N_{ORG} en el influente y efluente

Al comparar el influente con el efluente, se puede observar que hay un descenso en el contenido de N_{ORG} , lo cual indica que se puede lograr eliminar en promedio un 75.94% de la concentración inicial en el humedal con chuspata, un 73.39% con el tule y 65.46% con el carrizo como se observa en la Figura 4.10 y en la Tabla 4.5. La cantidad de nitrógeno orgánico en el humedal es menor al nitrógeno amoniacal debido a que el orgánico sufre una descomposición bacteriana y libera amoníaco al agua.

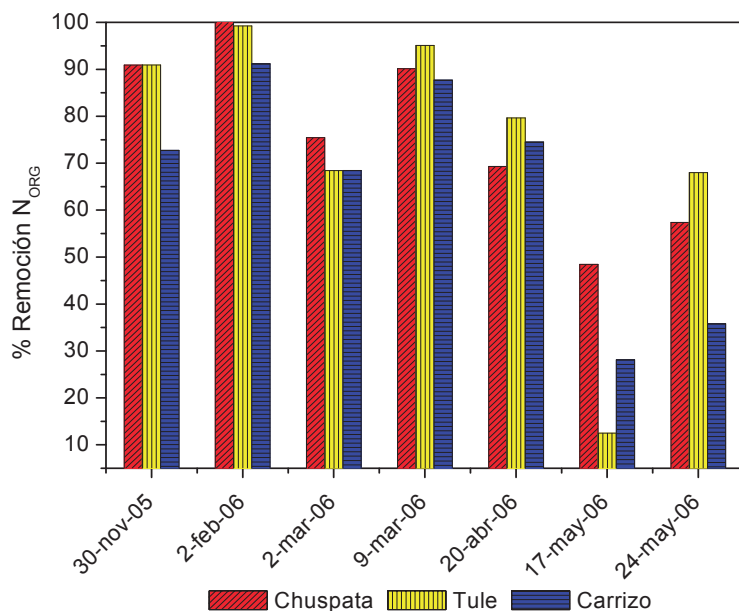


Figura 4.10 % Remoción de N_{ORG} de los humedales

Tabla 4.5 Niveles de eliminación y remoción de N_{ORG}

Fecha	Cruda (mg/L)	Chuspata (mg/L)	Tule (mg/L)	Carrizo (mg/L)	% Remoción		
					Chuspata	Tule	Carrizo
30-Nov-05	0.62	0.06	0.06	0.17	90.91	90.91	72.73
2-Feb-06	29.74	2.63	0.22	2.63	100.00	99.25	91.15
2-Mar-06	3.19	0.78	1.57	1.01	75.44	68.42	68.42
9-Mar-06	4.54	0.45	0.22	0.56	90.12	95.06	87.65
20-Abr-06	16.24	4.98	3.30	4.14	69.31	79.66	74.48
17-May-06	11.76	6.06	10.29	8.46	48.46	12.48	28.08
24-May-06	51.47	21.95	16.48	33.07	57.35	67.98	35.74

4.2.6 Sólidos sedimentables

En la Figura 4.11 y Tabla 4.6, se muestra la cantidad de sólidos sedimentables en el influente, la cual tuvo un valor máximo de 20 ml/L, un valor mínimo en la concentración de 0.5 mg/L. En el efluente del humedal con chuspata, la concentración máxima que se obtuvo fue de 0.7 ml/L y en algunos casos cero, en los humedales de tule y carrizo la concentración máxima y mínima oscilaron entre 0.1 ml/L y en otros casos la inexistencia de este tipo de sólidos. Esta eliminación de los sólidos sedimentables, se debe al tamaño y densidad de los sólidos. Además los sólidos también son retenidos por el medio granular. Las eficiencias de remoción de sólidos sedimentables cumplen con las normas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-

SEMARNAT-1996 que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público y NOM-CCA-029 ECOL/1993 que establece los límites máximos permisibles en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de hospitales.

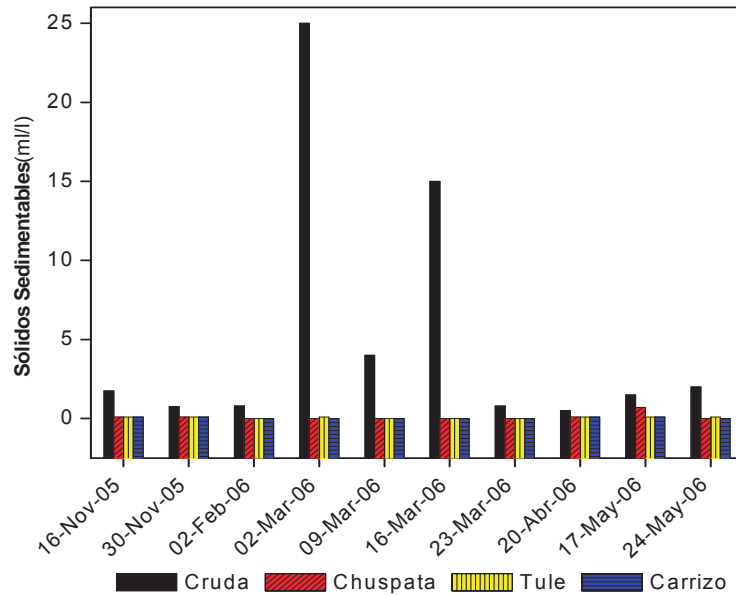


Figura 4.11 Concentración de SSED en el influente y efluente

En la figura 4.12 y la Tabla 4.6 se observa la remoción en promedio de sólidos sedimentables, en el humedal con chuspata fue de 81.42%, la remoción con tule de 85.35% y con carrizo de 85.42%.

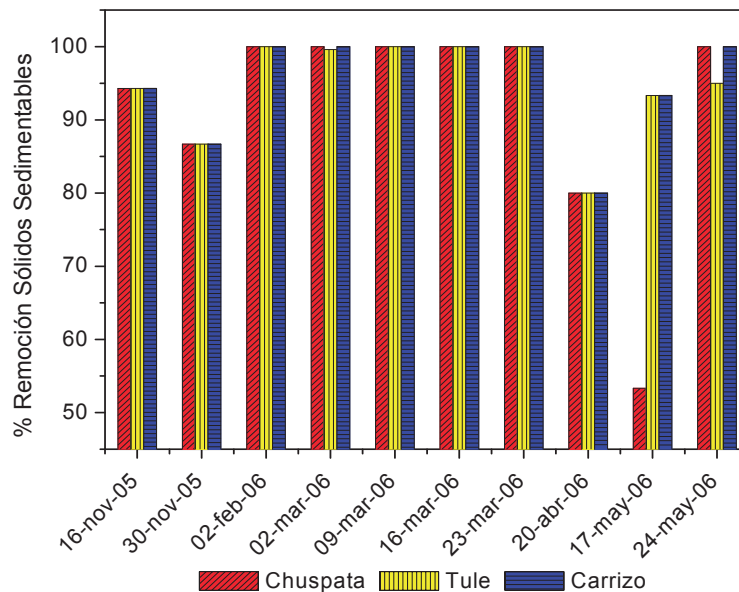


Figura 4.12 % Remoción de SSED de los humedales

Tabla 4.6 Niveles de eliminación y remoción de sólidos sedimentables

Fecha	Cruda (ml/L)	Chuspata (ml/L)	Tule (ml/L)	Carrizo (ml/L)	% Remoción		
					Chuspata	Tule	Carrizo
16-Nov-05	1.75	0.1	0.1	0.1	94.28	94.28	94.28
30-Nov-05	0.75	0.1	0.1	0.1	86.67	86.67	86.67
02-Feb-06	0.8	0	0	0	100	100	100
02-Mar-06	25	0	0.1	0	100	99.6	100
09-Mar-06	4	0	0	0	100	100	100
16-Mar-06	15	0	0	0	100	100	100
23-Mar-06	0.8	0	0	0	100	100	100
20-Abr-06	0.5	0.1	0.1	0.1	80	80	80
17-May-06	1.5	0.7	0.1	0.1	53.33	93.33	93.33
24-May-06	2	0	0.1	0	100	95	100

4.2.7 Sólidos suspendidos

La máxima concentración de sólidos suspendidos en el influente fue de 257 mg/L mientras que la mínima fue de 77.33 mg/L. La concentración máxima en el efluente del humedal con chuspata fue de 30 mg/L y de 6.67 mg/L como mínima, para el tule la concentración máxima y mínima fueron de 51.33 mg/L y 12 respectivamente, en el humedal con carrizo la concentración máxima fue de 16.67 mg/L y la mínima de 5.33 mg/L tal y como se indica en la Figura 4.13.

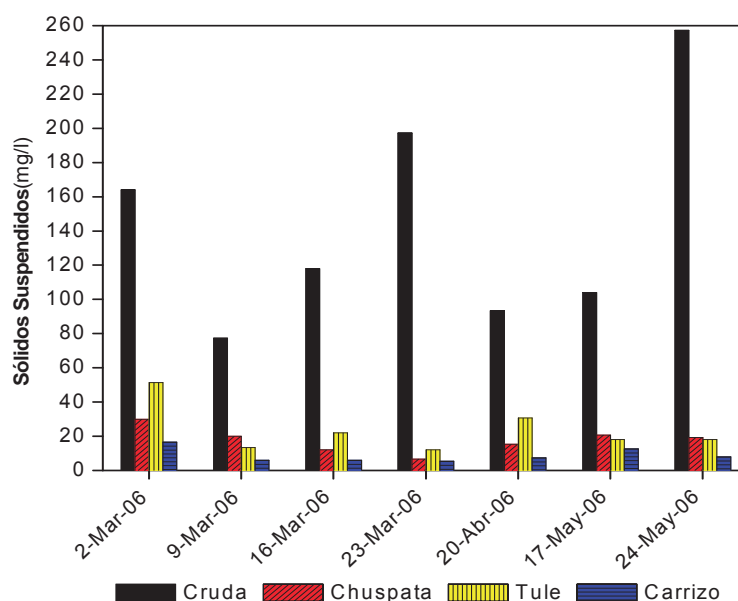


Figura 4.13 Concentración de SS en el influente y efluente

En la Figura 4.14 y en la Tabla 4.7 se muestran los valores para comparar el influente con el efluente, y se puede observar que hay una eliminación de sólidos suspendidos, lo cual indica que se puede lograr eliminar en promedio un 85.49% de la concentración inicial en el humedal con chuspata, un 81.36% con el tule y 93.02% con el carrizo. De acuerdo a los resultados obtenidos en los humedales, estos tienen una notable capacidad de remoción de sólidos suspendidos, estos fueron probablemente removidos por filtración, seguido por degradación aeróbica o anaeróbica.

De manera general las eficiencias de remoción obtenidas para sólidos suspendidos son bastante buenas, se cumple con los límites establecidos en la norma para fines de riego y abasto público NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 y la NOM-CCA-029 ECOL/1993 que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público y límites máximos permisibles en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de hospitales respectivamente.

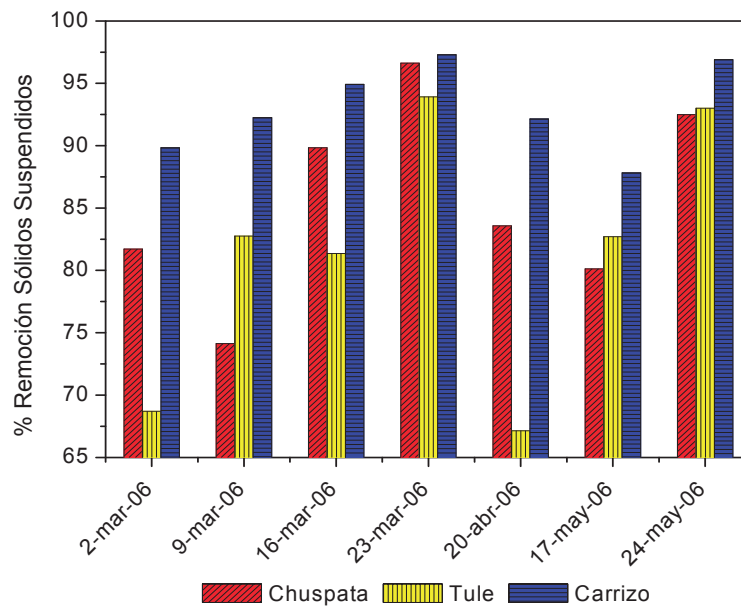


Figura 4.14 % Remoción de SS de los humedales

Tabla 4.7 Niveles de eliminación y remoción de sólidos suspendidos

Fecha	Cruda (mg/L)	Chuspata (mg/L)	Tule (mg/L)	Carrizo (mg/L)	% Remoción		
					Chuspata	Tule	Carrizo
2-Mar-06	164.00	30.00	51.33	16.67	81.71	68.70	89.84
9-Mar-06	77.33	20.00	13.33	6.00	74.14	82.76	92.24
16-Mar-06	118.00	12.00	22.00	6.00	89.83	81.36	94.92
23-Mar-06	197.33	6.67	12.00	5.33	96.62	93.92	97.30
20-Abr-06	93.33	15.33	30.67	7.33	83.57	67.14	92.14
17-May-06	104.00	20.67	18.00	12.67	80.13	82.69	87.82
24-May-06	257.33	19.33	18.00	8.00	92.49	93.01	96.89

4.2.8 Sólidos disueltos

La máxima concentración de sólidos disueltos en el influente fue de 1415 mg/L mientras que la mínima fue de 865 mg/L. En el efluente del humedal con chuspata la máxima concentración fue de 3110 mg/L y de 2535 mg/L como mínima, para el tule la concentración máxima y mínima fueron de 3860 mg/L y 1820 mg/L respectivamente, en el humedal con carrizo la concentración máxima fue de 3285 mg/L y la mínima de 1015 mg/L tal y como se muestra en la Figura 4.15.

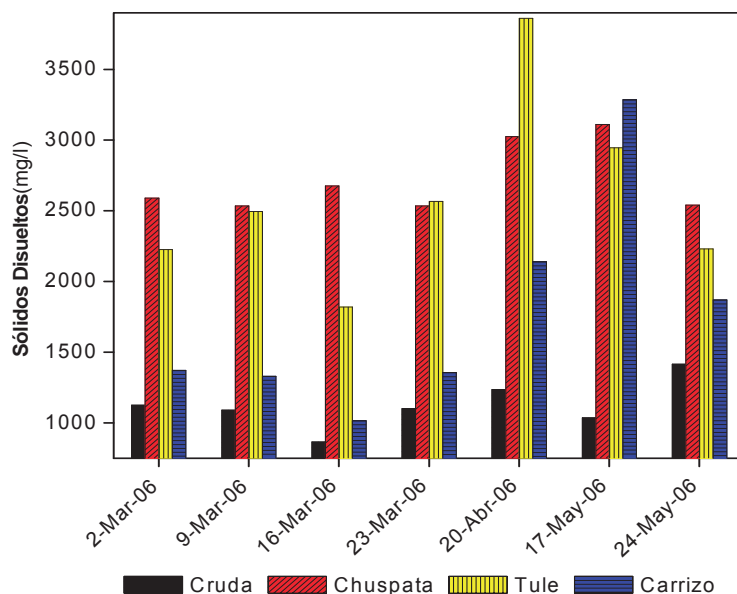


Figura 4.15 Concentración de SDIS en el influente y efluente

Al comparar el influente con el efluente, existe un incremento de los sólidos disueltos del 79% al 209% en el caso del humedal con chuspata, del 57% al 212% para

el caso del humedal con tule y para el humedal con carrizo del 17% al 217% como se observa en la Figura 4.16 y en la Tabla 4.8.

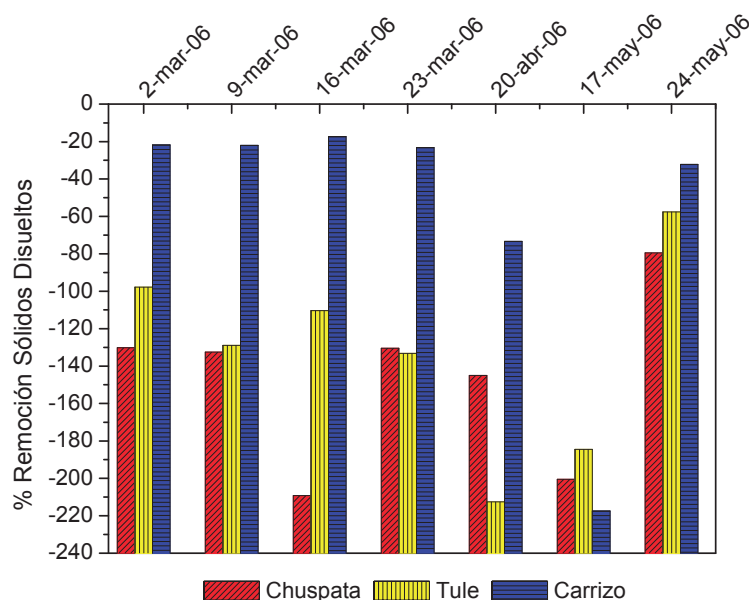


Figura 4.16 % Incremento de SDIS de los humedales

Tabla 4.8 Niveles de sólidos disueltos en el influente y efluente

Fecha	Cruda (mg/L)	Chuspata (mg/L)	Tule (mg/L)	Carrizo (mg/L)	% Remoción		
					Chuspata	Tule	Carrizo
2-Mar-06	1125	2590	2225	1370	-130.22	-97.77	-21.78
9-Mar-06	1090	2535	2495	1330	-132.6	-128.89	-22.01
16-Mar-06	865	2675	1820	1015	-209.24	-110.40	-17.34
23-Mar-06	1100	2535	2565	1355	-130.45	-133.18	-23.18
20-Abr-06	1235	3025	3860	2140	-144.93	-212.55	-73.27
17-May-06	1035	3110	2945	3285	-200.48	-184.54	-217.39
24-May-06	1415	2540	2230	1870	-79.50	-57.59	-32.15

La diferencia entre el influente y efluente es significativa, siendo mayor la concentración de sólidos disueltos en el efluente, este incremento se debe a la descomposición de las partes subterráneas de los macrófitos (rizomas y raíces), la descomposición de la materia orgánica depositada en la superficie del medio granular (hojas y tallos de los macrófitos), a la muerte de algas, hongos y bacterias existentes en el medio (Lara, 1999). Sin embargo, en los tres humedales, los valores en la concentración de sólidos disueltos son óptimos para un vertido posterior al medio ambiente. Los sólidos disueltos están relacionados con el grado de mineralización del

agua ya que son iones de sales minerales que el agua ha conseguido disolver a su paso.

4.2.9 Coliformes fecales

El análisis de las características microbiológicas del agua es uno de los factores con mayor influencia en la salud pública y en el potencial reuso o reciclaje del recurso. La medición del contenido de Coliformes Fecales en el influente se muestran en la Figura 4.17 y registró un valor máximo de 1.15×10^8 NMP/100mL, un valor mínimo de 5×10^6 NMP/100mL. En el efluente del humedal con chuspata, se tuvo un valor máximo de 4×10^5 NMP/100mL, una mínima de 1×10^3 NMP/100mL, en el humedal con tule el máximo 3.5×10^5 NMP/100mL y el mínimo 1×10^3 NMP/100mL y para el humedal con carrizo el valor máximo que se obtuvo fue de 1.19×10^6 NMP/100mL y el mínima fue de 2×10^3 NMP/100mL.

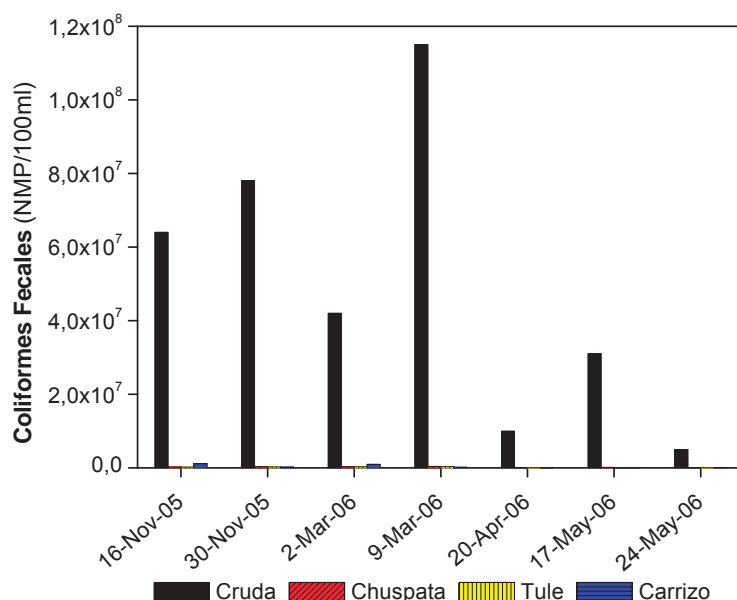


Figura 4.17 Concentración de Coliformes Fecales en el influente y efluente

La remoción en promedio de Coliformes Fecales en el humedal con chuspata fue de 99.61%, la remoción con tule de 99.60% y con carrizo de 99.28% como se muestra en la Figura 4.18 y en la Tabla 4.9.

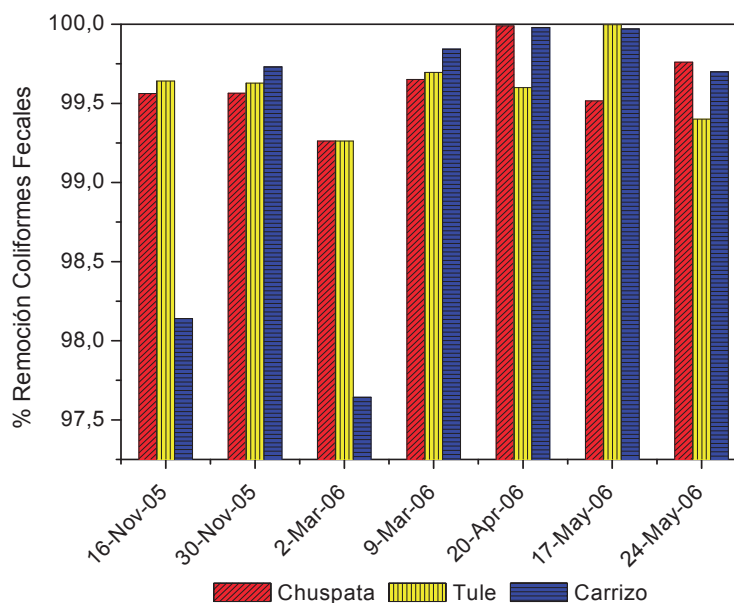


Figura 4.18 % Remoción de Coliformes Fecales de los humedales

La concentración de salida de coliformes fecales en la mayoría de los muestreos es mucho mayor a lo establecido en las normas mexicanas NOM-003- SEMARNAT - 1997 donde el limite máximo permisible es de 240NMP/100ml para servicio al público con contacto directo y de 1000NMP/100ml para servicio al público con contacto directo u ocasional y NOM-CCA-029 ECOL/1993 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de hospitales. Una opción para disminuir la cantidad de coliformes fecales es la cloración del efluente del humedal construido.

Tabla 4.9 Niveles de eliminación y remoción de Coliformes Fecales

Fecha	Cruda (MNP/100mL)	Chuspata (MNP/100mL)	Tule (MNP/100mL)	Carrizo (MNP/100mL)	% Remoción		
					Chuspata	Tule	Carrizo
16-Nov-05	6.40×10^7	2.80×10^5	2.30×10^5	1.19×10^6	99.56	99.64	98.14
30-Nov-05	7.80×10^7	3.40×10^5	2.90×10^5	2.10×10^5	99.56	99.62	99.73
2-Mar-06	4.20×10^7	3.10×10^5	3.10×10^5	9.90×10^5	99.26	99.26	97.64
9-Mar-06	1.15×10^8	4.00×10^5	3.50×10^5	1.80×10^5	99.65	99.69	99.84
20-Abr-06	1.00×10^7	1.00×10^3	4.00×10^4	2.00×10^3	99.99	99.60	99.98
17-May-06	3.10×10^7	1.50×10^5	1.00×10^3	9.00×10^3	99.51	99.99	99.97
24-May-06	5.00×10^6	1.20×10^4	3.00×10^4	1.50×10^4	99.76	99.40	99.70

4.3 Análisis Estadístico

Para estudiar si existe una variación en la concentración de los parámetros analizados se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la variación entre cada tratamiento o plantas y un análisis estadístico con el estadístico de prueba "t" de student para detectar diferencias entre dos grupos.

La tabla 4.10 presenta el resumen del análisis de varianza los parámetros cuantificados en el efluente de cada tipo de planta utilizada. Al comparar estadísticamente los 3 efluentes en el caso de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) no se presentan diferencias significativas entre los tratamientos para la demanda bioquímica de oxígeno (p=0.9802). Tampoco se encontró diferencias en la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) el valor p encontrado es 0.8658 que es mayor a 0.05. Para el nitrógeno total kjeldahl (NTK) el análisis de varianza nos arrojó un valor de 0.9246 lo que significa que no hay diferencias en la remoción, lo mismo sucede con el nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico no se encontraron diferencias en el análisis estadístico con valores de p de 0.8010 y 0.8583, respectivamente. El análisis de varianza de los sólidos sedimentables (SSED), nos dice que al igual que la DBO, DQO y nitrógeno en forma amoniacal y orgánico no existe diferencia. El análisis estadístico de sólidos suspendidos (SS), es el único parámetro que muestra diferencia en la remoción de este contaminante con un valor de p de 0.0267. En la tabla 4.1 se observa que al igual que los otros parámetros los coliformes fecales no mostraron diferencias significativas en el análisis estadístico (p= 0.4935).

Tabla 4.10 Resumen de los análisis estadísticos del ANOVA

Parámetro	Medias y Varianzas	Hipótesis	Valor P	Conclusión
DBO ₅	$\mu_1 = 37.3488$	$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$ $H_a : \text{Al menos una es diferente}$	0.9802	Se acepta H_0
	$\sigma_1 = 362.0134$			
	$\mu_2 = 36.9449$			
	$\sigma_2 = 313.3811$			
	$\mu_3 = 38.6584$			
	$\sigma_3 = 524.9234$			

Tabla 4.10 Resumen de los análisis estadísticos del ANOVA

Parámetro	Medias y Varianzas	Hipótesis	Valor P	Conclusión
DQO	$\mu_1 = 486.720$ $\sigma_1 = 80959.0579$	$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$ $H_a : \text{Al menos una es diferente}$	0.8658	Se acepta H_0
	$\mu_2 = 464.029$ $\sigma_2 = 70331.2169$			
	$\mu_3 = 426.589$ $\sigma_3 = 58774.5373$			
NTK	$\mu_1 = 14.9886$ $\sigma_1 = 146.2700$	$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$ $H_a : \text{Al menos una es diferente}$	0.9246	Se acepta
	$\mu_2 = 16.5062$ $\sigma_2 = 160.2575$			
	$\mu_3 = 17.6651$ $\sigma_3 = 173.9326$			
N-NH3	$\mu_1 = 9.7146$ $\sigma_1 = 35.9435$	$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$ $H_a : \text{Al menos una es diferente}$	0.8010	Se acepta H_0
	$\mu_2 = 11.9138$ $\sigma_2 = 50.7387$			
	$\mu_3 = 10.41221$ $\sigma_3 = 31.4119$			
N _{ORG}	$\mu_1 = 5.2740$ $\sigma_1 = 59.4198$	$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$ $H_a : \text{Al menos una es diferente}$	0.8583	Se acepta H_0
	$\mu_2 = 4.5924$ $\sigma_2 = 40.5522$			
	$\mu_3 = 7.14896$ $\sigma_3 = 138.8300$			

Tabla 4.10 Resumen de los análisis estadísticos del ANOVA

Parámetro	Medias y Varianzas	Hipótesis	Valor P	Conclusión
SSED	$\mu_1 = 0.10$ $\sigma_1 = 0.0467$	$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$ $H_a : \text{Al menos una es diferente}$	0.5898	Se acepta H_0
	$\mu_2 = 0.04$ $\sigma_2 = 0.0027$			
	$\mu_3 = 0.06$ $\sigma_3 = 0.0027$			
SS	$\mu_1 = 17.7143$ $\sigma_1 = 54.655$	$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$ $H_a : \text{Al menos una es diferente}$	0.0267	Se rechaza H_0
	$\mu_2 = 23.6190$ $\sigma_2 = 187.3862$			
	$\mu_3 = 8.8571$ $\sigma_3 = 17.8836$			
Coliformes Fecales	$\mu_1 = 2.1328 \times 10^5$ $\sigma_1 = 2.5718 \times 10^{10}$	$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2$ $H_a : \text{Al menos una es diferente}$	0.4935	Se acepta H_0
	$\mu_2 = 1.7871 \times 10^5$ $\sigma_2 = 2.2422 \times 10^{10}$			
	$\mu_3 = 3.7085 \times 10^5$ $\sigma_3 = 2.5171 \times 10^{11}$			

Con el fin de comprobar si los resultados obtenidos en el análisis estadísticos de los sólidos suspendidos son realmente son diferentes, se realizó la prueba de hipótesis para el caso de varianzas diferentes, utilizando el estadístico t_0^* y grados de libertad ν .

Los resultados se resumen en la Tabla 4.11. Según los valores de P obtenidos para los datos analizados, los niveles de remoción de sólidos suspendidos son distintos, es decir, uno de los humedales tiene mejores remociones. Al comparar el efluente del humedal con chuspata y tule el valor de p es de 0.3409, lo que significa que estadísticamente no hay diferencia en la remoción de sólidos suspendidos, en la comparativa estadística del humedal con carrizo y el humedal chuspata, el valor p es

0.0213, por lo tanto se rechaza H_0 o lo que es lo mismo, existen diferencias entre estos humedales, al comparar el humedal con carrizo y el humedal con tule el valor de p es 0.0290, por lo tanto estadísticamente el humedal con carrizo tuvo mejores remociones de sólidos suspendidos. Para mas detalles del análisis estadístico ver ANEXO III.

Tabla 4.11 Diferencia entre medias

Prueba de Hipótesis sobre las medias					
Parámetro	Comparación	Hipótesis	Valor t	Valor P	Conclusión
	Chuspata-Tule	$H_0 : \mu_1 = \mu_2$ $H_a : \mu_1 \neq \mu_2$	1.0042	0.3409	Se acepta H_0
Sólidos Suspendidos	Carrizo-Chuspata	$H_0 : \mu_1 = \mu_2$ $H_a : \mu_1 \neq \mu_2$	2.7516	0.0213	Se rechaza H_0
	Carrizo-Tule	$H_0 : \mu_1 = \mu_2$ $H_a : \mu_1 \neq \mu_2$	2.7260	0.0290	Se rechaza H_0

Diferencias estacionales en la remoción de DBO5

Se agruparon las mediciones del porcentaje de remoción promedio en dos grupos: otoño-invierno y primavera-verano para evaluar diferencias en el porcentaje de remoción debidas a la época del año. Los resultados se observan en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Diferencia entre medias en el porcentaje de remoción, efectos estacionales

Prueba de Hipótesis sobre las medias					
Parámetro	Comparación	Hipótesis	Valor t	Valor P	Conclusión
	Chuspata	$H_0 : \mu_1 = \mu_2$ $H_a : \mu_1 \neq \mu_2$	-1.2318	0.2727	Se acepta H_0
DBO5	Tule	$H_0 : \mu_1 = \mu_2$ $H_a : \mu_1 \neq \mu_2$	-1.1270	0.3108	Se acepta H_0
	Carrizo	$H_0 : \mu_1 = \mu_2$ $H_a : \mu_1 \neq \mu_2$	0.6759	0.5687	Se acepta H_0

1: otoño-invierno, 2: primavera-verano

Uno de los objetivos de esta investigación fue estudiar el efecto estacional en la remoción de DBO. A partir de los datos obtenidos, se realizó una prueba t, donde se compararon los niveles de descenso de la DBO en el efluente, en las estaciones otoño-invierno y primavera verano, obteniendo en la chuspata un valor de $p=0.2727$, de 0.3108 , para el tule y de 0.5687 para el carrizo, en los tres casos (chuspata, tule y carrizo) se acepta la H_0 , lo que significa que no se encontraron diferencias significativas, es decir, con los datos analizados podemos decir que no existe un efecto en la remoción de DBO en los tres humedales, con los tres tipos de plantas a causa de las estaciones del año, esto se puede deber a que el clima de la ciudad de Morelia es templado.

CONCLUSIONES

- Los humedales construidos de flujo subsuperficial muestra buen funcionamiento en el tratamiento de aguas residuales, en este caso efluentes hospitalarios, con cargas orgánicas altas, además son una opción de pre-tratamiento para otros sistemas que requieren altas inversiones económicas en energía. Manejan flujos pequeños, ya que requieren grandes áreas para su construcción, es por esto que se recomienda para zonas rurales y pequeñas comunidades que dispongan de la superficie necesaria para su construcción. Además la obtención de subproductos para su comercialización como por ejemplo forrajes, composta, usos artesanales (sillas, canastas, etc.) entre otros.
- La aplicación de humedales construidos puede ayudar a resolver el problema de manejo de aguas residuales en zonas rurales aisladas de nuestro país, así como áreas urbanas.
- Los humedales artificiales son eficientes para el proceso de tratamiento de aguas residuales, obteniendo rendimientos de degradación del 92% para DBO_5 , de 28-90% para DQO, del 69-75% para NTK, en el caso de N-NH_3 de 65-75%, la remoción de N_{ORG} de 65-75%, de 81-85 para sólidos sedimentables, 81-93% en sólidos suspendidos y para coliformes fecales del 99%, a partir de estos resultados podemos decir que los humedales construidos de flujo subsuperficial son efectivos para la remoción de DBO_5 , Nitrógeno en todas sus formas, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y coliformes fecales, y moderadamente efectivos en la remoción de DQO.
- Los niveles de concentración de los contaminantes cuantificados en el influente variaron en todos los muestreos, sin embargo, la eliminación de estos generalmente se encontró por encima del 50%. Por lo tanto, podríamos decir que los sistemas de humedales construidos de flujo subsuperficial son capaces de resistir variaciones de carga orgánica.
- Los resultados obtenidos en la remoción de DBO_5 , NTK, sólidos suspendidos y sólidos sedimentables están dentro de los límites permisibles de las normas mexicanas (NOM-001-SEMARNAT-1997 Y NOM-CCA-029ECOL/1993), en el

caso de DQO y Coliformes Fecales aunque las remociones son bastante buenas alrededor del 99% están fuera de norma, una recomendación sería otro sistema de tratamiento para reducir estos parámetros.

- En este caso el humedal no proporciona buenos resultados en cuanto a la eliminación de sólidos disueltos, al contrario aumenta la concentración de estos. En un intervalo del 79% a 209% en el caso del humedal con chuspata, para el humedal con tule de 57% a 212% y finalmente de 21% al 217% en el humedal con carrizo.
- Con el número de muestreos realizados y los resultados obtenidos, no se puede decir que planta es mejor para la remoción de contaminantes, además, no existe evidencia estadística para demostrar que una planta tenga mejores efectos de remoción que otra ya que en el análisis de varianza no se detectaron diferencias en los tratamientos para los parámetros medidos, excepto para sólidos suspendidos.
- En el caso de nuestros tres humedales, con los tres tipos de plantas, estadísticamente tienen la misma eficiencia de remoción de DBO, independientemente de la estación en que fue operado.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer mayor cantidad de muestreos y así tener más datos experimentales que permitirán confirmar estadísticamente el comportamiento de los humedales.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- **Álvarez S., 2005**, “La descomposición de materia orgánica en humedales: la importancia del componente microbiano”. Ecosistemas Revista Científica y Tecnológica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente, vol., 2.
- **APHA-AWWA-WPCF**
- **Arias T. O., 2004**, “Estudio de la Biodegradación de la Materia Orgánica en Humedales construidos de Flujo Subsuperficial”, Tesis de Maestría de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- **Corzo H. A., 2004**, “Influencia del estado físico de la materia orgánica en la eficiencia de humedales construidos de flujo subsuperficial”, Tesis de Maestría de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- **Costeron J. W., 1995** “Overview of microbial films” J. Indus. Microbial. 15:137-140.
- **Cuevas C. J., 1997**, “Evaluación de la Efectividad en la Remoción de Nitrógeno Amoniacal de Aguas Residuales con el uso de Zeolitas en Pantanos” Tesis de Maestría del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- **Douglas C. Montgomery y George C Runger, 1996**, “Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería”, Ed Mc Graw Hill.
- **Fernández G. J., Beascochea E. M., Muñoz J. M. y Curt Fernández M. M. D., 2005**, “Manual de Fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación” Universidad Politécnica de Madrid.
- **Ferreira La Rosa A.M., Moschem Tolfo A., Olinto Monteggia L., Nascimento de Almeida M.M., da Silva Ortolan M., Genro Bins M.J., de Almeida Bendati M.M., y Raya Rodríguez M.T., 2000**, “Gasto de efluentes de servicios de salud en Puerto Alegre”, Anais XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Puerto Alegre, Brasil.
- **Figuroa G. J. A., 2005**, “Evaluación de alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) como planta emergente en un pantano tipo flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales porcícolas” II Congreso Internacional Sobre Agua en la Frontera México-Guatemala- Belice. Campeche.

- **García J., Morató J. y Bayona J. M., 2004**, “Depuración con Sistemas Naturales: Humedales Construidos”, IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua, Tortosa, España.
- **Gómez V. F., 2004**, “Biosólidos”, VI Congreso Regional de Químicos Farmacéuticos Biólogos.
- **Hauenstein E., González M., Pena C. F. y Muñoz P. A., 2002**, “Clasificación y Caracterización de la Flora y Vegetación de los Humedales de la Costa de Tolten (IX Región, Chile)” *Gayana Bot.* 59(2): 87-100.
http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=118&Id_Categoria=2&tipo
- **Hammer, D. A., 1989**, “Constructed wetlands for wastewater treatment municipal, industrial and agricultural” Lewis Publisher.
- **IMTA 2001**, “Diagnóstico ambiental del lago de Pátzcuaro, 2da etapa: efecto de las descargas municipales en la calidad del agua. Informe final.
- **Kadlec R.H., Knight R.L., Vymazal J., Brix H., Cooper P. y Haberl, R., 2000**, “Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation”, IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing.
- **Kraigsley A., Ronney P. y Finkel S., 2002**, “Hydrodynamic influences biofilma formation and grow”
<http://carambola.usc.edu/research/biophysics/Biofilms4Web.html>
- **Lahora A., 2005**, “Depuración de Aguas Residuales Mediante Humedales Artificiales: La Edar de los Gallardos (Almería)” *Gestión de Aguas del Levante Almeriense S.A...GALASA*
[http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/VAnexos/IEA-EMCH-C8/\\$File/EMCH-C8.pdf](http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/VAnexos/IEA-EMCH-C8/$File/EMCH-C8.pdf)
- **Laber J., Haberl R. y Shrestha R., 1999**, “Two stage **constructed wetland for treating hospital wastewater in Nepal**” *Wat. Sci. Teach.* Vol. 40, No. 3, Elsevier Science Ltd.
- **Lahora C. A., 1998**, “Los Humedales Artificiales Como Tratamiento Terciario De Bajo Coste en la Depuración de Aguas Residuales Urbanas” *Encuentro Medioambiental Almeriense: en Busca de Soluciones.*

- **Lara B. J. A., 1999**, “Depuración de Aguas Residuales Municipales”, Universidad Politécnica de Cataluña.
- **Maurtis La Riviere J. W., 1990**, “Threats to World's Water, Managing the Planet Earth” Reading from Scientific American, Editions Freeman.
- **Paz M., Muzio H., Gemini V., Magdaleno A., Rossi S., Korol S. y Moretton J., 2004**, “Aguas residuales de un Centro Hospitalario de Buenos Aires, Argentina”, Hig. Sanid. Ambient., 4, 83-88.
- **Postel S., 1993**, “The Politic of Water, World Watch Institute, July- August.
- **Píriz, A. J., 2000**, “Condiciones de óxido- reducción en humedales construidos de flujo subsuperficial” Tesina de especialidad de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- **Reddy, K. y D`Angelo, E. M.,1997**, “Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands” Wat. Sci. Tech., 35, 1-10.
- **Rivas H. A., 2006**, “Experiencia Exitosa Del Uso De Humedales Construidos Para La Protección De La Calidad Del Agua Del Lago De Pátzcuaro” XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales.
- **U.S. Environmental Protection Agency, 2000**, “Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial” EPA 832-F-00-023 Office of Water Washington.
- **U.S. Environmental Protection Agency, 2000a**, “Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters” EPA/625/R-99/010. US EPA Office of Research and Development Cincinnati.
- **U.S. Environmental Protection Agency, 1993**, “Subsurface Flow Constructed Wetlands For Wastewater Treatment A Technology Assessment” EPA/832/R-93/008, Office Of Water.
- **Vidales C. J. A., Chaidez Q. C., Acuña A. K., Ibarra G. H., Rodríguez F. H.y Martínez T. G., 2004**, “Pantanos Construidos Para el Tratamiento de Agua Residual” Ciencia UANL, Julio- Septiembre, 7-003.
- **Torres B. A., 1997**, “Desarrollo de Tecnología de Construcción de Pantanos para el Tratamiento de Aguas Residuales” Tesis de Maestría del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

- **Torres L. A., Álvarez J. A., Reinoso R. y Bécares E., 2005**, “Influencia de la Vegetación Sobre la Eliminación de Bacterias en Humedales de Flujo Superficial” Encuentro Internacional en Fitodepuración, Laorca España.
- **<http://www.infojardin.com>**

ANEXO I

NOM- 001- SEMARNAT-1996

NORMA OFICIAL MEXICANA, QUE ESTABLECE LOS LIMITES MÁXIMOS PERSIMIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES

Parámetro	Vertidos a causas cuyo uso posterior es:			
	Riego Agrícola		Abasto Público	
	Promedio Mensual	Promedio Diario	Promedio Mensual	Promedio Diario
Grasas y Aceites (mg/L)	15	25	15	25
Materia Flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos Sedimentables (ml/L)	1	2	1	2
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	150	200	75	125
DBO ₅ (mg/L)	150	200	75	150
Nitrógeno Total K (mg/L)	40	60	40	60
Fósforo Total (mg/L)	20	30	20	30
Arsénico (mg/L)	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio (mg/L)	0.2	0.4	0.1	0.2
Cianuros (mg/L)	1.0	3.0	1.0	2.0
Cobre (mg/L)	4.0	6.0	4.0	6.0
Cromo (mg/L)	1.0	1.5	0.5	1.0
Mercurio (mg/L)	0.01	0.02	0.005	0.01
Níquel (mg/L)	2.0	4.0	2.0	4.0
Plomo (mg/L)	0.5	1.0	0.2	0.4
Zinc (mg/L)	10	20	10	20

NOM-002- SEMARNAT -1996

NORMA OFICIAL MEXICANA, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO URBANO O MUNICIPAL

Parámetro	Promedio Mensual	Promedio Diario
Grasas y Aceites	50	75
Sólidos Sedimentables (ml/L)	5	7.5
Arsénico	0.5	0.75
Cadmio	0.5	0.75
Cianuro	1	1.5
Cobre	10	15
Cromo	0.5	0.75
Mercurio	0.01	0.015
Níquel	4	6
Plomo	1	1.5
Zinc	6	9

NOM-003- SEMARNAT -1997

NORMA OFICIAL MEXICANA, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE REUSEN EN SERVICIOS AL PÚBLICO

Tipo de Rehusó	Coliformes	Grasas y	DBO ₅	SST
	Fecales (NMP/100mL)	Aceites (mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Servicio al público con contacto directo	240	15	20	20
Servicios al público con contacto directo u ocasional	1000	15	30	30

NOM-CCA-029 ECOL/1993

NORMA OFICIAL MEXICANA QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A CUERPOS RECEPTORES PROVENIENTES DE HOSPITALES

Parámetros	Promedio	
	Diario	Instantáneo
pH (unidades de pH)	6 a 9	6 a 9
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	80	120
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	40	60
Sólidos Sedimentables (ml/L)	1	2
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	40	60
Coliformes Fecales (NMP/100mL)	1000	2000

ANEXO II

MODELO GENERAL DE DISEÑO

Los sistemas de humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos, y el modelo de diseño que se usa actualmente asume condiciones de flujo pistón, su rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo pistón.

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

Donde:

C_e: Concentración del contaminante en el efluente, mg/L

C_o: Concentración del contaminante en el influente, mg/L

K_T: Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹

t: tiempo de retención hidráulica, d

El valor de K_T, depende del contaminante que se quiere eliminar.

El tiempo de retención hidráulica en el humedal puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$t = \frac{LWyn}{Q} \quad (2)$$

Donde:

L: Largo de la celda del humedal, m

W: Ancho de la celda del humedal, m

y: Profundidad de la celda del humedal, m

n: porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal. La porosidad es un porcentaje expresado como decimal.

Q: Caudal a través del humedal.

Si combinamos (1) y (2)

$$A = \frac{Q \ln(C_o/C_e)}{K_T yn}$$

El contaminante que requiera la mayor área para su remoción, será el factor limitante en el diseño y controlara el tamaño del humedal. El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia se da por el medio granular, las raíces de las plantas y sólidos acumulados, la solución para superar la resistencia es construyendo el humedal con una inclinación.

La relación largo-ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema, el rango recomendado por la EPA va de 0.4 a 3, la geometría de nuestro sistema nos da una relación largo-ancho de 1.2.

La ley de Darcy, nos describe el régimen de flujo en un medio poroso que es generalmente aceptado para en diseño de SFS usando suelo y arena. Esta ley no es estrictamente aplicable SFS debido a que asume condiciones de flujo laminar, pero el flujo turbulento puede darse con grava muy gruesa cuando el diseño usa un gradiente hidráulico alto. La ley de Darcy también asume que el flujo en el sistema es constante y uniforme, pero puede variar por la precipitación, evaporación, filtración y por los cortos circuitos en el flujo que pueden llegar a presentarse por una desigual porosidad o mala construcción. Si al construir al humedal se utiliza grava de tamaño pequeño o medio y si el sistema esta construido para minimizar los cortos circuitos y si esta diseñado para depender poco del gradiente, la ley de Darcy puede dar una aproximación razonable a las condiciones hidráulicas en los sistemas SFS.

$$Q = k_s AS$$

- Donde:
- Q: Caudal a través del humedal, m³/d.
 - K_s: Conductividad hidráulica de una unidad de área del medio perpendicular a la dirección del flujo.
 - A: Área de sección transversal perpendicular al flujo, m².
 - S: Gradiente hidráulico, m/m.

En el caso de nuestro humedal, los cálculos se hicieron al contrario.

$$\begin{aligned} L &= 1.30 \text{ m} \\ W &= 1.10 \text{ m} \\ y &= 0.35 \text{ m} \end{aligned}$$

El área superficial del humedal se calculo con la ecuación $A = ab\pi$ que es la ecuación para determinar el área de un ovoide

$$A = (0.65\text{m})(0.55\text{m})\pi$$

$$A = 1.1231\text{m}^2$$

El volumen de los humedales esta definido por:

$$V = ab\pi h$$

$$V = (0.65\text{m})(0.55\text{m})(0.3\text{m})\pi$$

$$V = 0.3369\text{m}^3$$

$$V = 393 \text{ L}$$

La porosidad del sistema esta definida como $n = \frac{V_v}{V}$

Donde V_v y V son volumen de vacíos y volumen total, respectivamente

$$n = \frac{345\text{ml}}{1000\text{ml}}$$

$$n = 0.345$$

El Tiempo de Retención Hidráulico es de 7 días y tomando en cuenta la porosidad.

$$V = 393 \text{ L}$$

$$V = (393 \text{ L})(0.345)$$

$$V = 135.58 \text{ L}$$

El valor del caudal se obtiene dividiendo el volumen entre el tiempo de retención hidráulico

$$Q = \frac{135.58 \text{ L}}{7\text{d}}$$

Flujo optimo de los humedales

$$Q = 19.37 \frac{\text{L}}{\text{d}} = 13.45 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$$

Aplicación del procedimiento general de diseño para el flujo de descarga del Hospital de la Mujer

En el siguiente ejemplo, se calculara el área requerida y la profundidad del lecho para un humedal de flujo subsuperficial para tratar el flujo real del Hospital de la Mujer de la Ciudad de Morelia Michoacán.

Datos para el diseño del humedal real

De la norma NOM-CCA-029 ECOL/1993	
DBO	40 (mg/L)
Datos del humedal	
Q	6609.91(m ³ /mes) 220.3303(m ³ /día)
n ₁ (Profundidad utilizada en el humedal planta piloto)	0.35 (m)
n ₂ (Profundidad mas utilizada en humedales)	0.6 (m)
m (Pendiente de humedal)	0.01
T _{PROMEDIO}	24.27 (°C)
Grava	1.905 (cm)
n (Porosidad)	0.345
K _S (Conductividad hidráulica)	1000
K _{T22.4}	1.4158
Cantidad de O ₂	7.5 O ₂ /m ³ /día

Nota: El cálculo del área del humedal será para la remoción de DBO₅

1. Asumiendo una temperatura del agua de diseño en el humedal de flujo subsuperficial de 24.27 que es el promedio de temperaturas de los muestreos. Utilizamos las ecuaciones.

$$K_T = K_{20}(1.06)^{(T-20)}$$

$$K_{20} = 0.678d^{-1}$$

$$K_T = 0.678(1.06)^{(22.27-20)}$$

$$K_T = 1.4158$$

2. Determinación del área superficial requerida para el humedal con:

$$A_s = \frac{Q \ln(C_o/C_e)}{K_T y n}$$

Para el cálculo del área superficial, se consideraron dos profundidades de la celda del humedal, una de 0.35 m que es la utilizada en el humedal plata piloto y 0.6 m que es la más utilizada en la construcción de humedales. Para el cálculo del área se necesita la concentración de DBO₅ en el influente, por lo que se determina para cada concentración de DBO₅ en las diferentes fechas de muestreo.

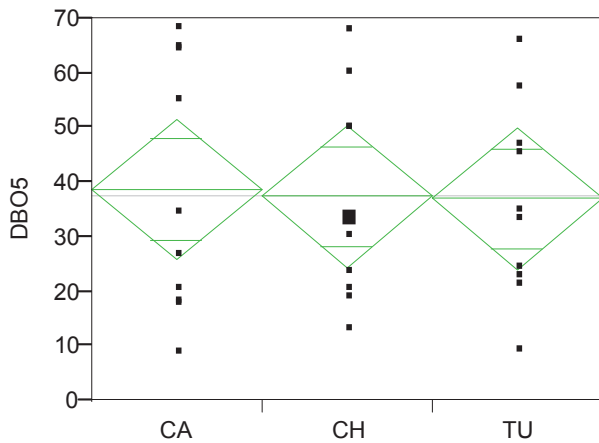
El área es para tener una concentración de 40 mg/L en el efluente.

C_o DBO₅ (mg/L)	As n₁=0,35 (m²)	As n₂=0,6 (m²)	L (m)	TRH (días)		
729.48	3741.77	2182.70	59.44	2.82		
283.69	2524.67	1472.69	40.10	2.07	Ac	22,03 (m)
222.90	2213.82	1291.40	35.17	1.89		
407.85	2992.46	1745.60	47.54	2.36	W n ₁ =0.35 m	62,95 (m)
610.33	3511.95	2048.64	55.79	2.68		
664.64	3621.80	2112.72	57.53	2.74	W n ₂ =0,6 m	36,72 (m)
883.49	3988.61	2326.69	63.36	2.97		
376.09	2887.97	1684.65	45.88	2.29		
648.43	3589.98	2094.16	57.03	2.72		
607.90	3506.81	2045.64	55.71	2.67		

ANEXO III

ANÁLISIS DE VARIANZA

Análisis de Varianza para DBO₅

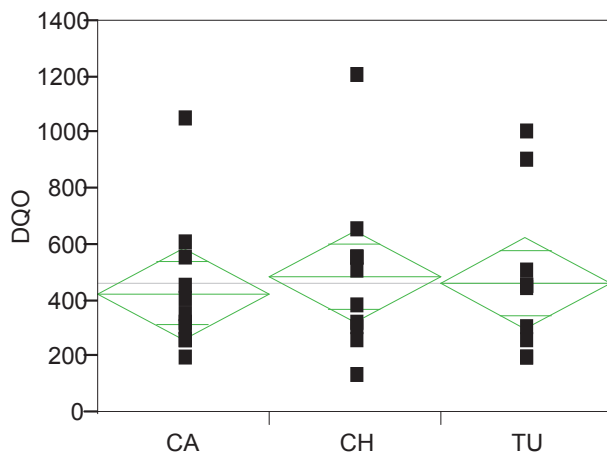


Fuente de Variación	G.L.	Suma de Cuadrados
TIPO	2	16.046
Error	27	10802.863
C. Total	29	10818.909

Media de Cuadrados	F ₀	Prob > F
8.023	0.0201	0.9802
400.106		

Si Prob>F es mayor a 0.05 entonces no se rechaza la hipótesis de igualdad entre medias, o lo que es lo mismo, no hay diferencias entre el comportamiento de remoción de la DBO₅ entre los tres humedales.

Análisis de Varianza para DQO

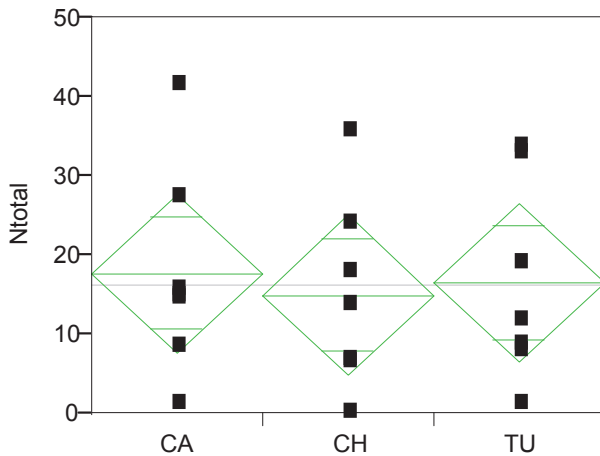


Fuente de Variación	G.L.	Suma de Cuadrados
TIPO	2	20285.3
Error	30	2100648.1
C. Total	32	2120933.4

Media de Cuadrados	F ₀	Prob > F
10142.7	0.1449	0.8658
70021.6		

Como Prob>F es mayor a 0.05, no hay diferencias entre el comportamiento de remoción de la DQO entre los tres humedales.

Análisis de Varianza para NTK

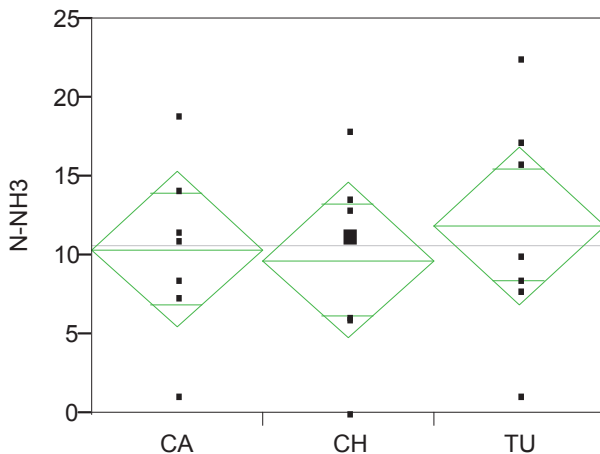


Fuente de Variación	G.L.	Suma de Cuadrados
TIPO	2	25.2239
Error	18	2882.7614
C. Total	20	2907.9853

Media de Cuadrados	F ₀	Prob > F
12.612	0.0787	0.9246
160.153		

Como Prob>F es mayor a 0.05, no hay diferencias entre el comportamiento de remoción de la NTK entre los tres humedales.

Análisis de Varianza para N-NH₃

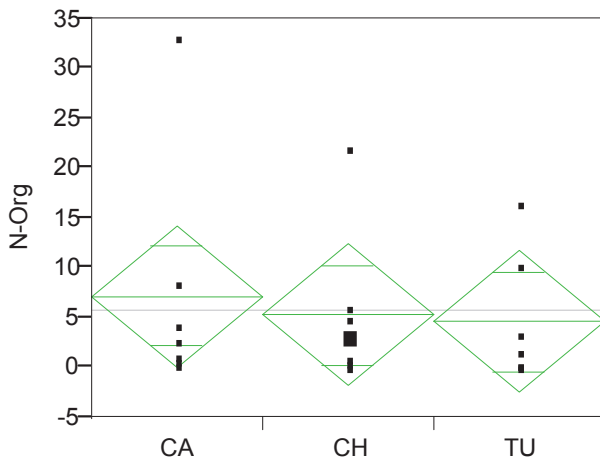


Fuente de Variación	G.L.	Suma de Cuadrados
TIPO	2	17.68183
Error	18	708.56566
C. Total	20	726.24749

Media de Cuadrados	F ₀	Prob > F
8.8409	0.2246	0.8010
39.3648		

La Prob>F es mayor a 0.05, no hay diferencias entre el comportamiento de remoción de la NTK entre los tres humedales.

Análisis de Varianza para N_{ORG}

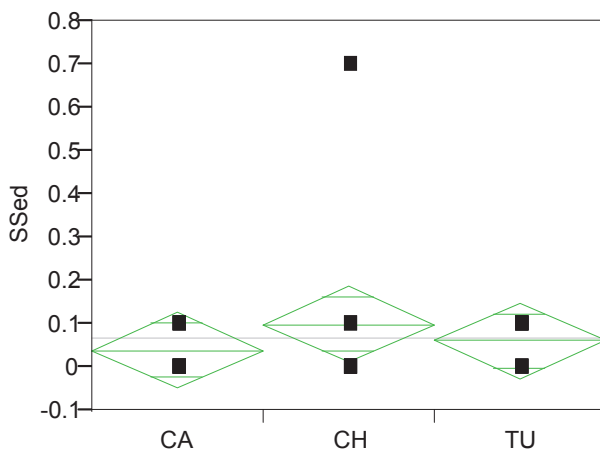


Fuente de Variación	G.L.	Suma de Cuadrados
TIPO	2	24.5362
Error	18	1432.8124
C. Total	20	1457.3486

Media de Cuadrados	F ₀	Prob > F
12.2681	0.1541	0.8583
79.6007		

La Prob>F es mayor a 0.05, no hay diferencias entre el comportamiento de remoción de la NTK entre los tres humedales.

Análisis de Varianza para SSED

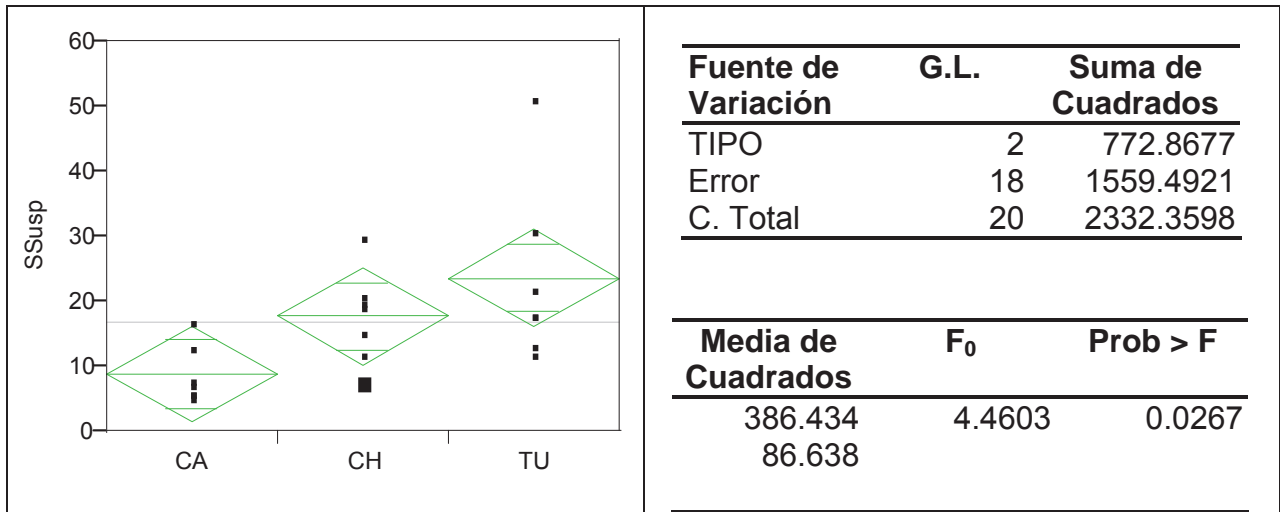


Fuente de Variación	G.L.	Suma de Cuadrados
TIPO	2	0.01866667
Error	27	0.46800000
C. Total	29	0.48666667

Media de Cuadrados	F ₀	Prob > F
0.009333	0.5385	0.5898
0.017333		

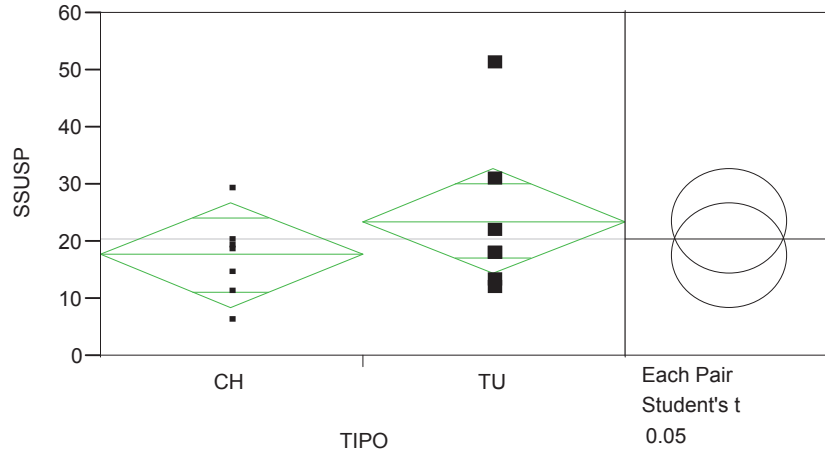
La Prob>F es mayor a 0.05, no hay diferencias entre el comportamiento de remoción de la SSED entre los tres humedales.

Análisis de Varianza para SS



En este análisis de Varianza si hay diferencias, por lo que hay que hacer un análisis por pares para ordenar las medias.

Comparación de Chuspata y Tule



Test t de Student

Asumiendo Variantes Iguales

	Diferencia	t Test	G.L.	Prob > t
Estimación	-5.9048	-1.004	12	0.3351
Error Std	5.8801			
Bajo 95%	-18.7165			
Alto 95%	6.9069			

Variantes Diferentes

	Diferencia	t Test	DF	Prob > t
Estimación	-5.905	-1.004	9.22516	0.3409
Error Std	5.880			
Bajo 95%	-19.157			
Alto 95%	7.348			

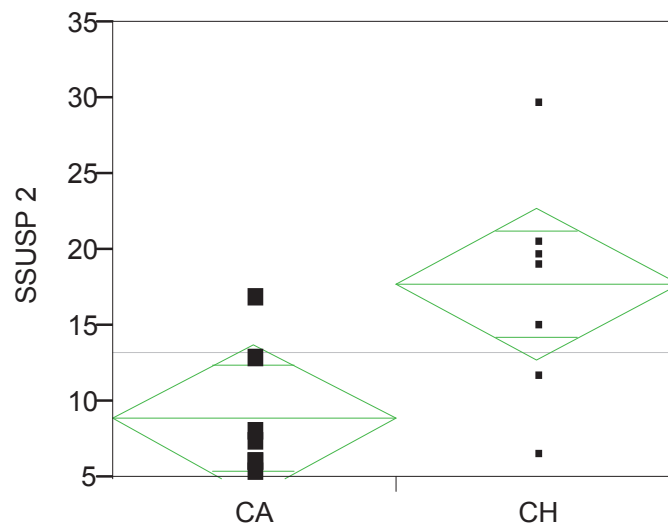
Análisis de Varianza

Fuente de Variación	DF	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	F ₀	Prob > F
TIPO	1	122.0317	122.032	1.0084	0.3351
Error	12	1452.1905	121.016		
C. Total	13	1574.2222			

$\alpha = 0.05$

No hay diferencias entre el comportamiento de remoción de la sólidos suspendidos entre el humedal con chuspata y el humedal con tule.

Comparación de Carrizo y Chuspata



t Test

Asumiendo Variantes Iguales

	Diferencia t Test		DF	Prob > t
Estimación	-8.8571	-2.752	12	0.0175
Error Std	3.2189			
Bajo 95%	-15.8705			
Alto 95%	-1.8438			

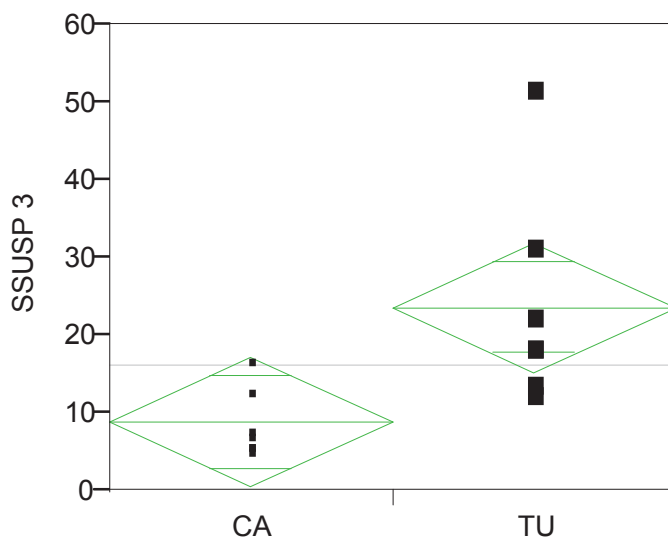
Variantes Diferentes

	Diferencia t Test		DF	Prob > t
Estimación	-8.857	-2.752	9.54727	0.0213
Error Std	3.219			
Bajo 95%	-16.076			
Alto 95%	-1.639			

Análisis de Varianza

Fuente de Variación	DF	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	F ₀	Prob > F
TIPO2	1	274.57143	274.571	7.5713	0.0175
Error	12	435.17460	36.265		
C. Total	13	709.74603			

Comparación de Carrizo y Tule



t Test

Asumiendo Variantes Iguales

	Diferencia	t Test	G.L.	Prob > t
Estimación	-14.762	-2.726	12	0.0184
Error Std	5.415			
Bajo 95%	-26.561			
Alto 95%	-2.963			

Variantes Diferentes

	Diferencia	t Test	DF	Prob > t
Estimación	-14.762	-2.726	7.13491	0.0290
Error Std	5.415			
Bajo 95%	-27.518			
Alto 95%	-2.006			

Análisis de Varianza

Fuente de Variación	G.L.	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	F ₀	Prob > F
TIPO 3	1	762.6984	762.698	7.4312	0.0184
Error	12	1231.6190	102.635		
C. Total	13	1994.3175			

ANEXO IV

Parámetros de Campo

Fecha	pH			
	Cruda	Chuspata	Tule	Carrizo
30-Nov-05	6.99	7.73	7.7	7.79
26-Ene-06	7.68	7.39	7.78	8.06
2-Feb-06	7.63	7.83	7.65	7.5
2-Mar-06	7.28	7.7	7.68	7.89
9-Mar-06	7.41	7.97	7.59	7.68
16-Mar-06	7.24	7.56	7.57	7.71
23-Mar-06	7.37	7.67	7.52	7.92
6-Abr-06	7.36			7.62
20-Abr-06	7.21	7.76	7.45	7.69
17-May-06	7.15	7.53	7.34	7.64
24-May-06	7.15	7.41	7.21	7.7

Fecha	Temperatura (°C)			
	Cruda	Chuspata	Tule	Carrizo
30-Nov-05	22	16.2	14	13.7
26-Ene-06	22.4	16.6	15.5	14.7
2-Feb-06	23	14	15.3	14.9
2-Mar-06	25.8	16.4	15.3	15.3
9-Mar-06	25.4	16.6	16.3	16
16-Mar-06	25.6	18.4	18.2	18.3
23-Mar-06	24.4	17.3	16.8	15.9
20-Abr-06	24.5	20.5	22.6	20.5
17-May-06	24.4	20	19.2	18.3
24-May-06	25.2	18.5	20.6	19.8

Fecha	Conductividad Eléctrica (mS)			
	Cruda	Chuspata	Tule	Carrizo
30-Nov-05	1600	2420	2850	1670
26-Ene-06	1700	2390	2750	1540
2-Feb-06	750	890	940	1200
2-Mar-06	720	1720	1650	1040
9-Mar-06	1440	2030	3340	3260
16-Mar-06	1785	2549	2860	2528
23-Mar-06	1520	3380	3580	1920
20-Abr-06	860	187	2340	1440
17-May-06	690	1000	2030	1440
24-May-06	840	1630	1460	1200