



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS –ERIS–
A NIVEL DE POST-GRADO**

“DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO, PUESTA EN MARCHA Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL EN LA PLANTA PILOTO AURORA II, PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS”

ESTUDIO ESPECIAL

POR EL INGENIERO:

JEOVANY RUDAMÁN MIRANDA CASTAÑÓN

Asesorado por el Dr. Ing. Adán Pocasangre Collazos

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA
Y RECURSOS HIDRÁULICOS –ERIS–



ESTUDIO ESPECIAL
PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS –ERIS–

“DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO, PUESTA EN MARCHA Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL EN LA PLANTA PILOTO AURORA II, PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS”

POR

ING. JEOVANY RUDAMÁN MIRANDA CASTAÑÓN

ASESORADO POR:

Dr. Ing. ADÁN POCASANGRE COLLAZOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE:

MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE)
EN INGENIERÍA SANITARIA

Guatemala, octubre de 2012

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA**



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

DIRECTOR DE ERIS

M. Sc. Ing. Pedro Saravia Celis

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	M. Sc. Ing. Pedro Saravia Celis
EXAMINADOR	M. Sc. Ing. Joram Matías Gil
EXAMINADOR	Dr. Ing. Adán Pocasangre Collazos

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR



Cumpliendo con los preceptos que las leyes de la Universidad de San Carlos de Guatemala establecen, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

“DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO, PUESTA EN MARCHA Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL EN LA PLANTA PILOTO AURORA II, PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS”

Tema que me fuera autorizado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

–ERIS–

Ing. Jeovany Rudamán Miranda Castañón

Guatemala, octubre de 2012

Guatemala, 26 de octubre de 2012

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería, USAC

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de prefabricados, CII
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

Telfax (502) 2418 9140

www.ingenieria-usac.edu.gt

Respetuosamente les comunico que he revisado la versión corregida, en mi calidad de Asesor y Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el trabajo de Estudio Especial titulado:

Determinación de parámetros de diseño, puesta en marcha y evaluación de la eficiencia de humedales de flujo subsuperficial en la planta piloto Aurora II, para el tratamiento de aguas residuales domésticas

presentado por el estudiante,

Ingeniero Civil Jeovany Rudamán Miranda Castañón

Les manifiesto que el estudiante cumplió con los requisitos exigidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio en forma satisfactoria.

Agradeciéndoles la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente.

“ID Y ENSEÑAR A TODOS”

MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría en Ingeniería Sanitaria

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de prefabricados, CII
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

Telfax (502) 2418 9140

www.ingenieria-usac.edu.gt

El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: MSc. Ing. Joram Matias Gil Laroj, MSc. Ing. Pedro Saravia Celis y MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Colazos; así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria, MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos; y la revisión lingüística realizada por la Licda. en Letras, Bibliotecóloga Marta Lidia Marroquín Reyes, Colegiada No. 10,329 al trabajo del estudiante: Ing. Civil Jeovany Rudamán Miranda Castañón, titulado "**Determinación de parámetros de diseño, puesta en marcha y evaluación de la eficiencia de humedales de flujo subsuperficial en la planta piloto Aurora II, para el tratamiento de aguas residuales domésticas**", en representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los 31 días del mes de octubre de 2012.

IMPRIMASE

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

MSc. Ing. Pedro Saravia Celis
DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS–, por las enseñanzas y conocimientos brindados en mi carrera.

Al Director de la Escuela de Ingeniería Sanitaria, M. Sc. Ing. Pedro Saravia, por sus ilustrados conocimientos y por su valioso apoyo para llevar a cabo el presente estudio.

A mi Asesor, Dr. Ing. Adán Pocasangre Collazos, por brindarme su tiempo para enriquecer con su amplia experiencia el presente estudio de investigación.

Al Sr. Alcalde Álvaro Arzú, por apoyar íntegramente a la preparación profesional de los trabajadores Municipales.

Al Gerente de EMPAGUA, Ing. Oscar Alfredo Guzmán, por brindarme su apoyo incondicional para mi preparación académica y al desarrollo de este tipo de investigaciones científicas.

Al Sub-Gerente Técnico, Ing. Hugo Vásquez, por compartir su amplia experiencia, sus conocimientos técnicos y sabios consejos.

Al Ing. Joram Gil, por brindarme su tiempo y experiencia para la elaboración del presente estudio.

A los Ingenieros: Álvaro Hugo Rodas, Gilberto Pérez, Otto Callejas, Alejandro Castañon, Marlon Portillo, quienes han contribuido de muchas formas en mi vida personal.

Al Ing. René Morales, por su valioso aporte para llevar con éxito la finalización de la presente investigación.

ÍNDICE

Índice	I
Índice de figuras	III
Índice de tablas	IV
Glosario	V
Simbología	VI
Resumen	VII
Introducción	VIII
Objetivos	IX
Planteamiento del problema	X
Hipótesis	X
1. ANTECEDENTES	1
2. ALCANCES Y LIMITACIONES	2
2.1. Experiencias de otros países.....	2
3. JUSTIFICACIÓN	4
4. MARCO TEÓRICO	6
4.1 Ubicación geográfica... ..	6
4.2 Localización	7
4.2.1 Clima	7
4.2.2 Temperatura	7
4.2.3 Humedad.....	7
4.3 Humedales	8
4.3.1 Funciones de los humedales	9
4.3.2 Características de los humedales	10
4.3.2.1 Humedales naturales	10
4.3.2.2 Humedales artificiales	10
4.3.2.2.1 Humedales de flujo superficial	10
4.3.2.2.2 Humedales de flujo subsuperficial	11
4.3.3 Componentes de humedales de flujo subsuperficial.....	12

5. DISEÑO	15
5.1 Parámetros de diseño	15
5.1.1 Determinación del área superficial del humedal	17
5.2 Ejemplo de cálculo	19
6. CONSTRUCCIÓN	20
6.1 Planta general	21
6.2 Unidades de pre-tratamiento y tratamiento primario.....	22
6.3 Unidades de tratamiento secundario.....	22
6.3.1 Isométrico.....	23
7. EVALUACIÓN	24
7.1 Metodología	25
7.1.1 Procedimiento.....	25
7.1.2 Técnicas para recopilación de información	25
8. RESULTADOS	26
8.1 Tabulación de resultados.....	27
8.2 Eficiencia del humedal.....	27
8.3 Gráficas de resultados.....	28
9. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	33
10. CONCLUSIONES	34
11. RECOMENDACIONES	35
12. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	36
12.1 De la vegetación y las estructuras.....	36
13. BIBLIOGRAFÍA	37
ANEXOS:	38
A) FOTOGRAFIAS	38
B) PLANOS	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Humedal de Cementos Progreso Sanatare.....	1
Fig. 2 Humedal de Santa Cruz La Laguna Sololá.	1
Fig. 3 Humedal de flujo subsuperficial Israel.....	2
Fig. 4 Humedal Venezuela, análisis de laboratorio	3
Fig. 5 Prototipo de humedal Venezuela.....	3
Fig. 6 Crecimiento del tul en la laguna El Pino.....	4
Fig. 7 Crecimiento del tul en el lago de Atitlán.	5
Fig. 8 Ubicación del área de estudio.	6
Fig. 9 Localización del área de estudio.	7
Fig. 10 Modelo general de un humedal.	8
Fig. 11 Humedal superficial.	11
Fig. 12 Sección de un humedal.	11
Fig. 13 Humedal subsuperficial construido en la planta Aurora II.....	11
Fig. 14 Humedal subsuperficial construido en la planta Aurora II.....	11
Fig. 15 Entrada del humedal.	12
Fig. 16 Preparación del substrato.....	12
Fig. 17 Crecimiento del tul en el humedal subsuperficial.....	13
Fig. 18 Flujograma del sistema de tratamiento.....	18
Fig. 19 Planta general del modelo experimental.	20
Fig. 20 Planta general y sus componentes.....	20
Fig. 21 Construcción de celdas del humedal.....	21

Fig. 22 Sección del humedal	22
Fig. 23 Crecimiento del tul.....	22
Fig. 24 Isométrico del humedal	23
Fig. 25 Isométrico con vegetación.....	23
Fig. 26 Análisis de laboratorio.	24
Fig. 27 Eficiencia en remoción de la DBO ₅	28
Fig. 28 Eficiencia en remoción de la DQO.....	29
Fig. 29 Eficiencia de remoción de nitrógeno total.....	29
Fig. 30 Eficiencia de remoción de fósforo total.....	30
Fig. 31 Eficiencia de remoción de aceites y grasas.....	30
Fig. 32 Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos	31
Fig. 33 Eficiencia de remoción de zinc... ..	31
Fig. 34 Eficiencia del humedal a dos meses de su construcción.....	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características típicas del medio poroso.....	15
Tabla 2 Resultados de laboratorio en la entrada.....	27
Tabla 3 Resultados de laboratorio en la salida.....	27
Tabla 4 Cálculo de la eficiencia del humedal.	27
Tabla 5 Determinación de la relación DBO ₅ /DQO.....	28
Tabla 6 Resultados de laboratorio	32

GLOSARIO

Agua: sustancia formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno esencial para la depuración de los seres vivos.

Afluente: el agua o flujo que entra al sistema.

Aguas residuales: aguas que han recibido uso y cuyas calidades han sido modificadas.

Contaminación: presencia en el ambiente de elementos nocivos a la vida, flora o fauna, que degraden la calidad de la atmósfera, del agua, del suelo o de los bienes y recursos naturales en general.

Caudal: volumen de agua por unidad de tiempo.

Coliformes fecales: parámetro que indica la presencia de contaminación fecal en el agua, y de bacterias patógenas provenientes del tracto digestivo de los seres humanos y animales.

Cuerpo receptor: embalse natural, lago, río, quebrada, humedal, estero, pantano, y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.

Demanda bioquímica de oxígeno: cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un periodo de cinco días y a una temperatura de veinte grados Celsius.

Demanda química de oxígeno: la medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizado en la oxidación química.

Humedal: sistema acuático natural o artificial, de carácter temporal o permanente de profundidad variable.

Tratamiento de aguas residuales: cualquier proceso físico, químico, biológico o una combinación de los mismos, utilizado para mejorar las características de las aguas residuales.

SIMBOLOGÍA

°C:	grados Celsius
cm:	centímetros
DBO:	demanda bioquímica de oxígeno
DQO:	demanda química de oxígeno
ERIS:	Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
m:	metros
NT:	nitrógeno total
pH:	potencial de hidrógeno
PT:	fósforo total
SST:	sólidos suspendidos totales
USAC:	Universidad de San Carlos de Guatemala
Ks:	conductividad hidráulica
mg/l	miligramos por litro

RESUMEN

Se procedió a diseñar y construir el humedal de flujo subsuperficial, utilizando el tul como vegetación para la purificación del agua residual. El tul se transportó desde la laguna El Pino y el periodo de siembra permitió verificar su crecimiento y adaptación a las aguas residuales que ingresan al lugar; posteriormente, durante año y medio se evaluó su eficiencia mediante las primeras muestras dos meses después de la siembra, en la planta piloto "Ingeniero Arturo Pazos Sosa", ubicada en la diagonal 26, 20-56 zona 13, colonia Aurora II. El proyecto fue construido a escala, por lo que para llegar a un proceso de evaluación se realizó una secuencia de actividades cumpliendo con el ciclo del proyecto: (I) Programación, (II) Identificación, (III) Diseño, (IV) Financiación, (V) Ejecución y (VI) Evaluación.

La programación se desarrolló en conjunto con la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS-, estableciendo tiempos para cada una de las actividades; se identificó el lugar adecuado para construir el sistema y, de acuerdo con sus características, se diseñó cada unidad utilizando las fórmulas y criterios establecidos. Luego, el proceso de ejecución, con la respectiva supervisión para respetar las medidas del diseño. Este proceso incluye la selección de la planta, traslado, siembra, control de adaptación y seguimiento.

La evaluación propiamente se inició dos meses después de la siembra del tul, con resultados de eficiencia promedio del 40 % de DBO₅, DQO, nitrógeno y fósforo. Un año después de haberse sembrado, el humedal alcanzó su eficiencia máxima de más del 85 % en remoción de DBO₅, DQO y nitrógeno, sin embargo en fósforo su eficiencia fue debajo del 35 %. Los humedales son uno de los muchos tipos de sistemas naturales que pueden usarse para el tratamiento y control de la contaminación.

El sistema fue diseñado y construido con un canal de entrada, rejillas, desarenador, trampa de grasa, tratamiento primario y dos unidades de humedales de flujo subsuperficial, con su medio filtrante y se utilizó el tul como medio de purificación natural.

INTRODUCCIÓN

La construcción de humedales ha sido considerada como los riñones del medio natural, por el papel fundamental que desempeñan en los ciclos hidrológicos y químicos, y como supermercados biológicos, en razón de las extensas redes alimentarias y la rica diversidad biológica. Los humedales son zonas de transición entre el medio ambiente terrestre y el acuático; además, sirven como enlace dinámico entre ambos.

El agua que se mueve arriba y abajo del gradiente de humedad asimila una variedad de constituyentes químicos o físicos en solución, ya sea como detritus o sedimentos. Dos procesos que dominan el rendimiento en el tratamiento de los humedales son: la dinámica microbial y la hidrodinámica. Los procesos microbiales son cruciales en la remoción de algunos nutrientes y en la renovación de las aguas residuales en los humedales; estos proveen sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Los humedales de flujo subsuperficial logran el tratamiento de las aguas residuales por medio de la sedimentación, absorción y metabolismo bacterial; además, interactúan con la atmósfera. Operan casi a velocidades de flujo y caudal constante y están sujetos a drásticos cambios en la remoción de DBO, debido a los cambios en la temperatura del agua; por esa razón en zonas templadas estos sistemas de tratamiento tienden a variar su eficiencia durante el año.

En zonas cálidas y tropicales los parámetros climatológicos: temperatura, radiación solar y evapotranspiración varían en un rango menor que en zonas templadas. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de las algas al limitar la penetración de luz solar.

OBJETIVOS

General

Diseñar, construir y evaluar la eficiencia del humedal de flujo subsuperficial para la reducción de la contaminación de las aguas residuales domésticas por medio de la purificación de plantas naturales utilizando el tul como vegetación.

Específicos

1. Determinar parámetros de diseño, dimensionamiento y eficiencia en los humedales de flujo subsuperficial y determinar el área requerida por persona equivalente.
2. Construir el modelo experimental que permita conocer la metodología de arranque y operación para alcanzar niveles de eficiencia mayores al 80 % en remoción de carga contaminante y del 90 % en remoción de nitrógeno y niveles de fósforo.
3. Establecer la relación largo ancho óptimo, para obtener una eficiencia aceptable.
4. Determinar la eficiencia de humedales en la remoción de nutrientes nitrógeno y fósforo.
5. Evaluar la eficiencia del humedal, para determinar si es adecuado un tiempo de retención hidráulica de cuatro días.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La mayoría de las aguas residuales domésticas, provenientes de los drenajes municipales, descargan directamente a las cuencas naturales (ríos o lagos) con altos contenidos de materia orgánica y nutrientes, los cuales generan contaminación para el ambiente natural. La falta de tratamiento adecuado, especialmente para la remoción de nitrógeno y fósforo, se debe a los altos costos que implican los tratamientos convencionales de desnitrificación.

La presente investigación pretende responder la pregunta ¿existen tecnologías apropiadas y de bajo costo de operación y mantenimiento, aparte de las lagunas de oxidación, para el tratamiento de aguas residuales domésticas, que sean más eficientes y requieran menor área por persona equivalente para eliminar nitrógeno y fósforo?

HIPÓTESIS

Es factible proponer la utilización del tul como vegetación y arena gruesa como medio poroso, en los humedales de flujo subsuperficial, como una alternativa de tratamiento de aguas residuales domésticas eficiente y de bajo costo en su operación y mantenimiento.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala existe una investigación sobre evaluación de humedales, realizada por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria -ERIS- en la planta San Miguel de la empresa Cementos Progreso S. A. localizada en el km 46.5 carretera al Atlántico, Sanarate, El Progreso, la cual fue construida en el año 2000. Un medio escrito publicó datos sobre el funcionamiento del sistema de tratamiento.



Fig. 1 Humedal de Cementos Progreso Sanarate

Como resultado del buen funcionamiento del humedal, en febrero del año 2005, se inauguro el humedal de Santa Cruz La Laguna, Sololá, para reducir la contaminación al lago de Atitlán. Un medio de comunicación escrita, publicó información acerca de este diseño que se construyó utilizando el tul como vegetación para la purificación natural.



Fig. 2 Humedal de Santa Cruz la Laguna, Sololá

2. ALCANCES Y LIMITACIONES

El estudio determina la forma más adecuada para el tratamiento de aguas residuales domésticas, para remover materia orgánica y nutrientes. La principal limitación que se encontró al efectuar el estudio fue la poca información local sobre el diseño y parámetros de diseño utilizados para determinar la sección de un humedal de flujo subsuperficial, escasa literatura nacional al respecto.

La estructura del humedal se adaptó a las condiciones del lugar, se consultó información acerca de experiencias en Perú, Venezuela e Israel. Se utilizaron los modelos de diseño acomodando los valores al medio nacional y se consideró una vegetación que se encuentra en el medio local. Se requieren mayores extensiones de terreno, comparado con los tratamientos convencionales.

2.1 Experiencias de otros países

Según las experiencias en Israel, Venezuela, Nicaragua (proyecto de Masaya) y España, la eficiencia del sistema de tratamiento de humedales es sumamente alta, lo cual significa que está entre el 80 % y el 90 %, según el diseño y el tipo de planta que desarrollará la fitodepuración.

Israel utiliza este tipo de sistemas de tratamiento para aguas residuales domésticas y para aguas provenientes de los establos, con un sistema de digestión de lodos. Los países citados manejan tan bien este tipo de humedales, que los recomiendan y los construyen cerca de áreas comerciales, sin generar ningún olor.



Fig. 3 Humedal de flujo subsuperficial en Israel

Venezuela realiza proyectos de investigación a escala para un sistema de humedales de flujo subsuperficial, tan perfeccionado que no aparenta ser un sistema de tratamiento, pues NO presenta mal olor y la calidad de salida está por arriba de 95 % de eficiencia.



Fig. 4 Venezuela; análisis de laboratorio



Fig.5 Prototipo de humedal en Venezuela

3. JUSTIFICACIÓN

Las diferentes plantas de tratamiento para aguas residuales domésticas diseñadas y construidas en nuestro medio, anaeróbicas o aeróbicas, remueven especialmente: sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y demanda química de oxígeno (DQO). Estas carecen de una alta eficiencia en la remoción de nutrientes, debido a que el proceso de desnitrificación eleva los costos de la planta de tratamiento. Sin embargo, en el caso de los humedales de flujo subsuperficial contribuyen altamente en la reducción de nutrientes presentes en las aguas residuales, por medio de la raíz y microorganismos que permiten la descomposición de la materia orgánica y mejoran la calidad de agua en el humedal; de manera que su implementación contribuye a la conservación de ríos y lagos.

Muchos lagos son afectados directamente por descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento que generan crecimiento de vegetación, la cual ocupa espacio de lagunas y lagos, como el siguiente caso que fue publicado por un medio local.

Se observa que la laguna El Pino, ubicada en Barberena, Santa Rosa, se consume por el crecimiento del tul como consecuencia de descargas de aguas residuales, en forma directa, a la laguna como producto de la presencia de nutrientes en el agua.



Fig. 6 Crecimiento del tul en la laguna El Pino

Las municipalidades generalmente desfogan sus drenajes sanitarios en forma directa y sin ningún tratamiento a la cuenca más cercana, la cual utilizan como cuerpo receptor y, finalmente, el cuerpo receptor desfoga su caudal a ríos o lagos, como sucede en los lagos de Amatitlán y Atitlán.



Fig. 7 Crecimiento de tul en el lago de Atitlán

Esto genera una serie de consecuencias ambientales incalculables en la salud de sus habitantes y la muerte de la vida acuática del lago; hechos que afectan el turismo e integralmente al medio ambiente del país.

Los ejemplos anteriores prueban la necesidad de que se promueva la investigación de humedales de flujo subsuperficial como alternativa para la remoción de nutrientes. Se trata de un sistema de bajo costo que se adapta a nuestro medio y que puede ser implementado por las municipalidades de Guatemala.

En países industrializados, con capacidad financiera para ese gasto, se pagan grandes sumas de dinero para que las plantas de tratamiento generen procesos de desnitrificación.

Teniendo en cuenta la cultura de pago de nuestro país, su implementación se justifica por su alta eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas y se selecciona el o los tipos de plantas por sembrar, que se adaptan a este medio; además, simultáneamente se evalúan su crecimiento y eficiencia.

Este trabajo contribuye a la recopilación de resultados de laboratorio que justifican la eficiencia del sistema de humedales, con base en los criterios de diseño previamente establecidos, con el afán de aplicar los sistemas a gran escala, por medio de humedales de flujo subsuperficial.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Ubicación geográfica

La construcción y evaluación del humedal de flujo subsuperficial se realizó en el área donde se ubica la planta de tratamiento “Ing. Arturo Pazos Sosa”, localizada en la parte final de la diagonal 26, No. 20-56, colonia Aurora II, zona 13, de la ciudad capital.



Fig. 8 Ubicación del área de estudio

Ubicación del área de estudio planta “Aurora II”

Su localización cartográfica está dada por las coordenadas: $14^{\circ}34'43.55\text{N}$ $90^{\circ}32'10.73\text{O}$, entre las cotas 1520 y 1550 msnm.

4.2. Localización

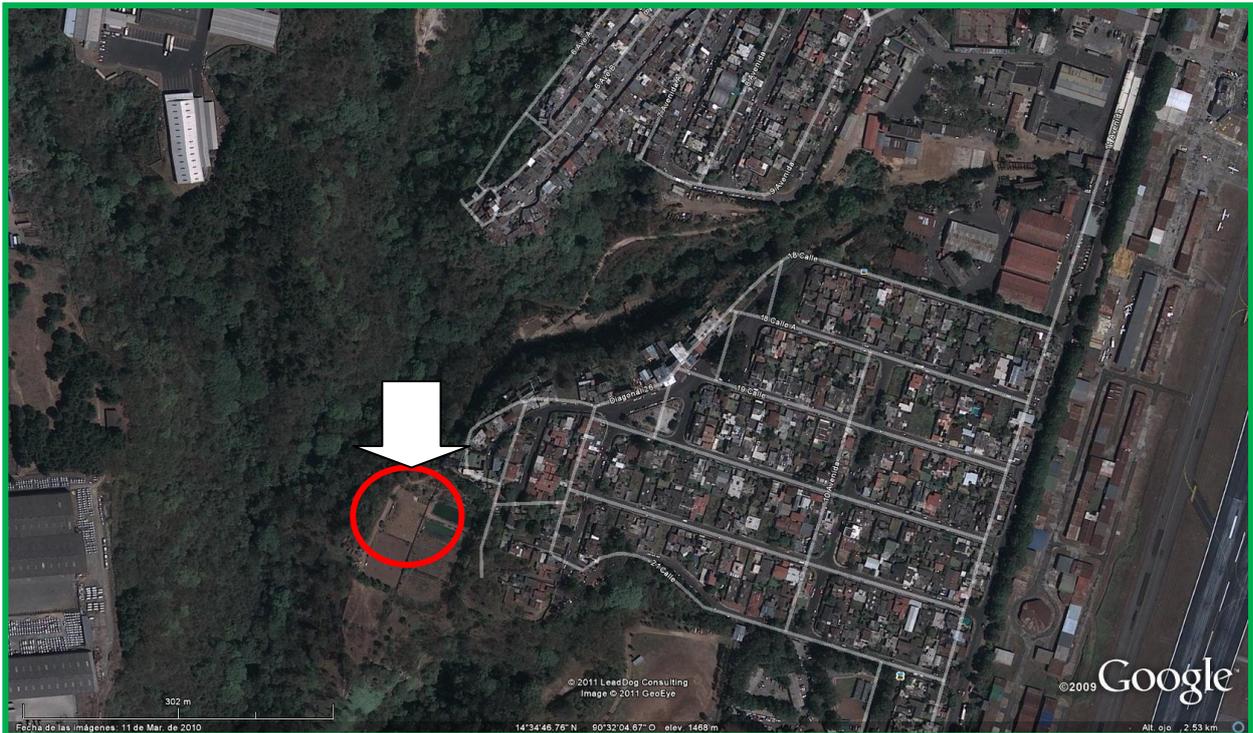


Fig. 9 Localización del área de estudio

4.2.1. Clima

El clima de Guatemala varía según su altitud; en el centro del país, entre los 700 y 1.800 metros de altura, el clima es templado, con medias de 18° a 25° C.

4.2.2. Temperatura

La temperatura media anual es de 19 °C. En el invierno, de diciembre a abril, la temperatura oscila entre 21 y 5 °C. En verano, de junio a septiembre, la temperatura oscila entre 25 y 16 °C. La humedad relativa media por la mañana: 84 %; por la noche, 64 %. El promedio de punto de rocío es de 12 °C.

4.2.3. Humedad

Humedad relativa: 65 %

Precipitación: 20 %

4.3 Humedales

Los humedales han sido descritos como los riñones del medio natural, debido a las funciones que desempeñan en los ciclos hidrológicos. Sus componentes son agua, vegetación, grava, microorganismos. Los humedales ocupan el espacio que hay entre los medios húmedos y los medios generalmente secos y que poseen características de ambos, por lo que no pueden ser clasificados categóricamente como acuáticos ni terrestres.¹

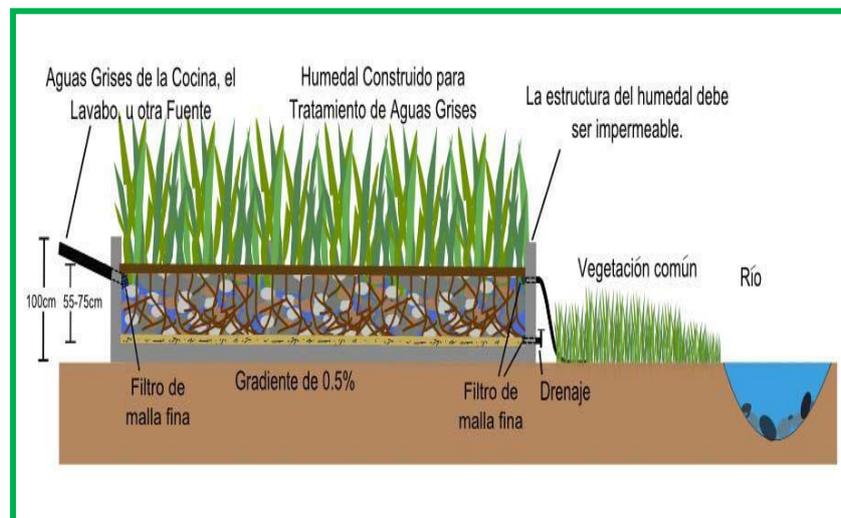


Fig. 10 Modelo general de un humedal

Lo característico de un humedal es la presencia de agua durante períodos lo bastante prolongados como para alterar los suelos, sus microorganismos y las comunidades de flora y fauna, hasta el punto de que el suelo no actúa como en los hábitat acuáticos o terrestres. Las profundidades típicas de estas extensiones de tierras son menores a 0,60 m donde crecen plantas emergentes como juncos (*typha* «totor»), tul (*Thypha* spp) y lenteja de agua que contribuye a la reducción de contaminantes mediante procesos aerobios de degradación.

¹ (Hammer y Bastian, 1999)

4.3.1 Funciones de los humedales

Las actividades humanas originan varios tipos de humedales de interés para algunas especies vegetales y animales. Las áreas inundadas y otro tipo de excavaciones abandonadas, restauradas o poco alteradas albergan distintos tipos de hábitats.²

4.3.1.1. Proceso de remoción físico

Los humedales son capaces de proporcionar alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociados con material particulado. El agua superficial se mueve muy lentamente a través de los humedales debido al flujo laminar característico y la resistencia proporcionada por las raíces y las plantas flotantes. La sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve por la baja velocidad de flujo y porque con frecuencia este es laminar en los humedales.

4.3.1.2. Proceso de remoción biológico

Este es quizá el camino más importante para la remoción de contaminantes en los humedales; los contaminantes son también formas de nutrientes esenciales para las plantas; de modo que estas toman con facilidad el nitrato, el amonio y el fosfato.

4.3.1.3. Proceso de remoción químico

El proceso químico más importante de la remoción de suelos del humedal es la absorción, que da lugar a la retención a corto plazo o la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes.

La absorción es un término ampliamente definido para la transferencia de los iones (moléculas con cargas positivas o negativas) a partir de la fase de solución (agua) a la fase sólida (suelo).

² (Hammer y Bastian, 1999)

4.3.2 Características de los humedales

Básicamente existen dos tipos de humedales: los naturales y los artificiales.

4.3.2.1 Humedales naturales

Los humedales naturales se consideran como tierras transicionales entre un sistema terrestre y un sistema acuático, con el nivel freático cerca de la superficie del suelo o el suelo, cubierto con agua de poca profundidad. Existen varios componentes de este sistema, entre ellos las propiedades bióticas y no bióticas como el suelo, el agua, las plantas y los animales. Una de las principales funciones es el resultado de la interacción de estos componentes, la cual incluye el ciclo de nutrientes, el intercambio de aguas superficiales y subterráneas y entre la superficie y la atmósfera.³

4.3.2.1 Humedales artificiales

Este tipo de humedales se construye con el fin de simular las condiciones de los humedales naturales. Se realiza una inundación continua con aguas residuales; esta es la mejor opción para descontaminar las aguas residuales, debido a que no afectan los ecosistemas naturales. Los humedales artificiales se clasifican por el tipo de flujo del agua que poseen: flujo superficial y flujo subsuperficial.

4.3.2.2.1 Humedales de flujo superficial

Son lagunas excavadas, donde el agua circula expuesta a la atmósfera y pasa a través de las plantas acuáticas emergentes. Las plantas crecen arraigadas en el fondo de la laguna. En estos humedales la profundidad de la lámina de agua varía entre unos centímetros y hasta un máximo de 1,0 m. La profundidad común es entre 0,3 y 0,5 m; la baja profundidad del agua, la velocidad baja del flujo y la presencia de tallos de la planta y basura, regulan el flujo del agua. El tratamiento ocurre cuando el flujo de agua atraviesa lentamente el tallo y la raíz de la vegetación emergente.

³ (Mitsch y Gosselink, 2000)



Fig. 11 Humedal superficial

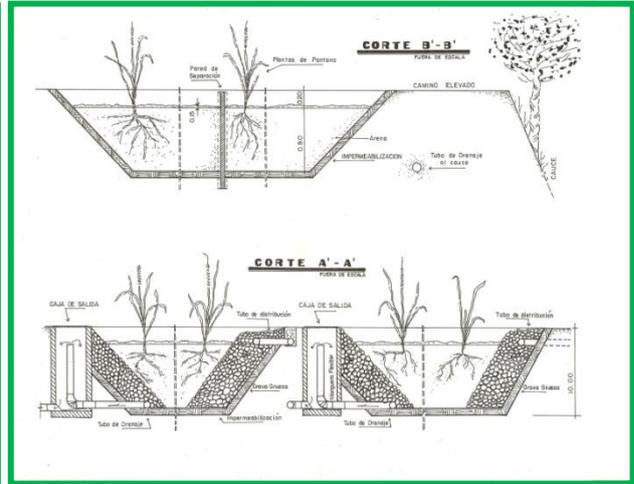


Fig. 12 Secciones de un humedal

4.3.2.2 Humedales de flujo subsuperficial

Los humedales de flujo subsuperficial son lechos excavados en el suelo, rellenos de un medio granular, a través de los cuales circula el agua sin aflorar a la superficie. El medio granular sirve de sustento a las plantas y de sustrato para fijar la biopelícula, que en este caso será muy superior, debido al medio granular.



Fig. 13. Humedal de flujo subsuperficial



Fig. 14. Humedal en la Planta Aurora II, zona 13

La profundidad varía entre 0,3 y 0,7 m. Dentro del lecho los microbios facultativos atacan al medio y las raíces de la plantas, contactando de este modo el agua residual que fluye horizontalmente a través del lecho; mientras que el sobrante baja a la superficie del medio.

Estos sistemas, que fueron desarrollados en Alemania Oriental, se diseñan con el propósito de obtener niveles de tratamiento secundarios.

4.3.3 Componentes del humedal de flujo subsuperficial

Agua

La hidrología es uno de los factores más importantes en un humedal, porque reúne todas las funciones del humedal y a menudo es el factor decisivo para el éxito o fracaso del mismo.



Fig. 15 Entrada del humedal

Substrato

Los substratos en los humedales construidos incluyen suelo, arena, grava, roca y materiales orgánicos como el compost.



Fig. 16 Preparación del substrato

Vegetación

El principal beneficio que aportan las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia en el sistema (tallos, raíces y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de forma más profunda de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión.

Las plantas que suelen utilizarse en los humedales son espadañas (Typha), carrizos (phragmites), juncos, tul.

Espadaña (typha): es una planta robusta, capaz de crecer en diversas condiciones medioambientales, se propaga fácilmente; por ello es una especie ideal para un humedal artificial. Además, puede producir biomasa anual grande; tiene potencial pequeño de remoción de nitrógeno y fósforo por la vía de la poda y la cosecha. Los rizomas de espadaña plantados a intervalos de aproximadamente 60 cm pueden producir una cubierta densa en menos de un año y tiene relativamente baja penetración en grava (30 cm).

Juncos (scirpus): pertenecen a la familia de las ciperáceas, son perennes y crecen en grupos, en un rango diverso de aguas interiores y costeras, pantanos salobres y humedales. Pueden crecer en agua desde 5 cm a 3 m de profundidad; en un pH de 4 a 9. La mayoría de las especies tienen crecimiento moderado y logran buen cubrimiento durante alrededor de un año, con separaciones de 30 cm. Algunas variedades crecen más rápido y pueden cubrir en un año, con espaciamiento menor (entre 30 y 60 cm).

Tul (Thypha spp): crece en el medio nacional y tiene alta eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo, caso en estudio.



Fig. 17 Crecimiento del tul en el humedal de flujo subsuperficial

Microorganismos

Una de las características importantes de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes.

Animales

Los humedales construidos proveen un hábitat para una rica diversidad de invertebrados y vertebrados. Invertebrados como insectos y gusanos, contribuyen al proceso de tratamiento fragmentado del detritus al consumir materia orgánica. Las larvas de muchos insectos son acuáticas y, durante sus fases larvales, consumen cantidades significativas de materia.

5. DISEÑO

- El agua fluye debajo de la superficie de grava = flujo a pistón
- Gradiente hidráulico = 0.5 – 1 %
- Caudal = 50-100 gal/persona por día (0.189-0.378 m³)
- Capacidad volumétrica del tanque = 5 veces el caudal medio
- Separación de las plantas = 0.50 m
- Altura del nivel de agua = 0.10-0.70 m
- Conductividad hidráulica de arena gruesa $K_s = 480.06 \text{ m}^2/\text{m}^2\text{d}$
- Relación largo ancho = 4:1
- Tiempo de retención hidráulica = 4 días
- Menor granulometría = mayor rendimiento
- Dotación = 150-200 lts/hab/día
- Principal mecanismo de eliminación en el flujo subsuperficial = adsorción.
- Medio de soporte = arena gruesa
- Vegetal = tul
- Q diseño = 0.014 lts/seg
- Porosidad $n = 0.39$
- $K_t = 0.52$
- Temperatura máxima = 25 grados
- Temperatura mínima = 15 grados

5.1 Parámetros de diseño

Determinación de la conductividad hidráulica (K_s).

Tabla 1					
Características típicas del medio					
Tipo de medio	Máximo 10 % del tamaño del grano (mm)	Porosidad (n)	Conductividad hidráulica K_s		K_{20}
			$\text{Pie}^3/\text{pie}^2\cdot\text{d}$	$\text{M}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$	
Arena media	1	0.42	1380	420.62	1.84
Arena gruesa	2	0.39	1575	480.06	1.35
Arena grava	8	0.35	1640	499.87	0.86

Fuente: autor, Rousseau, 2004

La relación largo-ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. En teoría grandes relaciones largo-ancho 10:1 o mayores asegurarían un flujo a pistón, pero tienen el inconveniente de que en la parte alta se desbordan debido al incremento en la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de vegetación, principalmente en sistemas subsuperficiales.

Por tanto, relaciones de 1:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son aceptables. Los cortocircuitos se pueden minimizar con una cuidadosa construcción y mantenimiento del fondo del humedal, con el uso de múltiples celdas y con la intercalación de zonas abiertas (sin vegetación) para la redistribución del flujo.

Ecuación básica de los reactores de flujo a pistón:

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

Donde:

- C_e: concentración del contaminante en el efluente, mg/l
- C_o: concentración del contaminante en el afluente, mg/l
- KT: constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹
- t: tiempo de retención hidráulica, d

$$t = \frac{L.W.y.n}{Q}$$

L = largo del humedal, m

W = ancho 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, porcentaje expresado como decimal.

Q = caudal medio a través del humedal, m³/d

5.1.1 Determinación del área superficial del humedal

Área superficial del humedal.

$$As = LW = \frac{Q \cdot \ln(Co / Ce)}{Ktyn}$$

Donde:

As = área superficial del humedal, m².

As= 12.02 m² (de diseño)

El valor de KT depende del contaminante que se desea eliminar y de la temperatura.

Velocidad del flujo de agua de un humedal,

Ecuación de Manning

$$v = \frac{1}{n} y^{2/3} s^{1/2}$$

Donde:

v = velocidad de flujo, m/s.

n = coeficiente de Manning s/m^{1/3}

y = profundidad del agua en el humedal, m

s = gradiente hidráulico o pendiente de la superficie del agua, m/m

Longitud máxima del humedal

$$L = \left[\frac{As \cdot y^{8/3} \cdot m^{1/2} \cdot 86400}{a \cdot Q} \right]^{2/3}$$

$$v = \frac{Q}{W \cdot y} \quad W = \frac{As}{L} \quad s = \frac{m \cdot y}{L}$$

Donde:

Q = caudal, m³/d

W = ancho de la celda de humedal, m

As = área superficial de la celda de humedal, m²

L = longitud de la celda de humedal, m

m = pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal

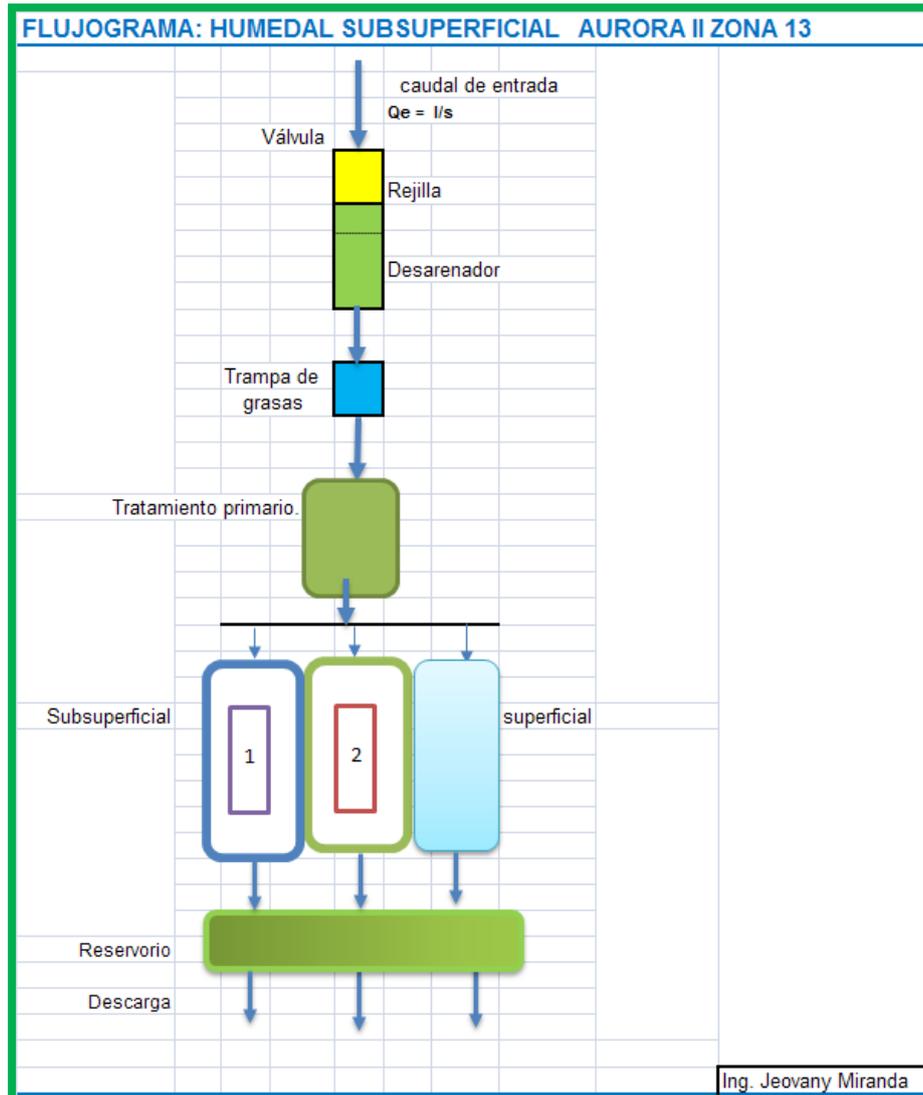


Fig. 18 Flujoograma del sistema de tratamiento

El esquema de funcionamiento del humedal construido se realizó tomando en cuenta las consideraciones previas constructivas de cada proceso, las cuales interfieren en los rendimientos de un sistema de tratamiento; son las unidades siguientes:

Tubería de entrada, válvula de entrada para regular el flujo, canal de entrada, rejillas, canasta, trampa de grasa, tratamiento primario, humedal de flujo subsuperficial.

5.2. Ejemplo de cálculo

- Estimación del área superficial

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

Modelo Reed, Sherwood C.

Donde:

C_e = concentración de DBO₅ en el efluente, mg/l

C_o = concentración de DBO en el afluente, mg/l

K_T = constante de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹

n = porosidad del sistema (espacio disponible para el paso del agua) como fracción decimal

Q = caudal promedio en el sistema, m³/d

y = profundidad del humedal

$$A_s = \frac{1.2 \ln(350 / 50)}{(0.83)(0.6)(0.39)}$$

$$A_s = 12.02 \text{ m}^2$$

- Cálculo del tiempo de retención hidráulica, t

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t)$$

$$t = -\ln(C_e / C_o) / K_T$$

$$t = -\ln(50 / 350) / 0.52$$

$$t = 3.74 \text{ dias}$$

6. CONSTRUCCIÓN

El proceso constructivo del presente estudio se realizó con base en toda la parte hidráulica analizada y los planos construidos para tales efectos, considerando las dimensiones previamente determinadas en el cálculo, para cumplir con los requisitos hidráulicos del humedal. En esta etapa se consideró la siembra de la vegetación, la cual se transportó de la laguna El Pino, que se encuentra a una distancia aproximada de 48 kilómetros de la ciudad de Guatemala sobre la carretera Interamericana CA-1 hacia el Salvador; en el municipio de Barberena, departamento de Santa Rosa.

Antes de sembrar el tul se preparó un compost de tierra negra con abono orgánico para que existiera reacción y crecimiento de bacterias y permitiera mejor adaptación del tul, en una cama de 10 centímetros, en combinación con arena gruesa como material granular.

Este proceso de trasplante duró aproximadamente dos horas hasta la nueva siembra, de manera que el tul no sufriera un proceso de secado. La separación entre cada planta fue de 50 centímetros, para permitir su futuro crecimiento.

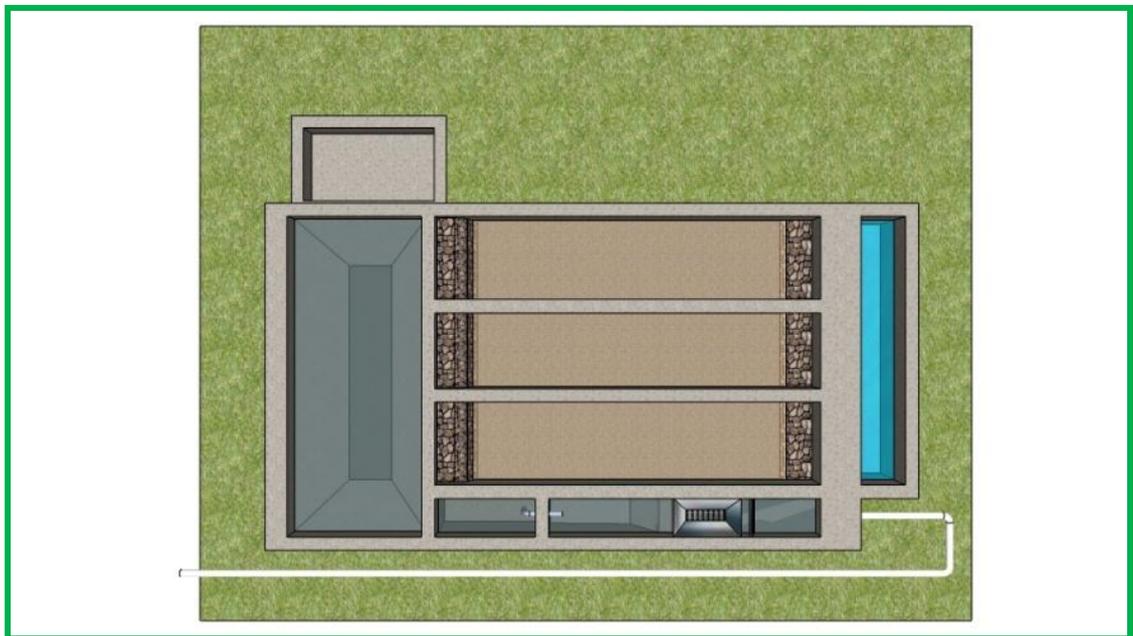


Fig. 19 Planta general del modelo experimental

6.2 Unidades de pre-tratamiento y tratamiento primario

La estructura del tratamiento primario posee estructura cónica con su respectivo Baffle o pantalla que permite mayor eficiencia en la sedimentación de sólidos.

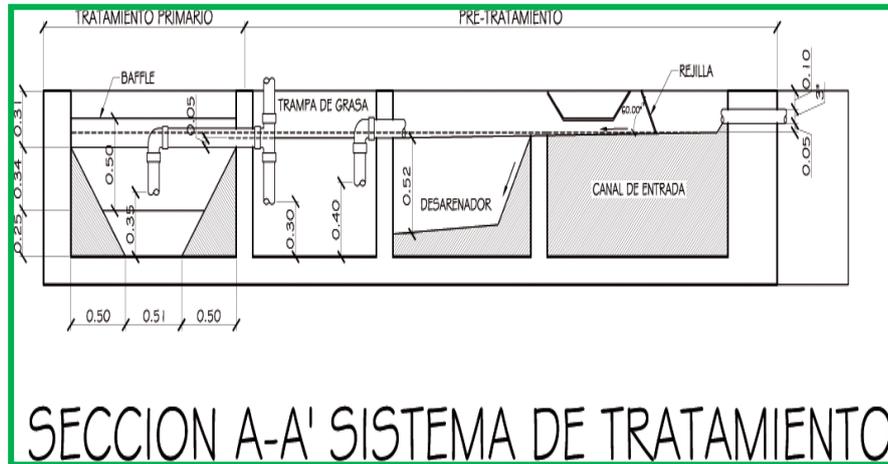


Fig. 22 Sección del humedal

6.3 Unidades de tratamiento secundario

Este proceso de tratamiento se efectúa por medio de dos unidades construidas en paralelo con humedales de flujo subsuperficial; se considera su pendiente hidráulica, el nivel de agua y la altura de la materia orgánica, así como la altura del medio filtrante del área.

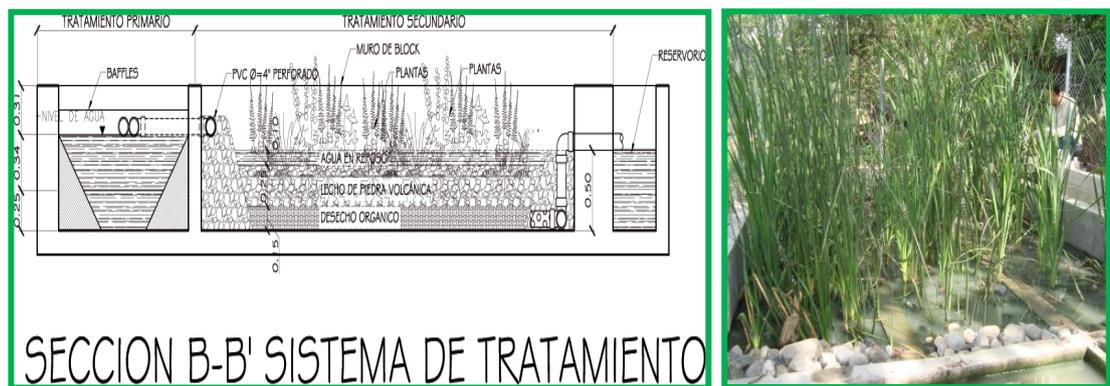


Fig. 23 Adaptación y crecimiento del tul en el humedal

6.3.1 Isométrico

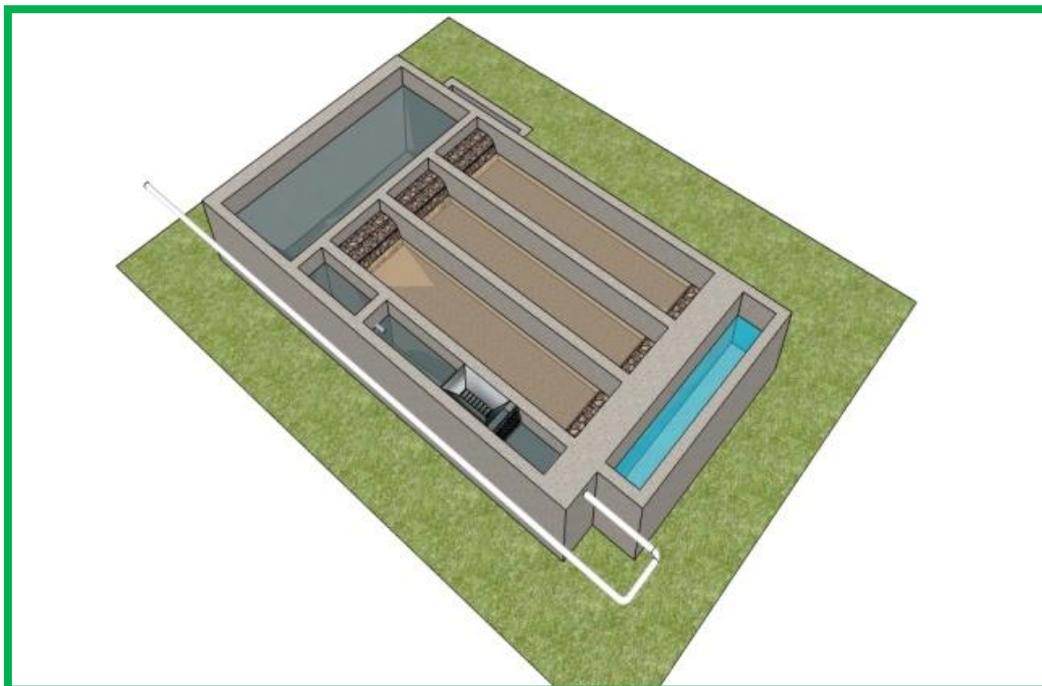


Fig. 24 Isométrico del humedal subsuperficial



Fig. 25 Isométrico del humedal con vegetación

7. EVALUACIÓN

El proceso de evaluación se realizó tomando varias muestras puntuales; las primeras se tomaron dos meses después de haber sembrado el tul, con el propósito de verificar la eficiencia en un tiempo de arranque corto. Se comprobó que la eficiencia obtenida fue del 63 % en remoción de DBO_5 , 65 % en remoción de DQO, 61 % en remoción de sólidos suspendidos, 38 % en remoción de nitrógeno total y 31 % en remoción de fósforo total. Se observó que la concentración de contaminantes presentes en las aguas residuales son variables según el mes en que se tomaron las muestras. Debido a que en la entrada principal llega caudal combinado, en invierno hay dilución y en verano mayor concentración de contaminantes; es decir, en invierno la concentración es media y en verano existe concentración alta.

Puntos de muestreo

- Entrada del humedal de flujo subsuperficial
- Salida del humedal

Trabajo de laboratorio

Al efectuar el análisis de agua residual en la entrada y salida del humedal, para determinar la eficiencia del sistema, se calculó DBO_5 , DQO, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, sólidos disueltos, nitrógeno total, fósforo total, coliformes fecales y totales.



Fig. 26 Análisis bacteriológico

7.1 Metodología

7.1.1 Procedimiento

Elegir el tipo de investigación determina los pasos por seguir para desarrollar una estructura de humedales adecuada y eficiente, utilizando fórmulas y modelos, así como literatura local existente. Por lo tanto, la investigación se puede dividir en dos tipos: de campo o de laboratorio; para el presente caso se combinaron ambos tipos para comprobar y llegar al resultado final.

La metodología empleada consistió en efectuar una memoria de cálculo hidráulico que permitiera obtener dimensionamiento de las estructuras, con base en un rendimiento esperado; luego se procedió al dibujo, etapa constructiva, siembra y control del humedal, periodo de arranque, aclimatación del tul y posteriormente, la evaluación periódica y continua para medir la eficiencia.

Lo anterior indica que la metodología de investigación para el presente estudio es de tipo mixta, pues combina la investigación documental y la de campo; es la comprensión del conocimiento científico y la utilización práctica de este. En otras palabras, se tomó en cuenta la experiencia de otros países, documentos y libros que contienen fórmulas matemáticas y modelos de diseño para la estimación de dimensionamiento de las unidades del humedal y se tomaron muestras puntuales tanto en la entrada como en la salida.

7.1.2 Técnicas para la recopilación de información

• Libros

Se consultaron libros del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial -CIDIAT-, para obtener información sobre diseño de humedales subsuperficiales.

• Tesis

Se consultaron trabajos de tesis que se encuentran en la biblioteca de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria -ERIS-.

• Sitios web

Se consultó literatura, reportajes, revistas científicas y artículos sobre humedales desarrollados en otros países.

8. RESULTADOS

Al considerar los parámetros de diseño se estableció que el gradiente hidráulico de diseño fue del 0.5 %, con una relación largo ancho 4:1; profundidad del agua, 60 centímetros; caudal de diseño, 0.014 l/s; arena gruesa, con porosidad de 0.39; vegetación utilizada, tul; tiempo de retención hidráulica, cuatro días. La construcción se realizó con paredes de mampostería; se aplicó un alisado final en toda la estructura, con espesor de pared de 15 centímetros; tubería perforada de 4" para distribuir el caudal; en la entrada se construyó una rejilla con canasta, canal de entrada, desarenador, trampa de grasa, tanque de sedimentación primario y la tubería que distribuye al humedal.

Se construyeron tres cámaras de humedales con un área de cuatro metros cuadrados cada una, para un total de doce metros cuadrados y mantener la relación 4:1 establecida en el diseño; el espesor de compost para la siembra fue de 10 centímetros y la altura combinada con la arena gruesa, de 40 centímetros, se dejaron 10 centímetros de altura sobre el nivel de agua, para la colocación de piedra bola y de esa manera evitar acumulación de mosquitos, contaminación de olor y contacto con las personas.

En el proceso de evaluación, se observó que el agua residual mostró una concentración cercana a fuerte, con resultados del agua bruta arriba de 350 mg/l en DBO₅ y una DQO mayor de 500 mg/l. Al efectuar el análisis con el propósito de determinar si el agua es o no biológicamente tratable se estableció que todos los valores en la relación DBO₅/DQO es mayor a 0.4, por lo tanto el agua residual es muy biodegradable. La eficiencia presentada en los dos primeros meses se considera alta y aceptable en la remoción de la DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo; la eficiencia fue mayor al 60 % y en remoción del nitrógeno y fósforo fue superior al 31 %.

Posteriormente el sistema llegó a un 80 % en remoción de materia orgánica y alcanzó niveles del 85 % en remoción del nitrógeno; sin embargo, los resultados de eficiencia del fósforo fueron de 35 % como valor promedio.

8.1 Tabulación de resultados

Tabla 2. Resultados de laboratorio en la entrada

AÑO	2 0 1 1			2012				
MES	JUN	SEP	NOV	ENE	FEB	MAR	JUN	AGO
Fecha	02-jun-11	12-sep-11	15-nov-11	23-ene-12	28-feb-12	30-mar-12	12-jun-12	20-ago-12
Hora	9:00 AM	11:30 AM	8:00 AM	8:30 AM	9:30 AM	11:45 AM	8:00 AM	8:30 AM
	ENTRADA							
Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO5	372.00	350.00	380.00	390.00	375.00	390.00	360.00	370.00
* Demanda Química de Oxígeno DQO	592.00	450.00	470.00	525.00	580.00	620.00	595.00	580.00
* Sólidos Suspendidos	160.00	140.00	175.00	168.00	162.00	170.00	155.00	150.00
Nitrógeno Total	45.00	40.00	50.00	55.00	52.00	58.00	42.00	45.00
Fósforo Total	7.80	8.60	7.70	7.80	7.60	8.50	7.70	7.50
* Zinc Zn	0.11	0.10	0.12	0.11	0.14	0.15	0.11	0.10

Tabla 3. Resultados de laboratorio en la salida

AÑO	2 0 1 1			2012				
MES	JUN	SEP	NOV	ENE	FEB	MAR	JUN	AGO
	SALIDA	SALIDA	SALIDA	SALIDA	SALIDA	SALIDA	SALIDA	SALIDA
Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO5	135.00	115.00	150.00	118.00	90.00	65.00	50.00	55.00
* Demanda Química de Oxígeno DQO	207.00	180.00	207.00	202.00	125.00	90.00	85.00	88.00
* Sólidos Suspendidos	63.00	40.00	63.00	55.00	35.00	20.00	18.00	20.00
Nitrógeno Total	28.00	15.00	22.00	14.00	8.00	5.00	4.00	5.00
Fósforo Total	5.40	3.00	4.00	2.40	4.00	4.50	4.40	5.00
* Zinc Zn	0.05	0.06	0.06	0.04	0.08	0.07	0.06	0.06

8.2 Eficiencias del humedal

Tabla 4. Cálculo de la eficiencia del humedal

AÑO	2 0 1 1			2012				
MES	JUN	SEP	NOV	ENE	FEB	MAR	JUN	AGO
Fecha								
Hora								
	EFICIENCIA							
Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO5	63.71%	67.14%	60.52%	69.74%	76.00%	83.33%	86.11%	85.14%
* Demanda Química de Oxígeno DQO	65.03%	60.00%	55.96%	61.52%	78.45%	85.48%	85.71%	84.83%
* Sólidos Suspendidos	60.63%	71.43%	64.00%	67.26%	78.40%	88.23%	88.38%	86.67%
Nitrógeno Total	37.78%	62.50%	56.00%	74.55%	84.61%	91.37%	90.47%	88.89%
Fósforo Total	30.77%	65.12%	48.05%	69.23%	47.37%	47.06%	42.86%	33.33%
* Zinc Zn	54.55%	40.00%	50.00%	63.64%	42.86%	53.33%	45.45%	40.00%

Tabla 5. Determinación de la relación DBO₅/DQO en las muestras

RESULTADOS OBTENIDOS	2 0 1 1			2012				
	JUN	SEP	NOV	ENE	FEB	MAR	JUN	AGO
RELACION DBO ₅ /DQO	0.63	0.78	0.81	0.74	0.65	0.63	0.61	0.64
Poco Biodegradable ≤ 20								
Biodegradable 0.20 - 0.40								
Muy Biodegradable ≥ 0.40	X	X	X	X	X	X	X	X

8.3 Gráficas de resultados

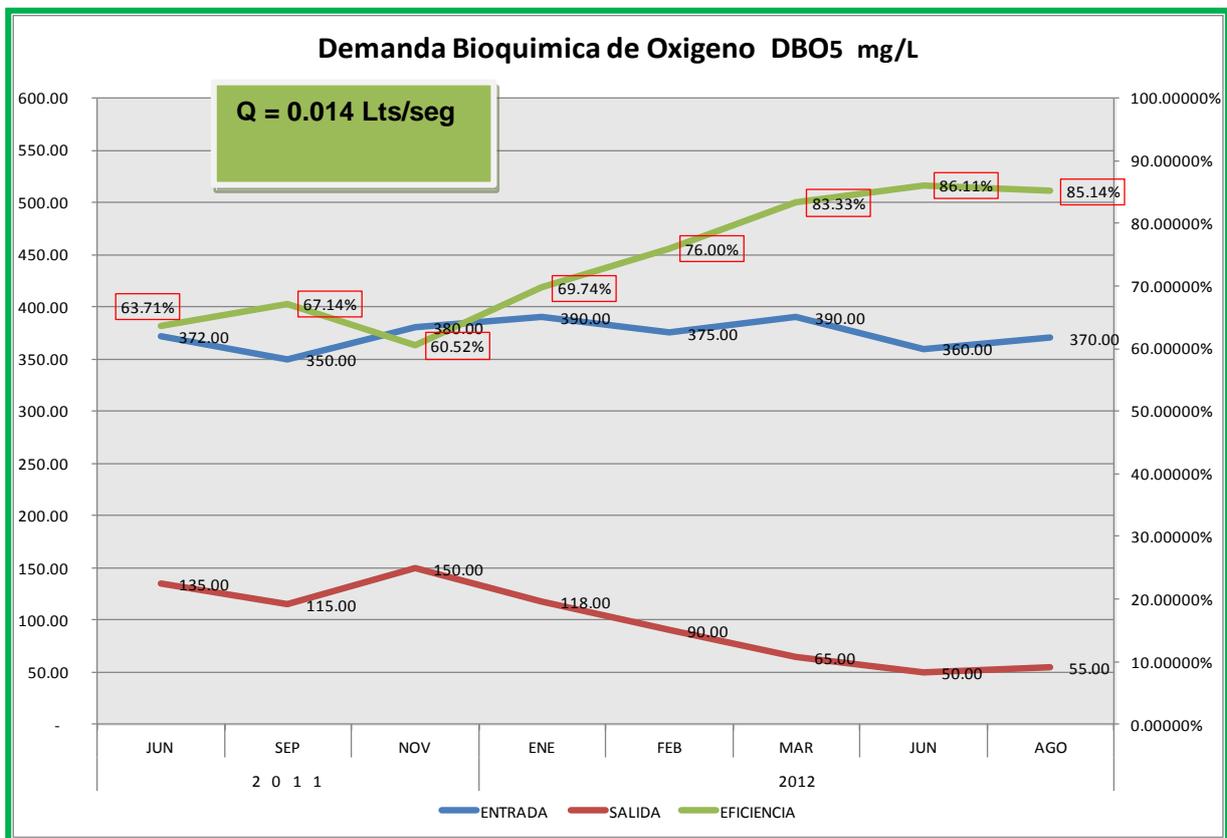


Fig. 27 Eficiencia en remoción de la DBO₅.

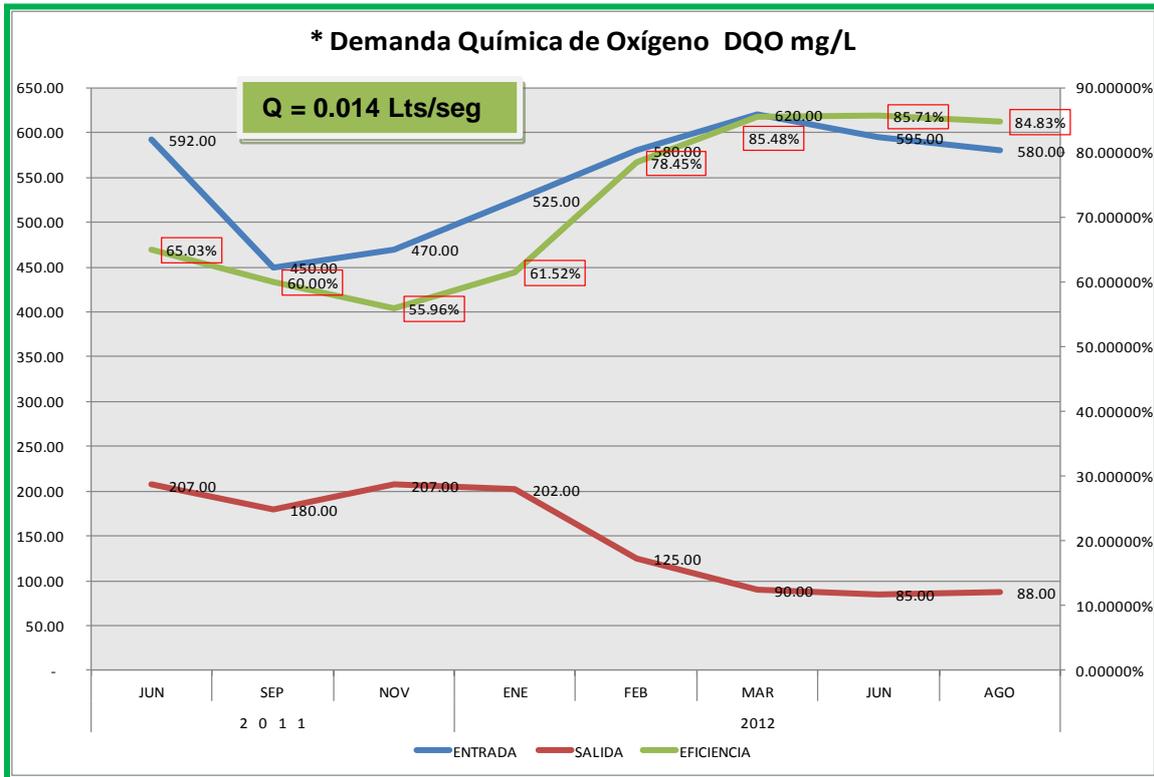


Fig. 28 Eficiencia de remoción de la DQO

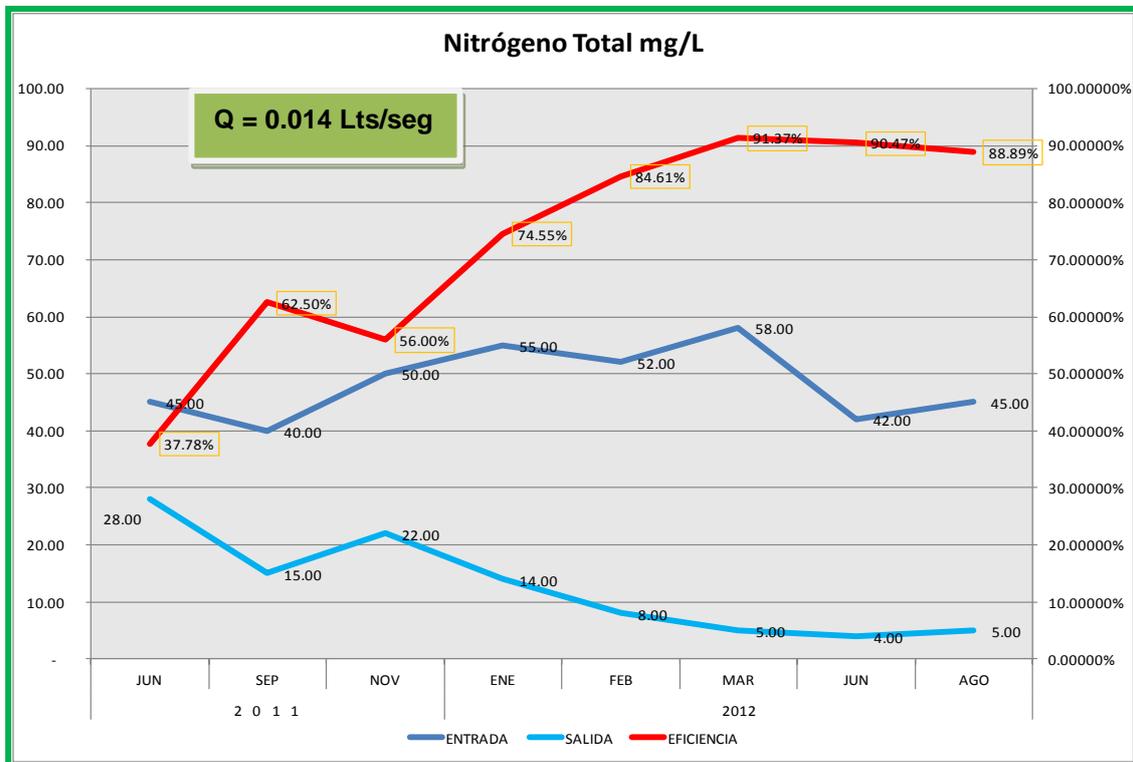


Fig. 29 Eficiencia de remoción del nitrógeno total

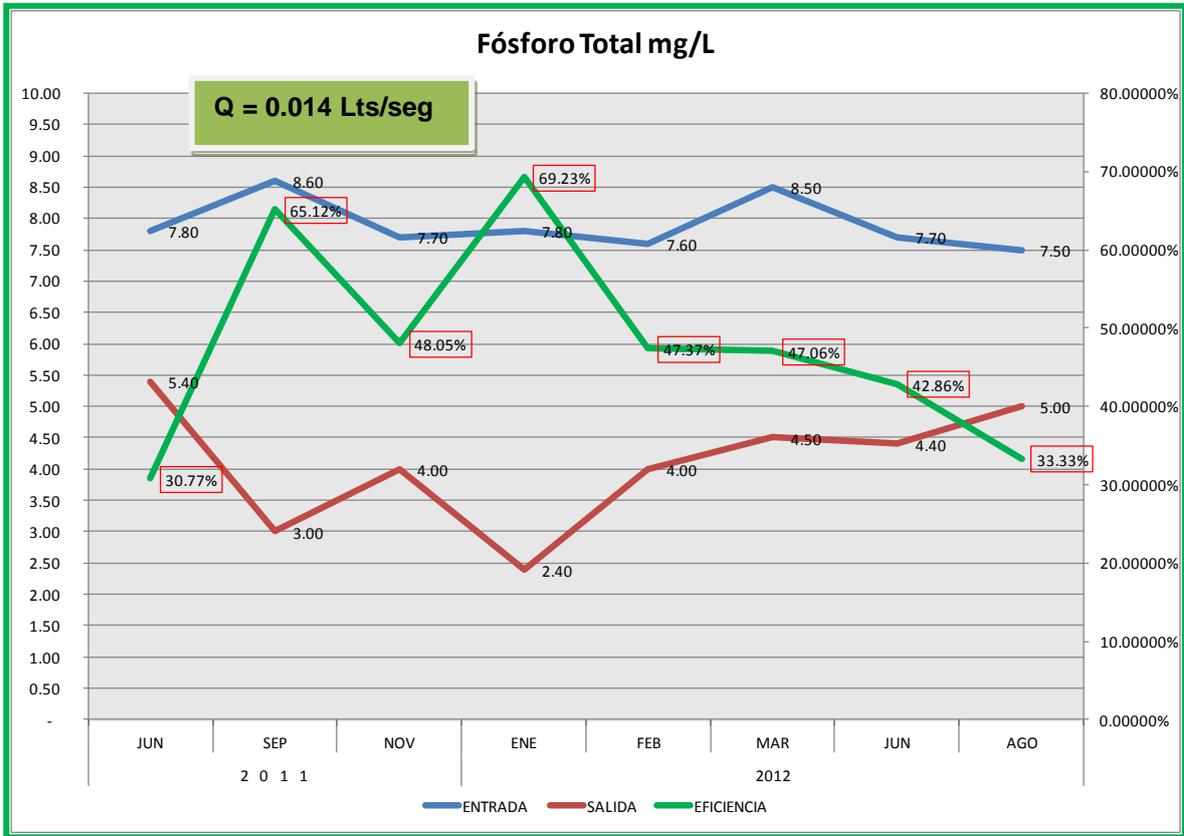


Fig. 30 Eficiencia de remoción del fósforo total

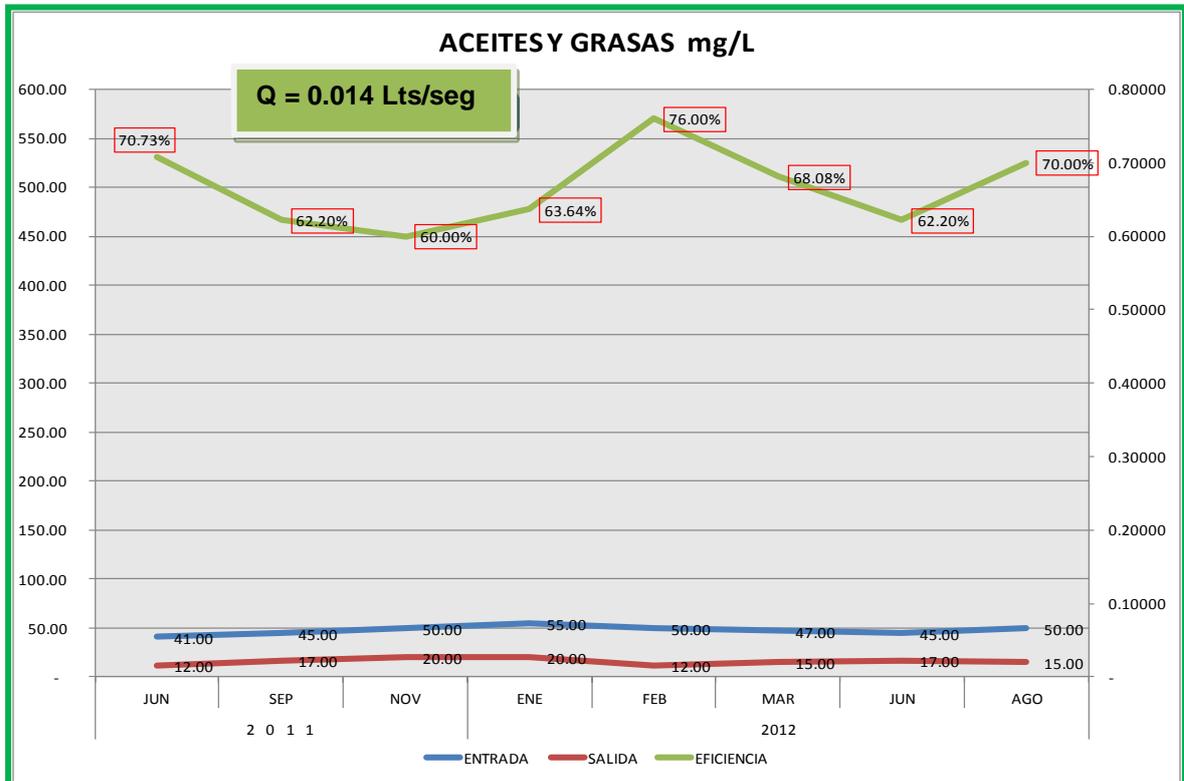


Fig. 31 Eficiencia de remoción de aceites y grasas

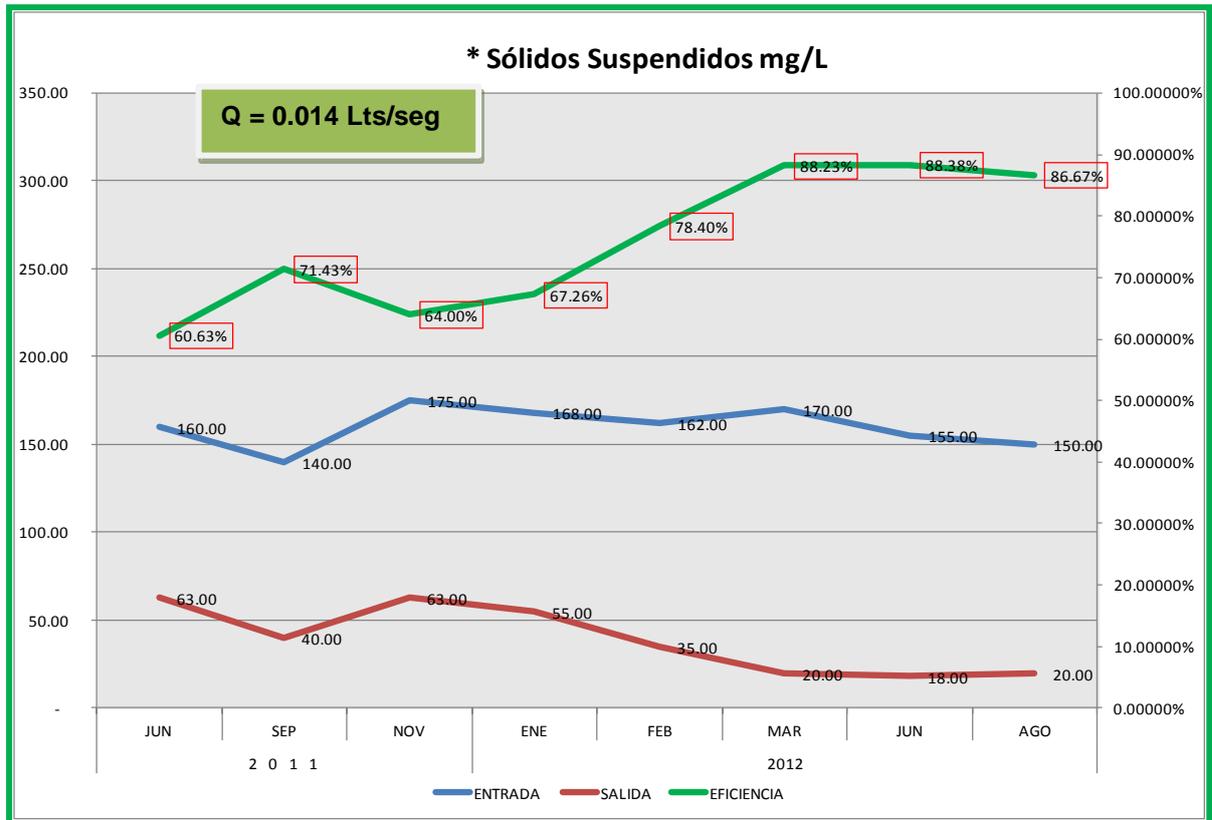


Fig. 32 Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos

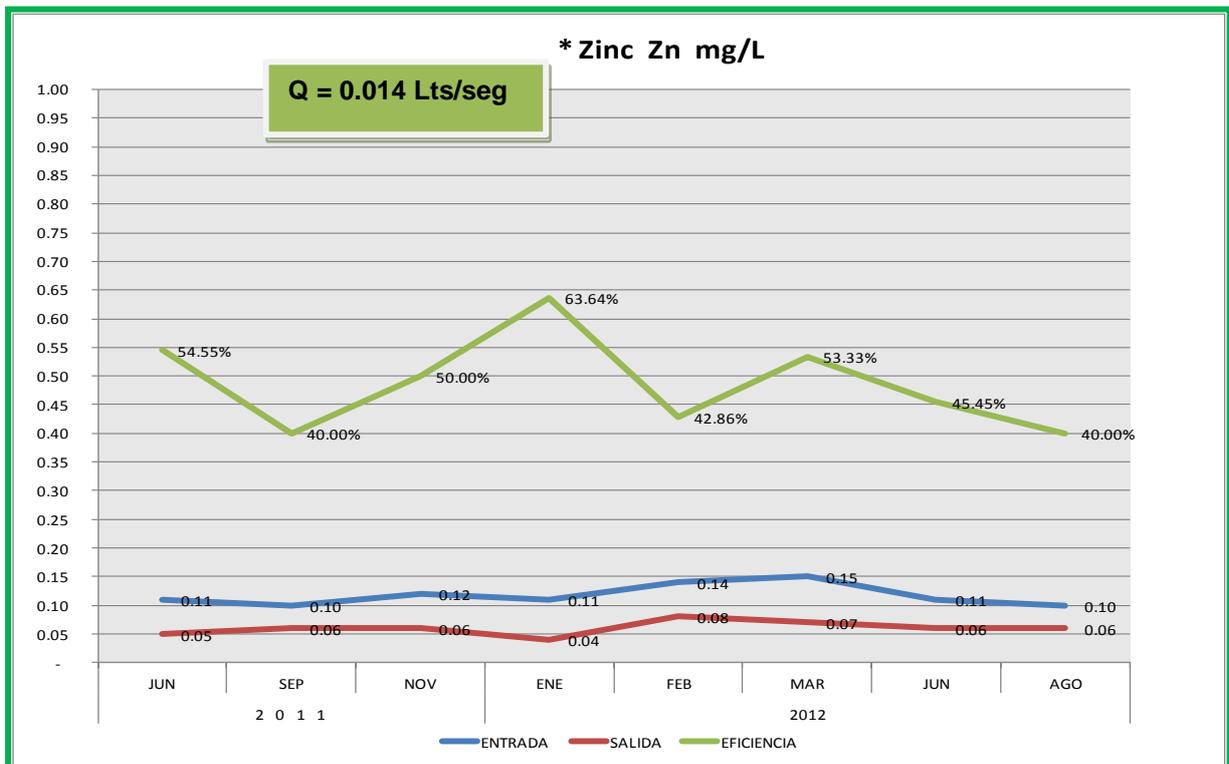


Fig. 33 Eficiencia de remoción del zinc

Tabla 6. Resultados de laboratorio en la entrada y salida del humedal a dos meses de la siembra del tul

EFICIENCIA DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL					
	DBO5	DQO	S.S	Nitrogeno T	Fosforo T
Entrada	372	592	160	45	7.8
salida	135	207	63	31	5.4
Eficiencia %	63.71%	65.03%	60.63%	31.11%	30.77%

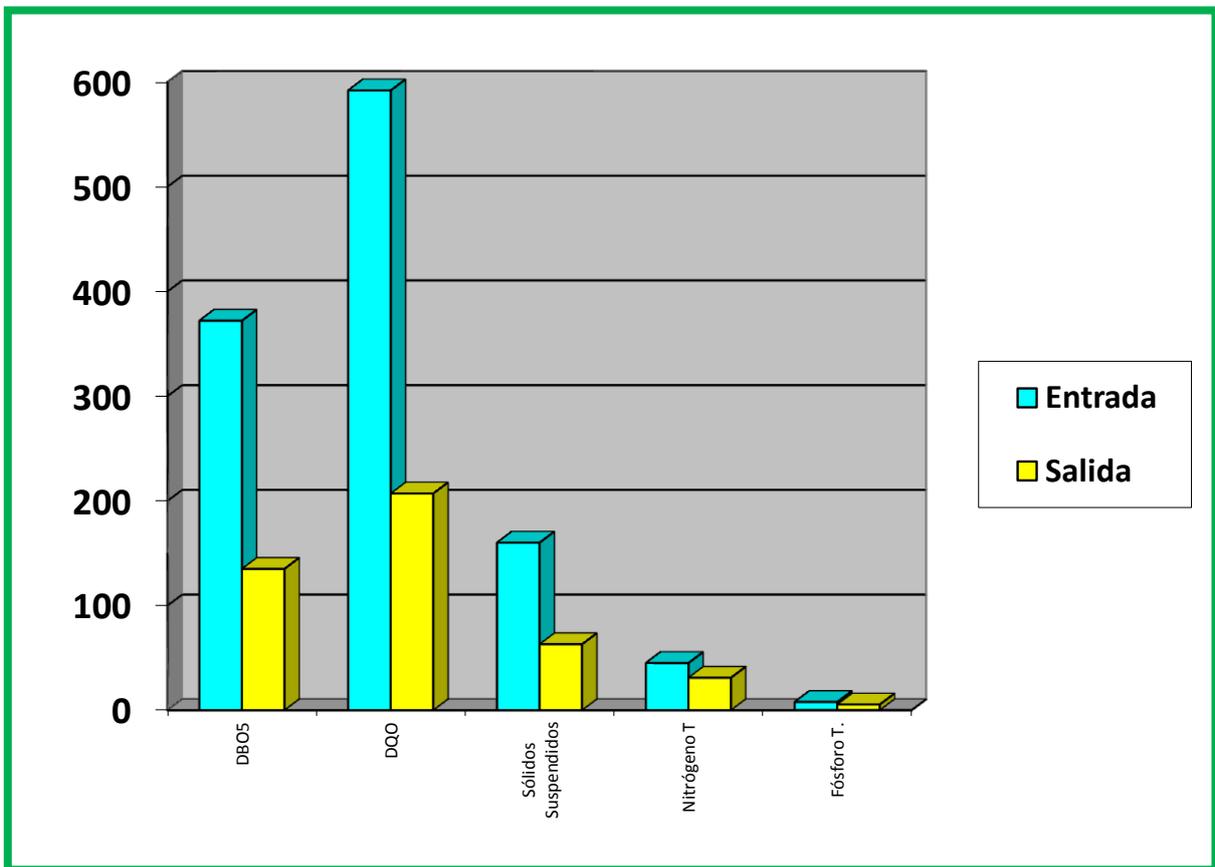


Fig. 34 Eficiencia del humedal a dos meses de la siembra del tul.

9. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El comportamiento de la remoción de materia orgánica, utilizando como medio poroso arena gruesa y funcionando con un tiempo de retención hidráulica de cuatro días, se muestra en la gráfica de resultados. Ahí se aprecia que la eficiencia de remoción del humedal fue aumentando conforme el paso del tiempo, hasta lograr una eficiencia muy pareja en los resultados mayor al 85%. Se determinó que la eficiencia del sistema estuvo en función del tiempo; sin embargo, en la remoción del fósforo se determinó que a los dos meses no presentó mayor eficiencia en su remoción. Luego de año y medio su remoción fue variada, lo cual indica que el tiempo de retención hidráulica de cuatro días es suficiente para lograr eficiencia aceptable. Esto reafirma que el medio poroso, la vegetación y el tiempo de retención hidráulica desempeñan un papel fundamental en los sistemas con flujo subsuperficial.

10. CONCLUSIONES

El diseño responde adecuadamente al comportamiento previsto, es una tecnología válida para depurar aguas residuales como tratamiento secundario o terciario; el tul como vegetación en los humedales de flujo subsuperficial es una planta eficiente para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Se considera una tecnología viable de bajo costo, pues no requiere de trabajo permanente ni personal calificado para su operación y mantenimiento, el cual es mínimo. La dimensión de las celdas para el diseño del humedal en la planta Aurora II, con relación 4:1 es aceptable, para la influencia del régimen hidráulico y la resistencia del flujo dentro del sistema.

Las ecuaciones utilizadas en este estudio pueden ser una herramienta valiosa en otros diseños para condiciones como las de Guatemala, utilizando los rangos establecidos. Las eficiencias obtenidas en cuanto a la remoción de materia orgánica son satisfactorias. Los humedales no constituyen un método efectivo para la eliminación de fósforo; de acuerdo con Korkusuz (2004), esta situación podría mejorar si se utiliza grava rica en hierro y aluminio. Los procesos para remoción de nitrógeno alcanzan niveles altos de eficiencia, debido a que los compuestos nitrogenados constituyen nutrientes claves para el crecimiento de seres vivos y la planta utiliza el nitrógeno en la síntesis de proteínas para su crecimiento, especialmente en forma de nitrato.

La hipótesis planteada en esta investigación es verdadera ya que los resultados demuestran la eficiencia en remoción de carga orgánica, nitrógeno y nivel de remoción de fósforo. Se requiere un área de 1.5 m^2 por persona equivalente para este tipo de proyectos, según Mara y Pearson 1998 para lograr la misma calidad de agua utilizando lagunas de estabilización se necesitan 2.5 m^2 como mínimo por habitante equivalente, requiriéndose para este sistema una menor área.

11. RECOMENDACIONES

En posteriores estudios es conveniente que la muestra se tome en forma compuesta para verificar si existe o no alguna variación con respecto a los resultados; además continuar con el monitoreo del sistema. También es importante investigar la eficiencia en remoción de coliformes totales y fecales, pues en otros estudios se observó la reducción de coliformes fecales hasta en un 95 %.

Es recomendable continuar con las actividades de operación y mantenimiento para el correcto funcionamiento del sistema, así como realizar estudios para proponer el reuso del efluente, según lo permita la legislación vigente.

12. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

12.1 De la vegetación y las estructuras

- Control de la vegetación, olor e insectos; cada mes, cortar y retirar hojas de la vegetación que estén secas.
- Verificar a diario el ingreso de caudal sanitario al humedal.
- Retirar natas que se forman en el tanque de sedimentación.
- Verificar la densidad de la vegetación en el humedal, ya que afecta fuertemente su hidrología. Primero, porque obstruye caminos de flujo; debido a que el movimiento del agua es sinuoso a través de la red de tallos, hojas, raíces y rizomas; y segundo, porque bloquea la exposición al viento y al sol.
- Asegurar que el flujo alcance todas las partes del humedal.
- Revisar periódicamente la rejilla y limpiar la canasta construida.

13. BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Cano A. A., J. Collado L. R. La lenteja de agua como sistema blando de depuración de aguas residuales de bajo costo. Tecnología del agua No. 174, marzo de 1998, pág 18-25.
- ✓ Estévez, S. F. Diseño y explotación de sistemas de depuración de aguas residuales en pequeños núcleos y comunidades. Asociación Nacional de Químicos Españoles, Agrupación territorial de Castilla la Mancha, Sección Técnica de Medio Ambiente.
- ✓ García J., Ruiz, Junqueras X. Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales construidos. En Tecnología del agua No. 165, junio de 1997, pág 58-65.
- ✓ Lara Borrero, Jaime. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. España. Universidad Politécnica de Cataluña. 1999
- ✓ Ortiz Castillo, Edwin Manuel. Evaluación del tratamiento primario, secundario e investigación del tratamiento terciario por fitodepuración en la remoción de nutrientes y descarga microbiológica en la planta piloto de Tratamiento de Agua Residual Doméstica Aurora II “Ingeniero Arturo Pazos Sosa”. Tesis, 2003.
- ✓ Pagoaga Alvarado, Cinthya Odeth. Evaluación y sistematización de la operación y mantenimiento del humedal artificial de la planta San Miguel de Cementos Progreso. Tesis, 2010.

ANEXO A: FOTOGRAFIAS



Foto No. 1: Construcción de las unidades.



Foto No. 2: Colocación del filtro.



Foto No. 3: Fundición de las celdas



Foto No. 4 Substrato del humedal



Foto No. 5: Siembra del tul



Foto No. 6: Adaptación del tul



Foto No. 7: Crecimiento del tul

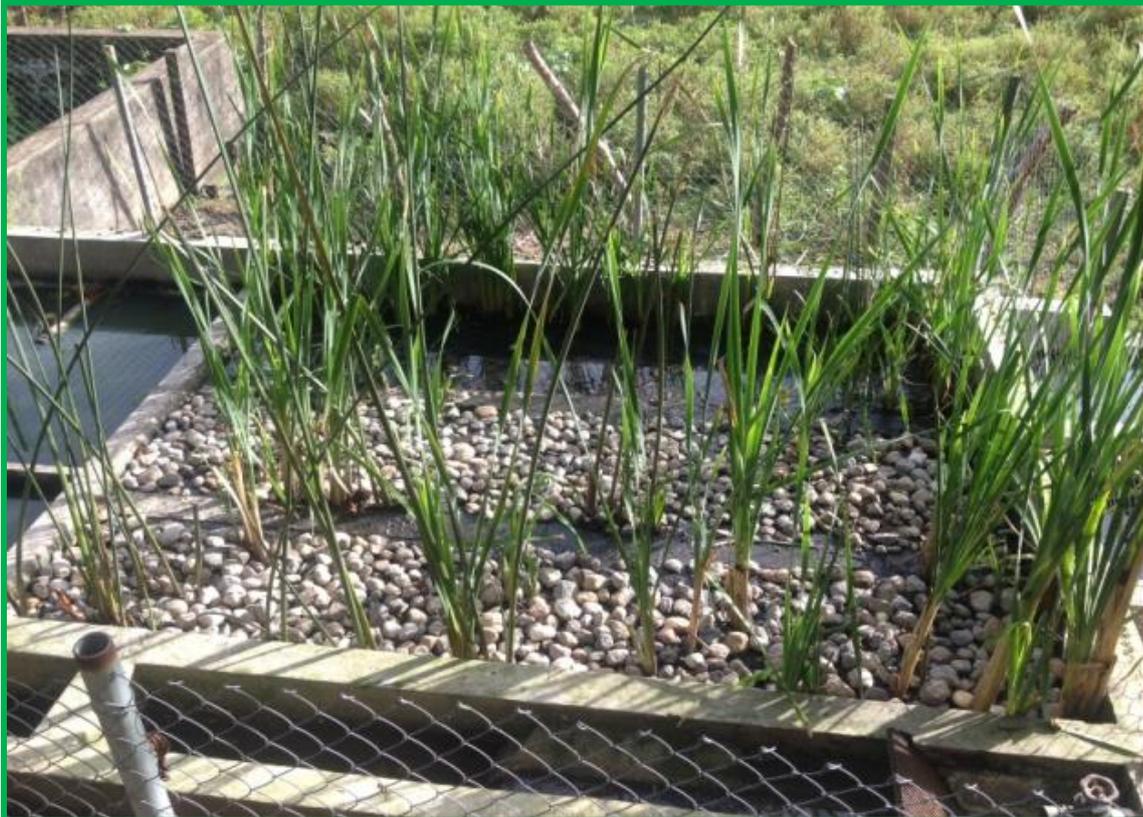
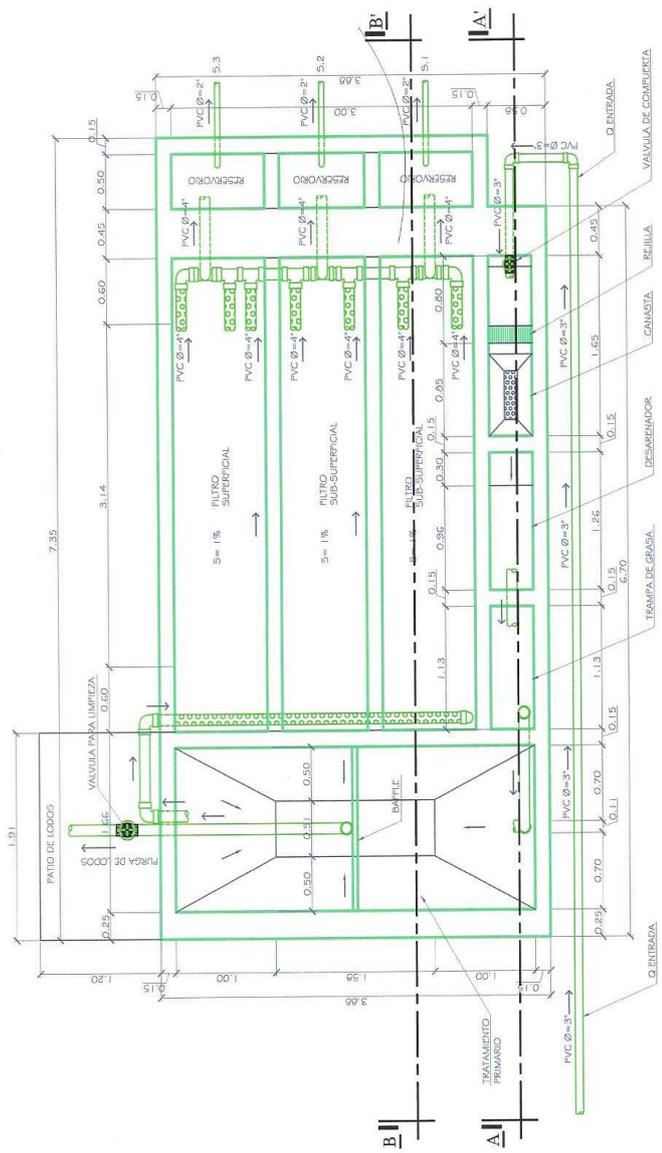


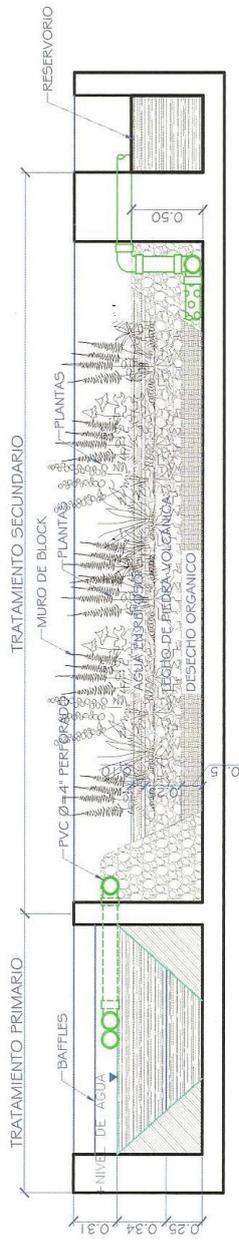
Foto No. 8: Humedal con el tul adaptado al lugar

ANEXO B: PLANOS



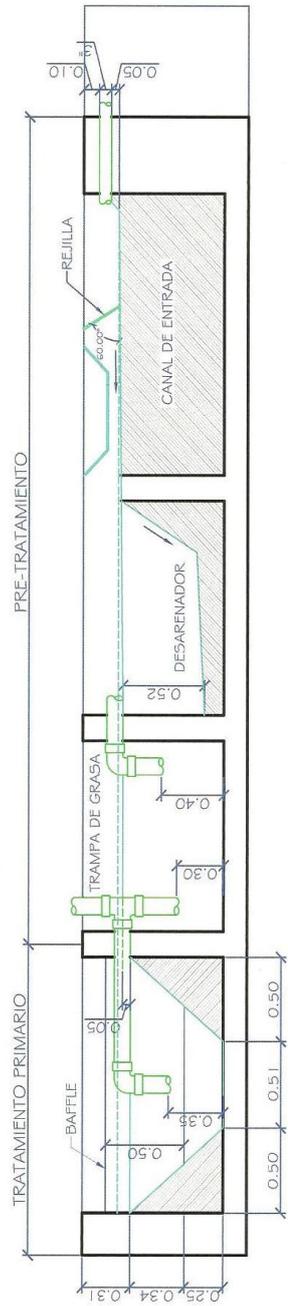
PLANTA GENERAL DEL HUMEDAL

ESTUDIO ESPECIAL
PROYECTO DE OBRAS DE RECONSTRUCCION DEL SERVIDOR DE AGUAS RESIDUALES DE LA COMUNIDAD RURAL DE SAN PEDRO DE SACATEPEQUEL
PLANTA GENERAL DEL HUMEDAL
GUATEMALA ENERO 2011



SECCION B-B' HUMEDAL SUBSUPERFICIAL

ESTUDIO ESPECIAL	
DISEÑO: ING. JOVANY MIRANDA ASESOR: DR. ING. ADAN FOCASANGRE	
UNIDADES DE PRE-TRATAMIENTO	
2	3
GUATEMALA ENERO 2011	



SECCION A-A' PRE-TRATAMIENTO

ESTUDIO ESPECIAL
DISEÑO: ING. JOVANY MIRANDA ASESOR: DR. ING. ADAN POCASANGRE
UNIDADES DE TRATAMIENTO PRIMARIO Y SECUNDARIO
GUATEMALA ENERO 2011
3 / 3