

Programa de Educación en Ciencia y Tecnología del Agua para la Población Infanto-Juvenil del Perú

D/030646/10 - PCI-AECID 2010

VERSION PRELIMINAR

Modelo demostrativo de tratamiento de aguas residuales para enseñanza a nivel escolar

2011

Realizado por:
Julio Miranda U.

Equipo participante:
Rosa Miglio
Julio Miranda
Maria Luisa Castro



Universidad Ramon Llull
■ CÁTEDRA UNESCO DE EDUCACIÓN,
DESARROLLO Y TECNOLOGÍA



MODELO DEMOSTRATIVO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA ENSEÑANZA A NIVEL ESCOLAR

I. INTRODUCCION

Actualmente la escasez del agua y su deterioro se está acentuando a nivel mundial. El cambio climático y el crecimiento poblacional son las principales causas de este gran problema que vislumbra un futuro poco alentador para las naciones. Nuestro país no es ajeno a esta realidad, datos de la UNESCO reportan que el Perú ocupa el lugar 17 entre 180 países con mayor acceso al agua; pero ello no es del todo cierto, pues a pesar que geográficamente tenemos un extenso territorio y cuantiosos recursos hídricos, el 98% del agua corresponde a los ríos que discurren por la selva, mientras que solo el 1,7% circula por la costa donde se concentra el 70% de la población peruana. Por otro lado, muchas de las fuentes de agua disponible se encuentran altamente contaminadas por actividades domésticas, industriales y mineras.

Si a este problema se agrega la falta de conciencia ambiental de la población peruana, la solución sería casi titánica, un ejemplo de ello es el río Rímac, principal abastecedor de agua a la ciudad de Lima, considerado como uno de los más contaminados del país, por la actitud de la población y las industrias.

Una de las formas de generar conciencia por el cuidado de nuestro ambiente, es incidir en la capacitación de la población más joven del país, niños y jóvenes; quienes deben conocer como se contamina el agua y como deben prevenir y/o tratar esta contaminación; considerando además que al agua no solo hay que cuidarla sino también ahorrarla. El uso de agua residual tratada, es una de las formas de ahorro, si se propicia su utilización en actividades en las que no se requiera usar agua potable, como en el riego de áreas verdes (en centros recreativos, parques, campos deportivos, fuentes de ornato), reuso en las industrias y en algunos servicios (lavado de patios, lavado de flota vehicular, sanitarios, intercambiadores de calor, calderas, etc). Para ello se requiere utilizar tecnologías de tratamiento seguras y fáciles de operar que como es el caso de los humedales artificiales.

En este contexto, y ante la falta de estrategias adecuadas en el país para la sensibilización de la población acerca de la grave situación de carencia de agua y su alto grado de contaminación; se propone este proyecto de investigación cuyo propósito es lograr la participación ciudadana en el cuidado del ambiente y la salud del entorno a través de la concientización de los niños en edad escolar, sobre la necesidad de tratar el agua residual y reusarla; difundiendo para ello una alternativa sencilla, económica y estética a través de humedales artificiales.

A través del proyecto se busca diseñar un prototipo de humedal artificial con fines de enseñanza a nivel escolar, desarrollando un modelo apropiado, fácilmente operable por niños y jóvenes de escuelas del país. Esto será posible gracias al trabajo conjunto de CEPIS Perú, la Universidad de Ramón Llull de España y la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Agraria la Molina del Perú.

II. ANTECEDENTES

En los últimos años el tratamiento de aguas residuales está teniendo más relevancia, la sociedad está tomando mayor conciencia de la importancia de reciclar el agua que consumimos debido a su escasez creciente. Por eso se han desarrollado tecnologías para el tratamiento de aguas residuales que van desde sistemas complejos y costosos hasta sistemas sencillos y económicos como son los humedales artificiales.

Los humedales artificiales están definidos como ecosistemas de substratos saturados, plantas y agua, cuyo objetivo es la remoción de la mayor cantidad de contaminantes del agua residual a través de mecanismos de depuración que actúan en los humedales. Esta tecnología incluye opciones de flujo libre, así como sistemas de flujo sub superficial a través de un medio permeable.

En el Perú existen investigaciones de humedales artificiales centradas en su construcción, monitoreo y evaluación de las mismas, pero son muy escasas las investigaciones orientadas a construir prototipos con la finalidad de enseñanza a nivel escolar. Son pocos los colegios de nuestro país, sobre todo en Lima que han apostado por integrar esta tecnología con finalidad de enseñanza a su alumnado.

Este sistema de tratamiento es más amigable con el entorno que otras tecnologías, ya que los humedales además de tratar el agua, mejoran la estética del lugar, las plantas que crecen en un medio permeable, no liberan olores desagradables como lo hacen otros sistemas. Por lo que es adecuado implementarlo en colegios para su fomento y la gran ayuda que dará para generar la conciencia de cuidar nuestro medio ambiente.

III. JUSTIFICACIÓN

Actualmente en el Perú se producen cerca de 1000 MMC de aguas residuales domésticas anualmente. De este volumen, sólo el 29% es tratado; y el resto es dispuesto sin ningún tratamiento en ambientes acuáticos superficiales como ríos, lagos, mares y en tierras agrícolas

El agua residual tratada adecuadamente puede proveer una fuente de agua valiosa para usos no potables. La practica combinada de sistemas de tratamiento de agua residual y un uso racional para la irrigación agrícola, significaría una estrategia económicamente posible para desarrollar una fuente de agua crucial para la agricultura peruana.

Y más aun, ante el posible escenario de agotamiento del recurso agua y la aparición de conflictos en aquellas zonas del Perú donde más escasea, se hace indispensable promover programas y proyectos de investigación acerca de sistemas de tratamiento de agua residual, así como su reuso en la agricultura con el fin de integrarlo dentro de una política de gestión de recursos hídricos.

Es por eso que con esta investigación se busca lograr la participación ciudadana en el cuidado del ambiente y la salud del entorno, a través de la concientización de los niños sobre la necesidad de cuidar el agua.

IV. OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y evaluar en modelos a escala, un sistema de tratamiento de aguas residuales, con fines de enseñanza escolar; utilizando para ello 3 prototipos de humedales artificiales con variaciones de carga orgánica.

V. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Humedales artificiales

Según Brix (1), los humedales artificiales son reactores bioquímicos diseñados especialmente para el tratamiento de las aguas residuales. Pueden proyectarse como un tratamiento secundario después de una fosa séptica, como un tratamiento terciario a continuación de una depuración biológica convencional o incluso pueden formar parte de un sistema integrado junto con otras tecnologías naturales como el lagunaje.

Hmedales artificiales de flujo sub superficial horizontal

Para Brix (1), el sistema consiste de una zanja o cama de poca profundidad (0.6 metros aproximadamente) con ligera inclinación (1-3%) entre la entrada y salida, con una capa impermeable de arcilla o forro sintético. La cama contiene substrato poroso que soporta el crecimiento emergente de la vegetación y por donde el agua residual circula horizontalmente en contacto con las raíces de las plantas.

La eliminación de contaminantes ocurre por la combinación de fenómenos que incluyen la degradación aeróbica y anaeróbica de las sustancias orgánicas, la absorción y la sedimentación de los contaminantes.

Según Brix (1), la vegetación a implantar en los pantanos artificiales es un factor fundamental para obtener rendimientos óptimos en la depuración de aguas residuales. Las plantas utilizadas para

sistemas de flujo superficial y sub superficial son las de tipo emergente, que tiene raíces que se extienden bajo la superficie del agua.

Diseño de humedales artificiales

Los principales parámetros de diseño de sistemas de pantanos artificiales incluyen la capacidad de recepción de carga orgánica (carga de DBO), la carga hidráulica aplicada, el tiempo de retención hidráulica, la profundidad y la geometría del lecho (ancho y longitud).

- a. Diseño hidráulico: para el diseño de un pantano de flujo sub superficial, es común utilizar la Ley de Darcy, que describe el flujo de un medio poroso:

$$Q = K_s A_t S \quad (1)$$

Donde:

Q = Caudal promedio que circula por el sistema ($m^3/día$)

K_s = Conductividad hidráulica ($m^3/m^2.día$)

A_t = Área de la sección transversal (m^2)

S = Gradiente hidráulica (m/m)

Teóricamente, esta ley se aplica a un flujo laminar, uniforme y constante a lo largo del sistema, cosa que no ocurre exactamente cuando se utiliza la grava de gran tamaño porque pueden ocurrir flujos turbulentos cuando el diseño hidráulico está basado en altas gradientes hidráulicas.

Por lo que UTEP (4) recomienda esta fórmula para pantanos que utilizan grava pequeña, de tamaño menor o igual a 4 cm. considerando que el sistema se construye de manera tal que minimice la formación de corto circuitos y cuando se utilice una pequeña gradiente hidráulica y un caudal promedio resultante de dividir entre dos el caudal de ingreso y el caudal de salida.

El área de la sección transversal del lecho del pantano, se pueden calcular a partir de la fórmula (1) como sigue:

$$A_t = Q / K_s \quad (2)$$

Según Reed (3), los pantanos de flujo horizontal deben ser diseñadas para que la velocidad del flujo definida por el producto ($K_s S$) no sea mayor a 8.6 m/día para minimizar el arrastre de la película biológica.

- b. Remoción de carga orgánica (Carga de DBO_5): la carga orgánica se debe limitar de modo que la demanda de oxígeno del agua residual aplicada no supere la capacidad de transferencia de

oxígeno de la vegetación al sistema. Según Metcalf (2), las tasas de transferencia de oxígeno estimadas para plantas emergentes varían entre 5 y 45 g/m².día. siendo 20 g/m².día (200 Kg/Ha.día) un valor medio típico para la mayoría de sistemas.

Para la remoción de carga orgánica, UTEP (4) aplica modelos cinéticos de primer orden como:

$$C_e/C_o = e^{(-k_T \cdot t)} \quad (3)$$

Donde:

C_e = Valor de la DBO₅ en el efluente (mg/l)

C_o = Valor de la DBO₅ en el afluente (mg/l)

K_T = Constante de remoción de carga orgánica.

T = Tiempo de retención hidráulica (días)

UTEP (4) define el valor de la constante K_T como sigue:

$$K_T = K_{20} (1.06)^{(T-20)} \quad (4)$$

Donde:

K₂₀ = Constante a la temperatura de 20°C

T = Temperatura del agua (°C)

- c. Tiempo de retención hidráulica (t): el tiempo de retención hidráulica se puede estimar en función al caudal de diseño y la geometría del sistema.

$$T = l \times a \times d \times n / Q \quad (5)$$

Siendo:

l = Longitud del lecho (m)

a = ancho del lecho (m)

d = Profundidad del agua en el lecho (m)

n = porosidad del medio.

- d. Profundidad del agua: en los sistemas de flujo sub superficial, la profundidad del agua depende de la profundidad optima para la vegetación seleccionada, por ejemplo los cattails crecen bien en los suelos sumergidos, donde la profundidad del agua está sobre los 15 cm, mientras que los phragmites pueden hacerlo en suelos donde la tabla de agua está sobre la superficie, pero también cuando esta 1.5 m por debajo.

VI. METODOLOGIA

6.1 Ubicación

El presente proyecto de tesis se ha desarrollado en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), en el área experimental de riego de la Facultad de Ingeniería Agrícola, donde se tiene instalado un reservorio que almacena agua proveniente de los canales de regadío de la UNALM y exteriores.

El agua a tratar proviene de las acequias que en su trayecto reciben algunos aportes contaminantes con descargas de industrias, aguas residuales domesticas y basura; conteniendo sólidos suspendidos, materia inorgánica (arena y tierra), nutrientes para las plantas (nitrógeno, fosforo) restos vegetales, detergentes, grasas e inclusive heces, por lo que su calidad es mala y es comparable con un agua residual de intensidad baja

Además en el reservorio donde se almacena el agua de riego, frecuentemente aparecen algas que ocasionan la elevación de los valores de DBO.

6.2 Diseño del prototipo

Para el diseño de las celdas de humedal se han tomado muestras del agua del reservorio para medir su DBO y se han considerado los parámetros mostrados en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1: Parámetros de diseño para humedal

PARAMETRO	VALOR
DBO_i	DBO ₅ de ingreso, 23 mg/l
DBO_s	DBO ₅ de salida. Elegido en tabla. Mínimo valor para riego y bebida de animales=15 mg/l
Q_p	Caudal promedio de ingreso a la celda, 0.18 m ³ /s.
Planta	Familia del papiro, Cyperus alternifolius
Pr	Profundidad de raíz = 0,5 m
Sustrato	Arena, diámetro = 2 a 4 mm

Las formulas aplicadas fueron:

Área Transversal

$$At = Q / (Ks \times S)$$

Ancho de celda (a)

$$a = At / Pr$$

Tiempo de retención para la remoción de carga (t)

$$t = -\ln (DBO_s / DBO_i) / Kt$$

Longitud del humedal

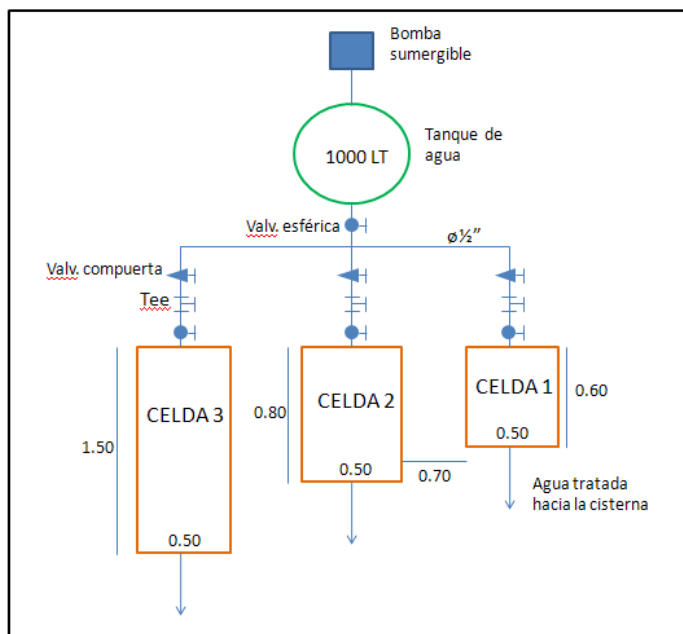
$$L = (t \times Q_p) / (a \times Pr \times n)$$

En base a estos cálculos las dimensiones de los prototipos quedaron definidas como se muestra en la Tabla N° 2 y la distribución de celdas se observa en la Fig. N° 1.

Tabla N° 2: Dimensiones de las celdas de humedal

Prototipo	Qingreso (m ³ /día)	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)
1	0.18	1.5	0.5	0.6
2	0.18	0.8	0.5	0.6
3	0.18	0.6	0.5	0.6

Fig. N° 1: esquema de distribución del sistema



6.3 Caracterización del material de relleno

El material de relleno que se ha seleccionado para cumplir con los parámetros recomendados en experiencias anteriores. Para obtener arena seleccionada se ha tamizado arena gruesa y se ha lavado para evitar cualquier material extraño que produzca el estancamiento del agua en la celda. La permeabilidad de esta arena seleccionada nos dará el tiempo de retención necesario para el tratamiento del agua.

Para no obturar los agujeros de las tuberías de ingreso y salida de agua de los prototipos y así mejorar la distribución del agua en la celda, se han colocado dos capas de confitillo al ingreso y salida del agua en el humedal, el confitillo tiene un tamaño mayor que la abertura de los agujeros de las tuberías, entre 6 y 10 mm.

Todo el material ha sido caracterizado en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la UNALM, determinando: granulometría, diámetro efectivo, coeficiente de uniformidad, conductividad hidráulica, porosidad.

Los resultados se muestran en la Tabla N° 3:

Tabla N° 3: características del material de relleno para las celdas de humedal

PARAMETRO	CARACTERISTICA	
Sustrato:	Arena	Diámetro 2-4mm
Ks:	5200 m ³ /m ² día	Conductividad hidráulica
n:	45 %	Porosidad (Tabla)
Pendiente S (1 - 3%):	0.01	Pendiente del fondo del relleno
Temperatura:	14 °C	Temperatura mínima del agua

6.4 Cargas aplicadas a las celdas de humedal

Cada prototipo trabaja con una carga superficial diferente, estas se muestran en la Tabla N° 4:

Tabla N° 4: carga orgánica aplicada en cada celda de humedal

Prototipo	Carga superficial (g/m ² .día)	Caudal (l/día)	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)
1	18	180	0.60	0.50	0.60
2	12	180	0.80	0.50	0.60
3	6	180	1.50	0.50	0.60

6.5 Materiales requeridos para la construcción

Para la construcción de los tres prototipos de humedal artificial se han utilizado los materiales mostrados en la Tabla N° 5:

Tabla N° 5: materiales utilizados para la construcción de los humedales

CELDAS DE HUMEDAL	<ul style="list-style-type: none">- 3 Celdas de vidrio estándar reforzada con aluminio- 3 Mesas de acero para las celdas respectivamente- Bomba de agua sumergible 1 HP- Tanque de agua 1000 litros- Mesa para el tanque de agua- Arena gruesa- Confitillo
TUBERIAS	<ul style="list-style-type: none">- Tubos PVC 1/2"- Válvulas PVC 1/2"- Tees PVC 1/2"- Codos x 90° 1/2" PVC c/r- Uniones universales 1/2" PVC- Tapones 1/2" PVC s/r- Teflón- Tapón 3/4" PVC- Manguera 3/4"
INSTALACION ELECTRICA	<ul style="list-style-type: none">- Cable vulcanizado- Tubos PVC 5/8"- Curvas 5/8"- Llave térmica- Control de nivel eléctrico
MATERIALES COMPLEMENTARIOS	Cesta plástica con aberturas para la bomba de agua Malla para cernir arena gruesa Manta plástica negra

6.6 Proceso constructivo

Los prototipos construidos son tres y sus celdas han sido fabricadas con vidrio estándar con un espesor de 12 mm. Las celdas se armaron in situ y fueron sellados con silicona para luego ser reforzadas en sus bordes con aluminio para una mejor resistencia a la presión del material de relleno. Estos prototipos se han colocado sobre una plancha de poliestireno expandido (tecnopor) de alta densidad para que amortigüe el peso y lo distribuya hacia una la placa de madera machimbrada ubicada sobre una mesa de fierro que sostendrá cada prototipo.

Las conexiones de tubería entre el tanque de agua y las celdas se han realizado con tubos de PVC de 1/2". Para el ingreso del agua residual a cada celda se ha utilizado tubería perforada con agujeros de 4

mm ubicados estratégicamente para una distribución por igual a todo lo ancho del humedal. Para la recolección del agua tratada también se ha instalado una tubería perforada con agujeros de 4mm; esta tubería se conecta finalmente con una manguera que lleva el agua tratada hacia una cisterna de almacenamiento. (Ver Figuras del N° 1 al 5)

6.7 Implementación del sistema.-

El agua de alimentación de las celdas se bombea desde el reservorio hacia un tanque elevado de 1000 litros de capacidad, el cual abastece a los tres prototipos. Para regular el caudal de ingreso a cada celda se han colocado válvulas compuerta seguidas de una tee con una salida adicional para la medición del caudal. A la salida de la celda, el agua tratada es llevada mediante una manguera de 3/8 hacia una cisterna enterrada.

La válvula de ingreso se tuvo que calibrar en cada una de las celdas para regular el caudal de ingreso. La bomba de agua esta conectada con una llave térmica y una válvula altimatica para el encendido y apagado automático de la electrobomba.

Luego de instalado el material de relleno en cada celda, se hizo el trasplante de la especie elegida, *Cyperus alternifolius* (paragüitas) en cada una de las celdas; en un primer momento se sembraron las dos primeras celdas, debido a que la tercera presentaba problemas de fuga de agua por sus bordes. Actualmente la tercera celda cuenta con las plantas totalmente desarrolladas.

6.8 Monitoreo de la operación del sistema de tratamiento.-

6.8.1 Crecimiento de plantas: se monitoreo el crecimiento de las plantas en cada celda de humedal, considerando la altura de tallos u la longitud de raíz. Para ello se estableció un código a cada medición, considerándose:

Pid = Planta al ingreso de la celda lado derecho
Piz = Planta al ingreso de la celda lado izquierdo
Psd = Planta a la salida de la celda lado derecho.
Psz = Planta a la salida de la celda lado izquierdo.
 Δt = Intervalo de días
Hprom = Altura promedio.
Hmáx = Altura máxima.
Pi = Planta ubicada al ingreso de la celda
Pc = Planta ubicada al centro de la celda.
Ps = Planta ubicada a la salida de la celda.

Los resultados se muestran a continuación:

Celda 1

<i>Profundidad de raíces (cm)</i>			<i>Tiempo</i>
<i>Piz</i>	<i>Psd</i>	<i>Psz</i>	<i>Δt(días)</i>
9	7	7.5	45
12	15	9	7
16	32	30	22
21	33	48	7

<i>Altura de tallos</i>		<i>Tiempo</i>
<i>Hprom</i>	<i>Hmax(cm)</i>	<i>Δt(días)</i>
90	1.15	120
93	1.15	7
96	1.15	7

Celda 2

<i>Profundidad de raíces (cm)</i>				<i>Tiempo</i>
<i>Pid</i>	<i>Piz</i>	<i>Psd</i>	<i>Psz</i>	<i>Δt(días)</i>
28	4	8	N.V	45
27.5	4.5	14	15	7
39	23.5	16.5	18	22
41	27	30	23	7

<i>Altura de tallos</i>		<i>Tiempo</i>
<i>Hprom</i>	<i>Hmax(cm)</i>	<i>Δt(días)</i>
92	1.26	120
95	1.26	7
98	1.26	7

Celda 3

Las plantas que seleccione para hacer el monitoreo fue en un primer momento las primeras plantas transplantadas, las cuales pudieron crecer unos pocos centímetros, como se muestra en la tabla de altura de tallos.

<i>Profundidad de raíces (cm)</i>				<i>Tiempo</i>
<i>Pid</i>	<i>Piz</i>	<i>Psd</i>	<i>Psz</i>	<i>Δt(días)</i>
12	5.5	10	12	15
17	16	15	20	9
27	17	27	21	14
32	27	30	31	14
36	36	30	32	7
40	41	34	33	7
43	42	35	40	7
43	42	42	43	7

<i>Altura de tallos (cm)</i>			<i>Tiempo</i>
<i>Pi</i>	<i>Pc</i>	<i>Ps</i>	<i>Δt(días)</i>
23	23	31	15
23	23	33	7
23	24	33	7
23	24	33	7

Se seleccionaron plantas emergentes las cuales se desarrollaron mas como se demuestran sus alturas alcanzadas en la siguiente tabla:

Altura de tallos (cm)			Tiempo
Pi	Pc	Ps	Δt(días)
32	24	18	49
49	40	21	7
51	42	21	7
52	44	21	7

Tallo	Tiempo
Hmax(cm)	Δt(días)
71	70
78	7
84	7
89	7
1.1	15

6.8.2 Análisis de agua

Los análisis de agua correspondientes se han iniciado una vez que se ha logrado el crecimiento de las plantas y la fijación de la película biológica en las raíces de ellas. Se medirá el DBO₅ del agua de la cisterna enterrada, del tanque y del agua tratada a la salida de los tres prototipos. Estas mediciones se realizarán quincenalmente durante 3 meses. I

Actualmente se ha realizado un primer análisis del agua, las muestras han sido tomadas del reservorio, del tanque de almacenamiento y de la segunda y tercera celda. Una vez por semana se está realizando el análisis del agua. Los puntos de muestreo han sido designados con la siguiente nomenclatura:

C2i = Agua de la celda 2 en el ingreso

C2s = Agua de la celda 2 en la salida

C3i = Agua de la celda 3 en el ingreso

C3s = Agua de la celda 3 en la salida

Tanque = Agua del tanque elevado

Reservorio = Agua del reservorio que abastece el tanque

Los datos registrados en el primer monitoreo se muestran en la Tabla N° 6.

Tabla N° 6: registro de datos del primer monitoreo

Parámetro	Unidad	C2i	C2s	C3i	C3s	Tanque	Reservorio
T	°C	30.2	30.05	30	29.05	29.3	28.7
pH		8.02	7.27	7.77	7.23	7.78	8.12
CE	µs/cm	494	472	485	499	471	487
OD	mg/l	6.51	4.49	6.46	4.27	5.97	6.84

VIII. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

1. Brix, H. 1993. Wastewater treatment in constructed wetlands. In Wetland systems for water pollution control. Lewis Publisher. USA.
2. Metcalf. Ingeniería de Aguas Residuales. Mac Graw Hill Book. 2da Edición. España 1996.
3. Reed S. C Crites R.W and E.J. Middlebroks. "Natural Systems for waste management and treatment". 2da Edición. Mc Graw Hill. New York.
4. UTEP "Subsurface flow constructed wetlands Conference" University of TEXAS at El Paso and U.S. Environmental Protections Agency. El Paso. Texas 1993.

ANEXO I
ALBUM DE FOTOS

Foto N° 1: vista de celdas ya construidas e instaladas sobre base de madera



Foto N° 2: clasificación y selección de la arena para relleno de celdas de humedal



Foto N° 3: siembra de plantas en celda de humedal



Foto N° 4: plantas en crecimiento



Foto N° 5: celda con plantas totalmente desarrolladas



Foto N° 6: desarrollo radicular de las plantas

