

**HUMEDALES ARTIFICIALES COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES**

**ADRIANA MARCELA VELASCO LÓPEZ  
YUDY MARISEL VIVAS CANTERO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2006**

**HUMEDALES ARTIFICIALES COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES**

**ADRIANA MARCELA VELASCO LÓPEZ  
YUDY MARISEL VIVAS CANTERO**

**Trabajo de grado, requisito parcial para optar al título de  
Ingeniera Ambiental**

**Director  
JUAN CARLOS CASAS ZAPATA  
Ingeniero Químico Magíster en Ingeniería Ambiental**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2006**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Juan Carlos Casas Zapata  
Director

---

Sandra Morales Velasco  
Jurado

---

Fabio Antonio Cabezas Fajardo  
Jurado

Popayán, de                      de 2006

**AGRADECIMIENTOS**

Expresamos nuestros agradecimientos a:

La Universidad del Cauca y la Vicerrectoría de Cultura y Bienestar quienes permitieron el desarrollo de nuestra formación profesional y por el apoyo para la realización de esta investigación.

Juan Carlos Casas Zapata, ingeniero Químico Magíster en ingeniería ambiental y director de la investigación, por su constante dedicación, orientaciones y apoyo durante la ejecución de nuestro proyecto.

El personal del laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, por su colaboración y orientación en el manejo de los equipos y realización de las pruebas de laboratorio.

Las Hermanas Salesianas por facilitar el desarrollo de esta investigación.

## CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	2
1. JUSTIFICACIÓN	3
2. OBJETIVOS	5
2.1 OBJETIVO GENERAL	5
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	5
3. MARCO TEÓRICO	6
3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES	6
3.1.1 Humedales artificiales con superficie de agua libre (FWS)	6
3.1.2 Humedales artificiales de flujo subterráneo o subsuperficial (SFS)	8
3.2 DESCRIPCIÓN DE UN HUMEDAL DE FLUJO HORIZONTAL	9
3.3 COMPONENTES DE UN HUMEDAL	11
3.3.1 Sustratos, sedimentos y restos de vegetación	11
3.3.2 Vegetación	11

3.3.3	Microorganismos	12
3.3.4	Animales	13
3.4	MECANISMOS DE REMOCIÓN EN UN HUMEDAL	13
3.5	RENDIMIENTOS ESPERADOS	15
3.5.1	Remoción de DBO	15
3.5.2	Remoción de sólidos suspendidos	17
3.5.3	Remoción de nitrógeno	17
3.5.4	Remoción de fósforo	17
3.5.5	Remoción de metales	18
3.5.6	Remoción de coliformes fecales	18
3.6	RIEGO AGRÍCOLA CON AGUAS RESIDUALES	18
4.	METODOLOGÍA	21
4.1	UBICACIÓN	21
4.1.1	Descripción del sistema de tratamiento	21
4.2	DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS	23
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25

5.1 CALIDAD DEL AGUA DEL AFLUENTE Y EL EFLUENTE	25
5.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS	26
5.2.1 Temperatura	26
5.2.2 pH	26
5.2.3 Conductividad	27
5.2.4 DQO	28
5.2.5 DBO <sub>5</sub>	29
5.2.6 Nitratos	30
5.2.7 Sólidos suspendidos totales	31
5.2.8 Fosfatos	33
5.2.9 Coliformes fecales	34
5.2.10 Huevos de helmintos	36
6. CONCLUSIONES	38
RECOMENDACIONES	40
BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXOS	45

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema con macrófitas flotantes	7
Figura 2. Sistemas con macrófitas sumergidas	7
Figura 3. Sistemas con macrófitas emergentes	8
Figura 4. Principales componentes de un humedal de flujo horizontal	10
Figura 5. Procesos que se llevan a cabo en un humedal y que permiten la depuración del agua residual	16
Figura 6. Comportamiento del pH en el afluente y efluente del humedal	26
Figura 7. Eficiencia de remoción de la conductividad.	27
Figura 8. Eficiencia de remoción de DQO	28
Figura 9. Eficiencia de remoción de DBO <sub>5</sub>	29
Figura 10. Eficiencia de remoción de nitratos	30
Figura 11. Eficiencia de remoción de los sólidos suspendidos totales	32
Figura 12. Eficiencia de remoción de fosfatos	33
Figura 13. Eficiencia de remoción de coliformes fecales	35
Figura 14. Eficiencia de remoción de los huevos de helmintos	37

## LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Tabique de sedimentación	22
Foto 2. Humedal artificial	22
Foto 3. Estanque de almacenamiento	23

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales procesos físicos, químicos y biológicos que favorecen la depuración de aguas residuales en los humedales.	14
Tabla 2. Metodología empleada para la realización de los ensayos de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.	24
Tabla 3. Estadística descriptiva de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.	25

## RESUMEN

La utilización de humedales artificiales para la depuración de aguas residuales tiene un interés e importancia creciente en todo el mundo. Estos humedales se están utilizando en el saneamiento de pequeños núcleos urbanos y también para el tratamiento de aguas residuales de todo tipo.

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial son sistemas naturales para el tratamiento de las aguas residuales. Este tipo de humedales pueden eliminar un buen número de contaminantes, incluyendo orgánicos (DBO y DQO), materia en suspensión, nitrógeno, fósforo, trazas de metales pesados y microorganismos. Esta reducción es llevada a cabo por mecanismos de tipo físico, químico y microbiológico (Lara, 1999).

En la granja María Auxiliadora de la Vereda la Honda, se hizo un seguimiento a las aguas residuales domésticas, realizando seis muestreos entre los meses de junio a septiembre de 2005, tanto en el afluente como en el efluente del humedal.

Los parámetros físicoquímicos y microbiológicos que se evaluaron fueron: pH, Temperatura, Nitratos, Fosfatos, DBO, DQO, Sólidos suspendidos totales, Huevos de helmintos y Coliformes fecales; encontrando en la mayoría de los casos altas eficiencias de remoción.

Al finalizar la parte experimental del estudio, se pudo determinar en los resultados arrojados por los análisis y con base en la normatividad, que la remoción de las coliformes fecales no es suficientemente alta para garantizar la utilización del agua para riego y que por tanto la comunidad de las hermanas para tal fin deben hacer uso de otros tratamientos que conlleven a obtener una reducción de las coliformes en el efluente y garantizar que el consumo de los productos no genere riesgos para la salud.

## LISTA DE ACRÓNIMOS

FWS: Humedales artificiales con superficie de agua libre.

SFS: Humedales artificiales de flujo subterráneo o subsuperficial.

pH: Potencial de hidrógeno.

DQO: Demanda química de oxígeno.

DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno (al quinto día).

SST: Sólidos suspendidos totales.

OMS: Organización mundial de la salud.

EPA: Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos.

UFC: Unidades formadoras de colonias.

TRH: Tiempo de retención hidráulico.

UNF: Unidades nefelométricas.

## INTRODUCCIÓN

En la vereda la Honda, municipio de Timbío, Departamento del Cauca, se encuentra la granja experimental Maria Auxiliadora de las Hermanas Salesianas. En ella se produce dulce para la venta y sustento de la granja, se cultivan variedad de productos de pan coger, se dictan cursos de capacitación a la comunidad en temas religiosos, formación comunitaria y ambiental de granja sostenible.

En dicha granja se dispone de un humedal artificial, el cual utiliza la *Phragmites australis* para el tratamiento de las aguas residuales domésticas. Este humedal fue diseñado para aproximadamente 30 personas y está operando desde hace tres años (2003).

El siguiente trabajo “Humedales artificiales como alternativa para el tratamiento de aguas residuales” tiene como objetivo principal la evaluación de un humedal artificial con base en parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, que permitirán determinar el posible uso de su efluente en riego agrícola.

De la eficiencia del humedal en la depuración del agua residual dependerá la reutilización que se le pueda dar al efluente en otras actividades según sean sus condiciones de calidad de agua. La reutilización del agua implica reducción en el consumo de agua potable y una preparación de la comunidad hacia el desarrollo sostenible en cuanto a la conservación de éste recurso (Lara, 1999).

Es importante considerar que el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales mediante esta técnica, constituye un magnífico tratamiento de bajo costo para la eliminación de nutrientes, patógenos, clarificador del efluente y para evaluar su posterior reuso en diferentes actividades.

## 1. JUSTIFICACIÓN

El deterioro de la calidad del agua supone un grave problema medioambiental y socioeconómico, tanto así que hoy día se ha llevado a su escasez. Especialmente bajo estas circunstancias se debe conseguir que un determinado uso del agua no imposibilite otros posteriores; el uso del agua para abastecimiento urbano e industrial debe ir acompañado de una correcta depuración que permita su reutilización para regadíos o como elemento que no perturbe el equilibrio biológico de las zonas de vertido.

El desbalance entre el recurso hídrico y el crecimiento explosivo de las ciudades ha obligado a priorizar el uso de aguas superficiales para abastecimiento público y generación de energía eléctrica, lo que ha ocasionado que la actividad agrícola de las grandes ciudades opte por el uso de las aguas residuales domésticas.

En el Departamento del Cauca la técnica de humedales artificiales puede ser utilizada en pequeñas comunidades que no cuentan con los recursos necesarios para implementar tratamientos biológicos convencionales, estos sistemas son muy económicos y realizan una adecuada remoción de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos, mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Por esta razón resultaría importante dar a conocer e implementar este tipo de sistemas en actividades que permitan reutilizar el agua para usos posteriores (ganadería, agricultura, entre otras).

El desarrollo de este estudio permite conocer el nivel de remoción de materia orgánica que se lleva a cabo dentro del sistema, evaluando la Demanda biológica y Demanda química de oxígeno, lo cual permite establecer cómo los compuestos orgánicos pueden ser transformados gracias a los procesos de oxidación y neutralización. El estudio microbiológico también juega un papel importante ya que este tipo de sistema se fundamenta en los procesos bioquímicos que realizan los microorganismos para la degradación de los contaminantes presentes en ellos, siendo las coliformes totales y fecales indicadores biológicos que determinan la calidad sanitaria de este tipo de aguas.

Desde el punto de vista de la salud pública y medio ambiental es necesario conocer en detalle el potencial del reuso del agua y el riesgo ambiental que entraña la presencia de organismos patógenos en el efluente de un humedal artificial. Los agricultores desconocen los riesgos a la salud asociados con

aguas residuales y muy poco conocen del aporte de nutrientes asociados a estas aguas.

Estudiar el aprovechamiento del efluente de aguas residuales domésticas tratadas para el reuso permite reducir y hasta eliminar las descargas que por lo general producen impactos negativos al ambiente.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar un humedal artificial como tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas y el posterior aprovechamiento de su efluente para reuso.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

**I.** Evaluar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua de entrada y salida del humedal, tales como temperatura, pH, conductividad eléctrica, DQO, DBO<sub>5</sub>, nitratos, sólidos suspendidos totales, fosfatos, coliformes fecales y huevos de helmintos.

**II.** Determinar el riesgo microbiológico del agua residual doméstica tratada para reuso a través de la tecnología con humedales artificiales.

### 3. MARCO TEÓRICO

Los humedales son áreas que se encuentran inundadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas. Se considera que los humedales se encuentran entre los ecosistemas más productivos de la tierra, además, por siglos han permitido la filtración del agua lluvia, lo que ha formado grandes depósitos subterráneos de agua dulce, conocidos también como mantos acuíferos, los cuales son de vital importancia para los humanos (Lara,1999).

Los Humedales Artificiales con flujo horizontal se han diseñado generalmente con profundidades de 60 cm. (García, 2004), con plantas emergentes como espadañas, carrizos y juncos. 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 algas al limitar la penetración de luz solar.

La preocupación por conservar los humedales es relativamente reciente, cuando se entendió la importancia de las funciones de estos ecosistemas y las consecuencias de su deterioro, muy evidentes por cuanto los procesos de industrialización habían transformado el entorno causando en muchos casos daños significativos en los sistemas naturales.

#### 3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES

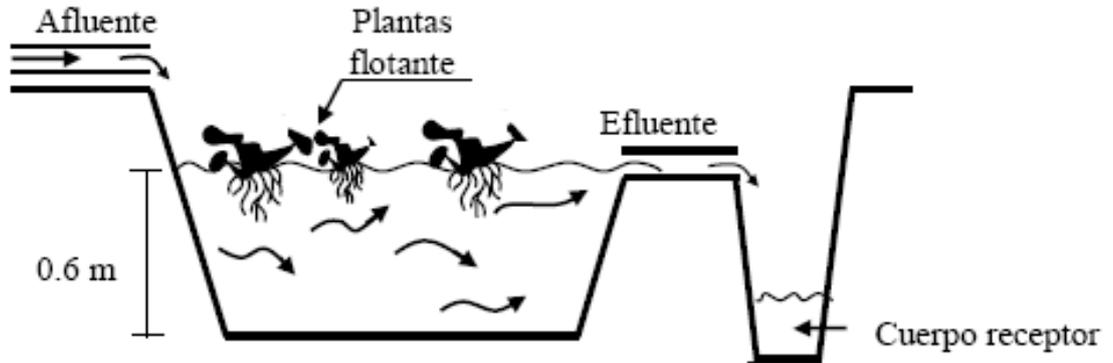
Existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento del agua residual:

**3.1.1 Humedales artificiales con superficie de agua libre (FWS).** En los casos en que se emplean para proporcionar tratamiento secundario o avanzado, los sistemas FWS suelen consistir en balsas o canales paralelos con la superficie del agua expuesta a la atmósfera y el fondo constituido por suelo relativamente impermeable o con una barrera subsuperficial, vegetación emergente y niveles de agua poco profundos (0,1 a 0.6 m).

Existen tres tipos de humedales artificiales con superficie de agua libre:

- **Sistemas con macrófitas flotantes.** Consiste de grandes lagunas con bajos niveles de agua provistas de plantas macrófitas que flotan libremente en la superficie y sus raíces sumergidas tienen un buen desarrollo. El concepto de tratamiento se basa principalmente en la recolección de la biomasa producida, siendo las plantas más utilizadas *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y *Pistia stratiotes* (lechuga de agua).

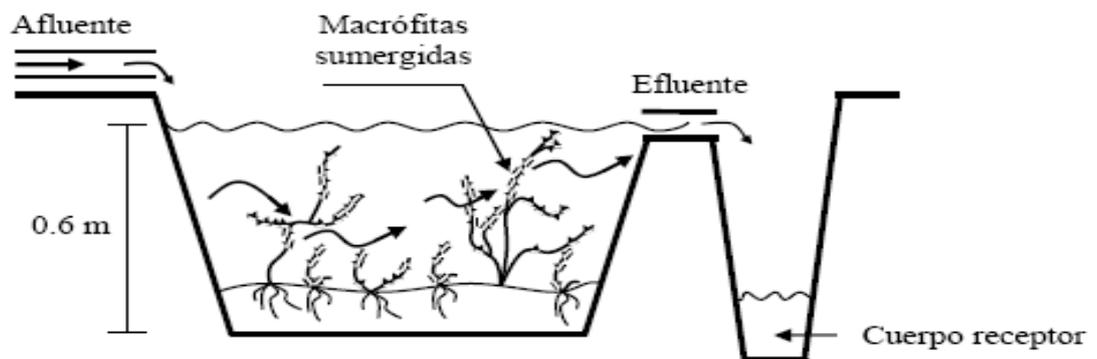
Figura 1. Sistema con macrófitas flotantes



Fuente: CIEMA, 2005

- **Sistemas con macrófitas sumergidas.** Consiste en lagunas con bajo nivel de agua, sembradas con plantas macrófitas que tienen su tejido fotosintético totalmente sumergido. Las plantas sumergidas solo crecen bien en aguas que contienen oxígeno disuelto, por lo tanto no se usan en aguas residuales con alto contenido de materia orgánica biodegradable porque la descomposición microbiana de ésta provoca condiciones anóxicas. Además, dependen de la penetración de luz a través del agua para que se produzca actividad fotosintética, por lo que se utilizan principalmente para tratamiento terciario (remoción de nutrientes). Entre las plantas que se utilizan en estos sistemas están *Egeria densa*, *Elodea canadensis* y *Elodea nuttalli*.

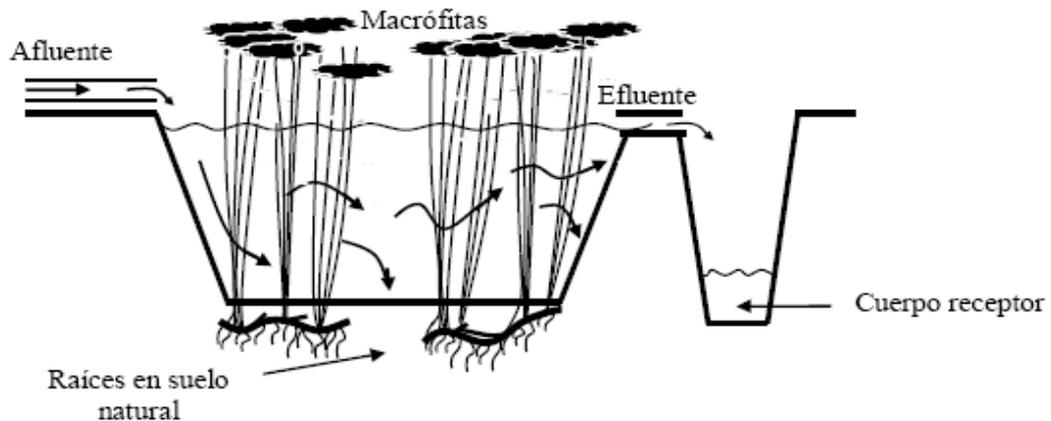
Figura 2. Sistemas con macrófitas sumergidas.



Fuente: CIEMA, 2005

- **Sistemas con macrófitas emergentes.** El diseño de este sistema con superficie de agua libre consiste en trincheras de 3 – 5 m de ancho y cientos de metros de longitud, plantadas por ejemplo, con *Scirpus lacustris* o *Phragmites australis*. El tratamiento biológico de las aguas residuales se ve favorecido por la presencia de porciones sumergidas de tallos y paja, los cuales sirven como sustrato para el crecimiento microbiano.

Figura 3. Sistemas con macrófitas emergentes.



Fuente: CIEMA, 2005.

### 3.1.2. Humedales artificiales de flujo subterráneo o subsuperficial (SFS).

Este tipo de sistemas con macrófitas emergentes es el que consiste en un filtro biológico relleno de un medio poroso (por ejemplo: piedra volcánica, grava), en el cual las plantas macrófitas se siembran en la superficie del lecho filtrante y las aguas residuales pretratadas atraviesan de forma horizontal o vertical el lecho filtrante. Las bacterias, las cuales son responsables de la degradación de la materia orgánica, utilizan la superficie del lecho filtrante para la formación de una película bacteriana y de esta manera existe en el filtro una población bastante estable que no puede ser arrastrada hacia la salida.

Debido a que el nivel del agua está por debajo de la superficie del medio granular, se evitan posibles problemas de mosquitos y olores que pueden llegar a presentarse. Aunque el área requerida sea menor que la de un sistema FWS, la viabilidad económica del sistema dependerá del costo de conseguir y poner el material granular en el lecho.

### **3.2 DESCRIPCIÓN DE UN HUMEDAL DE FLUJO HORIZONTAL.**

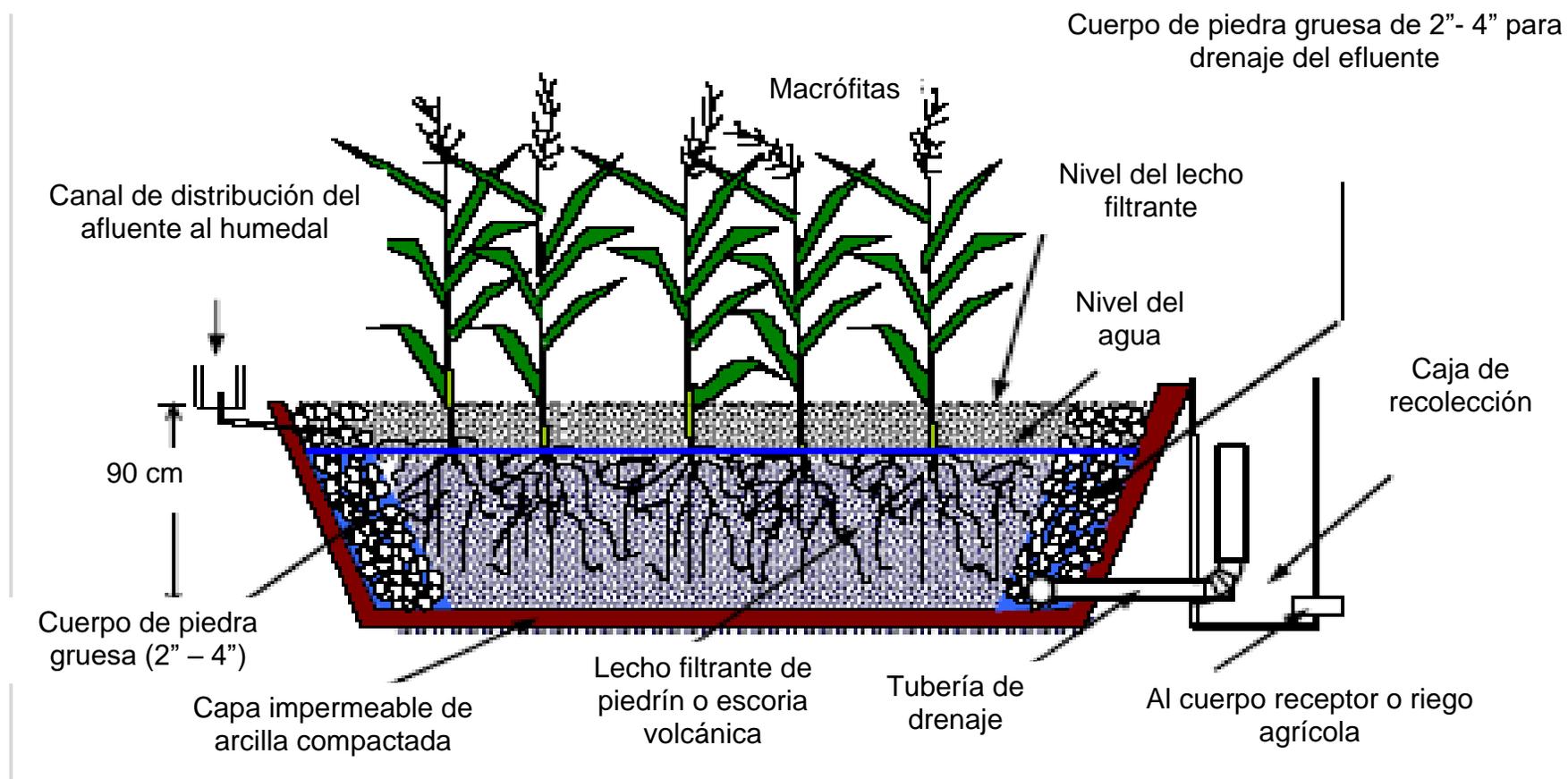
Un humedal de flujo horizontal consiste en pilas rectangulares con profundidades que oscilan entre 60 y 100 cm rellenas con grava o piedra volcánica y sembradas con plantas macrófitas.

En este tipo de sistemas, las aguas residuales fluyen lentamente desde la zona de distribución en la entrada de la pila, en una trayectoria horizontal a través del lecho filtrante, hasta que llegan a la zona de recolección del efluente. Durante este recorrido que dura normalmente varios días, el agua residual está en contacto con zonas aeróbicas y anaeróbicas.

Durante el paso del agua residual a través de las diferentes zonas del lecho filtrante, el agua residual es depurada por la degradación microbiológica proporcionada por la biocapa que se forma en la superficie del material del lecho filtrante y por procesos fisicoquímicos.

El esquema siguiente muestra los principales componentes de un humedal de flujo horizontal:

Figura 4. Principales componentes de un humedal de flujo horizontal.



Fuente: CIEMA, 2005.

### 3.3 COMPONENTES DE UN HUMEDAL

**3.3.1 Sustratos, sedimentos y restos de vegetación.** Los sustratos en los humedales construidos incluyen suelo, grava, roca y materiales orgánicos, estos se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y la alta productividad típica en estos sistemas. El sustrato, sedimentos y restos de vegetación son importantes por:

- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas tienen lugar dentro del sustrato.
- El sustrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y fuente de carbono.

**3.3.2 Vegetación.** Es indudable que la vegetación en los humedales artificiales es un componente fundamental, ya que el sistema de tratamiento está estrechamente relacionado con un tipo determinado de vegetación.

La vegetación desempeña papeles múltiples en el buen funcionamiento del sistema. Se trata tanto de actuaciones activas derivadas de la actividad fisiológica de la vegetación como actuaciones pasivas, en las que no intervienen éstos, sino procesos físicos por efecto de la presencia de las plantas en el sistema (Curt, 2004).

La presencia de la vegetación distribuye la velocidad del agua (Pettecrew y Kalff, 1992), citado por Kestler (2004), lo que favorece la sedimentación de los sólidos suspendidos y aumenta el tiempo de contacto entre el agua y la vegetación.

Tanto en sistemas de flujo superficial como subsuperficial, la asimilación de nutrientes por la vegetación parece explicar una eliminación del 10% de fósforo y el 25% del nitrógeno (Vymazal, 1998), citado por Kestler (2004).

Está demostrado que las plantas influyen sobre la composición de las comunidades microbianas del humedal y por tanto sobre el metabolismo de la rizósfera (Jespersen, 1998; Fran-Jaco, 1998), citado por Kestler (2004).

- **Efectos físicos.** La presencia de vegetación distribuye y reduce las velocidades del agua creando mejores condiciones para la sedimentación de sólidos suspendidos, reduciendo el riesgo de resuspensión (CIEMA, 2005).

- **Área superficial para el crecimiento microbiano.** El crecimiento de las raíces dentro del lecho filtrante ayuda a descomponer la materia orgánica, pues provee un área superficial que es colonizada por densas comunidades de microorganismos formando una biocapa, la cual es la principal responsable de la reducción de la carga contaminante que contienen las aguas residuales (CIEMA, 2005).

- **Consumo de nutrientes.** Las plantas consumen nutrientes principalmente a través de las raíces; la capacidad de consumo de las plantas emergentes que puede ser removida si la biomasa es recolectada, está en el rango de 30 a 150 Kg. de P/ha-año y 200 a 2500 Kg. de N/ha-año (CIEMA, 2005).

Las plantas que frecuentemente se encuentran en la mayoría de humedales para aguas residuales incluyen espadañas, carrizos y juncos.

- **Phragmites.** El carrizo es una planta perteneciente a la familia de las Gramíneas. Esta caña ha sido utilizada tradicionalmente para techar chozas y preparar cercados en algunos lugares. Su nombre científico es *Phragmites australis*.

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, presentando una gran inflorescencia al final del tallo.

Puede soportar niveles moderados de salinidad en el agua y en el suelo, necesitando suelos encharcados hasta profundidades de medio metro.

Cuando el carrizo es cortado regularmente pierde a largo plazo su vigor y los tallos se tornan pequeños y frágiles.

**3.3.3 Microorganismos.** Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones son reguladas principalmente por microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos y

protozoos. Los microorganismos degradan la materia orgánica y favorecen su mineralización, ofreciendo estos minerales para el consumo de las plantas.

**3.3.4 Animales.** Los humedales construidos proveen un hábitat para una gran variedad de invertebrados y vertebrados. Los animales invertebrados como insectos y gusanos contribuyen al proceso de tratamiento, consumiendo materia orgánica. Las larvas de muchos insectos son acuáticas y consumen cantidades significativas de materia durante sus fases larvales.

### **3.4 MECANISMOS DE REMOCIÓN EN UN HUMEDAL**

Las macrófitas juegan un papel vital en el tratamiento. Además de muchos beneficios operacionales, proveen superficies y un ambiente razonable para la filtración y el crecimiento microbiano. La transferencia de oxígeno por algunas plantas acuáticas a la rizósfera es también un requisito para que los procesos de remoción de contaminantes, especialmente microbianos, funcionen efectivamente. (CIEMA, 2005).

En la tabla 1 se presentan los principales procesos que se llevan a cabo en un humedal, los cuales favorecen la depuración de las aguas residuales en dicho sistema.

Tabla 1. Principales procesos físicos, químicos y biológicos que favorecen la depuración de aguas residuales en los humedales.

<b>Contaminante</b>	<b>Proceso de eliminación</b>
Sólidos suspendidos	Floculación Sedimentación Filtración Degradación
Materia orgánica	Sedimentación Asimilación Mineralización
Nitrógeno	Amonificación Volatilización de amonio Nitrificación Desnitrificación
Fósforo	Adsorción Sedimentación Precipitación química Asimilación vegetal
Metales	Fijación al sedimento Adsorción por las plantas
Patógenos	Sedimentación y muerte gradual Radiación UV Antibióticos naturales Predación
Compuestos inorgánicos	Asimilación Inmovilización

Fuente: Mitsch y Gosselink, 2000. Citado por Lahora, 2001.

### **3.5 RENDIMIENTOS ESPERADOS.**

Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales (SST) y nitrógeno, así como niveles significativos de metales, trazas orgánicas y patógenos. La remoción de fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades del contacto del agua residual con el suelo.

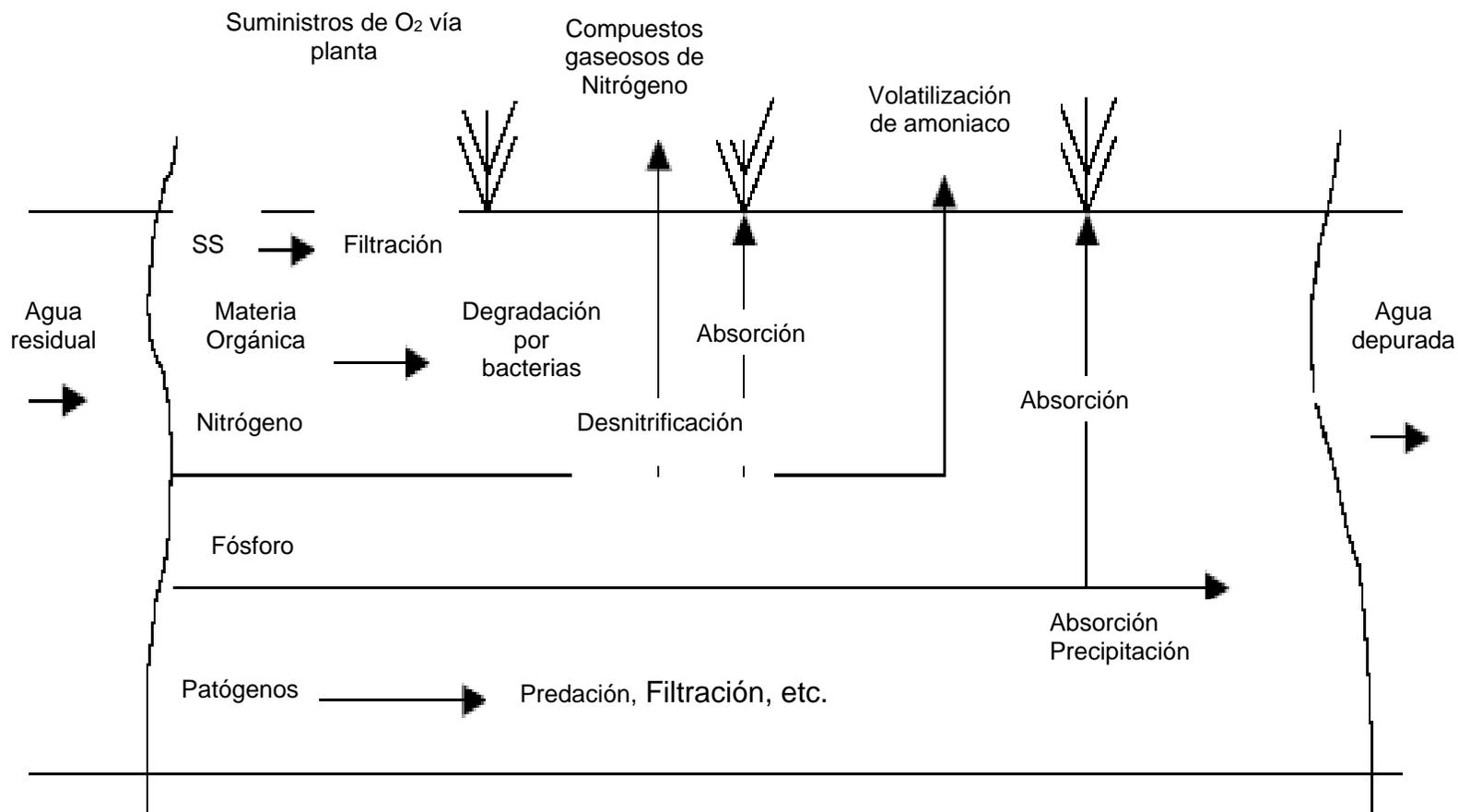
Los mecanismos básicos de tratamiento incluyen sedimentación, precipitación química, absorción e interacción biológica, así como también la captación por parte de la vegetación (Figura 5).

**3.5.1 Remoción de DBO.** En un sistema de humedal la remoción de materia orgánica sedimentable es muy rápida, debido a la deposición y filtración en los SFS, donde cerca del 50% de la DBO aplicada es removida en los primeros metros del humedal. Esta materia orgánica sedimentable es descompuesta aeróbica o anaeróbicamente, dependiendo del oxígeno disponible. El resto de la DBO se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal y continúa siendo removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema.

La actividad de los microorganismos es muy lenta en el invierno y los rendimientos para remoción de  $DBO_5$  tienen tendencia a disminuir durante este periodo. Pueden esperarse rendimientos de remoción que varían entre 80 y 95% durante el periodo cálido y entre el 70 y 80% durante el invierno.

La remoción de  $DBO_5$  está asegurada por una biodegradación a partir de microorganismos aerobios o anaerobios

Figura 5. Procesos que se llevan a cabo en un humedal y que permiten la depuración del agua residual.



Fuente: Trinidad, 1998.

**3.5.2 Remoción de sólidos suspendidos.** La remoción de sólidos suspendidos es muy efectiva en los dos tipos de humedales artificiales, produciendo efluentes con concentraciones inferiores a 20 mg/L (Lara, 1999).

Los sistemas de flujo subsuperficial ofrecen muy buenos rendimientos de remoción de sólidos suspendidos, los cuales pueden variar de 90 a 95% cuando el medio filtrante se ha escogido bien y no hay cortos circuitos. En general, el uso de un medio arenoso asegura una muy buena filtración.

**3.5.3 Remoción de nitrógeno.** Durante los meses de verano, el efluente de un humedal puede tener niveles bajos de nitrógeno amoniacal, pero a menudo contiene altas concentraciones de nitrógeno orgánico asociadas con las algas que salen de él. Los sistemas con alta intensidad o aireación prolongada pueden tener la mayor parte de nitrógeno en forma de nitratos.

La disponibilidad de oxígeno está relacionada con la eficiencia en la transferencia de oxígeno atmosférico en los humedales tipo FWS y con el alcance de la penetración de las raíces y la eficiencia en la transferencia de oxígeno de estas raíces en el caso de los SFS.

La remoción de nitratos también depende de la temperatura. Durante los meses de verano la remoción es bastante buena, pero decrece a medida que baja la temperatura, siempre dependiendo de la temperatura del agua.

**3.5.4 Remoción de fósforo.** La remoción de fósforo puede implicar dos fenómenos diferentes: La adsorción por el suelo y el consumo por las plantas.

La incorporación de arcilla en el medio filtrante puede favorecer la absorción de fósforo (Kickuth, 1990, Geller, 1990) citados por Cenagua (1999), pero la presencia de arcilla debe dosificarse muy bien para evitar que no disminuya de manera muy importante la conductividad hidráulica del medio filtrante.

Algunas plantas consumen una cantidad apreciable de fósforo durante su crecimiento; pueden almacenarlo en las raíces, los rizomas, los tallos y las hojas. Una alta proporción de fósforo es almacenado por las plantas en sus raíces mientras se marchitan. Se hace pues necesario cortarlas preferiblemente antes de su rebrote para asegurar una remoción definitiva del fósforo.

**3.5.5 Remoción de metales.** Los mecanismos de eliminación de metales en un humedal artificial incluyen asimilación por parte de las plantas, adsorción y precipitación. Los metales pueden acumularse en los humedales artificiales, pero las concentraciones que normalmente tienen las aguas residuales no representan una amenaza para los posibles usos a largo plazo.

Los sistemas de flujo subsuperficial que usan lecho de caña (*Phragmites australis*) han sido utilizados con éxito para la remoción de diferentes desechos industriales cargados con metales pesados (Kickuth, 1990), citado por Cenagua (1999).

**3.5.6 Remoción de coliformes fecales.** La reducción de microorganismos patógenos como los coliformes fecales, se hace posible en sistemas de tratamiento bajo ciertas condiciones.

Los sistemas subsuperficiales permiten disminuir las concentraciones en microorganismos de  $10^2$  a  $10^4$  coliformes por 100 ml y son menos sensibles a las variaciones de caudal (Kickuth, 1990, Geller, 1990) citados por Cenagua (1999). Cuando se presentan eventos intensos de lluvia, los picos de caudal influyen negativamente en la eficiencia de remoción de coliformes fecales.

### **3.6 RIEGO AGRÍCOLA CON AGUAS RESIDUALES**

Las aguas residuales desempeñan una importante función como sustituto del agua de abastecimiento empleada para el riego en la agricultura, contribuyendo a la conservación del agua y ofreciendo beneficios económicos. El objetivo primario de la práctica debe ser el de garantizar el aprovechamiento racional de las aguas residuales y, al mismo tiempo, proteger la salud.

La calidad de un agua residual se determina normalmente con parámetros globales de contaminación como lo son la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Pero estos no son los parámetros de calidad que toman mayor importancia cuando se trata de utilizar el agua residual como agua de riego sino aquellos elementos químicos que afectan el crecimiento de las plantas o las propiedades del suelo.

Según Mujeriego (1990), citado por Kestler (2004), en su publicación "Manual Práctico de Riego con Agua Residual Municipal Regenerada. Calidad de un

Agua de Riego”, el tipo de agua que se utilice como agua de riego tiene dos efectos importantes, a corto plazo influye en la producción y a largo plazo ciertas aguas pueden perjudicar el suelo. Sea cual fuere el origen del agua debe de cumplir la calidad que se exige a un agua de riego natural y únicamente en ciertas situaciones o para ciertas producciones pueden variarse los márgenes establecidos, siempre que no afecte las propiedades del suelo.

Teniendo en cuenta que los efluentes secundarios que se reutilizan pueden contener elevadas concentraciones de microorganismos patógenos, se han introducido diferentes normativas con la finalidad de asegurar un mínimo riesgo sanitario, imponiendo límites a la presencia de microorganismos u obligando a tratamientos de desinfección. La cloración de los efluentes provenientes de los humedales construidos puede producir aguas aprovechables para aplicaciones de reuso sin restricciones, ya que los niveles de coliformes pueden llegar a ser inferiores a los 2 UFC/100 mL (Gersberg, 1987) citado por García (2004).

Para el uso de aguas residuales tratadas, la OMS recomienda que éstas tengan una concentración de coliformes fecales menor a 1000 NMP/100 mL y ausencia de parásitos, y que los efluentes con concentraciones mayores sean utilizados con mayor cuidado.

El efluente de un humedal debe ser claro, sin sólidos suspendidos apreciables, lo que facilita su manejo con fines de reuso. El bajo contenido de materia orgánica contaminante del efluente, evita que se generen fenómenos de putrefacción en el área donde se aplica el riego. La remoción de los enteroparásitos Helmintos disminuye en gran medida el riesgo de contaminación microbiológica para el personal que labora en las áreas agrícolas y cultivos irrigados.

Las cantidades disponibles de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en el efluente del humedal posibilitan el desarrollo de los cultivos sin necesidad de usar fertilizantes sintéticos.

Estudios realizados en varios países han demostrado que, con una gestión apropiada, es posible incrementar el rendimiento de los cultivos regándolos con aguas residuales sin tratar o con efluentes sometidos a tratamiento primario y secundario (OMS, 1989; EPA, 1992). Por otra parte, el vertido de aguas residuales, sin tratar o parcialmente tratadas, al medio ambiente puede crear

problemas de contaminación del agua subterránea y superficial así como del suelo.

La reutilización directa de aguas residuales depuradas, se ha estado desarrollando en aquellos países con elevada capacidad tecnológica, escasez de agua y un nivel económico alto. Estas circunstancias se han dado principalmente en dos lugares, California (EUA) e Israel. Posteriormente también se desarrollaron en Arizona, Florida y otros estados de los EUA, en Japón y en los países árabes con potencial económico. Últimamente, en América Latina se está detectando un interés creciente por este recurso, afirma Salgot (1994), citado por Kestler (2004).

Uno de los aspectos negativos de la reutilización del agua residual doméstica para el riego en la agricultura, es el riesgo de contaminación por microorganismos patógenos que pueden causar enfermedades en el hombre. Muchos países han adoptado normas microbiológicas muy estrictas para las aguas residuales regeneradas, basándose exclusivamente en criterios indicadores de la calidad bacteriológica. Algunos han utilizado sistemas de tratamiento terciario cuando han estado a su alcance y han instalado los sistemas necesarios para la filtración rápida en arena y cloración después del tratamiento biológico secundario en aguas residuales. En varias regiones se empiezan a emplear otros sistemas de desinfección (ozono, radiación ultravioleta, ultra-filtración) para eliminar cualquier riesgo sanitario para el hombre (Asano, 1987; Asano, 1992).

Las actividades agrícolas ubicadas en la periferia de muchas ciudades se han visto seriamente afectadas por el crecimiento explosivo de la población con consecuencias en la pérdida de áreas de cultivo, lo que ha llevado a optar por el uso del agua residual como única alternativa de supervivencia. Esto se refleja en la existencia de más de 500.000 ha agrícolas irrigadas directamente con agua residual sin un tratamiento adecuado (Bartone, 1990) citado por Moscoso (2004).

Más del 67% del agua en el mundo está asociada con la producción agrícola, lo que hace de esta actividad un buen objetivo para la reutilización del agua residual regenerada. A partir de 1960 el uso del agua regenerada para el riego en la agricultura prácticamente se ha duplicado.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 UBICACIÓN

El sitio de estudio se encuentra localizado al sur occidente de la ciudad de Popayán en la Vereda la Honda, Municipio de Timbío, a una altitud promedio de 1800 m.s.n.m y una temperatura media anual de 19 °C. En este sitio opera un humedal artificial, el cual fue diseñado con la finalidad de tratar las aguas residuales domésticas provenientes de la granja, el cual viene operando desde Julio de 2002.

La caracterización del afluente y efluente del humedal se llevó a cabo en el laboratorio de química ambiental de la Universidad del Cauca y algunas pruebas fisicoquímicas (pH, Temperatura, conductividad) se tomaron en el lugar de estudio.

Los muestreos se llevaron a cabo en los meses de junio a septiembre del año 2005, periodo en el cual se realizaron los análisis del agua residual tanto en el afluente como en el efluente del humedal.

**4.1.1 Descripción del sistema de tratamiento.** El humedal evaluado es de tipo subsuperficial horizontal. El agua a tratar es de tipo doméstico, la cual es recolectada por medio de una tubería y conducida a un tabique de sedimentación el cual está localizado antes del humedal (ver foto 1). De aquí el agua es transportada hacia el humedal (ver foto 2) donde empieza el proceso de depuración, el cual puede tardar varios días y por último sale por un tubo pequeño hacia el estanque de almacenamiento (ver foto 3).

Foto 1. Tabique de sedimentación.



Foto 2. Humedal Artificial.



Foto 3. Estanque de almacenamiento.



El efluente presenta un caudal promedio de 0,06972 L/s, el cual se determinó por aforos volumétricos. El tiempo de retención hidráulico (TRH) es de tres días.

El lecho presenta una profundidad de 0,75 m. y un área superficial de 14,57 m<sup>2</sup> (según datos del diseñador). La planta utilizada es *Phragmites australis*, la cual crece naturalmente en presencia de materia orgánica en el trópico, presentando una alta capacidad de transferencia de oxígeno desde la atmósfera hasta las partes sumergidas y una buena penetración mayor de 60 cm. El medio de soporte es grava fina y el efluente sale por una tubería de 4 pulgadas.

#### **4.2 DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS**

Para desarrollar los objetivos de determinar si el agua tratada es apta para riego agrícola se tuvo en cuenta principalmente el parámetro de coliformes fecales, basándonos en la normatividad Colombiana respecto a este parámetro (decreto 1594 de 1984) en el cual se establecen en el artículo 40, los criterios admisibles para la destinación del agua residual para uso agrícola, el cual indica que el nivel máximo permisible (NMP) de coliformes fecales no deberá exceder 1000 UFC.

La metodología empleada para la realización de los ensayos de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se resume en la tabla 2. Los métodos de laboratorio utilizados para la determinación de los parámetros fisicoquímicos se realizaron con base en las guías de Stándar Methods for Examination of Water and Waster Water (1998). La medición de la temperatura, pH y conductividad se realizo in-situ utilizando equipos portátiles

Tabla 2. Metodología empleada para la realización de los ensayos de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

<b>PARÁMETROS</b>	<b>EQUIPO</b>	<b>MÉTODO</b>
T° (°C)	Termómetro 0-100°C Hg.	Termométrico
pH	Medición directamente en el agua con un pH HANDY LAB.	Potenciométrico
Conductividad (µs)	Conductímetro Hanna.	-
DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	Calentando las muestras en un reactor marca HACH por un periodo de tiempo de 2 horas, midiendo absorbancia en un espectrofotómetro HACH DR 2010 a 600 nm y ajustando el resultado a la curva de calibración realizada para este parámetro.	5220 D*
DBO <sub>5</sub> (mg/L O <sub>2</sub> )	Lectura de oxígeno disuelto en el día cero e incubando la muestra en winklers por 5 días.	2210 B*
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	Espectrofotómetro con ácido fenol disulfónico.	Espectrofotometrico
Sólidos Totales	Filtración al vacío y cápsulas.	2540 B
Fosfatos (mg/ L PO <sub>4</sub> )	Espectrofotómetro a 690nm	4500 P-D
Coliformes Fecales (UFC/ 100ml)	Filtración al vacío y cajas petri.	9222 D
Huevos de Helminetos	Cámara Mc master egg slide y microscopio a 10X marca Zeizz.	-

\* Numeral del Standard Methods.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación se presentan los datos obtenidos durante los muestreos realizados en el humedal artificial ubicado en la Vereda La Honda, que se realizaron entre el 9 de Junio y el 30 de septiembre de 2005 y donde se determinaron los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos tanto en el afluente como en el efluente del humedal. Los resultados obtenidos se relacionan en las tablas del anexo A.

### 5.1 CALIDAD DEL AGUA DEL AFLUENTE Y EL EFLUENTE

En la tabla 3 se presenta la estadística descriptiva para todos los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos correspondientes a los diferentes muestreos realizados en el afluente y efluente del humedal en estudio. Estos parámetros van a indicar la calidad del agua, para determinar su posible reuso.

Tabla 3. Estadística descriptiva de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Estadística descriptiva.	Nº de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
pH afluente	6	6,50	6,98	6,6967	0,1812
pH efluente	6	6,65	7,05	6,8583	0,1530
Conductividad afluente (us)	6	530	839	702,83	123,51
Conductividad efluente (us)	6	353	826	644,50	173,59
DQO afluente (mg./L O <sub>2</sub> )	6	219	1190	702,19	343,67
DQO efluente (mg./L O <sub>2</sub> )	6	58	232	148,15	67,93
DBO afluente (mg./L O <sub>2</sub> )	6	102	272	188,83	76,16
DBO efluente (mg./L O <sub>2</sub> )	6	32	54	44,26	9,13
Nitratos afluente (NO <sub>3</sub> )	6	0,4	4,6	2,6	1,36
Nitratos efluente (NO <sub>3</sub> )	6	0,2	2,4	1,4	0,87
Sólidos S.T. afluente	6	40	1956	499,33	754,00
Sólidos S.T. efluente	6	10	800	199,33	312,34
Fosfatos afluente (mg/L PO <sub>4</sub> )	6	11	114	39,5	37,46
Fosfatos efluente (mg/L PO <sub>4</sub> )	6	6	17	10,7	4,03
Coliformes afluente (UFC/100ml)	6	20000	17000000	3417500	6715175,17
Coliformes efluente (UFC/100ml)	6	10000	1880000	511666,67	737276,52
Huevos de H. afluente	6	0	40	20	17,89
Huevos de H. efluente	6	0	0	0	0

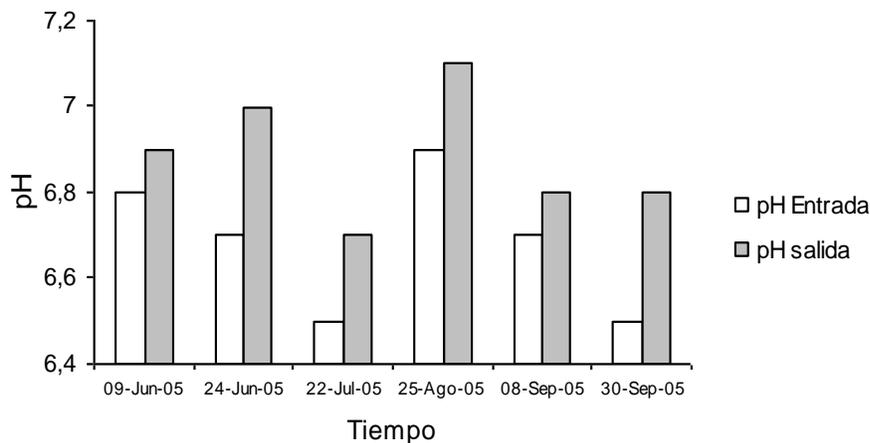
## 5.2 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

**5.2.1 Temperatura.** La temperatura promedio del efluente durante este estudio fue de 20 °C., lo que favorece los procesos biológicos que puedan darse en el interior del humedal, asegurando que los procesos cinéticos que suceden en el interior del humedal no serán afectados.

Es conocido que las reacciones biológicas responsables de la remoción de DBO, nitrificación y desnitrificación también dependen de la temperatura. No obstante, en muchos casos el rendimiento de remoción de DBO en sistemas de humedales existentes en climas fríos no ha demostrado una relación obvia de dependencia de la temperatura (Lara, 1999).

**5.2.2 pH.** En la tabla 3 se presenta la estadística descriptiva del pH en los dos puntos de muestreo y en la figura 6 se observa el comportamiento de dicho parámetro.

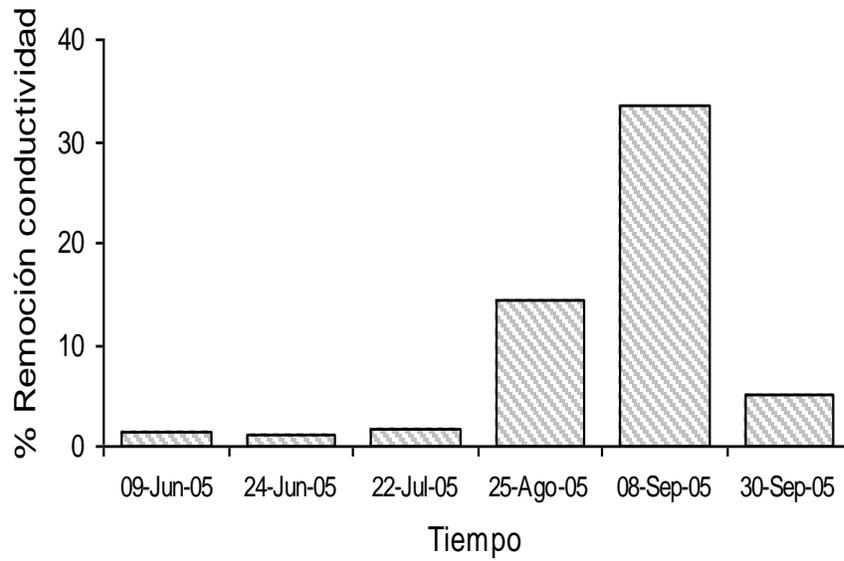
Figura 6. Comportamiento del pH en el afluente y efluente del humedal.



De acuerdo con la tabla 3 se puede observar que los valores obtenidos tienden a aumentar a la salida del humedal, buscando el punto de neutralidad, esto puede ser ocasionado por los procesos biogeoquímicos que se dan en este tipo de aguas, igualmente las variaciones pueden obedecer a los procesos de nitrificación y desnitrificación que determinan los cambios en el pH entre la entrada y la salida.

**5.2.3 Conductividad.** En la tabla 3 se presenta la estadística descriptiva de la conductividad en los dos puntos de muestreo y en la figura 7 se observa el comportamiento de dicho parámetro.

Figura 7. Eficiencia de remoción de la conductividad.



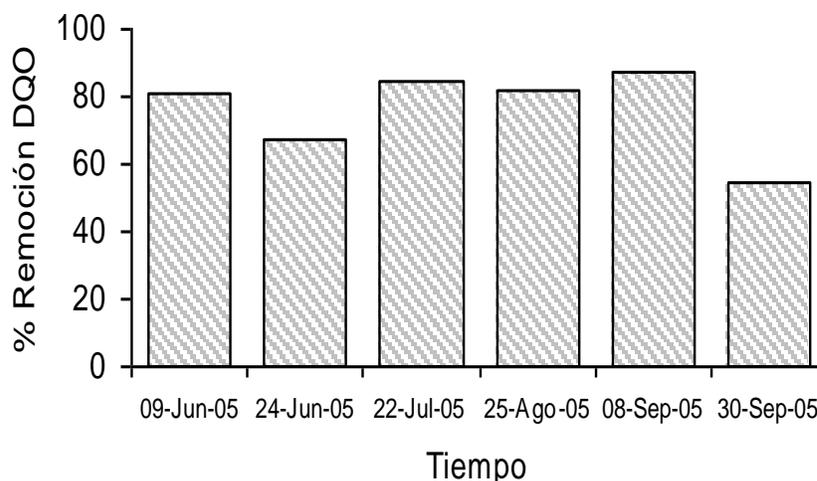
Según la tabla 3 en términos de la conductividad, el agua residual ingresó al humedal con una concentración promedio de conductividad de 702.8 mg/l y salió con una concentración promedio de 644.5 mg/l, obteniéndose una remoción global del 9.52%.

Según la figura 7 para los valores de conductividad de entrada y salida, se puede inferir que la remoción de conductividad fue baja en general. Es posible que la grava libere sales por fricción con el agua, a medida que fluye por el sistema.

Se ha demostrado que el crecimiento de la raíz disminuye la conductividad hidráulica en los sistemas de flujo subsuperficial, Marsteiner (1996), citado por García (2004). De hecho, la conductividad disminuye en la zona ocupada por las raíces, lo que provoca un mayor flujo en las zonas más profundas no ocupadas por las raíces Netter (1994), Citado por García (2004).

**5.2.4 DQO.** En la tabla 3 se presenta la estadística descriptiva de la DQO en los dos puntos de muestreo y en la figura 8 se observa el comportamiento de dicho parámetro.

Figura 8. Eficiencia de remoción de DQO.



Según la tabla 5 en relación a la demanda química de oxígeno, el agua residual de la granja ingresó al humedal con una concentración promedio de DQO de 702.2 mg/l y salió con una concentración promedio de DQO de 148.2 mg/l, obteniéndose una remoción global de 76%.

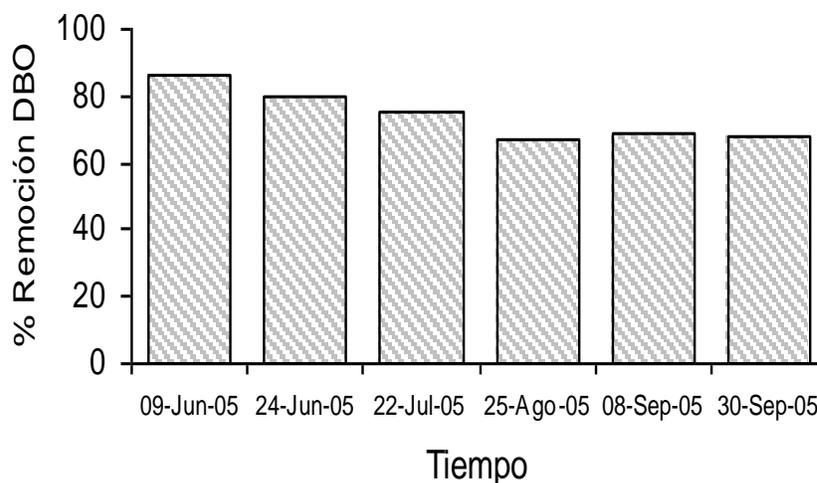
Según la figura 8, el mayor porcentaje de remoción fue de 86% presentándose durante el quinto muestreo y el de menor remoción fue de 55% para el último muestreo. Monje (2000) reporta eficiencias entre el 85% y 94%. Según el decreto 1594 de 1984 los valores de remoción de DQO deben ser mayor del 80%, por tanto la mayoría de los porcentajes obtenidos cumplen con el estándar de vertimiento.

Al medir los parámetros de eficiencia de remoción de materia orgánica en el afluente y efluente del humedal, fue notable observar que las tasas de remoción de materia orgánica estuvieron por encima del 50%.

En la zona aerobia se produce la mayor parte de remoción de la DQO, debido a que en esta zona el  $O_2$  es aprovechado por los microorganismos para producir  $CO_2$  y agua durante la degradación de la materia orgánica.

**5.2.5 DBO<sub>5</sub>.** En la tabla 3 se presenta la estadística descriptiva de la DBO<sub>5</sub> en los dos puntos de muestreo y en la figura 9 se observa el comportamiento de dicho parámetro.

Figura 9. Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub>.



Según la tabla 3 el agua residual ingresó al sistema con una concentración promedio de DBO<sub>5</sub> de 188.8 mg/l y salió con una concentración promedio de 44.3 mg/l, obteniéndose un promedio de remoción global de 74.11%.

En la figura 9 se pueden observar los valores de remoción de DBO<sub>5</sub> obtenidos. Para los dos primeros muestreos se obtuvieron remociones del 86% y 80% respectivamente, los cuales comparados con el decreto 1594 de 1984 cumplen con los estándares de vertimiento, no así el resto de los rendimientos obtenidos, ya que estos presentan valores inferiores. Según Aguirre (2004), citado por García (2004) los humedales construidos de flujo subsuperficial pueden obtener una eliminación de la DBO<sub>5</sub> del 85% aproximadamente, si se diseñan, construyen y mantienen de forma adecuada.

Según estudios de humedales que reportan eficiencias de remoción (US. EPA.1993, Axler et al, 2000, Davison et al 2000, Nakamura.K, 2000, Salati et al, 2000, Vymazal, J, 2000), citado por García (2004), los porcentajes de remoción variaron entre 20% y 93% con un promedio de 70.9%. Para este estudio el promedio obtenido fue de 74.11% encontrándose por encima del reportado en la literatura anterior, pero por debajo del permitido en el decreto 1594/84

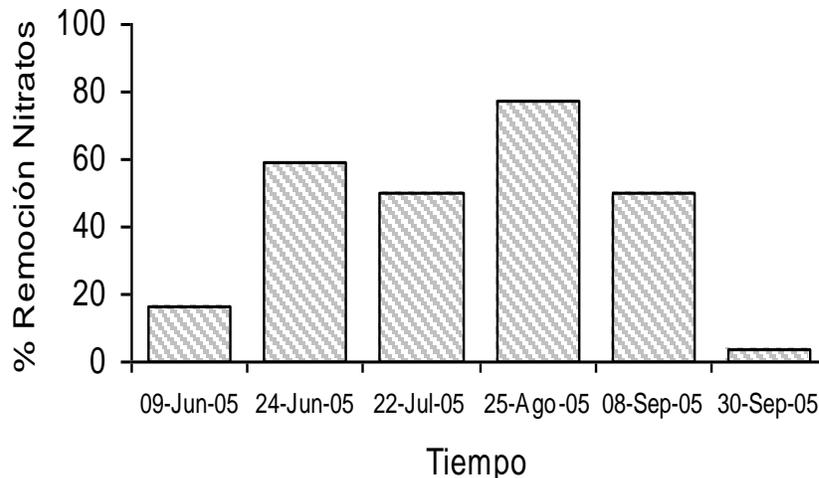
(mayor a 80%), lo que nos indica que hay una buena remoción de materia orgánica, aunque este valor no supere el límite permisible.

La eficiencia en la remoción de la DBO fue superior al 70% durante los tres primeros muestreos, para el resto de muestreos el porcentaje fue ligeramente menor. Estos porcentajes se encuentran dentro del rango SFS operando con plantas típicas como *Thypha* y *Phragmites* reportado por diferentes autores (Kadlec y Knight, 1996; Seoanez, 1999; Crites y Tchobanoglous, 2000).

Teniendo en cuenta que el humedal tiene casi tres años de funcionamiento, se esperaba que las eficiencias de remoción fueran más altas de las obtenidas, basándonos en la normatividad vigente (Decreto 1594/84), pues debe tenerse en cuenta que en este tiempo el sistema debe haber alcanzado un alto grado de madurez.

**5.2.6 Nitratos.** En la tabla 3 se presenta la estadística descriptiva de los nitratos en los dos puntos de muestreo y en la figura 10 se observa el comportamiento de dicho parámetro.

Figura 10. Eficiencia de remoción de nitratos.



De acuerdo con la procedencia del agua residual, podemos inferir que estas aportan una gran cantidad de nutrientes, tales como nitratos y fosfatos, los cuales en altas cantidades van a generar un proceso conocido como

eutrofización, el cual contribuye al crecimiento de algas. Estas reducen el contenido de oxígeno del agua y, por tanto, dificultan la supervivencia de los peces. Además esto hace que las aguas resulten muy desagradables.

Según la tabla 3 la concentración promedio de nitrógeno a la entrada fue de 2.6 mg/l y la de salida fue de 1.4 mg/l. El mayor porcentaje de remoción fue de 77.4% durante el cuarto muestreo y el de menor remoción fue de 4.0% para el último muestreo, lo cual puede ser debido a variaciones en las poblaciones de microorganismos involucrados en la remoción de las diferentes formas de nitrógeno.

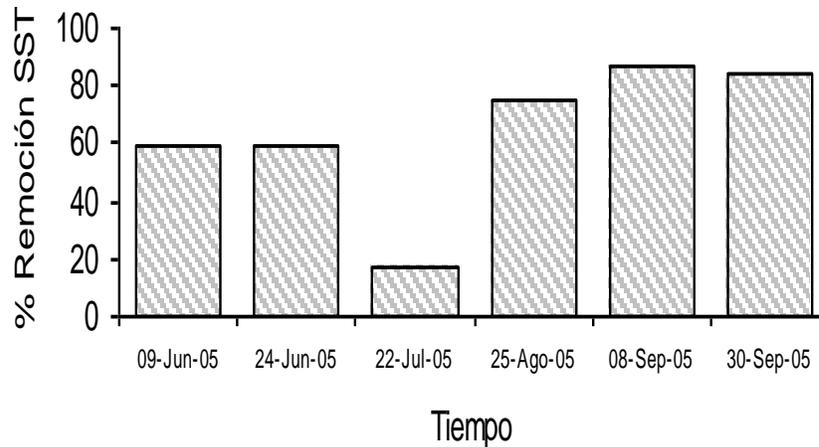
De acuerdo con la figura 10, se puede observar como las remociones de nitratos estuvieron entre 4,0% y 77.4% con un promedio de 42.7%. Al estudiar la literatura, las eficiencias de remoción de humedales para nitratos según Robusté (2004) citado por Morato (2004), encontró remociones de nitratos en un 54.5%, por tanto las remociones obtenidas de nitratos en este estudio se encuentran por debajo del valor citado en la literatura.

Numerosos estudios han demostrado que mediante la asimilación y cosecha de los macrófitos, como mucho se elimina entre un 15 y un 20% del nitrógeno Stottmeister (2003) citado por García (2004). Esto hace que la nitrificación combinada con la desnitrificación sea en realidad el principal mecanismo de eliminación de nitrógeno (teniendo en cuenta que la principal especie de nitrógeno en el agua residual es habitualmente el amoníaco).

Puede ser que en la zona aerobia ocurrió el proceso de nitrificación en el cual los organismos aerobios transforman el nitrógeno amoniacal en nitratos y en la zonas anóxicas y anaerobias se transforman los nitratos en nitrógeno gaseoso (Zuñiga, 2004).

**5.2.7 Sólidos suspendidos totales.** En la tabla 3 se presenta la estadística descriptiva de los sólidos suspendidos totales en los dos puntos de muestreo y en la figura 11 se observa el comportamiento de dicho parámetro.

Figura 11. Eficiencia de remoción de de los sólidos suspendidos totales



Según la tabla 3 la concentración promedio de SST a la entrada fue de 499.3 mg/l y la de la salida fue de 199.3 mg/l.

La remoción de sólidos suspendidos es muy efectiva en los dos tipos de humedales artificiales, produciendo efluentes con concentraciones inferiores a 20 mg/L que es el valor de referencia (Lara, 1999). En este estudio se obtuvieron concentraciones por debajo del valor de referencia para los tres últimos muestreos.

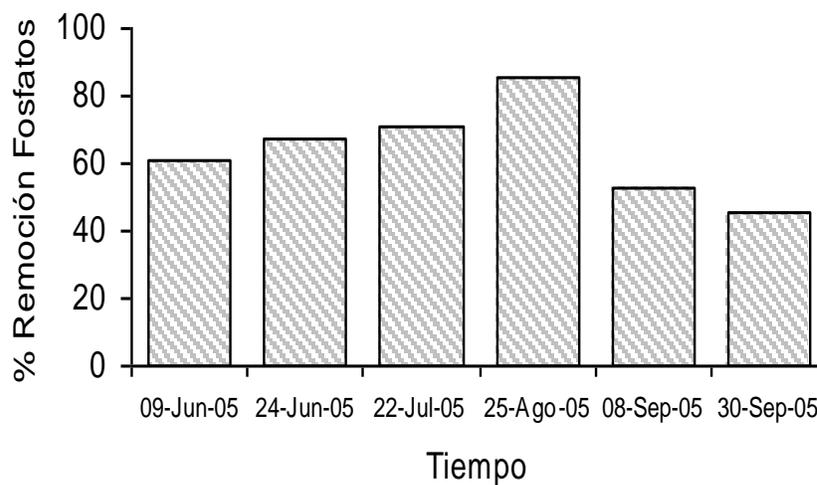
De la figura 11 se obtiene que el mayor porcentaje de remoción de SST fue de 87% correspondiente al quinto muestreo y el de menor remoción fue de 17% para el tercer muestreo; de acuerdo con la gráfica se puede observar que en los tres primeros muestreos las remociones de sólidos suspendidos totales tienden a decrecer y en los siguientes muestreos las remociones aumentan. Es de tener en cuenta que en los tres últimos muestreos nos encontrábamos en un periodo de verano, el cual pudo incidir en el aumento de la sedimentación de los sólidos.

Los principales procesos por los cuales se removieron los sólidos suspendidos totales fueron posiblemente la sedimentación y la filtración por parte de la grava.

Según la figura 11, los porcentajes de remoción de los sólidos suspendidos totales variaron entre 17% y 87% con un promedio de 62%, este promedio está por debajo del decreto 1594 de 1984, el cual contempla una remoción del 80%. Igualmente también está por debajo del promedio reportado por otros autores, donde los porcentajes de remoción variaron entre 56% y 95% con un promedio de 83% (EPA.1993, Axlerl 2000, Davison 2000, Nakamura K. 2000, Salati 2000, Vy Mazal, J, 2000), citado por García (2004).

**5.2.8 Fosfatos.** En la tabla 3 se presenta la estadística descriptiva de los fosfatos en los dos puntos de muestreo y en la figura 12 se observa el comportamiento de dicho parámetro.

Figura 12. Eficiencia de remoción de fosfatos.



De acuerdo con la figura 12 podemos observar como las remociones van aumentando en los cuatro primeros muestreos, desde un valor de 60.6% hasta 85.1% los cuales indican que el humedal presenta una buena remoción de fosfatos, pero es de notarse que estas remociones disminuyen a 52.4% y 45.5% en el quinto y sexto muestreo respectivamente, esto quizás causado por el periodo de verano. Aun así se puede inferir que se está presentando una buena remoción de fosfatos.

Las remociones de fósforo se encontraron entre un 45.5% y 85.1% con un promedio de 63.6%, al estudiar la literatura las eficiencias de remoción de humedales artificiales para este parámetro se encuentran entre 22% y 95% con un promedio de 49.7% (US.1993, Axler et al, 2000, Davison et al 2000,

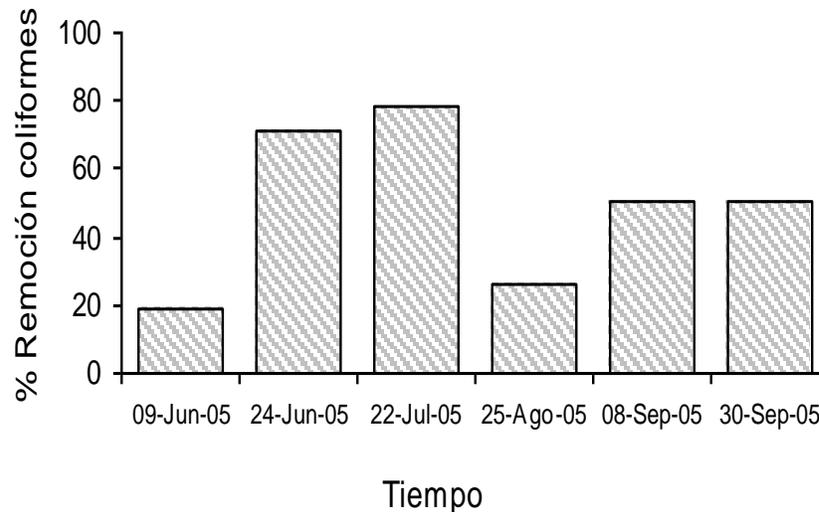
Nakamura.K, 2000, Salati et al, 2000, Vy Mazal, J, 2000), citado por García (2004); Monje (2000) entre 60% y 90%. En general, las eficiencias observadas en este estudio están dentro del rango de la literatura; en relación a las reportadas en otros humedales construidos en los que se reportan valores entre 20% y 60% (Seoáñez, 1999), son más elevadas, una posible explicación puede ser el tipo de sustrato utilizado, ya que pueden favorecer o no los mecanismos físicos y químicos para remover el fósforo como la adsorción, intercambio iónico, floculación y sedimentación (Ramírez, 2003).

La remoción significativa del fósforo se debe principalmente a la deposición e inmovilización de los fosfatos en los sedimentos; la vegetación contribuye con las extracciones de fósforo, siempre y cuando la biomasa se retire del sistema. La remoción de fósforo por las extracciones de vegetales y otros organismos sigue un patrón estacional dependiendo del clima (Curt, 2004). Los humedales son más eficientes en lugares templados y cálidos, pero numerosos estudios han demostrado que la eficiencia de los humedales no mejora con la temperatura (Kadlec y Knight, 1996).

Los macrófitos que crecen en humedales de reciente construcción asimilan más fósforo que los macrófitos de humedales maduros. Medios granulares recién instalados tienen disponibles más lugares para la adsorción del fósforo que medios con un cierto tiempo de operación (Arias, 2003).

**5.2.9 Coliformes fecales.** En la tabla 3 se presenta la estadística descriptiva de los coliformes fecales en los dos puntos de muestreo y en la figura 13 se observa el comportamiento de dicho parámetro.

Figura 13. Eficiencia de remoción de coliformes fecales.



En la figura 13 se observa que la mayor remoción de coliformes fecales alcanza un valor de 78.8%, correspondiente al tercer muestreo. Todos los muestreos registraron valores de remoción por debajo de los reportados por Martín (2005), el cual reporta valores entre 98,6% y 99,7%.

Respecto a los datos de remoción obtenidos, los coliformes fecales fueron removidos en un promedio del 49.3%, para un tiempo de retención de 3 días (para el cual fue diseñado el humedal, pero que de acuerdo con los datos de caudal obtenidos en el estudio, este tiempo es de 1,8 días). Según Lara (1999), estudios realizados en Canadá removieron coliformes fecales en aproximadamente un 90% cuando se operó en un tiempo de residencia de 6 y 7 días.

Zurita (2006) obtuvo eficiencias de remoción de coliformes fecales superiores al 99%, siendo este un valor típico de sistemas bien operados y diseñados (Dallas, 2004).

Con base en los resultados de la tabla 3 el valor de coliformes fecales en el efluente excede el valor admisible (1000 NMP/100ml según decreto 1594/1984, Colombia; CEPIS/OPS, 1994 y norma Mexicana, NOM-001.1996/1997), para uso agrícola. De acuerdo con los valores obtenidos y basándonos en lo anterior, podemos concluir que el agua del efluente del humedal no es apto para riego agrícola, ni tampoco para cría de peces.

En general, la mayoría de estudios realizados en humedales construidos, ya sea experimentales, a nivel de planta piloto o escala real, muestran como la eliminación de bacterias coliformes fecales en los humedales puede alcanzar valores entre 1 y 2.5 unidades logarítmicas (Rivera, 1995; Tanner, 1995; Williams, 1995; Ottová, 1997; Decamp, 1999), citados por García (2004), los cuales son valores superiores a los obtenidos en el humedal de estudio, donde la remoción de coliformes fecales fue baja. En este estudio sólo para el tercer muestreo se alcanzaron valores de remoción de 2 unidades logarítmicas.

La eliminación de bacterias fecales en humedales artificiales se ha relacionado con factores ambientales como el tiempo de retención hidráulico (TRH), el tipo de medio granular y el tipo de vegetación utilizado. No obstante, diferentes investigadores muestran resultados contradictorios, hecho que se atribuye a la gran variabilidad en la concentración bacteriana, especialmente en los afluentes Green (1997), citado por Morató (2004).

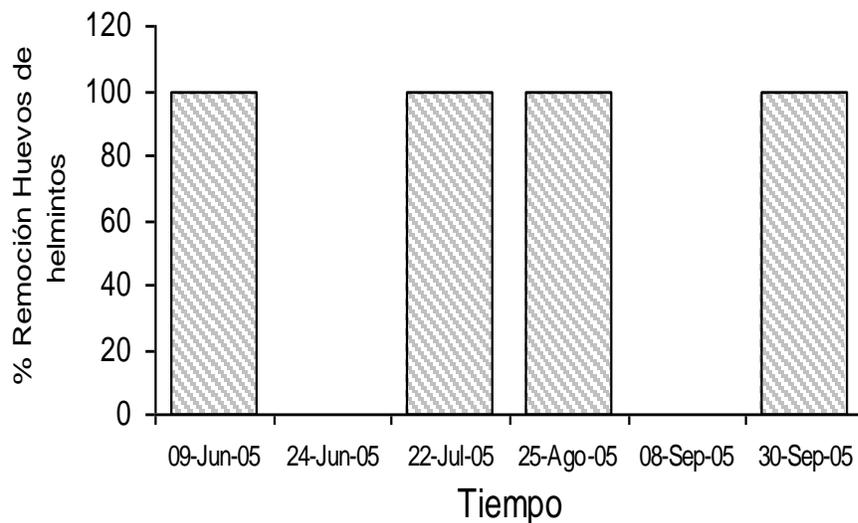
Es obvio que los humedales que disponen de TRH mayores pueden ofrecer rendimientos superiores. Se ha demostrado en un estudio realizado con efluentes secundarios (Tanner, 1995) citado por Morató (2004) que la eliminación de coliformes fecales aumenta a medida que aumenta el TRH.

Ottová (1997) citado por Morató (2004), trabajó con 5 humedales a escala real y encontró una menor inactivación de coliformes fecales en el sistema que operaba con un menor TRH. En el mismo estudio, se observó cómo la mayor eliminación de bacterias fecales se produjo en el humedal con un medio más fino (arena).

También se ha comprobado que los coliformes fecales sobreviven durante más tiempo cuando las condiciones de su entorno son anaeróbicas (Ottová, 1997), citado por Morató (2004).

**5.2.10 Huevos de helmintos.** En la tabla 3 se presenta la estadística descriptiva de los huevos de helmintos en los dos puntos de muestreo y en la figura 14 se observa el comportamiento de dicho parámetro.

Figura 14. Eficiencia de remoción de los huevos de helmintos.



En la figura 14 se observa que la remoción de huevos de helmintos obtenida fue del 100%, razón por la cual podemos inferir que el humedal funciona adecuadamente para la remoción de dichas bacterias. Igualmente López (2000) y Rivas (2006) reportan remociones de huevos de helmintos del 100% que concuerdan con los valores de remoción encontrados en este estudio.

De acuerdo con Cenagua (1999), los humedales artificiales han demostrado buena eficiencia en la remoción de bacterias patógenas, pero en general son pocos los estudios que presentan este parámetro microbiológico.

En sí, la investigación sobre los humedales artificiales se ha centrado principalmente en parámetros fisicoquímicos y sólo recientemente se ha dado importancia a los riesgos de salud pública que implica el uso del agua residual tratada que contenga patógenos y parásitos.

## 6. CONCLUSIONES

En general, el humedal artificial trata de manera adecuada el agua residual, pero se hace necesario implementar otro tipo de tratamiento que permita obtener un agua de mejor calidad, de tal manera que pueda ser utilizada según la necesidad. Por ejemplo, algunos tratamientos complementarios podrían ser: desinfección, laguna de sedimentación, entre otros.

Los mecanismos y procesos de remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO, SST y Coliformes fecales, pudieron verse afectados ante la disminución del tiempo de retención hidráulico (TRH) para el que fue diseñado el humedal.

En cuanto a la remoción de patógenos se encontró que el sistema es capaz de remover efectivamente las concentraciones de huevos de helmintos, alcanzando eficiencias de remoción del 100%.

Respecto a la eficiencia de remoción para coliformes fecales se encontró que esta no es la esperada, ya que según la norma colombiana (Decreto 1594 del 1984) el valor reportado supera el límite permisible para riego agrícola, razón por la cual no es aconsejable utilizar el agua para dicho uso. Actualmente la comunidad de las hermanas salesianas reutilizan el agua para irrigar los cultivos de mora y hortalizas que se cultivan en la granja. Por tanto, para dicho fin se deberá tratar el agua en mejora de su calidad microbiológica.

Se puede comprobar el positivo efecto de las plantas (*Phragmites australis*) sobre la calidad del efluente del humedal en relación con las remociones encontradas para los diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados.

Los humedales artificiales pueden eliminar niveles significativos de nutrientes. La gran capacidad de eliminación de nitrógeno se relaciona con la asimilación por parte de las macrófitas y la disponibilidad de oxígeno.

El uso de grava como medio de soporte puede aumentar el pH y la conductividad a la salida del humedal.

El incipiente reuso del agua residual tratada está basado en la oferta y la demanda, es necesario informar a los usuarios de la factibilidad de usar agua residual tratada para reuso agrícola.

## RECOMENDACIONES

Verificar el mantenimiento y poda del vegetal, pues este humedal no ha sido sometido a ningún mantenimiento.

Es necesario realizar trabajos de investigación tendientes a adecuar los modelos de diseño a las condiciones locales y poder analizar su funcionamiento con otras variables, tales como tipo de planta, tipo de grava, tiempo de retención hidráulica, las cuales asociadas a los diferentes climas, inciden en la eficiencias de remoción.

Antes de utilizar aguas residuales para el riego de cultivos agrícolas, es necesario determinar la calidad del efluente con relación a las normas nacionales establecidas para el reuso.

No se recomienda el riego de cultivos cuyos productos se consumen crudos, principalmente hortalizas, dado su riesgo para la salud.

En el Departamento del Cauca la técnica de humedales artificiales podría ser utilizada básicamente en pequeñas comunidades para el tratamiento de aguas residuales, ya que estos son sistemas muy económicos que realizan una adecuada remoción de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos, mediante procesos físicos, químicos y biológicos.

Sería recomendable realizar un estudio un poco más largo (aproximadamente de 1 año) basados en la experiencia que han tenido algunos autores, para de este modo poder garantizar si esta agua es o no apta para riego agrícola.

## BIBLIOGRAFÍA

- ARIAS C., BRIX H. y JOHANSEN N. Phosphorus Retention in Subsurface Constructed Wetlands: Investigations Focused on Calcareous Materials and their Chemical Reactions. *Wat. Sci. Tech.*, 2003.
- ASANO, T. "Irrigation with reclaimed municipal wastewater. *Geojournal*, 1987.
- ASANO, T., LEONG, L., RIGBY, M. AND SAKAJI, R. "Evaluation of the California wastewater reclamation criteria using enteric virus monitoring data". *Water Science and Technology*, 1992.
- CENAGUA. *Sistemas de Tratamiento de Aguas Servidas por medio de Humedales Artificiales*. OPS, Societe Quebecoise d' assainissement des eaux, Santa Fé de Bogotá D.C., Colombia, 1999.
- CEPIS - Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. *Manual de Evaluación y Manejo de Sustancias Toxicas en Aguas Superficiales*. Resumen ejecutivo. Lima, 1994.
- CIEMA. Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente. *Tecnología Sostenible para el Tratamiento de Aguas Residuales*. Managua, Agosto de 2005.
- CRITES, R., TCHOBANOGLIOUS, G. *Sistemas de Manejo de Aguas Residuales. Para Núcleos Pequeños y Descentralizados*. Vol. II. 1ª. Ed. McGraw-Hill. Impreso en Colombia, 2000.
- CURT FERNÁNDEZ DE LA MORA, María Dolores; BEASCOECHEA, Eduardo de Miguel; FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, Jesús; MUÑOZ, José de Miguel. *Fitodepuración en Humedales*. Universidad Politécnica de Madrid, 2004.
- DALLAS, S., SCHEFFE, B., Ho, G. *Reedbeds for greywater treatment –case study in Santa Elena-Monteverde, Costa Rica, Central America*. *Ecological Engineering*, 2004.
- Decreto 1594 de 1984, Colombia.

- EPA. Subsurface Flow Constructed Wetland for Wastewater Treatment. EPA 832-R-93-008, U.S Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1992.
- GARCÍA, Joan. Humedales Construidos para Controlar la Contaminación: Perspectiva Sobre una Tecnología en Expansión. Barcelona, julio 2004.
- KADLEC R.H; KNIGHT R.L. Treatment Wetlands. CRC Press, Lewis Publishers, Florida, 1996.
- KESTLER ROJAS, Patricia Jamilette. Uso, Reuso y Reciclaje del Agua Residual en una Vivienda. Guatemala, octubre 2004.
- LAHORA, Agustín. Depuración de Aguas Residuales Mediante Humedales Artificiales: La Edar de los Gallardos (Almería), 2001.
- LARA BORRERO, Jaime Andrés. Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Barcelona, 1999.
- LÓPEZ P. Diagnóstico de la contaminación del agua del Estado de Oax. Memorias Técnicas XII congreso Nacional FEMISCA. Morelia Michoacán, 2000.
- MARTÍN, Isabel; SALAS, Juan José y PIDRE, Juan R. El uso de los humedales artificiales en la mejora de la calidad de las aguas costeras y de recreo. Centro de investigación, fomento y aplicación de las nuevas tecnologías del agua (CENTA). 2005.
- MONJE, Luis Eduardo. Módulo Humedales Artificiales. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Bogotá. Marzo, 2000.
- MORATÓ, Jordi; BAYONA, Josep M. y GARCÍA, Joan. Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de Humedales Construidos. Barcelona, julio de 2004.
- MORATÓ, Jordi y DELGADO, Sandra Stela. Eliminación de microorganismos en humedales construidos. Barcelona, julio de 2004.

- MOSCOSO, Julio y EGOICHEAGA, Luis. Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente (CEPIS/OPS) 2004.
  
- Norma oficial Mexicana. NOM-001,1996. Diario oficial de la federación. Enero 6 de 1997.
  
- OMS. Organización Mundial de la Salud. Directrices Sanitarias Sobre el Uso de Aguas Residuales en Agricultura y Acuicultura, 1989.
  
- RAMÍREZ, C., Evaluación de la Remoción Biótica y Abiótica de Fosfatos en Reactores Empacados con Diferentes Materiales de Uso Potencial en Humedales Artificiales. M.Sc. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Ingeniería. Ciudad Universitaria. México, 2003.
  
- RIVAS HERNÁNDEZ Armando; POZO R. Fernando, MANTILLA MORALES Gabriela, RAMÍREZ OROZCO Aldo Iván. Tratamiento de aguas residuales mediante humedales. Caso Cucuchuco, Mich.Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Memorias, Taller Regional Iberoamericano Preparatorio al IV Foro, Mundial del Agua, La innovación científica y tecnológica para enfrentar los retos en materia de agua en México. Agua y saneamiento para todos, 2006.
  
- SEÓANEZ, M. Aguas Residuales: Tratamiento por Humedales Artificiales. Fundamentos Científicos, Tecnologías y Diseño. Mundi-Prensa Ed. Spain, ISBN 84-7114-821-8, 1999.
  
- Stándar Methods for Examination of Water and Waster Water, edición 20, 1998.
  
- TRINIDAD, David A. Uso de Sistemas de Humedales Artificiales en la Depuración de Aguas Residuales Domésticas, 1998.
  
- ZÚÑIGA, J. Influencia del Tipo de Soporte y Macrófitas en la Remoción de Materia Orgánica y Nutrientes en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Bioquímica, Chile, 2004.
  
- ZURITA. F; ANDA de J; BELMONT. M. Posibilidad de Hacer Compatible la Producción de Flores Ornamentales de Alto Valor Comercial con el Tratamiento de Aguas Residuales, Memorias. Taller Regional Iberoamericano Preparatorio al

IV Foro, Mundial del Agua, La innovación científica y tecnológica para enfrentar los retos en materia de agua en México, agua y saneamiento para todos, 2006.

## ANEXO A

Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en el afluente y efluente del humedal.

<b>Anexo A I. Muestreo 1</b>			
Junio 9 de 2005.			
Parámetros	Entrada	Salida	%Remoción
T° (°C)	20,0	18,0	-
pH	6,8	6,9	-
Conductividad (µs)	839,0	826,0	1,5
DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	1190,0	232,4	80,5
DBO <sub>5</sub> (mg/L O <sub>2</sub> )	272,0	38,1	86,0
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	2,5	2,1	16,0
Sólidos Suspendidos Totales	692,0	284,0	58,95
Fosfatos (mg/ L PO <sub>4</sub> )	33,0	13,0	60,6
Coliformes Fecales (UFC/ 00ml)	2320000	1880000	19,0
Huevos de Helminfos	40,0	0,0	100,0

<b>Anexo A II. Muestreo 2</b>			
Junio 24 de 2005.			
Parámetros	Entrada	Salida	% Remoción
T° (°C)	20,0	19,0	-
pH	6,7	7,0	-
Conductividad (µs)	830,0	820,0	1,2
DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	672,8	221,0	67,2
DBO <sub>5</sub> (mg/L O <sub>2</sub> )	271,9	54,4	80,0
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	4,6	1,9	58,7
Sólidos Suspendidos Totales	1956,0	800,0	59,10
Fosfatos (mg/ L PO <sub>4</sub> )	34,0	11,0	67,6
Coliformes Fecales (UFC/ 00ml)	70000,0	20000,0	71,4
Huevos de Helminfos	0,0	0,0	0,0

**Anexo A III. Muestreo 3**

22 de Julio de 2005

Parámetros	Entrada	Salida	% Remoción
T° (°C)	19,0	19,0	-
Ph	6,5	6,7	-
Conductividad (µs)	620,0	610,0	1,6
DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	924,9	141,6	84,7
DBO <sub>5</sub> (mg/L O <sub>2</sub> )	222,1	54,4	75,5
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	0,4	0,2	50,0
Sólidos Suspendidos Totales	84,0	70,00	16,66
Fosfatos (mg/ L PO <sub>4</sub> )	24,0	7,0	70,8
Coliformes Fecales (UFC/ 00ml)	1700000,0	360000,0	78,8
Huevos de Helminfos	40, 0	0,0	100,0

**Anexo A IV. Muestreo 4**

25 de Agosto de 2005.

Parámetros	Entrada	Salida	% Remoción
T° (°C)	22,0	22,0	-
pH	6,9	7,1	-
Conductividad (µs)	748,0	641,0	14,3
DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	761,0	136,6	82,0
DBO <sub>5</sub> (mg/L O <sub>2</sub> )	122,4	40,8	66,7
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	3,1	0,7	77,4
Sólidos Suspendidos Totales	40,0	10,0	75,0
Fosfatos (mg/ L PO <sub>4</sub> )	114,0	17,0	85,1
Coliformes Fecales (UFC/ 00ml)	1075000,0	790000,0	26,5
Huevos de Helminfos	20,0	0,0	100,0

<b>Anexo A V. Muestreo 5</b>			
8 de Septiembre de 2005			
<b>Parámetros</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>% Remoción</b>
<b>T° (°C)</b>	19,0	20,0	-
<b>pH</b>	6,7	6,8	-
<b>Conductividad (µs)</b>	530,0	353,0	<b>33,4</b>
<b>DQO (mg/L O<sub>2</sub>)</b>	445,9	58,5	<b>86,9</b>
<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L O<sub>2</sub>)</b>	102,0	31,7	<b>68,9</b>
<b>Nitratos (NO<sub>3</sub>)</b>	2,2	1,1	<b>50,0</b>
<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>	108,0	14,0	<b>87,03</b>
<b>Fosfatos (mg/ L PO<sub>4</sub>)</b>	21,0	10,0	<b>52,4</b>
<b>Coliformes Fecales (UFC/ 00ml)</b>	20000,0	10000,0	<b>50,0</b>
<b>Huevos de Helminos</b>	0,0	0,0	<b>0,0</b>

<b>Anexo A VI. Muestreo 6</b>			
30 de Septiembre de 2005			
<b>Parámetros</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>% Remoción</b>
<b>T° (°C)</b>	19,0	18,00	-
<b>pH</b>	6,5	6,8	-
<b>Conductividad (µs)</b>	650,0	617,0	<b>5,1</b>
<b>DQO (mg/L O<sub>2</sub>)</b>	219,0	98,8	<b>54,9</b>
<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L O<sub>2</sub>)</b>	142,8	46,2	<b>67,6</b>
<b>Nitratos (NO<sub>3</sub>)</b>	2,5	2,4	<b>4,0</b>
<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>	116,0	18,0	<b>84,48</b>
<b>Fosfatos (mg/ L PO<sub>4</sub>)</b>	11,0	6,0	<b>45,5</b>
<b>Coliformes Fecales (UFC/ 00ml)</b>	20000,0	10000,0	<b>50,0</b>
<b>Huevos de Helminos</b>	20,0	0,0	<b>100,0</b>