

## Septic Tank (ST)-Up Flow Anaerobic Filter (UFAF)-Subsurface Flow Constructed Wetland (SSF-CW) systems aimed at wastewater treatment in small localities in Colombia

Juan David Villegas Gómez, Jhonniers Guerrero Erazo,  
Juan Mauricio Castaño Rojas\* y Diego Paredes Cuervo

Grupo de investigación en agua y saneamiento, Facultad de Ciencias Ambientales,  
Universidad Tecnológica de Pereira. La Julita, Pereira, Risaralda, Colombia.  
Tel 57-6-3212443. \*E-mail: jmc@ambiental.utp.edu.co

### Abstract

Research was done on Septic Tank (ST), Up Flow Anaerobic Filter (UFAF) and Subsurface Flow Constructed Wetlands (SSF-CW) arrangements, aimed at domestic wastewater (DWW) treatment in Colombian small localities. UFAF (commonly used as complementary treatment for ST effluents) with hydraulic residence times (HRT) up to 8 hours were evaluated using gravel and bamboo rings as supporting media. Removal efficiencies of  $49.6\% \pm 2.6$  of COD,  $56.6\% \pm 2.1$  of BOD<sub>5</sub> and  $62.4\% \pm 2.3$  of TSS, were obtained. No significant statistical differences were detected between treatments. Pilots units of SSF-CW with HRTs up to 1 day were evaluated in order to reach a minimum of 80% removal efficiency on DWW, as established by Colombian legislation. *Typha* sp, *Juncus* sp and *Renealmia alpina*, vegetal species of the Colombian coffee-growing region, were planted in gravel and sand media. The systems reached BOD<sub>5</sub> removal efficiencies of  $50.6\% \pm 2.1$ , and indicator bacteria reductions near to 2 log cycles. No significant differences in efficiency were attained. The BOD<sub>5</sub> removal rates encountered, in the ST-UFAF-SSF-CW package, during the study allows 80%. The results obtained from the present research were used in scaling-up a DWW treatment system in a small locality in Colombia.

**Key words:** Water sanitation, communitarian participation, septic tank, up flow anaerobic filter, subsurface flow constructed wetland.

## Variaciones al sistema Tanque Séptico (TS)-Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA)-Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS) con miras al tratamiento de aguas residuales en pequeños municipios de Colombia

### Resumen

Se estudiaron modificaciones al conjunto Tanque Séptico (TS), Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA), y Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) para el tratamiento de aguas residuales domésticas (ARD) en pequeños municipios. En primer lugar, se evaluó el empleo de medios de soporte de grava y anillos de guadua en FAFAs con tiempos de residencia hidráulica (TRH) inferiores a 8 horas, tratando un efluente de TS. Se obtuvieron remociones de  $49,6\% \pm 2,6$  en DQO, de  $56,6\% \pm 2,1$  en DBO<sub>5</sub> y  $62,4\% \pm 2,3$  en SST, sin detectarse diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. Como

complemento al sistema TS-FAFA, se evaluaron unidades piloto de HAFSS (TRH < 1 día) con lechos de grava y arena, usando 3 especies vegetales de la zona cafetera colombiana: Typha (*Typha* sp.), Junco (*Junco* sp.) y Jengibre (*Renalmia alpina*). Se reportaron remociones de  $50,6\% \pm 21,7$  en DBO<sub>5</sub> y reducciones en indicadores bacterianos inferiores a 2 órdenes logarítmicos, sin encontrarse diferencias significativas. Las tasas de remoción globales obtenidas, en términos de DBO<sub>5</sub>, del conjunto TS-FAFA-HAFSS fueron del 80%. Estos resultados se usaron para optimizar un sistema de tratamiento de ARD en una localidad colombiana.

**Palabras clave:** Saneamiento hídrico, participación comunitaria, tanque séptico, filtros anaerobios de flujo ascendente, humedales artificiales de flujo subsuperficial.

## 1. Introducción

En Colombia se tratan las aguas residuales domésticas sólo en 235 de sus 1092 municipios, es decir cerca del 8% de las aguas vertidas<sup>1</sup>. Considerando que en los centros urbanos de Colombia se vierten 67 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales, y que gran parte de los sistemas de tratamiento instalados presentan deficiencias operativas y no cumplen con el proceso completo de tratamiento, se está ante una situación en extremo complicada cuya solución involucra grandes esfuerzos políticos, económicos y tecnológicos [1]. En Colombia, el Plan Nacional de Desarrollo 2002-2006 [2], como parte de su estrategia de manejo integral del agua, establece como prioridad la formulación e implementación del *Plan de manejo de aguas residuales* (PMAR). Para ello se establecen líneas de acción como el diseño de metodologías para identificar las inversiones necesarias en la descontaminación del recurso hídrico, la priorización de los municipios que requieren atención inmediata, la identificación de fuentes de recursos que hagan viable la ejecución del PMAR, y el ajuste al programa de aplicación de la tasa retributiva. Dentro de este marco, la situación para los pequeños municipios es especialmente difícil ya que en la ejecución del PMAR se priorizarían aquellos municipios con amplia cobertura de acueducto, alcantarillado y donde exista un sistema matriz de recolección de aguas residuales. Además, la capacidad de gestión de recursos de este tipo de comunidades es en general limitada, y la futura inclusión en la tarifa del servicio de acueducto y alcantarillado de la tasa retributiva y

los costos de construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento, podría causar un impacto socio-económico que dificultaría aún más la implementación de planes de saneamiento básico para pequeñas localidades [1]. Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento que replican los mecanismos de los humedales naturales como intermediarios entre la afluencia de la contaminación y los ecosistemas acuáticos [3], y son una alternativa atractiva para la depuración de aguas residuales domésticas en el caso de pequeñas comunidades, como es el caso de los asentamientos rurales, debido a su flexibilidad, sus bajos costos de construcción, operación y mantenimiento, y a sus bajos requerimientos de energía [3-5]. El enfoque clásico de saneamiento hídrico en zonas rurales, mediante el tratamiento de aguas residuales ha sido generalmente la construcción de tanques sépticos (TS), tecnología que en algunos casos se ha complementado con Filtros Anaeróbios (FAFA). La presente investigación muestra que para aguas residuales domésticas diluidas, el sistema TS-FAFA no cumple con el mínimo del 80 % de remoción en carga de DBO<sub>5</sub> y DQO, establecido por la legislación colombiana [6]. A consecuencia de ello se evaluaron modificaciones a esta tecnología, incluyendo el uso de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) como postratamiento. Los resultados obtenidos a escala piloto fueron utilizados para la optimización de un sistema de Tanque Séptico - Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA), existente en una pequeña comunidad.

1 Indicadores Ambientales del Sistema Nacional Ambiental (SINA) en Colombia.  
<http://www.minambiente.gov.co>.

## 2. Desarrollo experimental

### 2.1. Filtros Anaeróbicos de Flujo Ascendente (FAFA) a escala piloto, tratando efluentes de un Tanque Séptico (TS)

Durante esta fase de la investigación se estudió la factibilidad de usar anillos de guadua como medio de empaque alternativo a la grava en FAFAs, a fin de reducir cargas estructurales y tamaño de las unidades. Igualmente se determinó el efecto de duplicar el tiempo de residencia hidráulico (TRH) sobre la eficiencia de tratamiento. En la Figura 1 se muestran las unidades experimentales, consistentes en FAFAs con medios de soporte de grava y anillos de guadua. En la Figura 2 se ilustra a su vez el montaje experimental que con dichas unidades se llevó a cabo en las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP)<sup>2</sup>, con los puntos de muestreo numerados de 1 a 7. Los sistemas fueron inoculados conforme a la metodología recomendada por Zambrano *et al* [7] y el registro de datos se inició después de un mes de aclimatación del inóculo.

El agua afluente a los sistemas provino de un Tanque Séptico existente. Para filtros empacados con guadua y grava, se evaluó el efecto de duplicar el tiempo de retención, partiendo de una unidad base de volumen (V), alimentada con un caudal (Q) dado. Para ello se emplearon dos arreglos o configuraciones diferentes: la primera, alimentando el mismo caudal (Q) y duplicando el volumen base (2V) mediante el empleo de dos unidades en serie; y la segunda, alimentando una unidad de volumen (V) con la mitad del caudal base (Q/2). La Tabla 1 ilustra los factores, niveles y tratamientos del diseño experimental usado. En la Tabla 2 se presentan las características de los medios de soporte empleados y en la Tabla 3 las condiciones de operación de los sistemas. Como variables de respuesta del experimento se usaron las eficiencias de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub> y SST determinadas en laboratorio siguiendo los Métodos Estándar [8]. Se usó el paquete estadístico SPSS 10 para llevar a cabo el análisis de varianza (ANOVA) a fin de determinar la existencia o no de diferencias significativas entre tratamientos.

Para describir las condiciones climáticas bajo las cuales se desarrolló el experimento, en la Tabla 4 se presentan datos de dos estaciones me-

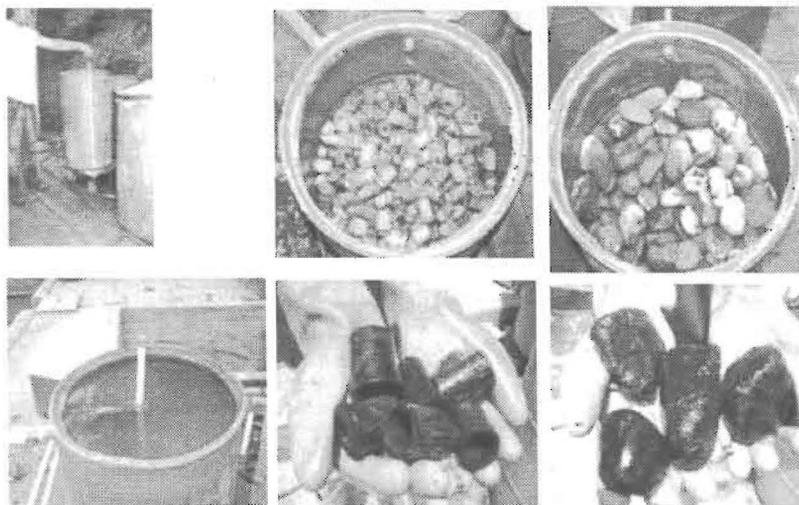


Figura 1. Unidades experimentales de FAFAs con medios de grava y anillos de guadua.

- 2 Actualmente, las aguas residuales de la UTP son tratadas mediante un sistema de aireación extendida. Paralelos a este, se encuentran diversos montajes experimentales como el TS que fue complementado con las variaciones expuestas en este artículo.

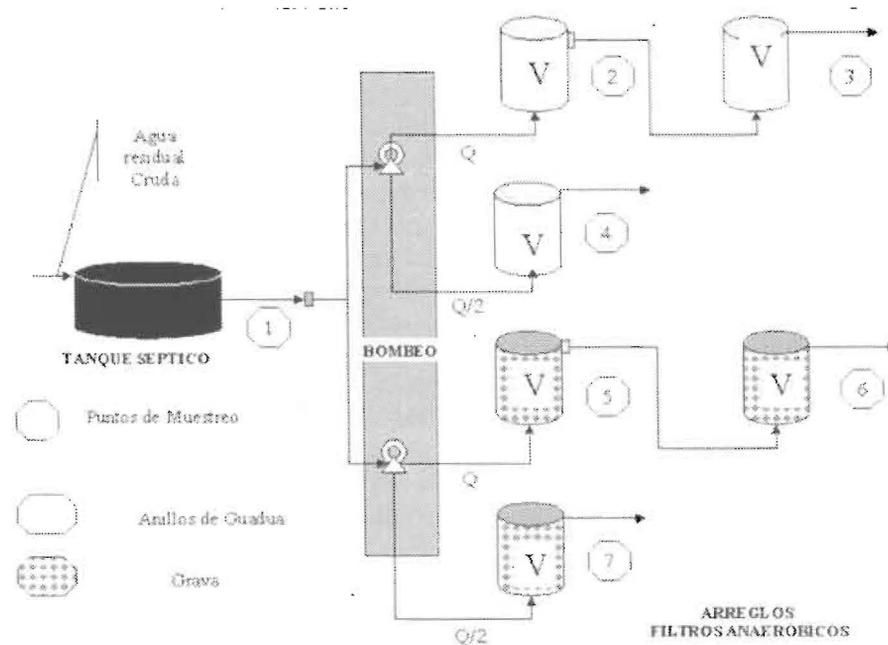


Figura 2. Montaje experimental para la evaluación del sistema TS-FAFA.

Tabla 1  
Diseño experimental

| Factor           | Niveles          | Nº niveles | Configuración (Figura 2)                | Nº de tratamientos |
|------------------|------------------|------------|---|--------------------|
| Arreglo          | Arreglo (V)(Q)   | 3          | 1 reactor con un caudal base            | 3 × 2 = 6          |
|                  | Arreglo (2V)(Q)  |            | 2 reactores en serie con el caudal base |                    |
|                  | Arreglo (V)(Q/2) |            | 1 reactor con la mitad del caudal       |                    |
| Medio de soporte | Grava            | 2          |   |                    |
|                  | Guadua           |            |   |                    |

Tabla 2  
Características de medio de soporte de los filtros anaerobios

| Parámetro                              | Grava        | Guadua  |
|--|--------------|---------|
| Volumen Empacado, Litros               | 148          | 148     |
| Porosidad                              | 0,40         | 0,60    |
| Volumen de vacíos, Litros              | 59           | 89      |
| Altura del lecho, m                    | 0.60         | 0,60    |
| Forma                                  | Canto rodado | Anillos |
| Diámetro, cm                           | 6-10         | ≈ 2,5   |
| Longitud, cm                           | -            | ≈ 2,5   |
| Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )     | 2,64         | 0,75    |
| Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,58         | 0,3     |

Tabla 3  
Condiciones de los tratamientos

| Tratamiento Arreglo    | TRH Teórico Horas <sup>(1)</sup> | COV <sup>(2)</sup> Kg DBO5/m <sup>3</sup> .h |
|------------------------|----------------------------------|--|
| Guadua (V)(Q)          | 4,0                              | 0,874  |
| Guadua (2V)(Q)         | 8,0                              | 0,414  |
| Guadua (V)(Q/2)        | 8,0                              | 0,414  |
| Grava Arreglo (V)(Q)   | 2,7                              | 1,226  |
| Grava Arreglo (2V)(Q)  | 5,3                              | 0,624  |
| Grava Arreglo (V)(Q/2) | 5,3                              | 0,624  |

<sup>(1)</sup> Calculados con base en el volumen de vacíos de la porción empacada del filtro.

<sup>(2)</sup> COV Carga Orgánica Volumétrica.

Tabla 4  
Condiciones climáticas de la zona (Fuente: Cenicafé [9])

| Año 2002 Pereira     |           | Año 2002 Pereira   |           |
|----------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Estación La Catalina |           | Estación El Cedral |           |
| Latitud              | 4° 45' N  | Latitud            | 4° 42' N  |
| Longitud             | 75° 44' O | Longitud           | 75° 32' O |
| Altitud              | 1310 m    | Altitud            | 2120 m    |
| Temperatura media    | 21,9°C    | Temperatura media  | 15,4°C    |
| Humedad relativa     | 73,40%    | Humedad relativa   | 86,20%    |
| Precipitación        | 1950,5 mm | Precipitación      | 2465,4 mm |
| Días lluvia          | 189       | Días lluvia        | 231       |
| Brillo solar         | 1838 h    | Brillo solar       | 1049,1 h  |
| Año 2003 Pereira     |           | Año 2003 Pereira   |           |
| Estación La Catalina |           | Estación El Cedral |           |
| Latitud              | 4° 45' N  | Latitud            | 4° 42' N  |
| Longitud             | 75° 44' O | Longitud           | 75° 32' O |
| Altitud              | 1310 m    | Altitud            | 2120 m    |
| Temperatura media    | 21,7°C    | Temperatura media  | 15,5°C    |
| Humedad relativa     | 74,70%    | Humedad relativa   | 86,80%    |
| Precipitación        | 2046,3 mm | Precipitación      | 2471,1 mm |
| Días lluvia          | 236       | Días lluvia        | 233       |
| Brillo solar         | 1754,4 h  | Brillo solar       | 1037,8 h  |

teorológicas [9] situadas en pisos térmicos que limitan la ubicación de la planta.

Según algunos registros en el Jardín Botánico de la UTP, la temperatura promedio en el sitio es de 22°C, la precipitación anual promedio es de 2400 mm y se tiene una humedad relativa del 80%. El campus universitario, se encuentra en

un piso térmico templado situado a una altitud de 1340 msnm.

## 2.2. Humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto

Se alimentaron 8 unidades piloto de HAFSS con el efluente de unidades FAFA. Tres especies

vegetales de la zona cafetera colombiana: *Typha* (*Typha* sp.), *Junco* (*Juncus* sp.) y Jengibre (*Reynoldsia alpinia*), se sembraron en medios filtrantes de grava y arena, dejando 2 unidades sin sembrar como controles (Figura 3).

Se presenta la caracterización de los lechos filtrantes (Tabla 5) y los parámetros de di-

seño de las unidades (Tabla 6), que fueron evaluadas en términos de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub>, SST, coliformes totales y fecales [8]. Los datos experimentales se sometieron a un Análisis de Varianza (ANOVA) usando el paquete estadístico SPSS 10. Se determinó un diseño experimental con los siguientes factores en evaluación: Medio

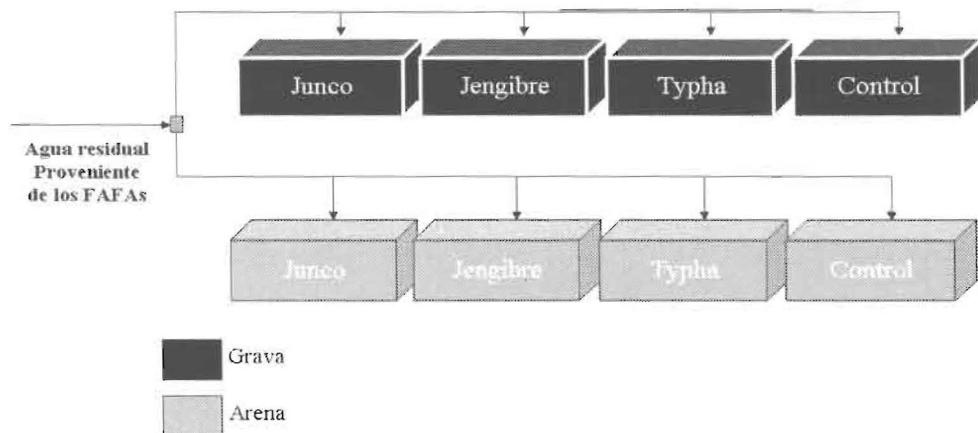


Figura 3. Montaje experimental HAFSS piloto.

Tabla 5  
Características del material de relleno.

| Parámetro                              | Grava | Arena |
|--|-------|-------|
| Diametro, mm                           | 20-40 | 0,3   |
| Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )     | 2,64  | 2,64  |
| Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,58  | 1,838 |

Tabla 6  
Parámetros de diseño y operación en estado estable de los HAFSS

| Medio | Especie  | Área superficial (m <sup>2</sup> ) | Porosidad del lecho <sup>(1)</sup> | V. vacío (m <sup>3</sup> ) | Caudal (mL/s) | Carga superficial Kg DBO <sub>5</sub> /ha.d | TRH (d) |
|-------|----------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------|---|---------|
| Arena | Junco    | 0,5                                | 0,3                                | 0,075                      | 1,39          | 114,7                                       | 0,63    |
| Arena | Jengibre | 0,5                                | 0,3                                | 0,075                      | 1,39          | 114,7                                       | 0,63    |
| Arena | Typha    | 0,5                                | 0,3                                | 0,075                      | 1,39          | 114,7                                       | 0,63    |
| Arena | Control  | 0,5                                | 0,3                                | 0,075                      | 1,39          | 114,7                                       | 0,63    |
| Grava | Junco    | 0,5                                | 0,4                                | 0,1                        | 1,36          | 149,7                                       | 0,85    |
| Grava | Jengibre | 0,5                                | 0,4                                | 0,1                        | 1,36          | 149,7                                       | 0,85    |
| Grava | Typha    | 0,5                                | 0,4                                | 0,1                        | 1,36          | 149,7                                       | 0,85    |
| Grava | Control  | 0,5                                | 0,4                                | 0,1                        | 1,36          | 149,7                                       | 0,85    |

<sup>(1)</sup>La porosidad se calculó midiendo el volumen de agua que puede agregarse a un volumen conocido de medio, sin que el volumen neto total aumente.

(arena y grava); Especie (Junco, Jengibre, *Typha*, Control).

**2.3. Sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas en "La Florida"**

Bajo el marco de un proyecto de saneamiento hídrico de las cuencas media y alta del río Otún mediante mecanismos de sensibilización, participación y apropiación comunitaria, se llevó a cabo, a partir de los resultados obtenidos a escala piloto, la optimización de un sistema de tratamiento de aguas residuales situado en la pequeña localidad de "La Florida", municipio de Pereira, Colombia (Figuras 4 y 5). El centro poblado

se encuentra a una altitud de 1660 msnm, posee un régimen de lluvias bimodal con un promedio anual de lluvias de 1800 a 2100 mm [10]. Esta localidad cuenta con 702 habitantes, y en su cabecera central se agrupan 167 viviendas, de las cuales el 40% están conectadas a la red de alcantarillado sanitario que transporta las aguas residuales domésticas (ARD) al sistema de tratamiento. En la planta se adecuó un sistema de rejillas y un desarenador previo a un TS, se implementó un medio de soporte de aros de guadua en los FAFAs, y se construyeron siete HAFSS con un área total de 750 m<sup>2</sup>, en los que se alternó el medio de soporte (grava y arena gruesa) y la especie

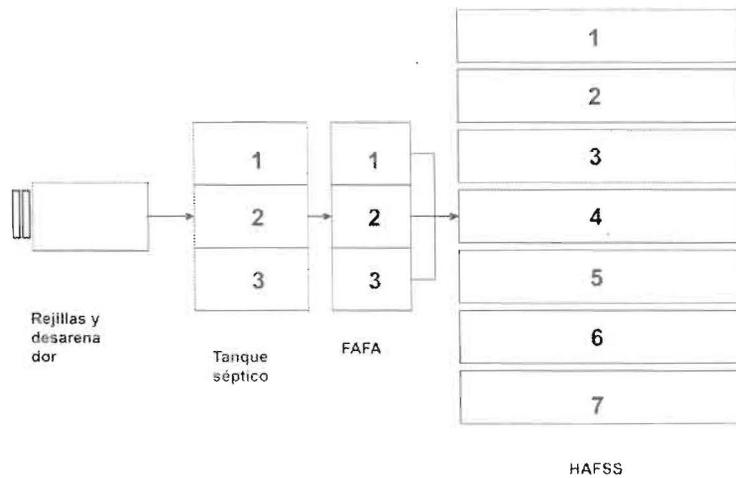


Figura 4. Sistema de tratamiento de aguas residuales en "La Florida".



Figura 5. Postratamiento mediante HAFSS.

sembrada (jengibre, papiro y *Typha* sp.). La planta optimizada se encuentra en operación desde Diciembre de 2003. Desde el 19 de febrero de 2004 se ha llevado a cabo la caracterización del afluente y el efluente del sistema TS-FAFA-HAFSS implementado. Mediante monitoreos mensuales tomando muestras compuestas ponderadas, alternando mediciones diurnas y nocturnas. La planta de tratamiento de las aguas residuales en la localidad "La Florida" trata un caudal promedio de  $1,85 \pm 0,4$  L/s.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Filtros anaeróbicos de flujo ascendente (FAFA) a escala piloto

Si bien las aguas residuales originadas en el campus universitario no corresponden a un agua residual doméstica típica, sus características (Tabla 7) corresponden a un agua residual de concentración débil [12], lo que permite la aplicabilidad de los resultados a aguas residuales domésticas diluidas como es el caso de muchas localidades rurales de Colombia. Para los parámetros analizados, DQO, DBO<sub>5</sub> y SST, la distribu-

ción de datos muestra una menor dispersión en los valores de salida para los tratamientos correspondientes a 2 unidades en serie (2V)(Q). La explicación de lo anterior puede estar dada por la importancia que tiene el medio en la retención de sólidos lo cual redundo en mejores eficiencias de remoción de DQO y DBO<sub>5</sub> y SST (Figuras 6, 7 y 8).

El análisis de varianza, permite establecer que existen diferencias significativas en cuanto a la configuración ( $p = 0,04$ ). Al duplicar el volumen (duplicar la longitud del medio), se generan diferencias en la eficiencia que resultan estadísticamente significativas, pero que producen incrementos marginales en eficiencia que no justifican el sobre costo implícito en la adición de otra unidad.

Además, aunque se rechaza la hipótesis nula, la potencia de la prueba es baja (0,871) evidenciándose la necesidad de realizar más repeticiones, lo que en la práctica se hace difícil debido a la limitación de recursos. Por otro lado, se tiene que para iguales cargas hidráulicas, no existen diferencias significativas ( $p = 0,266$ ) entre medios en cuanto a remoción, por lo cual parece viable el reemplazar el medio tradicional de grava por el de

Tabla 7  
Valores DQO – DBO<sub>5</sub> – SST

| Afluente        |                  | Intervalo de confianza para la media (95%) |                |
|-----------------|------------------|--|----------------|
|                 | DQO Entrada      | DBO5 Entrada                               | SST Entrada    |
|                 | $249,4 \pm 16,7$ | $137,9 \pm 9,5$                            | $78,2 \pm 4,2$ |
| Efluente        |                  | Intervalo de confianza para la media (95%) |                |
| Tratamiento     | DQO Salida       | DBO5 Salida                                | SST salida     |
| Guadua (V)(Q)   | $121,4 \pm 22,7$ | $55,9 \pm 8,6$                             | $27,9 \pm 4,1$ |
| Guadua (2V)(Q)  | $100,7 \pm 18,9$ | $51,3 \pm 6,5$                             | $22,3 \pm 3,0$ |
| Guadua (V)(Q/2) | $125,0 \pm 24,6$ | $58,0 \pm 10,3$                            | $31,3 \pm 7,5$ |
| Grava (V)(Q)    | $129,7 \pm 24,0$ | $61,5 \pm 10,3$                            | $30,0 \pm 6,1$ |
| Grava (2V)(Q)   | $112,1 \pm 19,5$ | $55,6 \pm 9,5$                             | $26,5 \pm 6,2$ |
| Grava (V)(Q/2)  | $128,5 \pm 24,2$ | $61,5 \pm 10,0$                            | $31,1 \pm 5,5$ |
| % de Remoción   | Remoción DQO     | Remoción DBO5                              | Remoción SST   |
| Global          | $49,6 \pm 2,6$   | $56,6 \pm 2,1$                             | $62,4 \pm 5,5$ |

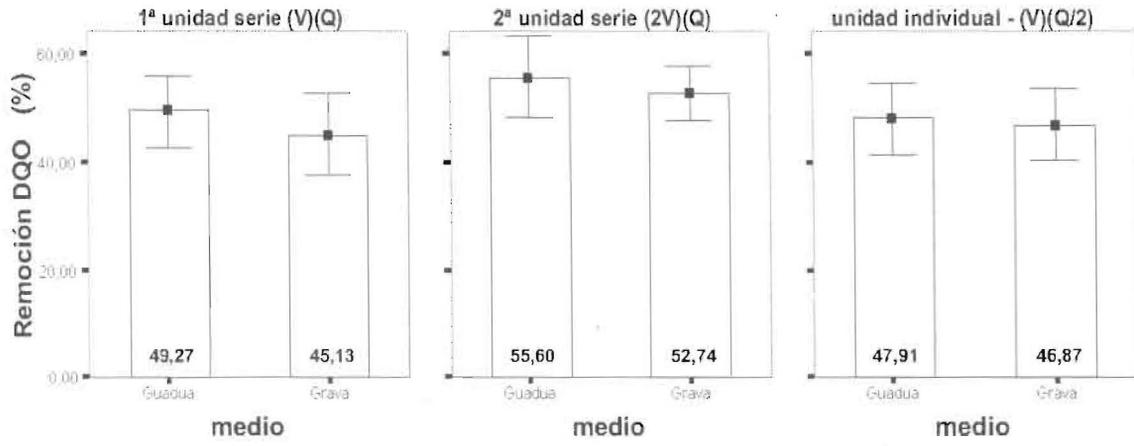


Figura 6. Eficiencias de remoción de DQO (Las barras de error representan el Intervalo de confianza al 95 % para la media).

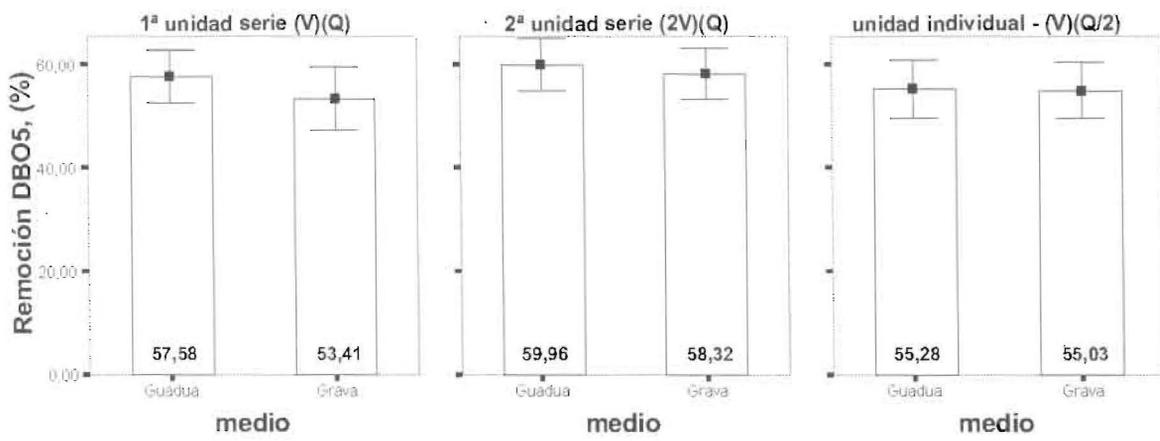


Figura 7. Eficiencias de remoción de DBO5 (Las barras de error representan el Intervalo de confianza del 95% para la media).

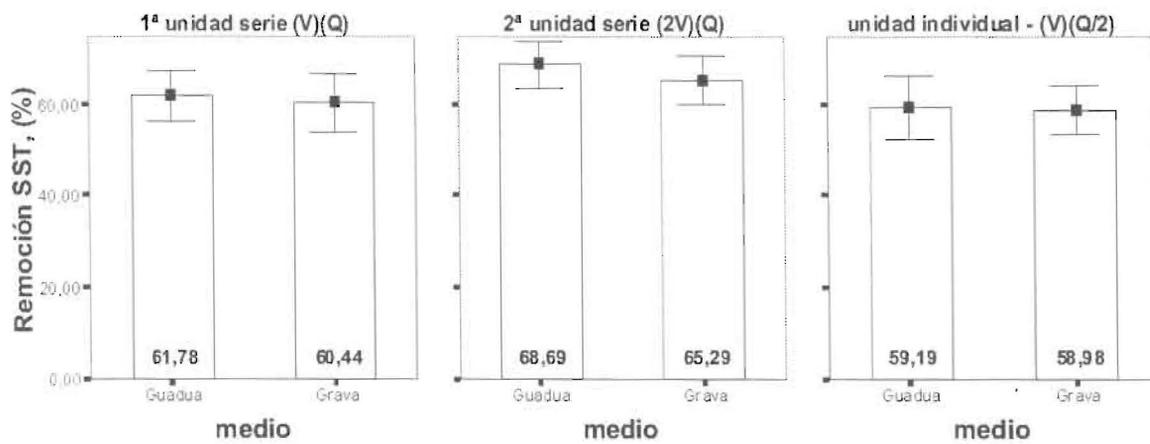


Figura 8. Eficiencias de remoción de SST (Las barras de error representan el Intervalo de confianza del 95% para la media).

guadua, lo que redundaría en unidades sometidas a menores cargas estructurales y de volúmenes reducidos en un porcentaje cercano al 30%, debido a la mayor porosidad y menor densidad aparente y real de este tipo de lecho (Tabla 2). Aunque no se determinó el área específica del material filtrante, existen experiencias [13] en las cuales se concluye, después de operar reactores con diferentes tipos de medios filtrantes, que el área específica del material filtrante tiene una baja influencia sobre el desempeño del reactor, lo anterior se explica en que una apreciable proporción de los microorganismos se encuentran suspendidos en los intersticios del medio y no adheridos al mismo [14].

De acuerdo con los resultados para cada medio independientemente, al duplicar el tiempo de retención sólo se presentan mejoras en la eficiencia cuando se duplica el volumen. En ningún caso las mejoras al duplicar el TRH superaron el 10%, siendo inferiores a los valores de 12 al 17% reportadas por Young [15].

### 3.2. Humedales artificiales de flujo subsuperficial

En general, no se presentaron diferencias de eficiencia según el medio filtrante para la mayor parte de los parámetros evaluados. Aunque los humedales con medio de arena removieron en promedio mayor porcentaje de  $\text{DBO}_5$  ( $p = 0,043$ ), estos sistemas presentaron inconvenientes hidráulicos como taponamientos y cortocircuitos superficiales. De acuerdo con los resultados ob-

tenidos en cuanto a tasas de remoción de  $\text{DBO}_5$ , los HAFSS pueden completar remociones del 80%, en el conjunto TS-FAFA-HAFSS, con tiempos de retención cercanos a un día en los HAFSS. Cabe anotar que, bajo condiciones tropicales, las unidades evaluadas trataron cargas superficiales superiores a las recomendadas por la literatura (112 Kg  $\text{DBO}_5/\text{ha.d}$ ) [16, 17]. Las remociones de coliformes fecales y totales no superaron los 2 órdenes logarítmicos bajo las condiciones de estudio. Sin embargo, estos resultados bajos, en contraste a los obtenidos con tiempos de retención recomendados para remover este tipo de contaminación [16, 18], son significativos si se considera que el tiempo de retención hidráulico fue menor a 1 día en todas las unidades. La Tabla 8 presenta las eficiencias de remoción de  $\text{DBO}_5$  y las cargas aplicadas para cada una de las unidades. La Figura 9 muestra la remoción de coliformes fecales en los HAFSS.

### 3.3. Sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas en "La Florida"

A partir de los resultados de laboratorio en cuanto al paquete TS-FAFA-HAFSS, se adecuó la planta de tratamiento existente en "La Florida". Allí como se mencionó anteriormente, se reemplazó el medio tradicional de grava por el de guadua en el empaque de los filtros anaeróbicos existentes, con ello se garantizaba desempeño similar a los empacados con grava con la ventaja de no redundar en sobre costos, además de ser la guadua un material menos denso. Así mismo se imple-

Tabla 8  
Cargas de  $\text{DBO}_5$  aplicadas y porcentajes de remoción

| Medio Filtrante | Especie Sembrada | Carga aplicada $\text{DBO}_5$<br>(Kg/ha.d) | Remoción $\text{DBO}_5$<br>% |
|-----------------|------------------|--|------------------------------|
| Arena           | Junco            | 114,7                                      | 69,02 ± 5,8                  |
| Arena           | Jengibre         | 114,7                                      | 51,9 ± 18,1                  |
| Arena           | Typha            | 114,7                                      | 52,9 ± 19,9                  |
| Arena           | Control          | 114,7                                      | 55,9 ± 14,8                  |
| Grava           | Junco            | 149,7                                      | 58,4 ± 14,7                  |
| Grava           | Jengibre         | 149,7                                      | 41,5 ± 33,4                  |
| Grava           | Typha            | 149,7                                      | 34,2 ± 39,4                  |
| Grava           | Control          | 149,7                                      | 41,1 ± 27,3                  |

mentó un sistema de HAFSS como post-tratamiento del sistema TS-FABA existente, en conocimiento de que es posible trabajar con cargas superficiales superiores a lo recomendado por la literatura, sin importar el medio de soporte o el tipo de planta. La Tabla 9 presenta los resultados de evaluación de este sistema de tratamiento.

La Figura 10 compara mediante cajas esquemáticas las eficiencias de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub> y SST para cada una de las etapas de tratamiento: TS, FABA y HAFSSs. Como se puede apreciar la combinación TS-FABA por sí sola no permite alcanzar remociones que cumplan con los requerimientos de ley [6], por lo que se resalta

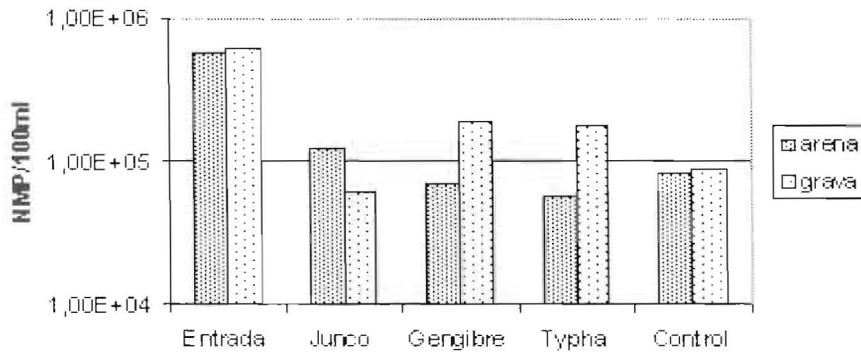


Figura 9. Remoción de coliformes fecales en HAFSS.

Tabla 9

Evaluación de eficiencia en la planta de "La Florida" (Medias ± Límite de confianza al 95%)

| Parámetro                                     | Afluente              | Efluente              |
|---|-----------------------|-----------------------|
| DBO5 (mg/L)                                   | 166,5 ± 68,281        | 36,6 ± 21,7           |
| DQO (mg/L)                                    | 261,4 ± 94,6          | 49,3 ± 24,2           |
| SST(mg/L)                                     | 126,6 ± 71,86         | 10,5 ± 3,9            |
| Coliformes totales <sup>(1)</sup> (UFC/100mL) | 1,9 * 10 <sup>7</sup> | 8,4 * 10 <sup>4</sup> |
| Coliformes fecales <sup>(1)</sup> (UFC/100mL) | 1,7 * 10 <sup>7</sup> | 6,7 * 10 <sup>4</sup> |

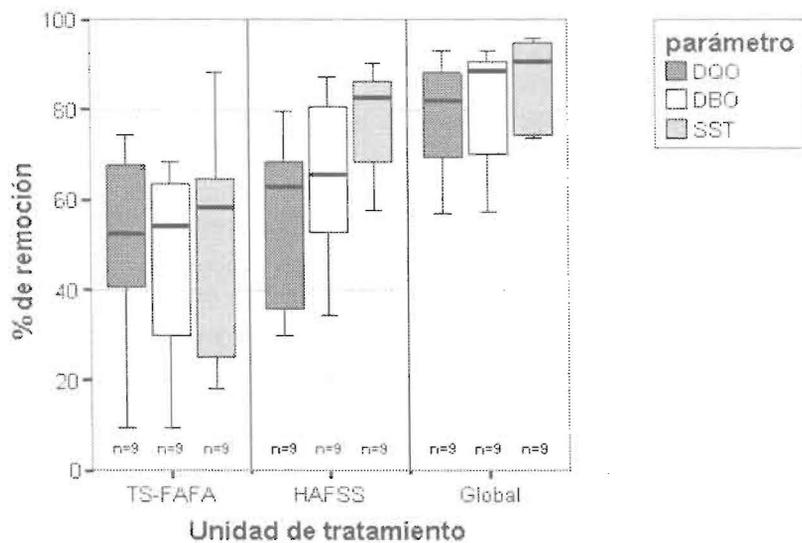


Figura 10. Eficiencias de remoción en las unidades de la planta.

la conveniencia de la implementación del postratamiento mediante humedales. El sistema global ha demostrado eficiencias de remoción acordes con lo requerimientos legales, con una tendencia a la estabilización para la  $DBO_5$  y la DQO, alcanzándose para 9 caracterizaciones un promedio de eficiencias de 78,1% y 81,14 para  $DBO_5$  y DQO respectivamente, resaltando que en algunas de estas caracterizaciones se ha superado el 90% para estos parámetros.

#### 4. Conclusiones

La guadua, como medio de soporte en sustitución de la grava, permite filtros anaeróbios de un tamaño hasta 30% menor, con la consecuente reducción en costos de construcción para un caudal de diseño dado. Así mismo, para tratar aguas residuales domésticas diluidas, TRHs mayores a 4 horas no contribuyen a incrementos significativos de eficiencia de remoción y resultan en sobre costos de construcción. Ni el tipo medio filtrante, ni la especie sembrada determinaron diferencias significativas en las eficiencias de remoción de los HAFSS evaluados, operando a TRHs inferiores a 1 día. En todo caso, el conjunto TS-FAFA, bajo las condiciones de operación impuestas durante el estudio, no es apto para alcanzar remociones en carga superiores al 80% en aguas residuales domésticas diluidas, para superar esta eficiencia (> 80%) se precisa postratamiento mediante HAFSS. Finalmente, se cuenta con una comunidad de una pequeña localidad colombiana comprometida con la operación y el mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, basada en el esquema TS-FAFA-HAFSS y construida con base en los resultados a escala piloto obtenidos durante el estudio resumido en el presente artículo, los humedales como sistema de postratamiento, han demostrado un gran resiliencia y estabilidad, a pesar de la discontinuidad de mantenimiento que se ha dado en el sistema TS-FAFA, debido a inconsistencias al definir la entidad responsable de esta actividad.

#### Agradecimientos

El proyecto de investigación fue financiado por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología (Colciencias), la Univer-

sidad Tecnológica de Pereira y la Agencia Alemana de Cooperación Técnica, GTZ. Importantes contribuciones han sido hechas por el Dr. Peter Kuschik del Grupo de Investigación en Fitoremediación del UFZ (Centro de Investigaciones Ambientales Leipzig-Halle, Alemania).

#### Referencias Bibliográficas

1. Departamento Nacional de Planeación., Ministerio del Medio Ambiente., Ministerio de Desarrollo Económico.: "Documento Conpes 31777, Acciones prioritarias y lineamientos para la Formulación del Plan Nacional de manejo de Aguas Residuales". Bogotá, D.C, Colombia, 2002.
2. Departamento Nacional de Planeación: "Plan Nacional de Desarrollo 2004-2006: Hacia un Estado Comunitario", Bogotá, D.C, Colombia, 2003.
3. Matagi S.V., Swai D., Mugabe R.: "A Review of heavy Metal Removal Mechanisms in Wetlands". Afr. J. Trop. Hydrobiol. Fish., 8 23-35 (1998).
4. Denny P.: "Implementation of Constructed Wetlands in Developing Countries". Wat. Sci. Tech. Vol. 35, N° 5 (1997) 27-34.
5. Paredes D. y Guerrero J.: Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales de Pequeños y Medianos Municipios de Colombia. En: Memorias del V Seminario Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga (2002) 189-198.
6. Ministerio de Agricultura: Decreto 1594 del 26 de junio de 1984.
7. Zambrano D., Isaza J.D., Rodríguez N. & López U.: "Tratamiento de Aguas Residuales del Lavado del Café". CENICAFE Boletín Técnico No. 20 (1999).
8. APHA.: "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 20th ed, American Public Health Association, Washington, D.C, 1996.
9. Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFE): "Anuario Meteorológico Cafetero", Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Chinchiná (Colombia) 2002-2003.

10. Villegas N.P.: "Reconocimiento de Especies del Complejo Chisa Asociadas al Cultivo de Cebolla y Pasto en la localidad de La Florida, Risaralda. Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Manizales (Colombia) 2004.
11. Arboleda J.; "Teoría y Práctica de la Purificación del Agua". Tercer edición, tomo 2. McGraw Hill. Bogotá, 2000.
12. Metcalf & Eddy.: "Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento vertido y reutilización". Tomo I, 3 ed, p. 125, Mc Graw Hill, México, 1996.
13. Kamiyama, Hissashi. Revisao e aperfeicoamento do sistema tanque séptico-filtro anaeróbico para o tratamento de esgoto sanitario. En: Revista DAE-SABESP. No. 169 (Enero/Febrero 1993); pp 1-12.
14. Campos, José Roberto. Proyecto y operación de filtros anaerobios para el tratamiento de efluentes líquidos industriales. En: Taller Regional y Conferencia sobre Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales en América Latina. (1990: Ciudad de México).
15. Young J.C.: "Factors Affecting the Design and Performance of Upflow Anaerobic Filters". Wat. Sci. Tech. Vol. 24, N° 8 (1991) 133-155.
16. Crites R.W., Tchobanoglous C.: "Small and Decentralized Wastewater Management system", Mc Graw Hill International., Singapore, 1998.
17. Romero J.: "Tratamiento de Aguas Residuales Teoría Y Diseño", Escuela Colombiana de Ingeniería., Bogotá, 1999.
18. Williams J.B., Zambrano D., Ford M.G., May E., Butler J.E.: "Constructed Wetlands for Wastewater treatment in Colombia". Wat. Sci. Tech. Vol. 40, N° 3 (1999) 217-223.

Recibido el 23 de Noviembre de 2004

En forma revisada el 16 de Julio de 2006