

# **Evaluación de humedales artificiales a escala piloto para el tratamiento secundario de efluentes agroindustriales**

**Claudia Belén López Revelo**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano  
Honduras**

Noviembre, 2016

ZAMORANO  
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

# **Evaluación de humedales artificiales a escala piloto para el tratamiento secundario de efluentes agroindustriales**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**Claudia Belén López Revelo**

**Zamorano, Honduras**

Noviembre, 2016

## **Evaluación de humedales artificiales a escala piloto para el tratamiento secundario de efluentes agroindustriales**

**Claudia Belén López Revelo**

**Resumen:** En la elección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, algunas de las consideraciones más importantes son el costo de inversión y la eficiencia de remoción de contaminantes. Los humedales artificiales representan una alternativa para el tratamiento de agua residuales, debido a que son sistemas de depuración eficientes en la eliminación de materia orgánica, nutrientes y sólidos en suspensión. El objetivo de la investigación fue evaluar la aplicabilidad de humedales artificiales con flujo sub-superficial como tratamiento secundario de efluentes agroindustriales. Estos efluentes fueron tomados en la salida de la fosa séptica interconectada a un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) que trata el agua residual generada de las plantas de hortofrutícola, post cosecha y mieles de la EAP, Zamorano. Los ensayos fueron realizados en dos réplicas de humedales artificiales y en condiciones naturales. Dichas réplicas se dividían en tres etapas y contenían arena fina y grava como medios filtrantes. Para fines de este estudio se utilizó la de planta *Heliconia psittacorum* como fitorremediadora para la simulación del humedal. Se determinó que los humedales artificiales operan con una carga de 4.81 g SV/m<sup>2</sup>-día removiendo concentraciones del 40% en fosfatos, 70% de nitrógeno total y 50% de materia orgánica. Los resultados obtenidos demostraron que los humedales artificiales pueden ser utilizados como tratamiento secundario de aguas residuales.

**Palabras clave:** Agua residual, fitorremediación, *Heliconia psittacorum*.

**Abstract:** In the selection of technologies for wastewater treatment some of the most relevant considerations are the investment cost and pollutant removal efficiency. Artificial wetlands represent an alternative for treatment of wastewater due to their efficiency in the removal of organic matter, nutrients and suspended solid. The objective of this study was to evaluate the applicability of artificial wetlands with subsurface flow for the secondary treatment of agro-industrial effluents. The effluents came from the septic tank interconnected to the Upflow Anaerobic Filter (FAFA for its acronym in Spanish) which treats wastewater generated in the fruit and vegetable processing plants, post-harvest and the honey processing plant in EAP Zamorano. The essays were conducted in two replicas of artificial wetlands, in natural conditions. The replicas were divided in three stages and contained fine sand and gravel as filter media. The plant *Heliconia psittacorum* was used as a source of phytoremediation for simulation of the wetland. It was determined that constructed wetlands operated with a charge of 4.81 g SV/m<sup>2</sup> diaries, removal concentrations of 40 % in phosphates, 70% in total nitrogen and 50% of organic matter. Recommending as a secondary treatment using artificial wetlands for wastewater treatment.

**Key words:** *Heliconia psittacorum*, phytoremediation, sewage water.

## CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas .....	ii
Resumen .....	iii
Contenido.....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos .....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>13</b>
<b>5. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>14</b>
<b>6. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>15</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>17</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

		Página
<b>Cuadros</b>		
1.	Análisis fisicoquímicos realizados para la caracterización de aguas. ....	4
2.	Características físicas y químicas de efluentes muestreados.....	7
3.	Carga orgánica diaria aplicada a humedales artificiales.....	8
4.	Concentraciones obtenidas en cada etapa de humedales artificiales. ....	9
<b>Figuras</b>		
1.	Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal .....	2
2.	Medidas de maceteros utilizados en la construcción de humedales artificiales .....	5
3.	Estructura y puntos de muestreo del sistema de tratamiento.....	6
4.	Comparación de remoción entre humedales artificiales.....	10
5.	Relación de carga orgánica aplicada y eficiencia de remoción en el tratamiento alimentado con agua de fosa la séptica. ....	11
6.	Comparación de tratamientos secundarios .....	11
<b>Anexos</b>		
1.	Sistema de humedales artificiales evaluado. ....	17
2.	Prueba de normalidad para etapas de humedales con efluente de fosa séptica.....	17
3.	Prueba ANOVA aplicada en Humedal artificial con efluente de fosa séptica.....	18
4.	Prueba Post hoc Tukey para humedal artificial con efluente de fosa séptica.....	18
5.	Prueba de normalidad en humedales con efluente de Filtro anaerobio. ....	18
6.	Prueba ANOVA aplicada en Humedal artificial con efluente de filtro anaerobio.....	19
7.	Prueba Post hoc Tukey para humedal artificial con efluente de filtro anaerobio.....	19

## 1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales a través de sistemas de depuración natural ha sido una de las alternativas más buscadas en la actualidad gracias a su alta eficiencia en remoción de contaminantes con bajos costos operativos. Los estudios de plantas acuáticas para la depuración de aguas contaminadas iniciaron en los años 70, analizando el comportamiento de su raíz como degradante de nutrientes en aguas residuales a través del método de la “zona de la raíz”, demostrando a través de los resultados obtenidos que los sistemas como estos pueden ser aplicados para la remoción de carga orgánica y nutrientes (Brix, 1987). Estos tratamientos son ahora conocidos como humedales, y estos consisten en ecosistemas que integran medios terrestres y acuáticos, donde el agua fluye continuamente saturando el suelo durante gran parte del año (Kadlec y Wallace, 2002).

Los humedales que son diseñados y construidos por el hombre para la obtención de sus beneficios se denominan humedales artificiales. Estos sistemas tienen como objetivo aprovechar los procesos físicos, químicos y biológicos, esto al unir sustratos de suelo, plantas y microorganismos para la biodegradación de materia orgánica y nutrientes en aguas residuales (Arias, Betancur, Gómez, Salazar y Hernández, 2010). La vegetación actúa como filtro biológico, transportando oxígeno desde las hojas hasta las raíces y al interactuar con el agua fija los nutrientes para metabolizarlos y descomponerlos. Además, ayuda a retener contaminantes en el sustrato, transformándolos en sustancias menos peligrosas, y de esta manera se remueve gran parte de la materia orgánica, sólidos y nutrientes (Peña, 2000).

Los sistemas de humedales artificiales más utilizados son los de flujo horizontal subsuperficial, ya que estos dejan fluir el agua residual de manera horizontal bajo la superficie del medio filtrante, desde el punto de distribución hasta el punto de descarga pasando a través del sustrato y las raíces de las plantas (Figura 1). El resultado de este proceso se considera como agua apta para ser vertida a cuerpos receptores y agua para poder reutilizarla en riego para cultivos (Arias et al., 2010).

Esta tecnología ambiental resulta altamente atractiva como alternativa en el tratamiento de aguas residuales debido a su alta efectividad y rentabilidad económica, ya que requiere bajos costos para construcción y operación, comparado con sistemas de tratamiento convencionales (Villegas, Guerrero, Castaño y Paredes, 2006). Estos sistemas son diseñados para tratar aguas residuales de diferente origen, como: agrícola, doméstico, agroindustrial y/o municipal. Se adecúan a las condiciones ambientales de cualquier sitio, además, gracias a su dinámica de funcionamiento logran equilibrar ecosistemas, naturalizar espacios y fortalecer microclimas (Secretaría de la Convención Ramsar, 2010).

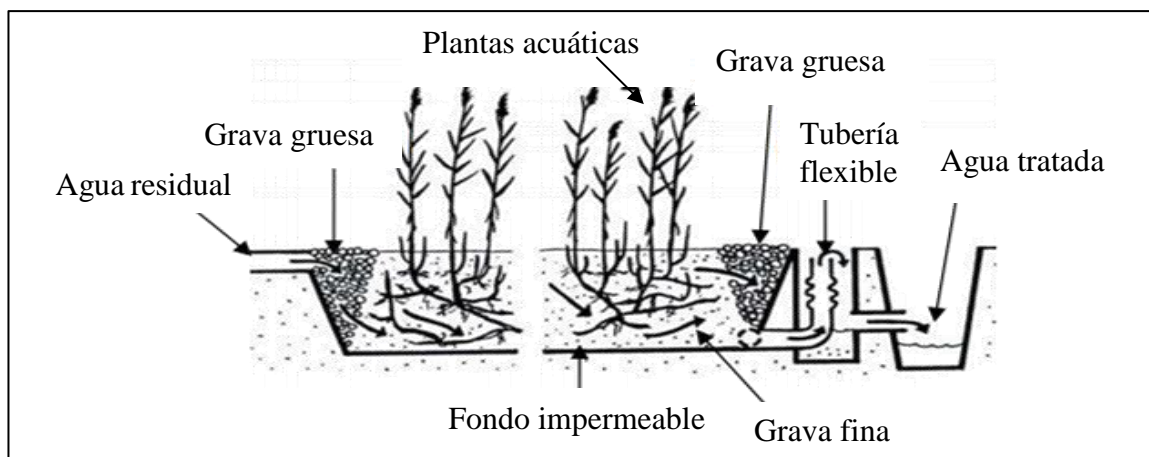


Figura 1. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.

Fuente: Mena (2010).

Los humedales artificiales requieren de una cantidad mínima de agua para mantenerse estables, sin embargo, no son sistemas constantes ya que presentan variaciones en su rendimiento al encontrarse expuestos a condiciones climáticas como lluvia y sequía. Estas variaciones afectan directamente el proceso de remoción de nutrientes y carga orgánica (Marín y Correa, 2010). Un inventario realizado en el 2007 indicó que las cargas orgánicas máximas aplicadas en humedales de flujo subsuperficial se encuentran en un rango de 0.8 a 23 g de  $\text{DBO}_5 \text{ m}^{-2}/\text{día}$ , cuyos rendimientos oscilan entre el 80 y 95% en la eliminación de  $\text{DBO}_5$  y el 40-50% de nutrientes (Puigagut, Villaseñor, Salas, Bécares y García, 2007) Las cargas orgánicas soportadas son relativamente bajas debido a que la vegetación, el medio filtrante y los microorganismos pueden llegar a colapsar ante una cantidad exagerada de sustancias tóxicas (Acero, 2014).

Las investigaciones en humedales artificiales de flujo subsuperficial tienen varios enfoques de estudio en la remoción de nutrientes y materia orgánica, probando diferentes tipos de vegetación, sustratos, caudales, carga orgánica y tipos de efluentes. Estudios realizados por Montoya y colaboradores (2010) evaluaron humedales artificiales de flujo subsuperficial usando tres tipos de vegetación: *Phragmites* sp., *Canna limbata* y *Heliconia psittacorum*, en donde removieron Demanda Química de Oxígeno (DQO) en un 97%, 95% y 94%, respectivamente, mostrando que las especies de plantas mencionadas son capaces de reducir contaminantes de aguas residuales domésticas (Montoya, Ceballos, Casas y Morato, 2010).

Por otro lado, se ha evaluado el desempeño de humedales artificiales con aguas provenientes del empacado de hortalizas, alcanzando porcentajes de remoción de DQO y  $\text{DBO}_5$  superiores al 90% (Navarro, García, Vázquez y Marrugo, 2013). Arias y colaboradores en el 2010, evaluaron la eficiencia que tiene un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas, cuyos resultados demostraron que existió remoción de nitrógeno en un 50% y fósforo en un 90%, esto indica que los humedales son aptos para remover diferentes tipos de efluentes (Arias et al., 2010).

La problemática asociada a la descarga de aguas residuales a cuerpos receptores deriva en el tipo de tratamiento que se le dé para cumplir con las normas legales de descarga. Comúnmente, el tratamiento de aguas residuales se limita al uso de una fosa séptica, a la cual se complementa un tratamiento secundario para incrementar la eficiencia de remoción de la carga orgánica previo a su descarga en cuerpo receptores. Uno de varios tratamientos para depuración de aguas considerados como secundarios es el Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) (Villegas et al., 2006).

Los FAFA's consisten de un medio de soporte con flujo ascendente que remueven gran parte de la carga orgánica de un afluente a través de una biopelícula de microorganismos anaeróbicos (Torres, Rodríguez y Uribe, 2003). No obstante, la principal desventaja de este tratamiento es la sensibilidad a bajas temperaturas menores a 20 °C (Batero y Cruz, 2007). Lo anterior implica una limitante de aplicación ya que pueden llegar a remover cargas orgánicas significativas pero presentar bajas eficiencias en remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo, por lo que se recomienda complementar el proceso con tratamientos posteriores para aumentar la calidad del efluente (Chernicharo, 2006).

La Escuela Agrícola Panamericana Zamorano trata las aguas residuales provenientes de las plantas agroindustriales hortofrutícola, mieles y post cosecha depositándolas en una fosa séptica como tratamiento primario, seguido de un FAFA, como tratamiento secundario, antes de ser vertido a la quebrada del Gallo. Conociendo las limitaciones de un sistema anaerobio y la necesidad de desarrollar tecnologías que sean amigables con el ambiente, es importante estudiar el comportamiento de humedales artificiales para optimizar la remoción de materia orgánica en el agua residual descargada a la quebrada y evitar riesgos en la salud de las comunidades aledañas que aprovechan el agua de la misma. Además, medir la aplicabilidad que llegase a tener el agua para reutilizarla en riego de cultivos o limpieza de equipos en las plantas agroindustriales.

Por dicha razón, el objetivo de este estudio es evaluar humedales artificiales de flujo sub-superficial, como tratamiento secundario de efluentes agroindustriales. Para ello se propuso: i) Construir un humedal artificial a escala piloto seleccionando materiales y vegetación local compatible con los objetivos del tratamiento. ii) Determinar la carga orgánica superficial utilizando las dimensiones del humedal que optimice el desempeño del sistema operando en forma continua. iii) Comparar la eficiencia de remoción de materia orgánica y nutrientes entre el humedal artificial y el filtro anaerobio actualmente implementado como tratamiento secundario.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización del estudio.** El estudio fue implementado en la Unidad de Energía Renovable de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, al aire libre.

**Toma de muestras y caracterización del efluente a tratar.** El efluente seleccionado para la operación de los humedales artificiales fue tomado en la salida de la fosa séptica que recibe a su vez el agua residual generada en las plantas de hortofrutícola, post cosecha y mieles de la EAP Zamorano. Adicionalmente, se tomó una muestra en la salida del Fafa, que actualmente funciona como tratamiento secundario del efluente resultante en la fosa séptica.

De cada punto de muestreo se tomaron aproximadamente 100 litros de efluente, trasladados por medio de recipientes de plástico hasta el sistema de humedales (Unidad de Energía Renovable) en donde se depositaron y almacenaron en bolsas de riego. El efluente abastecía la operación por aproximadamente cinco días, por lo tanto, el proceso de traslado se repitió siete veces para dar continuidad al estudio. Las muestras fueron sometidas a análisis fisicoquímicos para su caracterización (Cuadro 1).

Cuadro 1. Análisis fisicoquímicos realizados para la caracterización de aguas.

Parámetro	Método	Referencia
pH	9045 PH	APHA 2012
Nitrógeno Total	4500 NH3	APHA 2012
Sólidos Volátiles	2540 E	APHA 2012
Fosfatos	8048 Phos Ver 3	HACH 2004

**Diseño y construcción de humedales.** Dos réplicas del sistema de humedales fueron construidas para la evaluación de su desempeño en la remoción de materia orgánica y nutrientes de los efluentes seleccionados. Cada réplica consta de tres etapas con las mismas características de construcción, ubicadas en serie y a desnivel para favorecer el flujo por gravedad.

Se utilizaron maceteras rectangulares plásticas de 0.52 m de largo, 0.20 m de alto y 0.15 m de ancho (Figura 2), conectados entre sí por medio de tuberías PVC de 1 pulgada. Cada etapa o reactor del sistema fue dotada con medio filtrante de arena fina y grava (3 cm de diámetro). Sobre éste, se colocaron 12 plantas de la especie *Heliconia psittacorum* distribuidas aleatoriamente. *Heliconia psittacorum*, es una planta macrófita que se

caracteriza por la capacidad de acumular elementos inorgánicos y tolerar condiciones tóxicas en sus órganos (Peña, Madera, Sanchez y Medina, 2013). Estudios realizados con dicha especie demuestran remociones de nutrientes y materia orgánica arriba de un 70%, por esta razón fue escogida como parte del estudio.

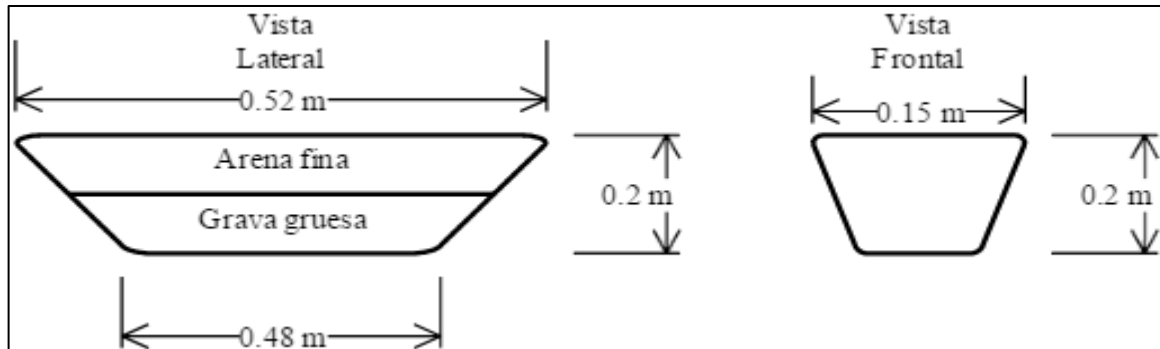


Figura 2. Medidas de maceteros utilizados en la construcción de humedales artificiales.

**Determinación de la carga orgánica superficial aplicada.** Los efluentes fueron dosificados de forma permanente al sistema por un extremo de las macetas, cuya agua residual fluía por cada etapa hasta llegar a la última maceta. La cantidad de agua entregada a cada sistema fue de 8.64 L/día controlado por medio de válvulas manuales, dicha agua se retenía en el sistema por 19 horas (TRH = 19 horas); adicionando al extremo opuesto de cada maceta válvulas con el fin de permitir la toma de muestras (Figura 3).

Los efluentes seleccionados para el tratamiento provienen de la mezcla de aguas residuales generadas en las plantas de post cosecha, mieles y hortofrutícola. Es necesario determinar la carga orgánica de dichos efluentes con el fin de determinar la eficiencia del sistema. La carga orgánica aplicada a los humedales se calcula mediante la ecuación 1.

$$CO = \frac{SV \left( \frac{mg}{L} \right) \times Q \left( \frac{L}{día} \right)}{AS} \quad [1]$$

En donde:

CO= carga orgánica

SV= cantidad de materia orgánica entrante medida en sólidos volátiles (mg/L)

Q= caudal entrante al sistema (L/día)

AS= área superficial (m<sup>2</sup>)

**Monitoreo del sistema de humedales y evaluación del desempeño.** Una vez dosificada el agua residual, se realizó la toma de muestras en intervalos de 3 días a la salida de cada una de las etapas del sistema de humedales (Figura 3), completando siete muestreos en un

periodo de operación de 30 días. En cada uno de ellos se tomó un volumen de 300 ml que fue trasladado al laboratorio para el análisis de los parámetros físicos y químicos descritos anteriormente (Cuadro 1). Las muestras fueron almacenadas a 4 °C, preservando para cada ítem una porción con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para el posterior análisis de nutrientes.

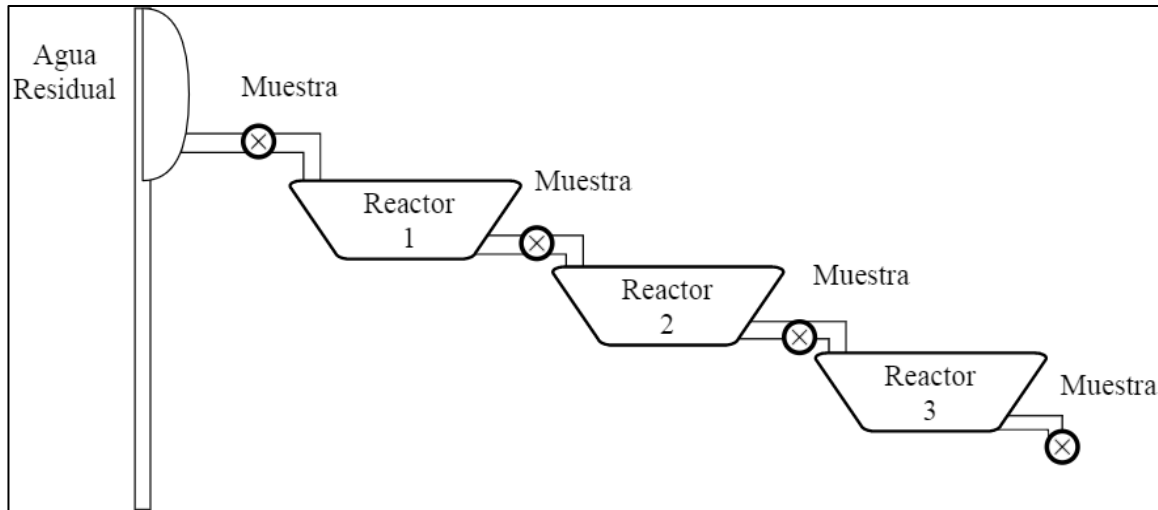


Figura 3. Estructura y puntos de muestreo del sistema de tratamiento.

Con el fin de encontrar la remoción total de sólidos totales, sólidos volátiles, nitrógeno total y fosfato en cada uno del tratamiento se aplicó la ecuación 2.

$$RT = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100 \quad [2]$$

Donde:

RT=Remoción total en porcentaje (%)

C<sub>0</sub>=Concentración inicial en mg/L

C<sub>f</sub>=Concentración final en mg/L

**Análisis estadístico.** Para estimar la variabilidad de los datos tomados de los efluentes se aplicó un coeficiente de variación que fue utilizado en la determinación del desempeño del sistema. Se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk con un nivel de significancia del 95% (p=0.05) para verificar la normalidad de los datos en las muestras tomadas. Posteriormente, se determinó la existencia de diferencias significativas entre la remoción de nutrientes y sólidos en las etapas de cada sistema de tratamiento mediante la aplicación de la prueba ANDEVA con un nivel de significancia del 95%, seguida de una prueba Post hoc Tukey para comparar el desempeño entre cada etapa. Este análisis permitirá la selección del número de etapas requerido para optimizar cada tratamiento.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Caracterización del efluente a tratar.** Las muestras tomadas fueron sometidas a análisis de los parámetros de nitrógeno total (NTK), fosfato (PO<sub>4</sub>), sólidos totales y sólidos volátiles en el laboratorio. Se determinó la variabilidad de las concentraciones de dichos parámetros a través de su coeficiente de variación (Cuadro 2), que indica que tan homogéneo es el efluente muestreado.

Cuadro 2. Características físicas y químicas de efluentes muestreados.

Parámetro	Unidad	Fosa séptica		Filtro anaerobio	
		Promedio	CV (%)*	Promedio	CV (%)*
pH	-	6.59 ± 0.40	6.07	5.88 ± 0.80	13.61
Nitrógeno Total	mg/L	10.02 ± 2.47	24.62	5.65 ± 1.65	29.15
Fosfato (PO <sub>4</sub> )	mg/L	2.25 ± 0.90	40.02	0.75 ± 0.08	10.27
Sólidos volátiles	mg/L	88.83 ± 34.02	38.30	32.4 ± 7.91	24.37

\*Coeficiente de variación expresado en porcentaje.

Los resultados obtenidos afirman que las concentraciones varían entre 20 y 40 %, es decir, la composición del efluente de la fosa séptica no resultó homogénea en los diferentes monitoreos realizados. Esto se debe a las limitaciones de las fosas sépticas como tratamiento primario de aguas residuales, en donde los sólidos más pesados se sedimentan en su mayoría, pero no existe una remoción significativa de materia orgánica y nutrientes, dando como resultado una apreciable variabilidad en las concentraciones de sus componentes. Por otro lado, el efluente resultante del filtro anaerobio muestra menor variabilidad de concentraciones entre sí, lo cual es propio de un tratamiento secundario, que se enfoca en la remoción de nutrientes y materia orgánica, amortiguando las sobrecargas al sistema lo cual resulta en una mezcla con mayor homogeneidad.

Actualmente, el FAFA se encuentra removiendo concentraciones de fosfatos y sólidos volátiles en un 60 % y apenas un 26% de nitrógeno total, lo cual indica que el sistema es deficiente en la remoción de este parámetro. Maldonado y Ramón (2006) confirman que la biopelícula conformada en un FAFA remueve más cantidad de materia orgánica que nutrientes, este comportamiento se encuentra relacionado con la infraestructura del sistema, mientras mejor se adecúen las condiciones para los microorganismos, mayor será la eficiencia del sistema.

**Determinación de la carga orgánica aplicada.** Los humedales artificiales fueron suministrados un caudal constante de 8.64 L/día para la operación del tratamiento por espacio de 30 días. La carga orgánica aplicada diariamente (CO) es dependiente de la concentración de sólidos volátiles presente en cada lote de efluente a tratar. Los resultados muestran que los efluentes presentan cargas orgánicas diferentes, mismas que fueron dosificadas a cada sistema de tratamiento (Cuadro 3).

Cuadro 3. Carga orgánica diaria aplicada a humedales artificiales.

Muestreo	Fosa Séptica		Filtro Anaerobio	
	SV (mg/L)	CO (g SV/día)	SV (mg/L)	CO (g SV/día)
1	66.67	0.58	23.33	0.20
2	83.00	0.72	28.00	0.24
3	90.00	0.78	43.33	0.37
4	56.00	0.48	33.33	0.29
5	84.00	0.73	40.00	0.35
6	153.33	1.32	26.67	0.23
<b>Promedio</b>	88.83	0.77	32.44	0.28
<b>Desviación estándar</b>	34.02	0.29	7.91	0.07

Al realizar los cálculos fue posible identificar que, la carga orgánica diaria suministrada al operar con el efluente de la fosa séptica, fue de 0.77 mg/L día y de 0.28 mg/L al día al suministrar el efluente resultante del filtro anaerobio. El valor más elevado de carga orgánica se registra en el efluente de la fosa séptica. Esto es producto de un tratamiento primario del cual los componentes orgánicos no han sido removidos totalmente y por ello existe mayor concentración de carga orgánica. El filtro anaerobio remueve parte de esta materia orgánica durante su operación, por lo tanto, el producto de este tratamiento resulta en menores cantidades de carga orgánica. Por consiguiente, los sistemas de humedales artificiales fueron dotados con estas cargas orgánicas respectivamente.

**Área superficial requerida para el tratamiento.** Se determinó el área superficial óptima para la carga orgánica aplicada en cada sistema de humedales, a través de los resultados promedios obtenidos en el periodo de evaluación en cada una de las etapas de los sistemas de tratamiento medidos en concentraciones (Cuadro 4).

Se registran variaciones en las eficiencias de remoción en las etapas de ambos humedales, por lo que se realizó la comparación de las concentraciones alcanzadas por cada etapa de los tratamientos, por separado, mediante una ANDEVA complementada por una prueba Tukey con un nivel de significación de 95% y un  $p=0.05$ , encontrando diferencias significativas en la remoción de nutrientes y sólidos.

Cuadro 4. Concentraciones obtenidas en cada etapa de humedales artificiales.

Parámetro	Fosa séptica			
	Efluente	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
NTK	10.35 ± 2.41	3.25 ± 1.26	2.32 ± 0.96	1.8 ± 0.94
PO <sub>4</sub>	2.50 ± 1.05	1.39 ± 0.11	1.25 ± 0.14	0.90 ± 0.18
SV	88.83 ± 34.02	74.56 ± 39.10	43.94 ± 11.57	87.89 ± 36.11
Filtro Anaerobio				
NTK	7.16 ± 2.64	1.8 ± 1.12	1.4 ± 0.92	1.16 ± 0.65
PO <sub>4</sub>	0.74 ± 0.07	0.46 ± 0.14	0.11 ± 0.02	0.04 ± 0.01
SV	32.44 ± 7.91	139.56 ± 45.88	41.00 ± 23.59	53.42 ± 29.50

Por tanto, el sistema que trató el efluente de la fosa séptica, removió concentraciones significativas de los parámetros evaluados en las primeras dos etapas, pero no se presentan diferencias significativas en las etapas 2 y 3 ( $p < 0.05$ ). En consecuencia, una tercera etapa no se considera necesaria para tratar la carga orgánica aplicada. Por consiguiente, al tomar en cuenta dos maceteras con un área de 0.078 m<sup>2</sup>, la suma de ellas es el área necesaria para tratar una carga orgánica de 0.77 g de SV diarios resultando un total de 0.16 m<sup>2</sup>. Se determina, que el humedal artificial operó con una carga de 4.81 g SV/m<sup>2</sup> al día.

Para el caso del sistema operado con el agua residual proveniente del filtro anaerobio, se requirió del área superficial de tres etapas, ya que no presentan diferencias significativas en la reducción de la concentración de los parámetros evaluados entre las etapas ( $p > 0.05$ ). Considerando estos resultados, el humedal no representa un aporte en la mejora del efluente del filtro anaerobio, debido a que la carga orgánica total aplicada de 1.21 g SV/ m<sup>2</sup> día no representó una carga lo suficientemente alta para que los componentes del humedal (vegetación y sustrato) degraden concentraciones significativas de los parámetros: fosfato, nitrógeno total y sólidos volátiles.

**Eficiencia de remoción y desempeño del sistema.** Una vez seleccionada el área superficial de cada sistema de tratamiento, se comparó la remoción de concentraciones obtenidas al final de ellas (Figura 4).

El parámetro que fue removido en mayor porcentaje, en la etapa dos, del sistema de humedales alimentado con aguas de fosa séptica, fue el nitrógeno total, con promedio del 77%, lo cual indica que las condiciones brindadas de vegetación y medio filtrante fueron capaces de remover una cantidad considerable de dicho parámetro. En la misma etapa, los fosfatos fueron removidos en un 42% y los sólidos volátiles el 50%, es decir la materia orgánica degradó en su mayoría las concentraciones iniciales.

El sistema alimentado con efluente del filtro anaerobio presentó una remoción total de 94% de fosfato y un 84% de nitrógeno total, que indican que las condiciones dadas para el

sistema remueven la mayor concentración de dichos parámetros. Sin embargo, en esta etapa no mostró un porcentaje de remoción total significativo de sólidos volátiles con respecto a las concentraciones que ingresan al sistema, debido a que la carga orgánica aplicada fue baja y el humedal no removió de forma significativa este parámetro.

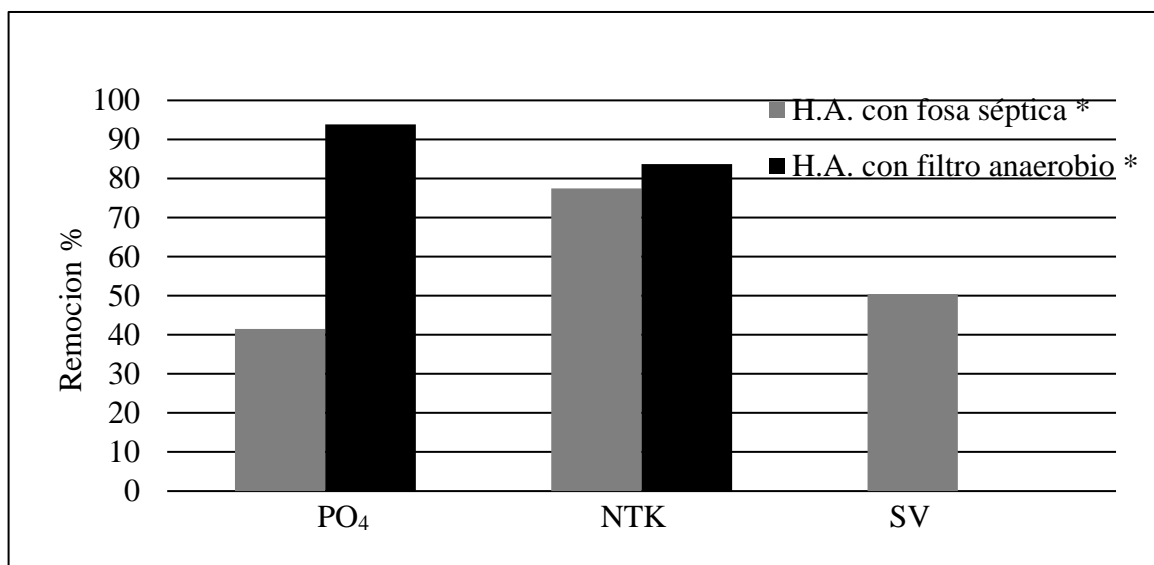


Figura 4. Comparación de remoción entre humedales artificiales.

\*Humedal artificial alimentado con efluente de fosa séptica.

\*Humedal artificial alimentado con efluente de filtro anaerobio.

Al comparar las cargas orgánicas aplicadas en los humedales artificiales en conjunto con las eficiencias de remociones obtenidas en las etapas seleccionadas, los resultados muestran que el humedal donde se trató el efluente de la fosa séptica obtuvo menores porcentajes de remoción comparado con una carga orgánica mayor aplicada en un área superficial de menor tamaño. El humedal artificial alimentado con el efluente del filtro anaerobio que presentó mayores porcentajes de remoción de nutrientes, sin embargo, se debe recalcar que no presentó diferencias significativas en las concentraciones removidas entre las diferentes etapas. En consecuencia, el humedal artificial alimentado con efluente de fosa séptica mostró la mejor eficiencia y puede ser implementado como tratamiento secundario después de la fosa séptica.

Lo anterior indica que la vegetación propuesta (*Heliconia psittacorum*) aprovecha de mejor manera los efluentes ricos en nutrientes o carga orgánica alta, como son los resultantes de una fosa séptica, para presentar remociones relativamente altas. Por tanto, se observa que existe una relación directa entre la carga orgánica y su remoción al utilizar humedales artificiales, marcando la tendencia de que al incrementar la carga orgánica se registra un mayor porcentaje de remoción (Figura 5).

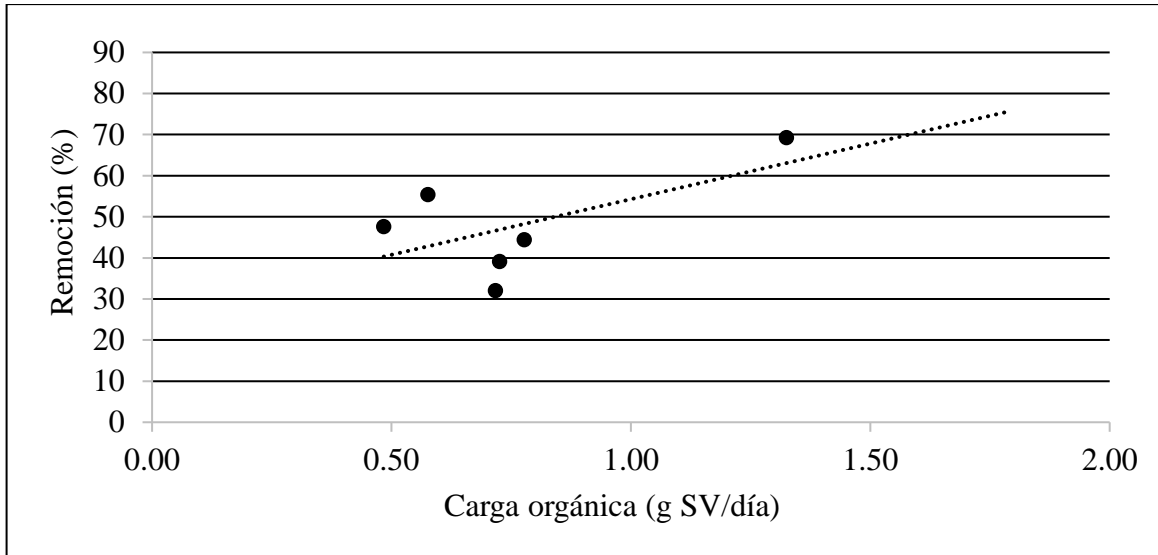


Figura 5. Relación de carga orgánica aplicada y eficiencia de remoción en el tratamiento alimentado con agua de fosa séptica.

**Comparación de humedales artificiales con filtro anaerobio.** A raíz de estos resultados, se comparan los sistemas de tratamiento como secundarios (Figura 6).

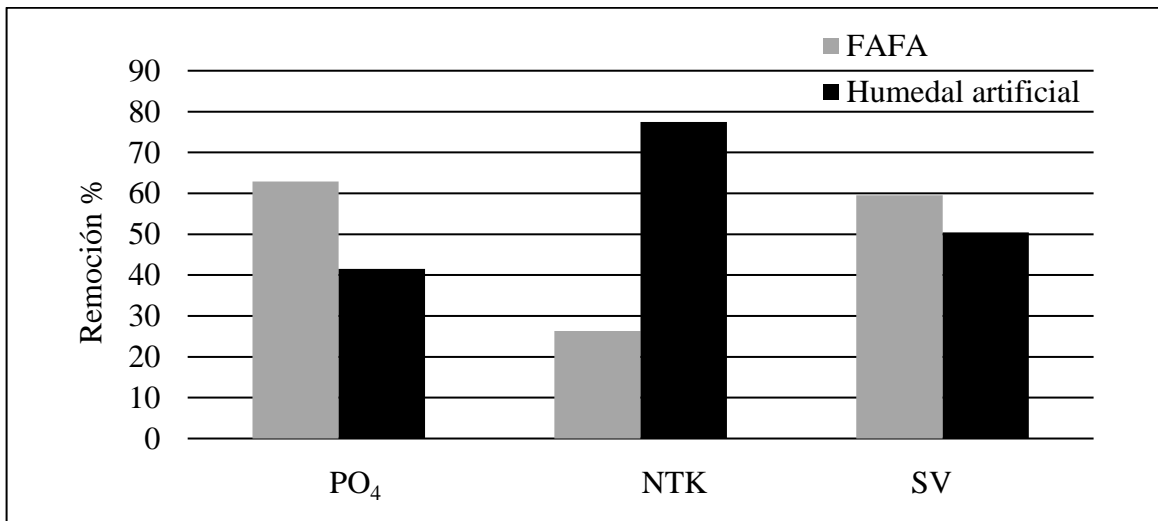


Figura 6. Comparación de tratamientos secundarios.

Los resultados muestran que el tratamiento FFAFA actualmente implementado como secundario, tiene remociones superiores en fosfatos en comparación con el humedal artificial. Sin embargo, en cuanto a nitrógeno total se observa lo contrario, el humedal artificial removió el 77% de nitrógeno total en comparación al 26% removido en el FFAFA, es decir, aproximadamente tres veces más; esto significa que el humedal artificial es mucho más eficiente en la remoción de dicho parámetro y es aplicable a este tipo de aguas



residuales. Estos efluentes contienen altas concentraciones de nitrógeno gracias a las actividades realizadas en las plantas. Cárdenas y Sánchez (2013) señalan que reducir concentraciones de nitrógeno total previo a una descarga en aguas superficiales es importante debido a que su presencia en cuerpo receptores de agua aumenta la acidez, eutrofización y niveles tóxicos de concentraciones, limitan el uso de este recurso para consumo humano, riego o acuacultura. Por lo tanto, un humedal artificial contribuirá a la remoción y prevenir los mencionados problemas.

La remoción de sólidos volátiles de ambos tratamientos es similar (50%-60%), afirmando que ambos sistemas funcionan como tratamientos secundarios después de la fosa séptica. Los porcentajes de remoción encontrados son cantidades consideradas eficientes en cuanto a la depuración de aguas, sobre todo en el tratamiento de humedales artificiales, ya que, al considerar el tiempo de retención hidráulica dado, que en este caso es relativamente bajo (TRH=19horas), a comparación de varios estudios realizados que superan las 24 horas de retención, presenta remociones altas de materia orgánica.

Ambos tratamientos remueven cantidades considerables de fosfatos y materia orgánica. No obstante, la utilización de humedales artificiales es una forma natural de depuración de aguas residuales que minimizan costos de inversión y de mantenimiento. No se invierte en energía adicional para su funcionamiento gracias a que plantas, microorganismos y el sustrato cumplen con la degradación eficiente de materia orgánica y nutrientes. Para este caso, este tratamiento remueve cantidades considerables de nitrógeno total.

## 4. CONCLUSIONES

- La aplicación de humedales artificiales como tratamiento secundario mostró una remoción de 40% de fosfatos, 70% de nitrógeno total y el 50% de materia orgánica presente en los efluentes, demostrando un mejor desempeño al incrementar la carga orgánica.
- Se registró la mayor eficiencia en remoción para el efluente de la fosa séptica que suministró una mayor carga orgánica ( $4.81 \text{ g SV/m}^2\text{-día}$ ), con un tiempo de retención hidráulica de 19 horas.
- Los humedales artificiales demostraron que no son eficientes como un tratamiento terciario. Sin embargo, el sistema de tratamiento presentó eficiencias comparables a las remociones del filtro anaerobio y por lo tanto puede ser implementado como tratamiento secundario con mayores eficiencias de remoción de nitrógeno.

## **5. RECOMENDACIONES**

- Evaluar el sistema de humedales con especies alternativas de macrófitas, comparando la eficiencia en remoción de nutrientes y reducción de materia orgánica.
- Tomar en cuenta de forma minuciosa la influencia que tiene la precipitación en la variación de los resultados.
- Incrementar el periodo de operación del sistema, verificando los cambios en procesos de remoción y la probabilidad de saturación del medio filtrante a diferentes cargas orgánicas superficiales.

## 6. LITERATURA CITADA

- Acero, A. (2014). Tratamiento de agua residual a través de humedales, V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, pp. 1–8.
- Arias, S. A., Betancur, F. M., Gómez, G., Salazar, J. P. y Hernández, M. L. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico (Colombia)*, 74, 12–22.
- Batero, Y. y Cruz, E. (2007). Evaluación de filtros de flujo ascendente (FAFAs) con medio de soporte en guadua para la remoción de materia orgánica residual sintética. Recuperado de: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/821/1/6283B328.pdf>.
- Chernicharo, C. (2006). Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater. *Environmental Science and Bio-Technology*, 5, 73-92.
- Cárdenas, G. y Sánchez, I. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. Universidad y Salud, pp. 72–88. Recuperado de: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-71072013000100007&lang=pt](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000100007&lang=pt).
- Kadlec, R. H. y Wallace, S. (2002). Treatment Wetlands, Second Edition. Recuperado de: <https://books.google.hn/books?hl=es&lr=&id=hPDqfNRMH6wC&oi=fnd&pg=PP1&dq=wetlands&ots=k6M37QdV3P&sig=Tmf2qHpsg43QRb0Wt50KQxaSH0w#v=onepage&q=wetlands&f=false>.
- Londoño, L., y Marín, C. (2009). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal sub superficial alimentados con agua residual sintética. *Facultad de Tecnologías. Escuela de Tecnología Química. Universidad Tecnológica de Pereira*.
- Marín, J. y Correa, J. C. (2010). Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la Guadua angustifolia Kunth. Trabajo especial de grado, pp. 32-35. Recuperado de: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1801/1/6283M337.pdf>.
- Mena, J. (2010). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales : Ventajas de los sistemas híbridos. Congreso Nacional de Medio Ambiente. Recuperado de: [http://www.alquimiaimasd.com/UserFiles/ficheros/IdiAplicada/2643\\_JMena.pdf](http://www.alquimiaimasd.com/UserFiles/ficheros/IdiAplicada/2643_JMena.pdf).

- Minchola, J. y Gonzáles, F. (2013). Humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales domesticas de la mina Barrick, *Arnaldoa*, 20, 433-444.
- Montoya, J., Ceballos, L., Casas, J. y Morato, J. (2010). De Flujo Horizontal Subsuperficial. *Revista EIA*, 14, 75–84.
- Navarro, A., García, Y., Vázquez, A. y Marrugo, J. L. (2013). Eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales del empacado de hortalizas. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(1), 39-50.
- Pabello, V. M. L. y Carrillo, H. F. R. (2004). Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 20(1), 31-38.
- Puigagut, J., Villaseñor, J., Salas, J.J., Bécares, E. y García, J. (2007). Subsurface-flow constructed wetlands in Spain for the sanitation of small communities: a comparative study. *Ecological Engineering* 30(4), 312-319.
- Peña, C. E., Carter, D. E. y Ayala-Fierro, F. (2000). Toxicología ambiental: Evaluación de riesgos y restauración ambiental. In *Toxicología ambiental: evaluación de riesgos y restauración ambiental*. The University of Arizona.
- Peña-Salamanca, E. J., Madera-Parra, C. A., Sánchez, J. M. y Medina-Vásquez, J. (2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *heliconia psittacorum* (heliconiaceae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(145), 469-481.
- Romero, M., Colín, A., Sanchez, E. y Ortiz, M. L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica, *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 157-167.
- Secretaria De La Convencion Ramsar. (2010). *Uso racional de los humedales: Conceptos y enfoques para el uso racional de los humedales*. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 1, 40-47.
- Torres., P., Rodriguez, J. A. y Uribe, E. (2003). Almidón De Yuca En Filtro Anaerobio : Influencia Del Medio De Soporte. *Scientia et Technica Año*, 23, 75–80.
- Villegas, J. D., Guerrero, J., Castaño, J. M. y Paredes, D. (2006). Septic Tank ( ST ) -Up Flow Anaerobic Filter ( UFAF ) -Subsurface Flow Constructed Wetland ( SSF-CW ). *Revista Téc. Ing. Univ. Zulia*, 29(3), 269–281.

## 7. ANEXOS

Anexo 1. Sistema de humedales artificiales evaluado.



Tomada por: Andrés Hidalgo.

Anexo 2. Prueba de normalidad para etapas de humedales con efluente de fosa séptica.

<b>Parámetro</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Statistic</b>	<b>df</b>	<b>Sig.</b>
Fosfato (PO <sub>4</sub> )	Etapa 1	0.851	6	0.160
	Etapa 2	0.858	6	0.182
	Etapa 3	0.975	6	0.924
Nitrógeno total (NTK)	Etapa 1	0.958	6	0.801
	Etapa 2	0.868	6	0.217
	Etapa 3	0.862	6	0.198
Sólidos volátiles	Etapa 1	0.651	6	0.002
	Etapa 2	0.837	6	0.123
	Etapa 3	0.887	6	0.303

Anexo 3. Prueba ANOVA aplicada en Humedal artificial con efluente de fosa séptica.

<b>Parámetro</b>	<b>df</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>
Fosfato (PO <sub>4</sub> )	2	20.606	0.000
	18		
	20		
Nitrógeno total (NTK)	2	3.330	0.059
	18		
	20		
Solidos volátiles	2	3.079	0.076
	15		
	17		

Anexo 4. Prueba Post hoc Tukey para humedal artificial con efluente de fosa séptica.

<b>Parámetro</b>	<b>(I) Tratamiento</b>	<b>(J) Tratamiento</b>	<b>Std. Error</b>	<b>Sig.</b>
Fosfato	Etapa 1	Etapa 2	0.07956	0.205
	Etapa 2	Etapa 3	0.07956	0.001
Nitrógeno total	Etapa 1	Etapa 2	0.570121	0.257
	Etapa 2	Etapa 3	0.570121	0.004
Sólidos volátiles	Etapa 1	Etapa 2	18.1569728	0.243
	Etapa 2	Etapa 3	18.1569728	0.030

Anexo 5. Prueba de normalidad en humedales con efluente de filtro anaerobio.

<b>Parámetro</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Shapiro-Wilk</b>		
		<b>Statistic</b>	<b>df</b>	<b>Sig.</b>
Fosfato (PO <sub>4</sub> )	Etapa 1	0.886	6	0.300
	Etapa 2	0.949	7	0.722
	Etapa 3	0.941	7	0.647
Nitrógeno total (NTK)	Etapa 1	0.739	6	0.065
	Etapa 2	0.737	7	0.079
	Etapa 3	0.746	7	0.052
Sólidos volátiles	Etapa 1	0.961	6	0.824
	Etapa 2	0.913	7	0.420
	Etapa 3	0.753	7	0.143

Anexo 6. Prueba ANOVA aplicada en humedal artificial con efluente de filtro anaerobio.

<b>Parámetros</b>	<b>df</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>
Fosfatos (PO <sub>4</sub> )	2	47.372	0.000
	18		
	20		
Nitrógeno Total (NTK)	2	1.069	0.364
	18		
	20		
Sólidos volátiles	2	0.750	0.487
	17		
	19		

Anexo 7. Prueba Post hoc Tukey para humedal artificial con efluente de filtro anaerobio.

<b>Parámetro</b>	<b>(I)Tratamiento</b>	<b>(J)Tratamiento</b>	<b>Std. Error</b>	<b>Sig.</b>
Fosfato (PO <sub>4</sub> )	Etapa 1	Etapa 2	0.0468606	0.051
	Etapa 2	Etapa 3	0.0468606	0.346
Nitrógeno total (NTK)	Etapa 1	Etapa 2	0.4935135	0.701
	Etapa 2	Etapa 3	0.4935135	0.796
Sólidos volátiles	Etapa 1	Etapa 2	14.614254	0.616
	Etapa 2	Etapa 3	14.0409217	0.508