

# Evaluación de la eficiencia entre dos sistemas de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la localidad de Carapongo, Lurigancho-Chosica

## Evaluation of the efficiency between two biofilter systems for the treatment of domestic wastewater in the locality of Carapongo, Lurigancho-Chosica

RECIBIDO: MARZO 15 DE 2019 | REVISADO: ABRIL 20 DE 2019 | ACEPTADO: MAYO 12 DE 2019

ANDREA ELIZABETH QUISPE PULIDO<sup>1</sup>  
WILLIAMS BRAYAMS CASIMIRO VIDAL<sup>1</sup>

### ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the efficiency between two biofilter pilot systems for the treatment of wastewater, by analyzing the physical - chemical and microbiological parameters, in order to provide a contribution in the treatment and reuse of wastewater. for irrigation purposes of crops and to mitigate the contamination in the irrigation canals and as a consequence in the Rimac river for the benefit of the inhabitants and the environment. To do this, an experimental design was used, two biofilters of similar characteristics were implemented, the first biofilter system (SB1) conformed by a roughing channel, septic tank, subsurface vertical flow wetland (HSSFV) and surface wetland (HS), and the second biofilter system (SB2) consisting of a roughing channel, septic tank, vermicomeller and surface wetland; using the species *Cyperus papyrus*, *Alocasia macrorrhiza* and *Eichhornia crassipes* in SB1, *Eisenia foetida* and *Eichhornia crassipes* in SB2.

The results obtained from the parameters Total Suspended Solids (TSS), Biochemical Oxygen Demand (BOD<sub>5</sub>), nitrate (NO<sub>3</sub>-), nitrite (NO<sub>2</sub>-), phosphates (PO<sub>4</sub>-3) and Thermotolerant Coliforms (TC) were recorded during Two months, reaching the following conclusions, SB1 was more efficient in the removal of SST, BOD<sub>5</sub> and CT with values of 95.71%, 91.55% and 99.87%, respectively. Meanwhile, SB2 presented values of 90.33%, 91.23% and 97.28%, respectively. On the other hand, SB2 showed a greater removal of PO<sub>4</sub>-3 with a value of 94.5% compared to 92.23% in SB1.

**Keywords:** Biofilter system, wastewater, wetland, vermicelli.

### RESUMEN

El objetivo de la investigación fue evaluar la eficiencia entre dos sistemas pilotos de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales mediante el análisis de los parámetros físico - químico y microbiológico con la finalidad de brindar un aporte en el tratamiento y reaprovechamiento de las aguas residuales para fines de riego de cultivos y mitigar la contaminación en los canales de regadío y como consiguiente en el río Rímac en beneficio de los habitantes y el ambiente. Para ello, se empleó un diseño experimental, se implementaron dos biofiltros de características similares, el primer sistema de biofiltro (SB1) conformado por un canal de desbaste, tanque séptico, humedal subsuperficial de flujo vertical (HSSFV) y humedal superficial (HS), y el segundo sistema

<sup>1</sup> Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima - Perú  
E-mail: quispe.pulido.andrea@gmail.com/cbrayam1@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.24039/cv201971325>

de biofiltro (SB2) conformado por un canal de desbaste, tanque séptico, lombrifiltro y humedal superficial; empleando a las especies *Cyperus papyrus*, *Alocasia macrorrhiza* y *Eichhornia crassipes* en el SB1, *Eisenia foetida* y *Eichhornia crassipes* en el SB2. Los resultados obtenidos de los parámetros Sólidos Suspendedos Totales (SST), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), nitrato (NO-3), nitrito (NO-2), fosfatos (PO4-3) y Coliformes Termotolerantes (CT) fueron registrados durante dos meses, llegando a las siguientes conclusiones, el SB1 fue más eficiente en la remoción de SST, DBO5 y CT con valores de 95.71%, 91.55% y 99.87%, respectivamente. En tanto, el SB2 presento valores de 90.33%, 91.23% y 97.28%, respectivamente. Por otro lado, el SB2 presentó una mayor remoción de PO4-3 con un valor de 94.5% frente al 92.23% en el SB1.

**Palabras clave:** Sistema de biofiltro, agua residual, humedal, lombrifiltro

## Introducción

El tratamiento de las aguas residuales es una cuestión prioritaria a nivel mundial debido a su incidencia directa sobre la salud humana, así como por su efecto sobre el ambiente al contaminar los depósitos naturales que serán empleados como fuentes de abastecimiento para plantas de potabilización y demás actividades humanas (Trang & Konnerup, 2010).

En el Perú, las Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS) son las responsables de administrar y gestionar los sistemas de alcantarillado que conducen las aguas residuales a las denominadas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Sin embargo, la demanda insatisfecha de la capacidad de tratamiento de aguas residuales municipales es mayor de 3,6 millones de habitantes, de los cuales al menos 1,9 millones de habitantes viven en ciudades donde no existen PTAR y requieren la ejecución de nuevos proyectos (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento-SUNASS, 2015).

La localidad de Carapongo cuenta con 210 hectáreas de área agrícola el cual es irrigado con las aguas en mal estado del río Rímac (Soto & Siura, 2008), mientras que las aguas residuales de dicha localidad son vertidos clandestinamente a los canales de riego. Ello debido a que no cuenta en su totalidad con un sistema de tratamiento de las aguas residuales. Asimismo, estudios realizados en el 2006 muestran que más del 97 % de agua aplicada a las hortalizas posee concentraciones de coliformes fecales de hasta  $5 \times 10^6/100$  ml, encima de los estándares de calidad de agua (ECA-Agua 1000 NMP/100ml) estipulados en la legislación nacional ambiental. Como consecuencia se detectó una gran variedad de parásitos

de origen humano los cuales ponen en riesgo a la salud de estos mismos (Centro Internacional de la Papa, 2007).

Por tal motivo, en la presente investigación se evaluó la eficiencia entre dos sistemas de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales domesticas a fin de contribuir en el mejoramiento de la calidad del agua residual para fines de riego en la localidad de Carapongo- Lurigancho Chosica.

## Método

### Materiales

Los materiales empleados para el desarrollo de la investigación fueron los siguientes:

#### a) Materiales de campo

- Especies vegetales (*Cyperus papyrus*, *Alocasia macrorrhiza*, *Eichhornia crassipes*, *Eisenia foetida*)
- Sustratos para los filtros (Confitillo, arena gruesa, arena fina, aserrín)
- Para la construcción de biofiltros (ladrillos, cemento, arena fina, arena gruesa, piedra chancada)
- Kit de albañilería (pico, lampa, otros)
- Tanques de vidrio
- Tuberías (Tubos de 2", Tubos de 4", Tubo "T" de 2", Tapón 2", Codos de 4", reducciones, uniones)
- Pegamento, teflón
- Balde graduado
- EPP (Guantes quirúrgicos, Mascarillas, guardapolvo, Jabón líquido)
- Para toma de muestras (envases de vidrio, envases de plástico, cooler y gel refrigerante para conservar las muestras)

#### b) Equipos

- Calculadora científica
- Laptop (Hp, Intel COREi3) para la redacción de la investigación
- Cámara digital (Lumix) para la documentación fotográfica

#### c) Cartografía utilizada

- Plano de lotización del distrito de Lurigancho-Chosica, escala de 1:5000.

#### d) Software utilizado

- Autocad versión 2015, para elaborar planos
- ArcGIS 10.3, para elaborar mapas
- Office 2013

## Método

Se aplicó un diseño experimental con la implementación de los sistemas de biofiltros ya que se planteaba resolver la carencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales en el distrito de Lurigancho-Chosica y la contaminación del agua en los canales de regadío. Se empleó el muestreo no probabilístico.

## Procedimiento

En este ítem se desarrolló el procedimiento para el diseño e implementación de los sistemas de biofiltros, con la finalidad de realizar las comparaciones de ambos sistemas.

**Fase 1:** Diseño e implementación de los dos sistemas pilotos de biofiltros

La presente investigación hace una comparación entre dos sistemas de biofiltros (SB1 y SB2), el primero (SB1) se encuentra compuesto por un canal de desbaste (Pre tratamiento), tanque séptico (Tratamiento primario), seguido por un humedal de flujo subsuperficial vertical (HFSSV) y un humedal de flujo superficial (FS), ambos como tratamiento secundario. Mientras el segundo (SB2), conformado por un canal de desbaste (Pre tratamiento), tanque séptico (Tratamiento primario), seguido por un lombrifiltro y un humedal de flujo superficial, tal como se muestra en la Figura 1.

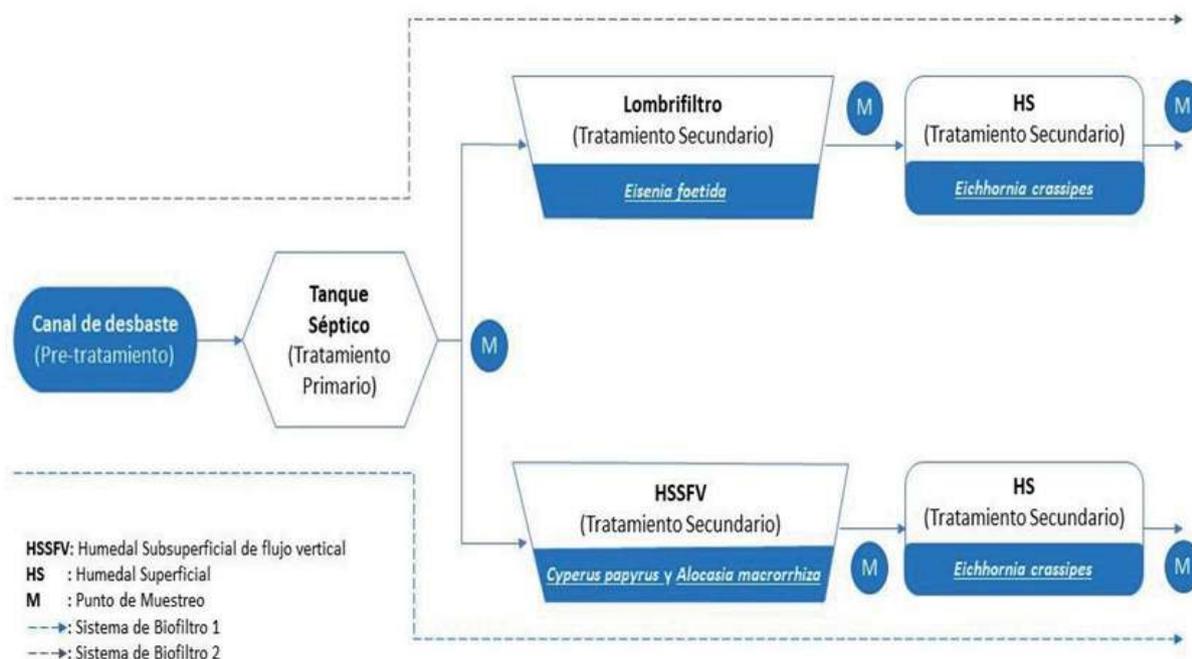


Figura 1. Esquema de sistemas de biofiltro

El diseño se basó en el modelo para la remoción de DBO en humedales de flujo subsuperficial y superficial (tratamiento secundario) empleado por Lara Borrero (Lara, 1999) en su tesis de maestría titulado “Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales”. Sin embargo, para el cálculo de las dimensiones del pretratamiento se tomó como referencia la Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial de autoría de García y Corzo (2008). Por otro

lado, para el diseño del tanque séptico (tratamiento primario) se consideraron las especificaciones de la Norma Técnica I.S. 020 - Tanques Sépticos.

En las Tablas 1 y 2, se muestran de manera resumida las dimensiones para cada tipo de humedal y las formulas empleadas.

Tabla 1. Dimensiones del Humedal superficial (HS)

Datos de entrada	Fórmula	Cálculo	Valor	Unid
Población (P)			10	Hab.
Caudal (5% de 0.35 m <sup>3</sup> /d)			0.018	m <sup>3</sup> /d
DBO afluente			190	mg/l
DBO efluente			15	mg/l
SST entrada			210	mg/l
Vegetación			<i>Eichhornia crassipes</i>	
Profundidad			0.25	m
Porosidad			0.65	m
Temperatura media del AR			21	°C
Temperatura mínima del AR			16	°C
<b>Dimensionamiento biológico</b>				
K <sub>21</sub>	$K_T = 0.678 d^{-1} x 1.06^{T-20}$	$K_{21} = 0.678 x 1.06^{(21-20)}$	0.719	d <sup>-1</sup>
Área superficial del humedal (A <sub>s</sub> )	$A_s = \frac{Q * (\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * y * n}$	$A_s = \frac{0.018 \frac{m^3}{d} x (\ln 190 - \ln 15)}{0.719 d^{-1} x 0.25m x 0.65}$	0.391	m <sup>2</sup>
<b>Dimensionamiento hidráulico</b>				
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	$TRH = \frac{A_s * y * n}{Q}$	$TRH = \frac{0.391m^2 x 0.25m x 0.65}{0.018 m^3/d}$	3.5	d
Largo (L)			0.63	m
Ancho (W)			0.63	m
<b>Dimensionamiento térmico</b>				
Velocidad		$v = \frac{0.63 m}{3.5 d x 86400 s/d}$	2x10 <sup>-6</sup>	m/s
Temperatura del agua a la distancia x <sub>0</sub> , entrada (T <sub>o</sub> )			22	°C
Temperatura promedio del aire durante el periodo considerado (T <sub>2</sub> )			17	°C
Temperatura promedio del agua (T <sub>e</sub> )	$T_e = T_a + (T_o - T_a) \exp \left[ \frac{-U_s (x - x_e)}{\delta \gamma v C_p} \right]$	$T_e = 17^{\circ}C + (22 - 17)^{\circ}C$	20.2	°C
Temperatura del agua a la distancia x (T <sub>w</sub> )	$T_w = \frac{T_o + T_e}{2}$	$T_w = \frac{22 + 20.2}{2}$	21.1	°C

Tabla 2. Dimensiones del Humedal subsuperficial (HSS)

Datos de entrada	Fórmula	Cálculo	Valor	Unid
Población (P)			10	Hab.
Caudal (5% de 0.35 m <sup>3</sup> /d)			0.018	m <sup>3</sup> /d
DBO afluente			190	mg/l
DBO efluente			15	mg/l
SST entrada			210	mg/l
Vegetación		<i>Cyperus papyrus / Alocasia macrorrhiza</i>		
Profundidad			0.4	m
Porosidad			0.36	m
Temperatura media del AR			21	°C
Temperatura mínima del AR			16	°C
<b>Dimensionamiento biológico</b>				
K <sub>21</sub>	$K_{21} = 1.104 d^{-1} * 1.06^{T-20}$	$K_{21} = 1.104 x 1.06^{(21-20)}$	1.17	d <sup>-1</sup>
Área superficial del humedal (A <sub>s</sub> )	$A_s = \frac{Q * (\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * y * n}$	$A_s = \frac{0.018 \frac{m^3}{d} x (\ln 190 - \ln 15)}{1.170 d^{-1} x 0.4m x 0.36}$	0.27	m <sup>2</sup>
<b>Dimensionamiento hidráulico</b>				
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	$TRH = \frac{A_s * y * n}{Q}$	$TRH = \frac{0.27m^2 x 0.4m x 0.36}{0.018 m^3/d}$	2.16	d
Largo (L)			0.73	m
Ancho (W)			0.37	m
<b>Dimensionamiento térmico</b>				
Capa de residuos de vegetación			10	cm
Capa de grava seca			80	mm
Capa de grava saturada			40	cm
Coefficiente de transferencia de calor (U)	$U = \frac{1}{\frac{y_1}{k_1} + \frac{y_2}{k_2} + \frac{y_3}{k_3} + \frac{y_4}{k_4}}$	$U = \frac{1}{\frac{0.1}{0.05} + \frac{0.08}{1.5} + \frac{0.4}{2}}$	0.44	W/m <sup>2</sup>
Capacidad de calor específico del agua (c <sub>p</sub> )			4215	J/kg
Densidad del agua (δ)			1000	kg/m <sup>3</sup>
Temperatura del agua que entra al humedal (T <sub>o</sub> )			22	°C
Temperatura promedio del aire durante el periodo considerado (T <sub>a</sub> )			17	°C
Cambio de temperatura en el humedal (T <sub>c</sub> )	$T_c = \frac{C_p \delta A_s y n}{(T_o - T_e) U \sigma A_s t}$	$T_c = \frac{4215 x 1000 x 0.27 x 0.4 x 0.36}{(22 - 17) 0.44 x 86400 x 0.27 x 2.16}$	1.48	°C
Temperatura del efluente (T <sub>e</sub> )	$T_e = T_o - T_c$	$T_e = 22 - 1.48$	20.52	°C
Temperatura promedio del agua (T <sub>w</sub> )	$T_w = \frac{T_o + T_e}{2}$	$T_w = \frac{22 + 20.52}{2}$	21.26 ≈ 21	°C

Una vez calculadas las dimensiones, se procedió a implementar cada sistema de biofiltro (SB1 y SB2) (Figura 2).

Antes de realizar el muestreo de la calidad de agua, se esperó un mes hasta la adaptación y estabilización de las especies en el medio.



Figura 3. Implementación del sistema de biofiltro SB1 (Izq.) y SB2 (Der.)

**Fase 2:** Análisis de la calidad del agua residual y determinación de la eficiencia de remoción.

Las muestras de agua residual tomadas de los sistemas de biofiltro piloto se analizaron en el laboratorio certificado Servicios Analíticos Generales (SAG) para el análisis de los parámetros fisicoquímicos: SST (mg/l), DBO<sub>5</sub> (mg/l), Nitratos, Nitritos (mg/l), Fosfatos (mg/l) y parámetros microbiológicos: Coliformes Termotolerantes (NMP/100 ml) del agua residual, para determinar la concentración del material orgánico presente en las muestras.

Los puntos de monitoreo se ubicaron, el primero a la salida del tanque séptico (M1), el segundo a la salida del humedal subsuperficial de flujo vertical (M2), el tercero a la salida del lombrifiltro (M3), el cuarto y quinto a la salida del humedal superficial (M4 y M5). Por otro lado, el monitoreo se realizó con una frecuencia semanal, con un total de cinco repeticiones, tal como se muestra en las Figuras 3 y 4.

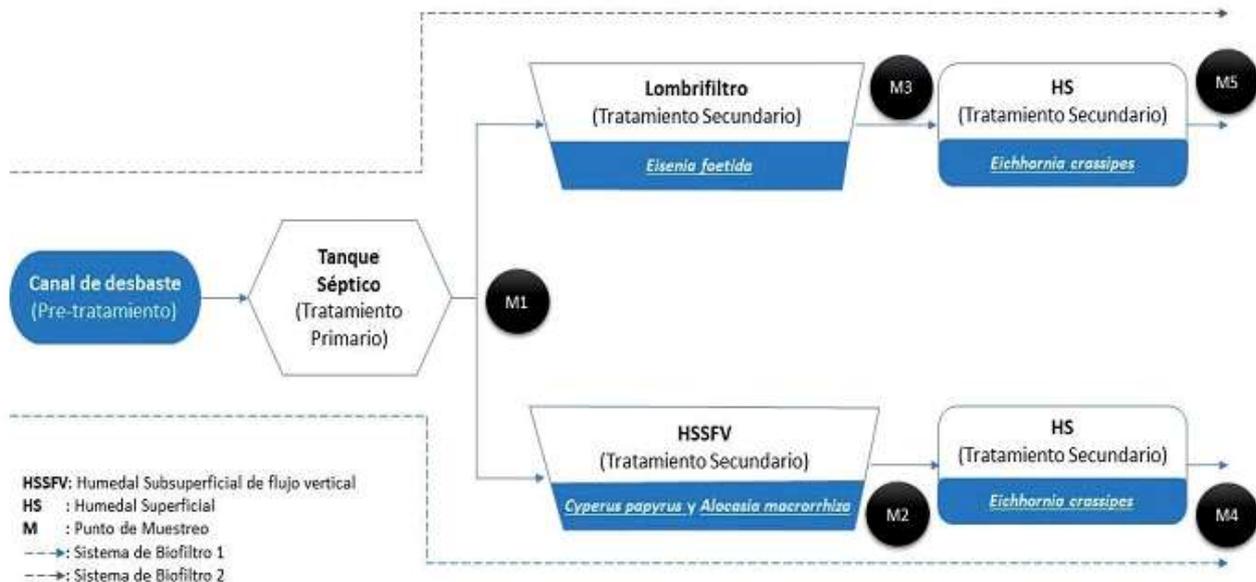


Figura 4. Puntos de monitoreo en los sistemas de biofiltros

La eficiencia de remoción (ER) de contaminantes se expresa en porcentaje haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$\% ER = \left[ \frac{C_a - C_e}{C_a} \right] \times 100$$

**Dónde:**

$C_a$ : Concentración afluente

$C_e$ : Concentración efluente

Esta se enfocó en evaluar la eficiencia entre los dos (02) sistemas de biofiltros para el tratamiento del agua residual de Carapongo, el cual incluye el tanque séptico (tratamiento primario) importante para obtener mejores resultados, por tal motivo la eficiencia de remoción será calculada de la siguiente manera:

Para evaluar la eficiencia de remoción del Sistema de Biofiltro 1 (SB1)

- Entre los puntos M1 y M2, Humedal Subsuperficial
- Entre los puntos M2 y M4, Humedal Superficial
- Para evaluar la eficiencia de remoción del Sistema de Biofiltro 2 (SB2)
- Entre los puntos M1 y M3, Lombrifiltro
- Entre los puntos M3 y M5, Humedal Superficial



Figura 4. Puntos de monitoreo en los sistemas de biofiltros

## Resultados

Sistema de Biofiltro 1 (SB1) Se analizó el parámetro temperatura en el afluente y efluente del sistema, registrándose 21°C y 22.1 °C, respectivamente. Respecto al pH se registró 7.34 en el afluente y 7.62 en el efluente. En la Figura 5 se observan los valores de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), los cuales van disminuyendo de manera significativa al paso por el humedal subsuperficial de flujo vertical (HSSFV) con las especies *Cyperus papyrus* y *Alocasia macrorrhiza* (M2), luego al humedal superficial con la especie *Eichhornia crassipes* (M4).

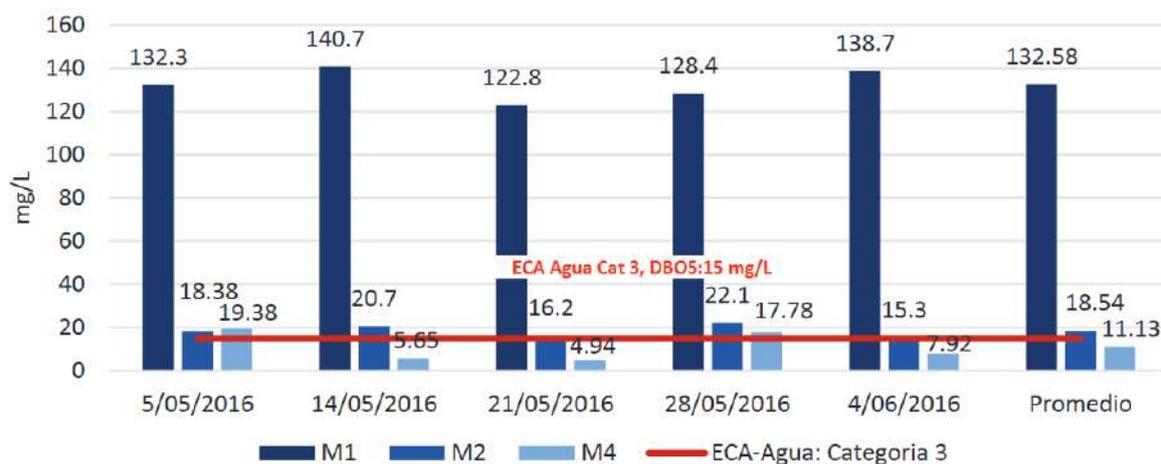


Figura 6. Variación de la concentración de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)-SB1

Respecto a los porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub>, como se muestra en la Tabla 3, el humedal, subsuperficial de flujo vertical (M2) presentó una eficiencia promedio de 86.02% de DBO<sub>5</sub> respecto al efluente del tanque séptico (M1), una eficiencia máxima del 88.97% mostrado

el día 04/06/2016. Por otro lado, el efluente del humedal superficial (M4) presentó una eficiencia promedio de 91.55% respecto al efluente del tanque séptico (M1) y una máxima remoción de 95.98% de DBO<sub>5</sub> los días 21 y 28/05/2016.

Tabla 3. Remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)-SB1

Fecha de monitoreo	Afluente		Efluente			%Remoción global (SB1)
	M1	M2 (HSSFV)	Remoción (%)	M4 (HS)	Remoción (%)	
05/05/2016	132.3	18.38	86.11	19.38	-5.44*	85.35
14/05/2016	140.7	20.7	85.29	5.65	72.70	95.98
21/05/2016	122.8	16.2	86.81	4.94	69.51	95.98
28/05/2016	128.4	22.1	82.79	17.78	19.54	86.15
04/06/2016	138.7	15.3	88.97	7.92	48.23	94.29
Promedio	132.58	18.54	86.02	11.13	52.50	91.55

\* No se tuvo en cuenta en el cálculo de Remoción global y remoción promedio

En la Figura 6 se observan los valores de Sólidos Suspendidos Totales (SST), los cuales van disminuyendo de manera significativa al paso por el humedal subsuperficial de flujo vertical (HSSFV) con las especies *Cyperus papyrus* y *Alocasia macrorrhiza* (M2) y humedal superficial con la especie *Eichhornia crassipes* (M4).

Por otro lado, tomando como referencia los valores de la guía de protección ambiental (EPA, 1992) para el reúso de aguas residuales, los valores de M2 y M4 en su totalidad cumplen con el valor establecido de 30 mg/l para SST.

Respecto a los porcentajes de remoción de SST, como se muestra en la Tabla 4, el humedal subsuperficial (M2) presentó una eficiencia promedio de 94.67% de SST respecto al efluente del tanque séptico (M1), una eficiencia máxima del 97.35% presentado el día 04/06/2016. Por otro lado, el efluente del humedal superficial (M4) mostró una eficiencia promedio de 95.71% respecto al efluente del tanque séptico (M1) y una máxima remoción de 96.86% de SST el día 04/06/2016.

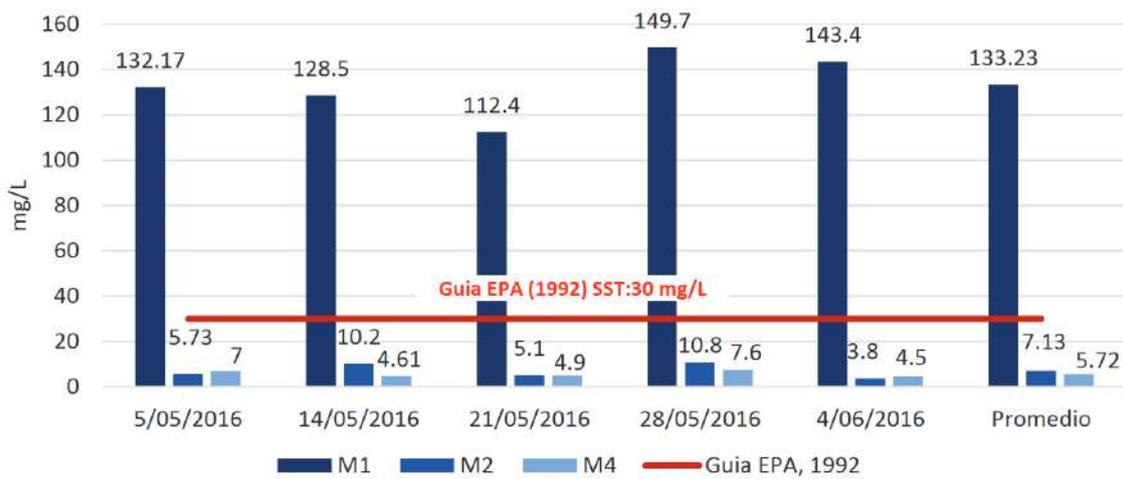


Figura 7. Variación de la concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST)-SB1

Tabla 4. Remoción de la concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST)-SB1

Fecha de monitoreo	Afluente		Efluente		%Remoción global (SB1)
	M1	M2 (HSSFV)	Remoción (%)	M4 (HS)	
05/05/2016	132.17	5.73	95.66	7	-22.16*
14/05/2016	128.5	10.2	92.06	4.61	54.80
21/05/2016	112.4	5.1	95.46	4.9	3.92
28/05/2016	149.7	10.8	92.79	7.6	29.63
04/06/2016	143.4	3.8	97.35	4.5	-18.42*
Promedio	133.23	7.13	94.67	5.72	29.45

\* No se tuvo en cuenta en el cálculo de Remoción global y remoción promedio

En Figura 7 se aprecia que los valores de nitratos van disminuyendo al paso por el humedal subsuperficial con las especies *Cyperus papyrus* y *Alocasia macrorrhiza*

(M2); sin embargo, al paso por el humedal superficial con la especie *Eichhornia crassipes* (M4) aumenta la concentración de nitratos.

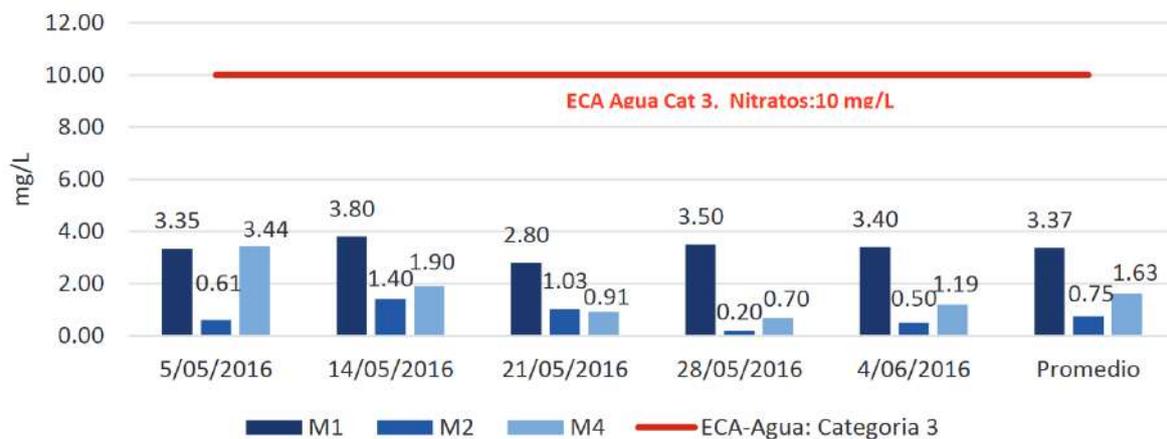


Figura 8. Variación de la concentración de Nitratos-SB1

En la Figura 8, los valores de nitritos aumentan al paso por el humedal subsuperficial con las especies *Cyperus papyrus* y *Alocasia macrorrhiza* (M2) y el

humedal superficial con la especie *Eichhornia crassipes* (M4).

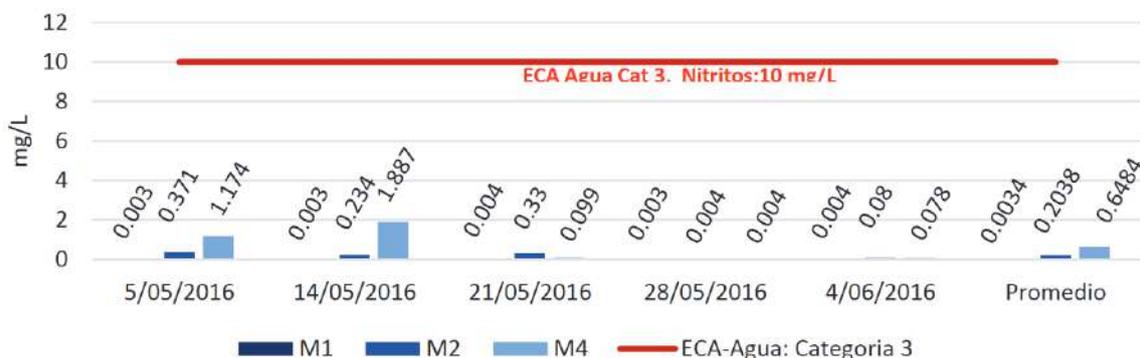


Figura 9. Variación de la concentración de Nitritos-SB1

En la Figura 9, los valores de fosfatos van disminuyendo de manera significativa al paso por el humedal subsuperficial de flujo vertical (HSS- FV) con las especies *Cyperus papyrus* y *Alocasia macrorrhiza*

(M2) y humedal superficial con la especie *Eichhornia crassipes* (M4). Los porcentajes de remoción de fosfatos se aprecian en la Tabla 5.

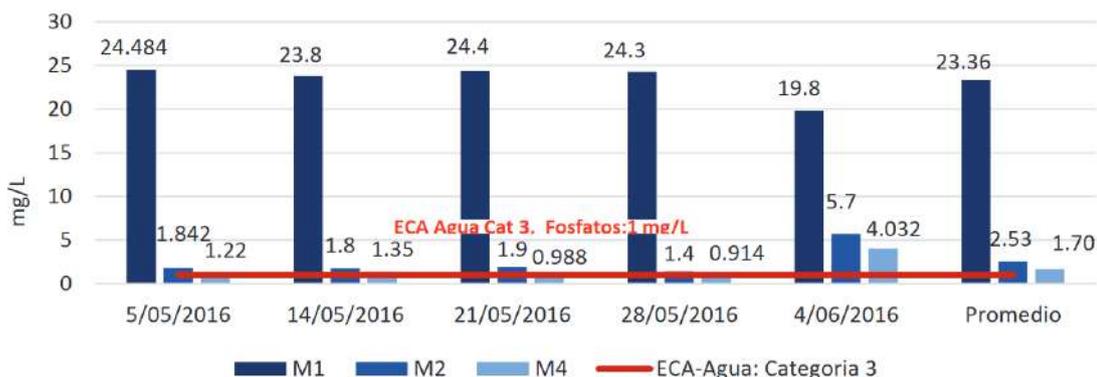


Figura 10. Variación de la concentración de Fosfatos-SB1

Tabla 5. Remoción de la concentración de Fosfatos-SB1

Fecha de monitoreo	Afluente		Efluente		Remoción (%)	%Remoción global (SB1)
	M1	M2 (HSSFV)	Remoción (%)	M4 (HS)		
05/05/2016	24.484	1.842	92.48	1.22	33.77	95.02
14/05/2016	23.8	1.8	92.44	1.35	25.00	94.33
21/05/2016	24.4	1.9	92.21	0.988	48.00	95.95
28/05/2016	24.3	1.4	94.24	0.914	34.71	96.24
04/06/2016	19.8	5.7	71.21	4.032	29.26	79.64
Promedio	23.36	2.53	88.52	1.70	34.15	92.23

En la Figura 10, los valores de coliformes termotolerantes disminuyen de manera significativa al paso por el humedal subsuperficial de flujo vertical (HSSFV) con las especies *Cyperus papyrus* y *Alocasia*

macrorrhiza (M2) y humedal superficial con la especie *Eichhornia crassipes* (M4). Los porcentajes de remoción se aprecian en la Tabla 6.

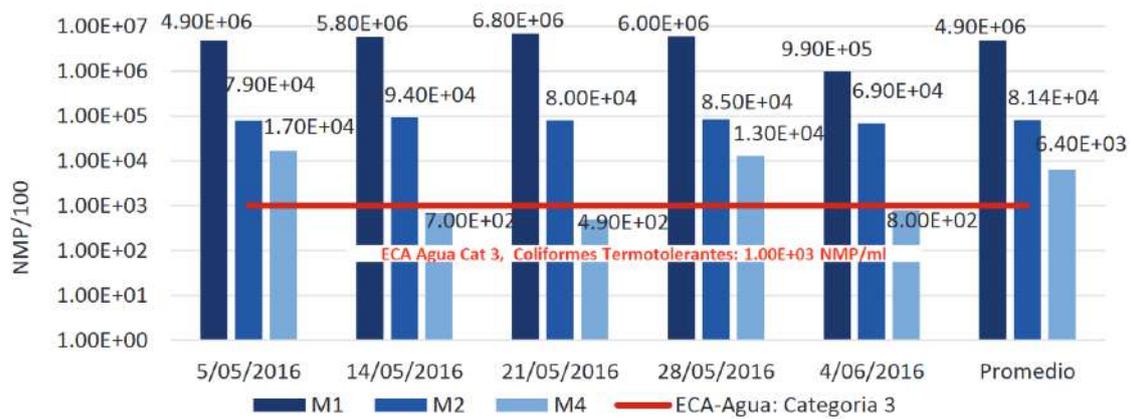


Figura 11. Variación de la concentración de Coliformes Termotolerantes-SB1

Tabla 6. Remoción de la concentración de Coliformes Termotolerantes-SB1

Fecha de monitoreo	Afluente		Efluente			%Remoción global (SB1)
	M1	M2 (HSSFV)	Remoción (%)	M4 (HS)	Remoción (%)	
05/05/2016	4.90E+06	7.90E+04	98.39	1.70E+04	78.48	99.65
14/05/2016	5.80E+06	9.40E+04	98.38	7.00E+02	99.26	99.99
21/05/2016	6.80E+06	8.00E+04	98.82	4.90E+02	99.39	99.99
28/05/2016	6.00E+06	8.50E+04	98.58	1.30E+04	84.71	99.78
04/06/2016	9.90E+05	6.90E+04	93.03	8.00E+02	98.84	99.92
Promedio	4.90E+06	8.14E+04	97.44	6.40E+03	92.14	99.87

Respecto a los porcentajes de remoción de coliformes termotolerantes, como se muestra en la Tabla 6, el humedal subsuperficial (M2) presentó una eficiencia promedio de 97.44% de coliformes termotolerantes respecto al efluente del tanque séptico (M1) y una eficiencia máxima del 98.82% presentado el día 21/05/2016. Por otro lado, el efluente del humedal superficial (M4) mostró una eficiencia promedio de 99.87% respecto al efluente del tanque séptico (M1) y una máxima remoción de 99.99% de coliformes termotolerantes los días 14 y 21/05/2016.

### Sistema de Biofiltro 2 (SB2)

Se registró una temperatura en el afluente y efluente del sistema, de 21°C y 22.3 °C, respectivamente. Respecto al Ph se registró 7.34 en el afluente y 7.73 en el efluente.

En la Figura 11, los valores de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) van disminuyendo de manera significativa al paso por el lombrifiltro con la especie Eisenia Foétida (M3) y el humedal superficial con la especie Eichhornia crassipes (M5). Presentando una máxima concentración de DBO5 en el punto M1 de 140.7 mg/l (14/05/2016), en el punto M3 de 32.4 mg/l (21/05/2016) y en el punto M5 de 19.2 mg/l (21/05/2016). En promedio en el punto M1 tuvo una concentración de 132.58 mg/l, en el punto M3 una concentración de 24.64 mg/l y por último en M5 una concentración de 11.36 mg/l. Los porcentajes de remoción de DBO5 –SB2 se aprecian en la Tabla 7.

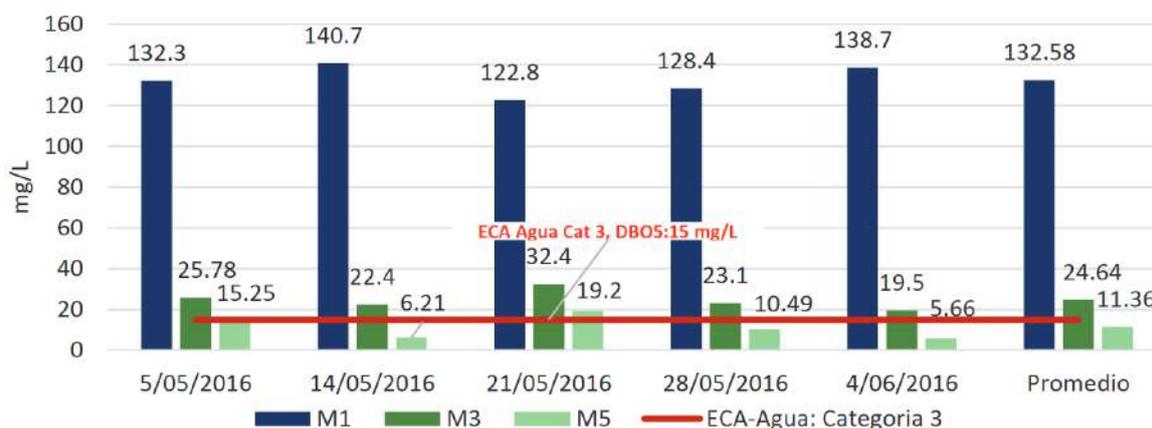


Figura 12. Variación de la concentración Demanda Bioquímica de Oxígeno (SST)-SB2

Tabla 7. Remoción de la concentración Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)-SB2

Fecha de monitoreo	Afluente		Efluente			%Remoción global (SB2)
	M1	M3 (Lombrifiltro)	Remoción (%)	M5 (HS)	Remoción (%)	
05/05/2016	132.3	25.78	80.51	15.25	40.85	88.47
14/05/2016	140.7	22.4	84.08	6.21	72.28	95.59
21/05/2016	122.8	32.4	73.62	19.2	40.74	84.36
28/05/2016	128.4	23.1	82.01	10.49	54.59	91.83
04/06/2016	138.7	19.5	85.94	5.66	70.97	95.92
Promedio	132.58	24.64	81.23	11.36	55.89	91.23

En la Figura 12, los valores de Sólidos Suspendidos Totales (SST) disminuyen de manera significativa al paso por el lombrifiltro con la especie Eisenia Foétida (M3) y el humedal superficial con la especie Eichhornia crassipes (M5). Presentan una máxima concentración de SST en el punto M1 de 149.7 mg/l (28/05/2016), en

el punto M3 de 16.8 mg/l (14/05/2016) y en el punto M5 de 22.4 mg/l (14/05/2016). En promedio, en el punto M1 tuvo una concentración de 133.23 mg/l, en el punto M3 una concentración de 12.80 mg/l y por último en M5 una concentración de 12.66 mg/l. En la Tabla 8 se muestran los porcentajes de remoción de SST-SB2.

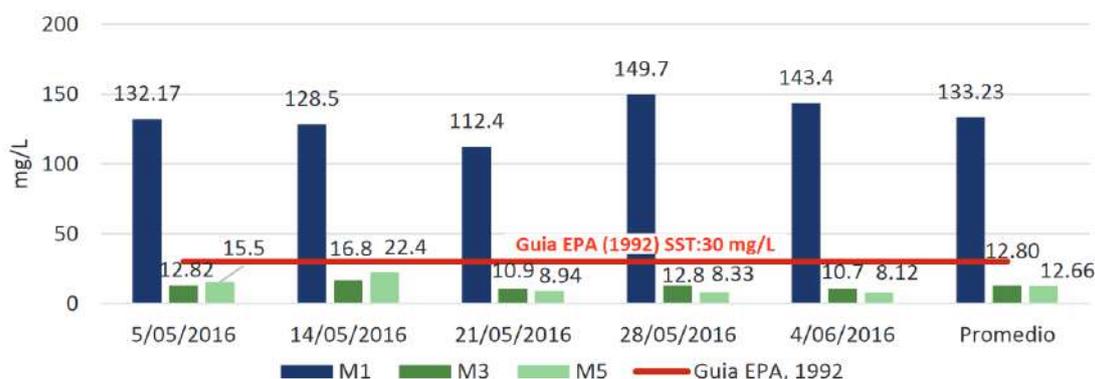


Figura 13. Variación de la concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST)-SB2

Tabla 8. Remoción de la concentración de Sólidos Suspendedos Totales (SST)-SB2

Fecha de monitoreo	Afluente		Efluente			%Remoción global (SB2)
	M1	M3 (Lombrifiltro)	Remoción (%)	M5 (HS)	Remoción (%)	
05/05/2016	132.17	12.82	90.30	15.5	-20.91*	88.27
14/05/2016	128.5	16.8	86.93	22.4	33.33	82.57
21/05/2016	112.4	10.9	90.30	8.94	17.98	92.05
28/05/2016	149.7	12.8	91.45	8.33	34.92	94.44
04/06/2016	143.4	10.7	92.54	8.12	24.11	94.34
Promedio	133.23	12.80	90.30	12.66	27.58	90.33

\* No se tuvo en cuenta en el cálculo de Remoción global y remoción promedio

En la Figura 13 se observan los valores de nitratos. Estos aumentan al paso por el lombrifiltro con la especie Eisenia Foétida (M3); sin embargo, al paso por el humedal superficial (M5) disminuye la concentración de nitratos. Presenta una máxima concentración en el punto M1

de 3.8 mg/l (14/05/2016), en el punto M3 de 13.69 mg/l (05/05/2016) y en el punto M5 de 4.29 mg/l (28/05/2016). En promedio en el punto M1 tuvo una concentración de 3.37 mg/l, en el punto M3 una concentración de 11.96 mg/l y por último en M5 una concentración de 2.25 mg/l.

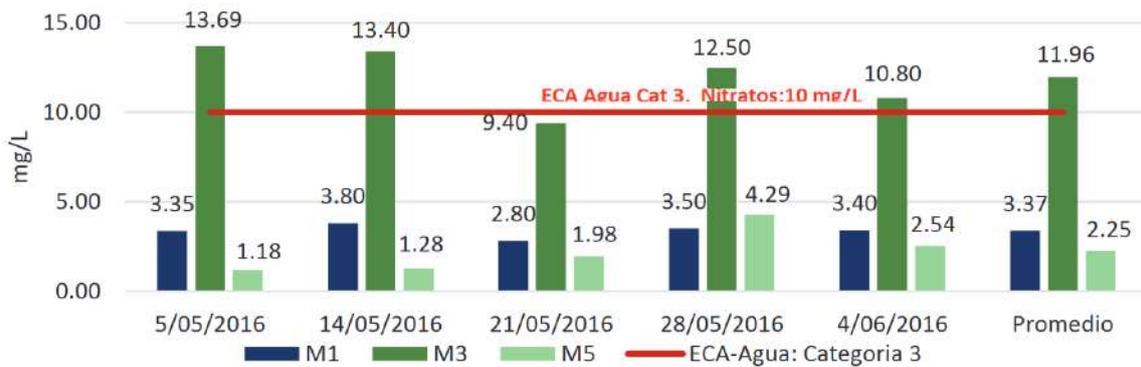


Figura 14. Variación de la concentración de Nitratos-SB2

En la Figura 14, se observan los valores de nitritos. Estos aumentan al paso por el lombrifiltro con la especie Eisenia Foétida (M3) y el humedal superficial con la especie Eichhornia crassipes (M5). Presentan una

concentración promedio en el punto M1 de 0.0034 mg/l, en el punto M3 una concentración de 1.38 mg/l y por último en M5 una concentración de 0.483 mg/l.

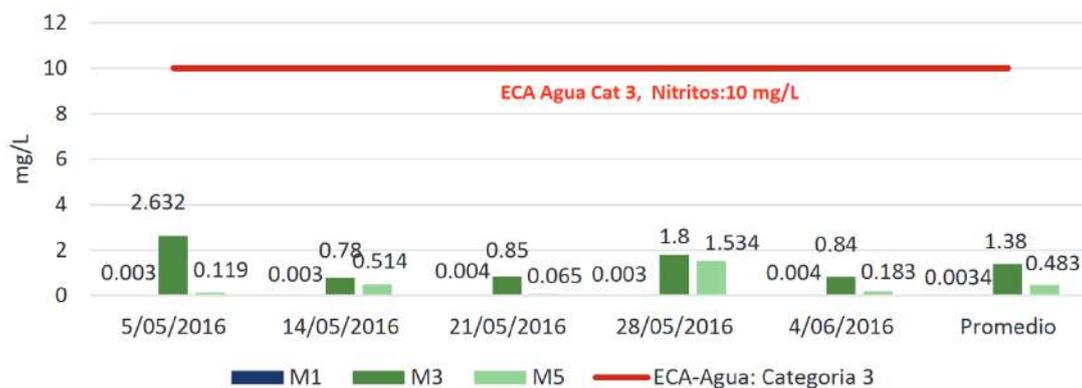


Figura 15. Variación de la concentración de Nitritos-SB2

En la Figura 15, los valores de fosfatos disminuyen de manera significativa al paso por el lombrifiltro con la especie *Eisenia Foétida* (M3) y el humedal superficial con la especie *Eichhornia crassipes* (M5). Presentan una máxima concentración de fosfatos en el punto M1 de 24.484 mg/l (05/05/2016), en el punto M3 de 4.4 mg/l

(28/05/2016) y en el punto M5 de 3.15 mg/l (28/05/2016). En promedio en el punto M1 tuvo una concentración de 23.36 mg/l, en el punto M3 una concentración de 2.5 mg/l y por último en M5 una concentración de 1.31 mg/l. Los porcentajes de remoción de fosfatos se aprecian en la Tabla 9.

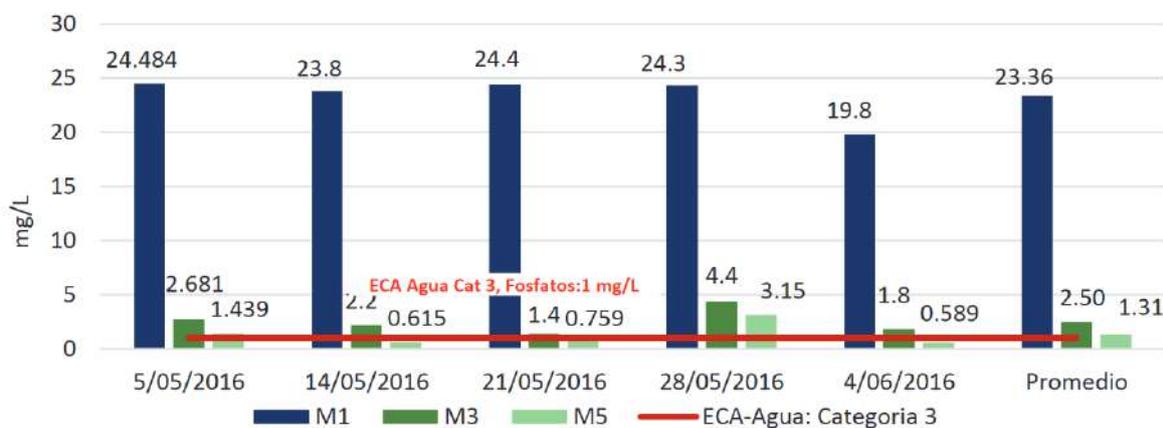


Figura 16. Variación de la concentración de Fosfatos-SB2

Tabla 9. Remoción de la concentración de Fosfatos-SB2

Fecha de monitoreo	Afluente		Efluente		%Remoción global (SB2)
	M1	M3 (Lombrifiltro)	Remoción (%)	M5 (HS)	
05/05/2016	24.484	2.68	89.05	1.439	94.12
14/05/2016	23.8	2.2	90.76	0.615	97.42
21/05/2016	24.4	1.4	94.26	0.759	96.89
28/05/2016	24.3	4.4	81.89	3.15	87.04
04/06/2016	19.8	1.8	90.91	0.589	97.03
Promedio	23.36	2.50	89.37	1.31	94.50

En la Figura 16, los valores de coliformes termotolerantes van disminuyendo de manera significativa al paso por el lombrifiltro con la especie *Eisenia Foétida* (M3) y el humedal superficial con la especie *Eichhornia crassipes* (M5). Presentan una máxima concentración de coliformes termotolerantes en el punto M1 de 6.80E+06 NMP/100ml (21/05/2016), en el punto M3 de 4.50E+05 NMP/100ml (21/05/2016) y

en el punto M5 de 1.30E+05 NMP/100ml (04/06/2016). En promedio, el punto M1 tuvo una concentración de 4.90E+06 NMP/100ml, en el punto M3 una concentración de 2.52E+05 NMP/100ml y por último en M5 una concentración de 3.21E+04 NMP/100ml. En la Tabla 10 se aprecian los resultados de remoción de coliformes termotolerantes-SB2.

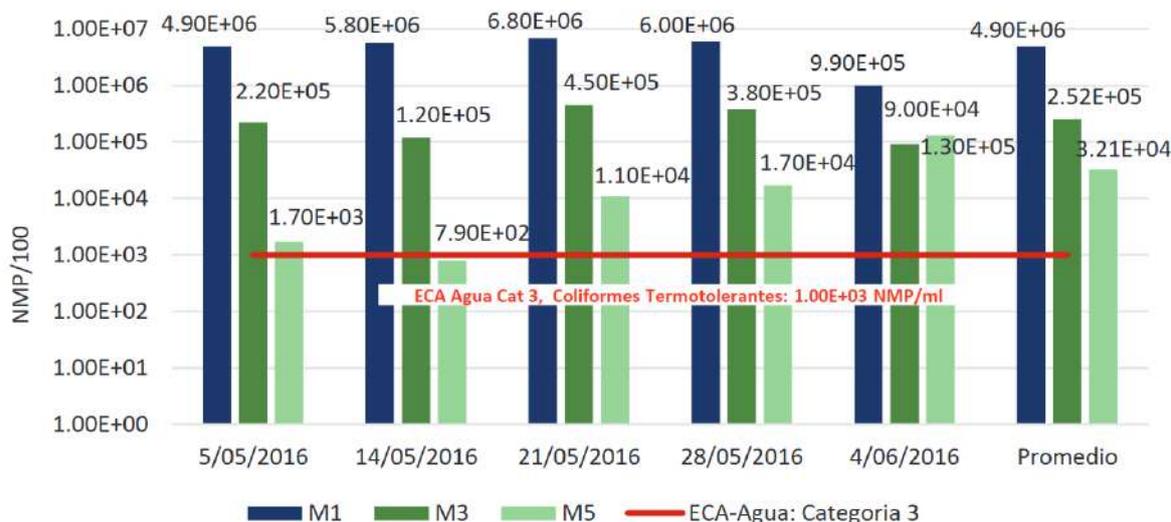


Figura 17. Variación de la concentración de Coliformes Termotolerantes-SB2

Tabla 10. Remoción de la concentración de Coliformes Termotolerantes-SB2

Fecha de monitoreo	Afluente		Efluente			
	M1	M3 (Lombrifiltro)	Remoción (%)	M5 (HS)	Remoción (%)	%Remoción global (SB2)
05/05/2016	4.90E+06	2.20E+05	95.51	1.70E+03	99.23	99.97
14/05/2016	5.80E+06	1.20E+05	97.93	7.90E+02	99.34	99.99
21/05/2016	6.80E+06	4.50E+05	93.38	1.10E+04	97.56	99.84
28/05/2016	6.00E+06	3.80E+05	93.67	1.70E+04	95.53	99.72
04/06/2016	9.90E+05	9.00E+04	90.91	1.30E+05	-44.44*	86.87
Promedio	4.90E+06	2.52E+05	94.28	3.21E+04	97.92	97.28

\* No se tuvo en cuenta en el cálculo de Remoción global y remoción promedio

## Discusión

Duran I. & Redañez M. (2014) en su tesis titulada “Evaluación de un Humedal Artificial de flujo subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas grises” tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes de las aguas grises mediante la construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical en la casa de retiro Alvernia – Cieneguilla, previo a la implementación del humedal con la especie *Cyperus papyrus* se ha previsto una trampa de grasas y un tanque de sedimentación para

que el proceso sea más efectivo. Por otro lado, el caudal de ingreso al sistema fue de 3.65 m<sup>3</sup>/d, el área superficial del humedal fue de 51 m<sup>2</sup> con una profundidad 1.2 m y tiempo de retención de 10 horas. Se obtuvo valores de remoción de 96.39% de DBO<sub>5</sub>, 95.2% de DQO, 97.48% en SST y 99.89% de coliformes termotolerantes, y para los parámetros nitrito y nitratos no se presentó porcentajes de remoción. Asimismo, los resultados se encuentran dentro de los rangos establecidos por la OMS y los estándares nacionales. En la Tabla 11 se muestran los resultados y porcentajes de remoción por parámetro.

Tabla 11. Resultados y porcentajes de remoción en humedal subsuperficial vertical

Parámetro	Valor efluente	% Remoción
Ph	7.92	--
DBO5	13.78 mg/l	96.39
DQO	24.8 mg/l	95.20
SST	2.6 mg/l	97.48
Nitratos	0.27 mg/l	--
Nitritos	0.089 mg/l	--
Coliformes Termotolerantes	4.32 x10 <sup>2</sup> NMP/100ml	99.89

Fuente: Duran y Redañez, 2014

En esta investigación, al igual que en la investigación de Duran I. & Redañez M. en el 2014, se ha previsto un pre tratamiento y tratamiento primario antes de la implementación del humedal subsuperficial de flujo vertical (HSSFV); sin embargo, en la presente investigación se agregó un humedal superficial (HS) después del HSS- FV. Por otro lado, se trabajó a nivel piloto con un caudal de 0.018 m<sup>3</sup>/d, 0.27 m<sup>2</sup>,

profundidad 0.4 m y tiempo de retención hidráulica 2.16 días utilizando las especies *Cyperus papyrus* y *Alocasia macrorrhiza* para el HSSFV, y un área de 0.391 m<sup>2</sup>, profundidad 0.25 m y tiempo de retención hidráulica 3.5 días utilizando la especie *Eichhornia crassipes* para el HS. Al igual que la investigación de Duran se obtuvieron altos porcentajes de remoción, tal como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Comparación de resultados y porcentajes de remoción

Parámetro	Humedal flujo vertical (Duran & Redañez, 2014)		Sistema de Biofiltro 1 (Quispe, 2018)		Sistema de Biofiltro 2 (Quispe, 2018)	
	Promedio	% Remoc.	Promedio	% Remoc.	Promedio	% Remoc.
DBO <sub>5</sub>	13.78	96.39	11.13	91.55	11.36	91.23
SST	2.6	97.48	5.72	95.71	12.66	90.33
Nitratos	0.27	--	1.63	--	2.25	--
Nitritos	0.089	--	0.64	--	0.48	--
Coliformes Termotolerantes	4.32 x10 <sup>2</sup>	99.89	6.4 x10 <sup>3</sup>	99.87	3.21 x10 <sup>4</sup>	97.28

En la Tabla 12, los resultados del sistema de biofiltro 1 (SB1) se asemejan a la investigación de Duran; sin embargo, en la presente investigación por fines prácticos se trabajó a una pequeña escala, con un área de 0.27 m<sup>2</sup> y profundidad 0.4 m para el HSSFV, y un área de 0.391 m<sup>2</sup> y profundidad 0.25 m para el HS, mientras en la investigación de Duran trabajó en un área de 51 m<sup>2</sup> con una profundidad 1.2 m. Cabe resaltar que si bien las bajas profundidades en humedales HSS, aumentan el potencial de transferencia de oxígeno, lo cual favorece el desarrollo de una biomasa aerobia (biofilm) fijada sobre el medio poroso y con ello la eliminación de la materia y la nitrificación, es necesario un área superficial mayor. En este sentido, para las dimensiones trabajadas los resultados son óptimos.

Respecto a los parámetros nitritos y nitratos si bien no ha presentado porcentaje de remoción, sus valores se encuentran por debajo de los estándares de calidad para Agua – Categoría 3 para riego de vegetales 10 mg/l para nitritos y 10 mg/l nitratos.

En tanto en la presente investigación se optó por trabajar con dos especies en el HSSFV, ya que ello permite una mayor estabilidad a largo plazo frente a perturbaciones (por ejemplo, plagas), aumenta la superficie colonizada por las bacterias y mejora el valor ecológico del humedal (García, Morató, & Bayona, 2004). Sin embargo, será necesario a largo plazo la eliminación de la potencial vegetación oportunista a fin de evitar la disminución de conductividad hidráulica del

sistema que conlleva a la disminución de la vida activa del mismo.

Zambrano X. et al (2009) en su artículo de investigación titulado “Diseño del sistema de tratamiento para la depuración de las aguas residuales domésticas de la población San Eloy en la provincia de Manabí por medio de un sistema de tratamiento natural compuesto por un humedal artificial de flujo libre”, tuvo como objetivo colaborar con la reducción de la contaminación de los cuerpos de agua depurando las aguas residuales que pasen por este sistema, mediante la implementación de un diseño de humedal de flujo libre basado en la remoción de contaminantes como la DBO, sólidos suspendidos, fósforo y nitrógeno principalmente, previo a la implantación del humedal con la especie *Scirpus* se ha previsto un tanque séptico y filtro anaerobio para que el proceso sea más efectivo. Llegando a la conclusión después de los cálculos realizados que el sistema obtiene una DBO<sub>5</sub> y SST de efluente teórico de 50 mg/l y 36 mg/l que corresponde

al 80 % y 86% de remoción, respectivamente, y está por debajo del valor 100 mg/l permitido por la legislación ambiental de Ecuador, valor que se espera obtener en la construcción del sistema.

La presente investigación, al igual que la tesis desarrollada por Zambrano, X. en el 2009, ha previsto un tanque séptico como tratamiento primario antes del diseño del humedal de flujo libre, sin embargo, en la presente investigación se agregó adicionalmente un canal de desbaste como pre tratamiento para ambos sistemas de biofiltros (SB1 y SB2), un humedal subsuperficial de flujo vertical en el SB1 empleando a las especies *Cyperus papyrus* y *Alocasia macrorrhiza* y un lombrifiltro en el SB2, y al igual que la investigación de Zambrano, para los parámetros de DBO<sub>5</sub> y SST los valores se encuentran por debajo de los valores establecidos en los estándares de calidad de agua. Los resultados comparativos de remoción de DBO<sub>5</sub> y SST de cada investigación se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados y porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub> y SST

Tratamiento	DBO <sub>5</sub>		SST	
	Promedio	% Remoción	Promedio	% Remoción
Sistema de tratamiento natural				
compuesto por un humedal artificial de flujo libre	50	80	36	86
Sistema de Biofiltro 1 (SB1)	11.13	91.55	5.72	95.71
Sistema de Biofiltro 2 (SB2)	11.36	91.23	12.66	90.33

En Tabla 13, se aprecian mejores resultados en el SB1 y SB2 en cuanto a remoción de materia orgánica DBO<sub>5</sub> debido a que se empleó humedales/lombrifiltro adicionales. En este sentido, debido a que en los humedales subsuperficiales de flujo vertical prevalecen las vías aerobias en comparación con otros tipos de humedales, favorece la biodegradación de la materia orgánica presente en el medio. Estos valores se encuentran dentro de lo esperado, confirmando que el rendimiento para DBO<sub>5</sub> en humedales puede estar entre 75-95% y produciendo efluentes menores a 20 mg/l (García & Corzo, 2008).

En la remoción de sólidos suspendidos por medio de los procesos físicos de sedimentación y filtración se consigue la eliminación de la materia en suspensión, en el cual el rendimiento de eliminación de la materia en suspensión en los humedales subsuperficiales suelen ser muy elevado. Normalmente es de más del 90%

produciendo efluentes con concentraciones menores de 20 mg/l de forma sistemática (García & Corzo, 2008).

## Conclusiones

Se implementó los dos sistemas pilotos de biofiltro (SB1 y SB2), el primero (SB1) compuesto por un canal de desbaste, tanque séptico, seguido por un humedal de flujo subsuperficial vertical y un humedal de flujo superficial. Mien- tras el segundo (SB2), conformado por un canal de desbaste, tanque séptico, seguido por un lombrifiltro y un humedal de flujo superficial. Las especies empleadas en el humedal subsuperficial fueron *Cyperus papyrus* y *Alocasia macrorrhiza*, mientras en el humedal superficial se utilizó la especie *Eichhornia crassipes*. Cabe resaltar, por fines prácticos, que el canal de desbaste y el tanque séptico se compartió por ambos sistemas.

Para el análisis de la calidad del agua residual, se establecieron cinco puntos de monitoreo, el primero a la salida del tanque séptico (M1), el segundo a la salida del humedal subsuperficial de flujo vertical (M2), el tercero a la salida del lombrifiltro (M3), el cuarto y quinto a la salida del humedal superficial (M4 y M5). En cada punto de muestreo se analizó los SST (mg/l), DBO5 (mg/l), nitratos, nitritos (mg/l), fosfatos (mg/l) y coliformes termotolerantes (NMP/100 ml), con una frecuencia semanal durante cinco semanas. Luego de haber realizado los análisis en el laboratorio se evidenció que la calidad del agua del sistema de biofiltro SB1 tiene una alta eficiencia de remoción de los parámetros SST, DBO5 y coliformes termotolerantes respecto al sistema biofiltro SB2, alcanzando un porcentaje de remoción promedio de 95.71%, 91.55% y 99.87%, respectivamente. De manera referencial se compararon los resultados de ambos sistemas (SB1 y SB2) con los estándares de calidad ambiental para agua (ECA-Agua) en la categoría 3 (D1: riego de vegetales – Agua para riego no restringido) establecido en el D.S. N°004-2017-MINAM, los cuales para los parámetros DBO5, SST, nitratos, nitritos cumplen con lo establecido en la normativa.

### Agradecimiento

Al Dr. Walter Gómez Lora por su asesoría en la realización de esta investigación, al Centro de Investigación de gestión del agua (CEIGA) y al equipo de promotores del Programa de Estudiantes Investigadores de la Oficina Central de Investigación - Vicerrectorado de Investigación por su ayuda en mi formación como investigadora.

### Referencias

Centro Internacional de la Papa. (2007). *Agricultores en la Ciudad. Enfrentando la pobreza de la agricultura*. Lima: Centro Internacional de la Papa.

Duran, I., & Redañez, M. (2014). *Evaluación de un Humedal Artificial de flujo subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas grises*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.

García, J., & Corzo, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y

Ambiental. Obtenido de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia\\_and\\_Acorzo.pdf?sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia_and_Acorzo.pdf?sequence=1)

García, J., Morató, J., & Bayona, J. (2004). *Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos*.

Lara, J. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Trabajo final Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, Instituto Catalán de Tecnología, Barcelona.

Soto, N., & Siura, S. (2008). *Panorama de Experiencias de Agricultura Urbana en Lima Metropolitana y Callao*. Lima: Biblioteca Nacional del Perú.

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento-SUNASS. (Octubre de 2015). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito de operación de la entidades prestadoras de servicio saneamiento*. Obtenido de <http://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/ptar.pdf>

Trang, N., & Konnerup, D. (2010). *Ecological Engineering*. En *Kinetics of pollutant removal from domestic wastewater in a tropical horizontal subsurface flow constructed wetland system: Effects hydraulic loading rate*. (págs. 527-535).

Vergara, A. (2013). *Las EPS y su desarrollo*. Lima: SUNASS.

Zambrano, X., Saltos, X., & Villamar, F. (2009). *Diseño del sistema para la depuración de las aguas residuales domesticas de la población San Eloy en la provincia de Manabi por medio de un sistema natural compuesto por un humedal artificial de flujo libre*. Guayaquil, Ecuador.