

Determinación de la eficiencia de remoción de carga contaminante de filtros anaerobios para agua residual pecuaria

Determination of the efficiency of remove of contaminating load on anaerobic filters for livestock wastewater

Camilo Alejandro Calderón G.¹

RESUMEN

Las aguas residuales de origen pecuario que se generan en la Granja Experimental Botana, a pesar de pasar por un proceso de tratamiento, crean un afluente que desemboca en la Quebrada Miraflores con altos índices contaminantes, poniendo en riesgo el desarrollo de las actividades que se ejecutan aguas abajo. Por esto, se ejecutó la presente investigación, en la que se determinó la eficiencia de remoción de carga contaminante de dos filtros anaerobios a escala piloto con lecho reciclable, teniendo en cuenta como variables de evaluación la DBO₅, la DQO y los SST. Para el diseño del proceso de filtrado que se instaló como anexo al final de la planta de tratamiento de agua residual de la granja, se tuvo en cuenta el Sistema de Tratamiento "CENSA" de CORNARE, ubicado en el municipio de Santuario, Antioquia, y se lo acopló de acuerdo a los elementos ya existentes en la PTAR. El proceso de evaluación se dividió en dos periodos, donde primero se determinó el comportamiento de los filtros con dos tiempos de retención hidráulica diferentes y de igual forma, se estudió si al anexar un proceso de recirculación de agua en el filtro, la remoción mejoraría; como resultado de la investigación se obtuvo que un proceso que maneje un TRH mayor, obtendrá una mayor eficiencia en remoción de carga contaminante, e igualmente, se obtendrán mejores resultados cuando es añadido un proceso de recirculación. El sistema alcanzó niveles máximos de remoción del 64% en DBO₅, 35,27% en DQO y 86,54% en SST.

Palabras clave: Tiempo de Retención Hidráulico, Recirculación, DBO₅, DQO, Sólidos suspendidos totales.

¹ Estudiante del Programa de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño. Pasto. Colombia. 2018. cacg1012@hotmail.com

ABSTRACT

The wastewater of livestock origin that are generated in the Botana Experimental Farm, despite going through a treatment process, create a tributary that flows into the Miraflores Creek with high polluting indexes, putting at risk the development of the activities that are carried out downstream. Therefore, the present investigation was carried out, in which the contaminant load removal efficiency of two pilot-scale anaerobic filters with a recyclable bed was determined, taking into account BOD₅, COD and TSS as evaluation variables. For the design of the filtering process that was installed as an annex to the end of the wastewater treatment plant of the farm, the Treatment System "CENSA" of CORNARE, located in the municipality of Santuario, Antioquia, was taken into account. It was coupled according to the elements already existing in the WWTP. The evaluation process was divided into two periods, where first the behavior of the filters was determined with two different hydraulic retention times and in the same way, it was studied whether to append a process of recirculation of water in the filter, the removal would improve, as a result of the research it was obtained that a process that manages a higher HRT, will obtain a greater efficiency in removal of contaminant load, and likewise, better results will be obtained when it is added a process of recirculation. The system reached maximum levels of removal of 64% in BOD₅, 35.27% in COD and 86.54% in SST.

Keywords: Hydraulic Retention Time, Recirculation, BOD₅, COD, Total suspended solids.

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los elementos claves para la vida, por ende, no es casualidad que los primeros establecimientos de civilizaciones humanas se hayan localizado a inmediaciones de grandes fuentes hídricas, puesto que se ha evidenciado que el desarrollo de los asentamientos urbanos está ligado a los cursos fluviales, que han actuado como arterias de fertilidad y comunicación a lo largo de la historia (Mora, 2016), ya que, el recurso hídrico es un componente esencial en el desarrollo del día a día de los humanos al ser utilizado para el consumo, la agricultura, las actividades pecuarias, la obtención de energía y demás.

Dentro de la Granja Experimental Botana de la Universidad de Nariño, así como en la mayoría del departamento de Nariño, se llevan a cabo actividades agrícolas y pecuarias, las que demandan cantidades significativas de agua; dentro de estas, se encuentra un criadero porcino en el cual se realizan acciones permanentes de lavado de galpones, generando efluentes cargados de material orgánico por la excretas presentes en estos que si no se les aplicara ningún tipo de tratamiento, podrían contaminar el agua superficial, el subsuelo e inclusive afectar la calidad del aire por causa de gases tóxicos como el dióxido de carbono o el amoníaco (Pérez, 2000).

Por esto, es de gran importancia determinar las características de las aguas residuales producidas en la granja para así, implantar un sistema de tratamiento, teniendo en cuenta las reglamentaciones colombianas pertinentes que deben ser aplicadas, como la Resolución 0631 de 2015 (MINAMBIENTE, 2015), que establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales.

En la granja ya existe una planta de tratamiento de aguas residuales que según la Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO, 2017), a su salida crea un afluente de corriente continua llamado Granja Botana y que escurre superficialmente hasta desembocar en el cauce principal de la Quebrada Miraflores, que a pesar de que se está llevando a cabo una exclusión del 80% de la carga contaminante, la misma corporación, dentro de sus informes propone aumentar el porcentaje de remoción al 87% para cumplir con lo establecido en la Resolución 0631 de 2015; por lo que el presente estudio tiene como

objetivo principal el determinar la eficiencia de remoción de carga contaminante de dos filtros anaerobios con lecho reciclado a escala piloto, instalados como un sistema adicional de fácil adopción y de apoyo al final del proceso llevado a cabo por la planta de tratamiento de agua residual de la Granja Experimental Botana de la Universidad de Nariño.

MATERIALES Y MÉTODOS

El actual proyecto se desarrolló en instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Granja Experimental Botana de la Universidad de Nariño (Figura 1), ubicada en la vereda Botana perteneciente al corregimiento de Catambuco del municipio de Pasto, a nueve kilómetros sobre la vía Panamericana Sur que conduce al municipio de Ipiales, desviándose al sector izquierdo de la carretera que comunica a la vereda El Campanero, en el kilómetro 77, localizada al occidente del meridiano de Greenwich a $1^{\circ}09'30.62''$ LN, $77^{\circ}16'31.81''$ LO, a una altura de 2820 msnm, con una temperatura promedio de 12°C y una precipitación media anual de 967mm (UDENAR, 2016).

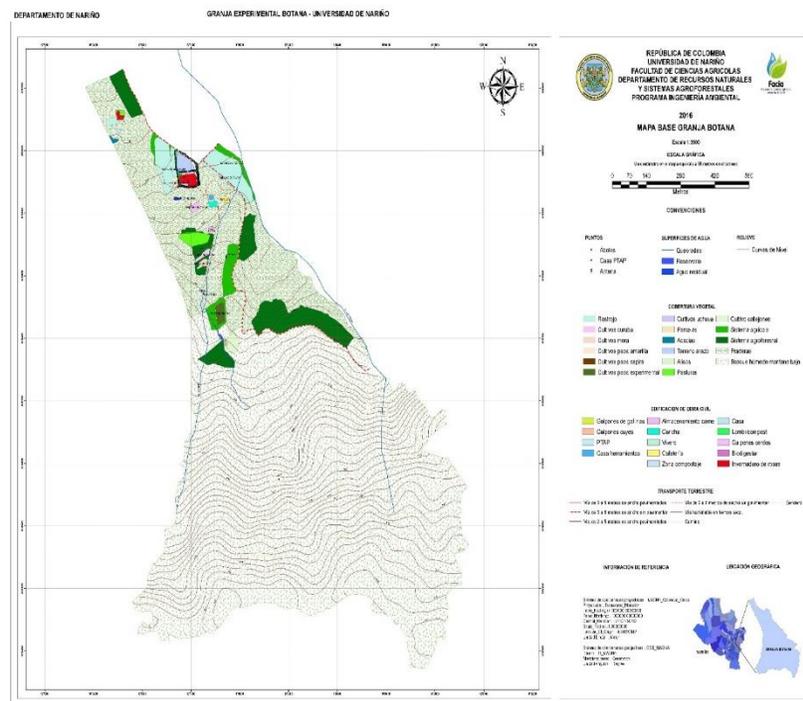


Figura 1. Mapa Base Granja Experimental Botana.

Fuente: UDENAR, 2016.

Fase I. Diseño del sistema de tratamiento. Se comenzó estableciendo el modelo del sistema de tratamiento a escala piloto que fue instalado como anexo a la planta de tratamiento de aguas residuales de la Granja Experimental Botana de la Universidad de Nariño, para ello, se tuvo en cuenta el Sistema de Tratamiento de Residuos Líquidos "CENSA" del laboratorio de aguas de la Corporación Autónoma Regional del Río Negro y el Río Nare (CORNARE) en la sede de Santuario, Antioquia. De tal forma, se estableció la implementación de dos filtros anaerobios de flujo descendente con lecho reciclable, los que fueron alimentados por un tanque de almacenamiento e igualación y así mismo, la instalación de un tanque de recirculación para uno de los tanques de tratamiento.

El material usado para conformar el medio filtrante fue escogido según las recomendaciones de Pinto y Chernicharo (1996, citado por Torres, Rodríguez y Uribe, 2003), que dicen que tiene que ser estructuralmente resistente, biológica y químicamente inerte, y que tenga un precio reducido; además se tuvo en cuenta que sea un material que su vida útil haya terminado con el fin de darle un nuevo propósito.

Fase II. Montaje y estabilización del sistema. Una vez establecida la forma del sistema, se inició con la recolección de tapas de botellas plásticas recicladas las que serían destinadas como el medio filtrante, para lo que se les hicieron agujeros de taladro con broca de 5/32 pulgadas con el fin de aumentar la rugosidad del material, lo que aumenta la adherencia de biopelícula en el lecho (Gualteros y Chacón, 2015).

Posteriormente, se inició el proceso de inoculación del material con el fin de que se vaya creando el biofilm sobre la superficie y de tal forma cuando se diera inicio al proceso de remoción de carga contaminante, se ejecute un mejor trabajo por parte de los microorganismos, los que según Bejarano y Escobar (2015), son los principales encargados de la degradación del material orgánico contaminante del agua y al ejecutar un proceso previo de inoculación, se obtienen porcentajes altos de remoción en los sistemas. Para esto, se sumergieron las tapas en agua residual proveniente tanto del afluente, como del efluente de la planta de tratamiento de agua residual de la granja, durante un periodo de 6 semanas, en las que semanalmente se cambiaba el agua y el porcentaje de concentración de agua residual que se agregaba de cada punto, esto con el fin de acoplar a los microorganismos a

las concentraciones de contaminantes con las que trabajarían finalmente tal y como lo sugieren Franco y Ricaurte (2018).

Para la construcción de los filtros se tomaron dos baldes de pegamento reciclados de cinco galones a los que se les realizaron dos agujeros, uno de entrada y uno de salida, los que serían alimentados a través de una tubería de media proveniente de un tanque de alimentación e igualación. Además, a cada filtro, se le instaló un falso fondo en acrílico con orificios que permitieran la corrida del agua y la retención del lecho y los sólidos y así mismo, cada uno contó con un sistema de distribución que permitiera dar una repartición homogénea del fluido en todo el filtro; esto de acuerdo a las recomendaciones del CEPIS (2004).

Antes de comenzar a evaluar la eficiencia de los biofiltros instalados, se dejó que el sistema se acople a las condiciones del flujo constante de agua residual, por lo que se esperaron aproximadamente ocho semanas, esto para cumplir con las condiciones del medio que establece Belalcázar (1991) para que se dé un correcto funcionamiento de la acción de los microorganismos.

Fase III. Evaluación de acuerdo al Tiempo de Retención Hidráulica. En esta etapa del estudio se midió la eficiencia de acuerdo a dos diferentes tiempos de retención hidráulica (TRH) en cada tanque.

Para el desarrollo de esta fase, se tomaron en cuenta las referencias de Metcalf y Eddy (2012), Padilla (2010) y Ruíz, *et al.* (2000), que sugerían distintos intervalos de TRH para el correcto funcionamiento de un filtro anaerobio, y se sacaron dos puntos en común entre dichas sugerencias y con la ayuda de una fórmula simple de razón entre volumen y caudal, se concordaron dos diferentes caudales en cada tanque con los que se evaluó la eficiencia de aquellos TRH con la ayuda de análisis de laboratorio en tres diferentes muestreos tomados semanalmente, teniendo como puntos de comparación la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales, tanto del afluente como de los efluentes de los puntos de salida de los filtros.

Los análisis de las muestras de agua residual tomadas, fueron hechos por el personal del laboratorio de análisis químico y aguas de la sección de laboratorios de la Universidad de Nariño, manejando para la DBO₅ una técnica de luminiscencia, la DQO se determinó por colorimetría y los SST a través de gravimetría.

Con los resultados de las pruebas de laboratorio, se eligió el mejor TRH en cuanto a porcentaje de remoción de carga contaminante y de tal forma, se procedió a igualar el caudal en ambos tanques para así pasar a la siguiente fase de comparación.

Fase IV. Evaluación de acuerdo al proceso de recirculación. Para este periodo, se instaló un tanque de recirculación el que estaba conectado a uno de los biofiltros, con el fin de determinar si la eficiencia aumentaría o no al agregar un proceso de recirculación del agua residual ya tratada una vez. Esto, al igual que con el TRH se estableció por medio de análisis de laboratorio, realizados por el mismo personal con las mismas técnicas, teniendo como punto de comparación las mismas variables (DBO₅, DQO y SST), pero esta vez se aumentó el número de muestreos, de tres a cinco, y se los ejecutó en una frecuencia más corta, es decir, un muestreo cada tres días, con el fin de tener más control sobre el sistema.

Finalmente, para comparar el desempeño de los biofiltros durante el periodo de ejecución de la segunda etapa, se llevó a cabo un análisis estadístico en el programa Statgraphics Centurion (vXVII), en el cual se sometieron los datos a un análisis de varianza simple (ANOVA) y las diferencias de medias de cada tanque se compararon por medio de la prueba Tukey a $p \leq 0,05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fase I. Diseño del sistema de tratamiento. Para diseñar la estructura final del sistema a instalarse en la planta de tratamiento de agua residual de las instalaciones de la Granja Experimental Botana de la Universidad de Nariño, se tuvo en cuenta los elementos ya presentes en la misma, por lo que se acondicionó el diseño original, conectándolo a un tanque de almacenamiento que a su vez serviría como tanque de igualación y de tal forma, se obtuvo la formación plasmada en la Figura 2.

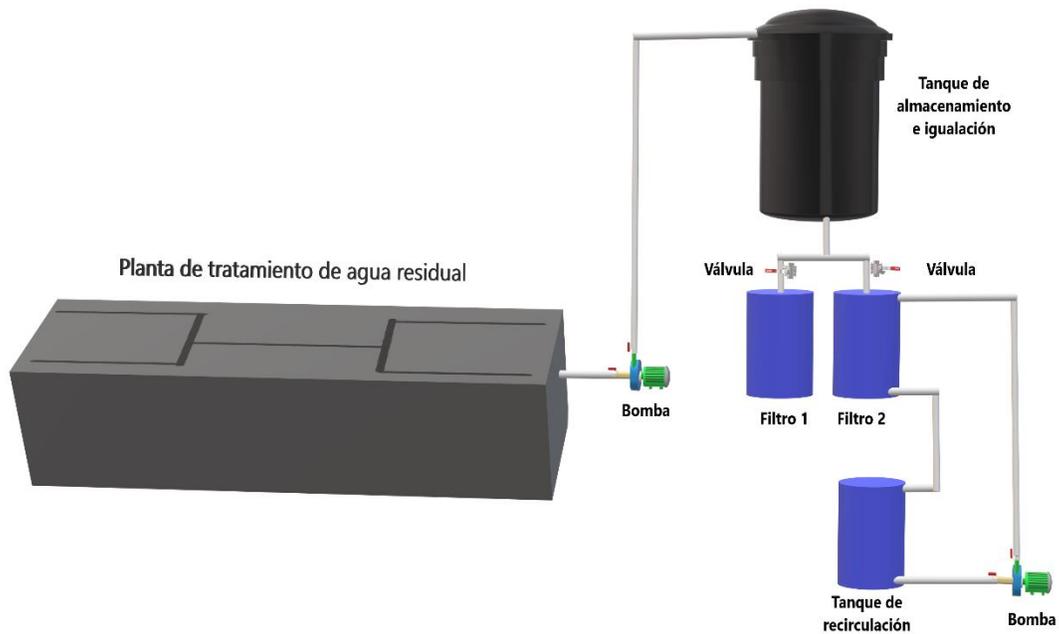


Figura 2. Diseño del sistema a instalarse.

Fase II. Montaje y estabilización del sistema. A estos biofiltros, antes de instalarlos se les hizo una preparación, empezando por la creación de los puntos de alimentación y de salida, y la instalación del falso fondo, el que según Pérez (1991), crea una cámara en la parte inferior del filtro que recoge toda el agua de filtrado y así mismo, distribuye el agua con una presión uniforme en caso de realizar un lavado al sistema.

La concentración de agua residual usada tanto del afluente, como del efluente de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR), usada para la inoculación del lecho filtrante, se distribuyó semanalmente de acuerdo a los porcentajes mostrados en la Figura 3, donde se comenzó usando un cien por ciento del agua del efluente en la semana uno, cambiando las concentraciones hasta llegar a la semana seis donde se usó únicamente agua proveniente del afluente de la PTAR.

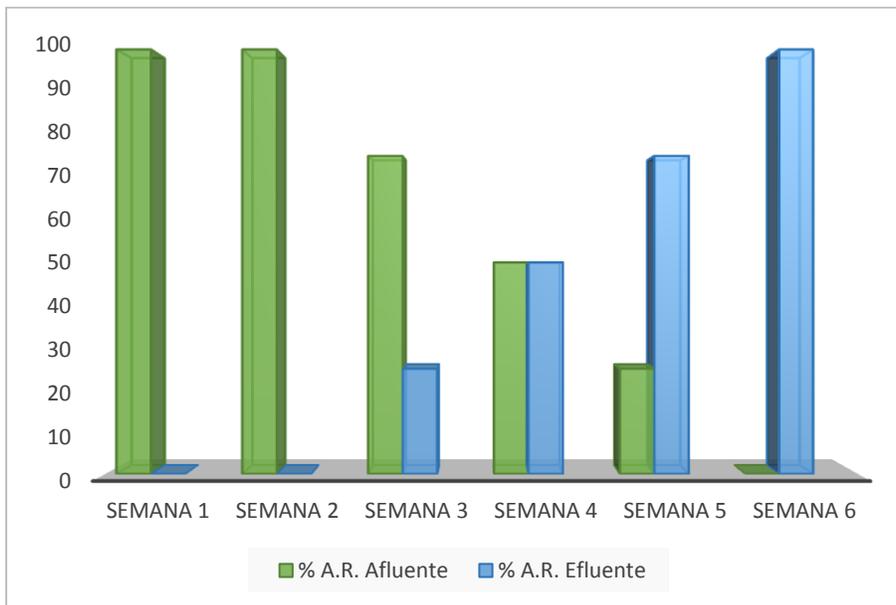


Figura 3. Porcentajes de agua residual usada para inoculación.

Fase III. Evaluación de acuerdo al Tiempo de Retención Hidráulica. Los tiempos de retención hidráulica usados en la primera etapa de comparación, fueron tomados a partir de puntos en común estipulados por diferentes autores, tal y como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Recomendaciones de Tiempos de Retención Hidráulica en Filtros.

No.	Autor	TRH (h)	Rango Escogido
1	Metcalf y Eddy (2012)	12 – 48	
2	Padilla (2010)	12 – 96	12 y 48 horas
3	Ruíz <i>et al.</i> (2000)	12 – 170	

De esta manera, con los TRH escogidos, se procedió a implementarlos en el sistema y esto se logró al establecer los caudales de entrada de cada filtro con ayuda de las válvulas instaladas en el canal de alimentación de cada uno. Es de aclarar que los caudales a usar, fueron obtenidos a partir de una formula simple de razón entre el volumen del tanque y el TRH, tal y como se muestra a continuación.

$$TRH = \frac{Volumen (V)}{Caudal (Q)} \rightarrow Caudal (Q) = \frac{Volumen (V)}{TRH}$$

El volumen de los tanques filtrantes se obtuvo con la siguiente formula

$$\text{Volumen (V)} = \pi \times r^2 \times h$$

$$\text{Volumen (V)} = \pi \times (0,15\text{m})^2 \times 0,35\text{m}$$

$$\text{Volumen (V)} = 0,02\text{m}^3$$

De tal forma, se obtuvieron los siguientes caudales

$$\text{Caudal 1 (Q)} = \frac{0,02 \text{ m}^3}{12 \text{ h}}$$

$$\text{Caudal 1 (Q)} = 0,0017 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Caudal 1 (Q)} = 0,0017 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{1000\text{L}}{1\text{m}^3} \times \frac{1000\text{mL}}{1\text{L}} \times \frac{1\text{h}}{60 \text{ min}}$$

$$\text{Caudal 1 (Q)} = 28,33 \text{ mL/min}$$

$$\text{Caudal 2 (Q)} = \frac{0,02 \text{ m}^3}{48 \text{ h}}$$

$$\text{Caudal 2 (Q)} = 0,00042 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Caudal 2 (Q)} = 0,00042 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{1000\text{L}}{1\text{m}^3} \times \frac{1000\text{mL}}{1\text{L}} \times \frac{1\text{h}}{60 \text{ min}}$$

$$\text{Caudal 2 (Q)} = 7 \text{ mL/min}$$

Cabe resaltar que se comprobó que los caudales en los filtros fueran los determinados anteriormente, realizando mediciones por el proceso de volumetría, usando una probeta de 50 mL que se dejaba llenar durante un minuto contabilizado con cronometro. Dichas mediciones se realizaron en el conducto de salida puesto que, según el principio de conservación de la masa líquida de mecánica de fluidos, el caudal volumétrico se va a mantener constante, es decir será igual tanto en la entrada como en la desembocadura del filtro. (Cienfuegos, 2011) Dichas mediciones se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Mediciones de caudales.

	Variables	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio
Caudal 1	Volumen	28 mL	28,75 mL	28,5 mL	28,42 mL/min
	Tiempo	1 min	1 min	1 min	
Caudal 2	Volumen	7,25	6,75	7,25	7,08 mL/min
	Tiempo	1 min	1 min	1 min	

Después de una semana de haber iniciado el proceso de tratamiento con la primera fase, se tomó el primer muestreo y se llevó a laboratorio, donde se analizó la DBO₅, la DQO y los SST de las muestras tomadas tanto en la entrada del sistema, como a la salida de los biofiltros; dicho proceso se repitió en dos ocasiones más, obteniendo los datos mostrados en la Tabla 3, teniendo en cuenta que la salida uno corresponde al biofiltro que maneja un caudal de 7 mL/min, y la salida dos es la desembocadura del tanque que trabajaba con un caudal de 28,33 mL/min.

Tabla 3. Resultados análisis de laboratorio de la primera etapa de evaluación.

Semana	Punto de muestreo	DBO₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
1	Entrada	108,00	465,67	190,0
	Salida 1	80,22	365,67	29,0
	Salida 2	84,36	355,67	50,0
2	Entrada	59,04	262,33	17,0
	Salida 1	74,50	292,33	62,0
	Salida 2	72,13	262,33	104,0
3	Entrada	88,28	319,0	29,0
	Salida 1	85,27	332,3	53
	Salida 2	89,86	329,0	45,5

A partir de los resultados de los análisis, se obtuvo el porcentaje de remoción obtenido en cada biofiltro, según cada parámetro, obteniendo los resultados que muestra la Tabla 4.

Tabla 4. Porcentaje de remoción de carga contaminante de la primera etapa

Semana	Punto de muestreo	DBO₅	DQO	SST
1	Salida 1	25,72%	21,47%	84,74%
	Salida 2	21,89%	23,62%	73,68%
2	Salida 1	-26,19%	-11,44%	-264,71%
	Salida 2	-22,17%	0,00%	-511,76%
3	Salida 1	3,41%	-4,17%	-82,76%
	Salida 2	-1,79%	-3,13%	-56,90%

Tal y como se observa en los resultados de las semanas dos y tres, en lugar de generarse una reducción en los niveles de los parámetros evaluados, se observó un aumento en los mismos, lo que demuestra que existió un incremento en la concentración de carga contaminante de las muestras evaluadas. Cabe resaltar que durante el periodo de ejecución de esta fase y en el tiempo de toma de las muestras, los biofiltros estuvieron trabajando con un flujo de agua intermitente, a causa de que se presentaron varios episodios en los que el sistema fue afectado y manipulado por acciones de terceros, y además teniendo en cuenta que las actividades que se llevan a cabo en la Granja Experimental Botana y que generan aguas residuales, solo se presentan periódicamente en la semana y únicamente durante el día (CORPONARIÑO, 2017).

De tal forma y teniendo en cuenta lo estipulado en el Título E del RAS 2000 (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000), que a pesar de estar derogado por la Resolución 0330 del 2017 (MINVIVIENDA, 2017), esta última excluye la descripción de filtros, donde se expresa que, un filtro con flujo intermitente debe presentarse después de un proceso de sedimentación, con el fin de evitar la acumulación excesiva de material contaminante en el filtro, que fue lo que ocurrió en este caso por lo cual, al reactivar el flujo dentro del tanque, el agua residual inyectada arrastra todos los materiales precipitados anteriormente, los que se pueden presentar como incrementos en los índices evaluados en los muestreos.

Además, según la misma Resolución y el CEPIS (2004), para filtros que manejan flujos intermitentes se recomienda utilizar un material filtrante granular de lavado durable con tamaño de 0,25 a 0,5 mm; el que es un material totalmente diferente y con un tamaño efectivo menor al que se usó en este caso. Así mismo, se recomienda que, para un filtro con lecho filtrante plástico, el flujo debe ser constante y no discontinuo como ocurrió en esta etapa.

Todo lo mencionado anteriormente, pudo generar que se presenten los resultados obtenidos durante este periodo de estudio, puesto que tal y como lo expresan Menéndez, Pérez y García (2013), al interrumpir el flujo de agua residual, se comienza a generar biomasa en exceso en el sistema, que, al devolver el caudal al filtro, se desprende y puede ser expresada

como anexo de carga contaminante en los efluentes de los tanques. A causa de los resultados negativos obtenidos en los muestreos de las semanas 2 y 3, se trabajó con el primer muestreo, que demuestra mayor remoción en valores de DBO₅ y SST en el caudal de 7 mL/min, con respecto al de 28,33 mL/min.

Fase IV. Evaluación de acuerdo al proceso de recirculación. Una vez igualados los TRH en ambos filtros y con el tanque de recirculación instalado y conectado a uno de ellos, se comenzó con la segunda etapa de evaluación de la investigación, que mostraría si aplicando un ciclo de recirculación se obtendrían mejores resultados en cuanto a porcentajes de remoción. Cabe resaltar que, para esta etapa se realizaron más muestreos y con una frecuencia más corta, es decir se tomaron cinco muestras cada tres días, sin embargo, se mantuvieron los mismos puntos que en la etapa uno y se analizaron las mismas variables; esto con el fin de evitar los percances ocurridos durante la parte inicial; así, en la Tabla 5, se plasman los resultados obtenidos durante este capítulo.

Tabla 5. Resultados análisis de laboratorio de la segunda etapa de evaluación

Muestreo	Punto de Muestra	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
1	Entrada	83,42	369,00	36,5
	Salida sin recirculación	130,81	419,00	148,0
	Salida con recirculación	84,1	385,67	27,0
2	Entrada	121,56	597,33	370,4
	Salida sin recirculación	89,77	432,33	215,13
	Salida con recirculación	43,76	345,67	55,0
3	Entrada	85,18	429,00	28,5
	Salida sin recirculación	83,17	419,00	28,0
	Salida con recirculación	48,33	286,96	15,45
4	Entrada	126,91	662,33	208,0
	Salida sin recirculación	100,29	455,67	104,40
	Salida con recirculación	60,70	362,76	28,0
5	Entrada	147,95	609,00	110,0
	Salida sin recirculación	95,77	535,67	78,0
	Salida con recirculación	74,77	428,13	51,0

Aplicando nuevamente una regla de tres simple, se obtuvo la siguiente tabla 6, con los porcentajes de remoción obtenidos en esta etapa.

Tabla 6. Porcentaje de remoción de carga contaminante de la segunda etapa

Muestreo	Punto de muestreo	DBO₅	DQO	SST
1	Salida sin recirculación	-56,81%	-13,55%	-305,48%
	Salida con recirculación	-0,82%	-4,52%	26,03%
2	Salida sin recirculación	26,15%	27,62%	41,92%
	Salida con recirculación	64,00%	42,13%	85,15%
3	Salida sin recirculación	2,36%	2,33%	1,75%
	Salida con recirculación	43,26%	33,11%	45,79%
4	Salida sin recirculación	20,98%	31,20%	49,81%
	Salida con recirculación	52,17%	45,23%	86,54%
5	Salida sin recirculación	35,27%	12,04%	29,09%
	Salida con recirculación	49,46%	29,70%	53,64%

En los resultados del primer muestreo de esta etapa, se vuelve a observar la situación presentada en el primer período del estudio, que pudo presentarse por residuos del exceso del biofilm generado a causa del flujo intermitente; sin embargo, se evidencia que en el resto de resultados el proceso de remoción de carga contaminante se ejecuta en ambos filtros, lo que evidencia que al realizar muestreos más seguidamente, como lo sugieren Rivera y Valiente (2003), se obtiene un mayor control sobre el sistema y se evita la ocurrencia de eventos que afectan el correcto funcionamiento de los filtros, puesto que de tal forma se garantiza de que este entrando un caudal constante y no intermitente como en el anterior caso.

Durante el análisis estadístico, a través del método de Tukey, usado para comparaciones múltiples con el fin de determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras (Fallas, 2012), se pudo comprobar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los porcentajes de remoción de carga contaminante de los biofiltros evaluados, puesto que se obtuvo un valor de p menor a 0,05 ($p < 0,05$), tanto en el caso de la DBO₅, como en los de la DQO y los SST, demostrando que al anexar un tanque de recirculación, se logra eliminar una mayor concentración de contaminantes en el agua tratada.

Y es que al implementar un tanque por el que pase el agua tratada antes de ser recirculada, según Menéndez *et al.* (2013), es como anexar un sedimentador adicional al sistema, lo que aporta a reducir la concentración de los sólidos del agua residual que entra al filtro y a promover el desprendimiento de la biomasa en exceso que se halla adherida al medio de soporte, consiguiendo una mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes que al hacer la recirculación directamente o al excluir este proceso; así mismo Metcalf y Eddy (2012), expresan que los tanques dispuestos para recirculación, tienen la función de generar un efluente más clarificado y con menor contaminación; por lo que se pueden justificar los resultados obtenidos durante el segundo período de evaluación de los filtros, donde se observa mayor eficiencia en el filtro con tanque de recirculación, con respecto al que no incluye esta acción.

Al final del estudio se observó que los biofiltros alcanzaron picos máximos de remoción del 64% en cuanto a DBO₅, 45,23% en DQO y 86,54% en SST, los que según lo estipulado en el Artículo 184 de la Resolución 0330 de 2017, son índices que demuestran que se obtuvo una buena eficiencia de remoción de carga contaminante en cuanto a DBO₅ y SST.

CONCLUSIONES

El modelo del sistema que se implementó como anexo a la planta de tratamiento de agua residual de la Granja Experimental Botana de la Universidad de Nariño, fue basado en el Sistema de Tratamiento de Residuos Líquidos “CENSA” de la Corporación Autónoma Regional del Río Negro y el Río Nare (CORNARE), y se adaptó conforme a los elementos ya existentes en la PTAR de la zona de estudio.

Los materiales usados para constituir e implementar los filtros, son de fácil obtención, lo que vuelve al sistema en una alternativa viable tanto técnica como económicamente. Además, contribuye a la disminución de residuos sólidos que se generan a diario en las comunidades, y, al ser una alternativa económica y que no requiere de tantas especificaciones, se convierte en una opción viable y replicable para instalarse en otras

fincas o espacios de trabajo para pequeños productores, situación que se presenta en la mayoría del Departamento de Nariño.

La fluctuación en las horas de ejecución de actividades que generan aguas residuales dentro de la Granja Experimental Botana de la Universidad de Nariño, generó que el sistema trabaje con un caudal intermitente y no con uno continuo, lo que, en conjunto con la influencia de terceros y factores externos dentro del sistema, impidieron que el sistema tenga el mejor funcionamiento durante el periodo de estudio.

La evaluación del agua residual indicó que la remoción de carga contaminante en cuanto a los valores de DBO₅ y SST, son aceptables de acuerdo a lo establecido por la normatividad colombiana (Resolución 0330 de 2017).

A pesar de las ocurrencias presentadas, se observó que los filtros remueven porcentajes considerativos que pueden aportar a llegar a un porcentaje de exclusión del 87% del material contaminante, puesto que se obtuvieron picos de remoción del 64% en DBO₅, 35,27% en DQO y 86,54% en SST.

RECOMENDACIONES

El estudio podría ser replicado en las mismas instalaciones de la planta de tratamiento de agua residual de la Granja Experimental Botana, aumentando el control que se tiene sobre el mismo, con el fin de evitar de que se interrumpa el flujo por un periodo de tiempo muy largo, como aconteció en el presente estudio.

Al replicarlo, se podría cambiar la fuente del agua residual que alimenta al sistema, es decir podría inyectarse agua desde el afluente de la PTAR, o inclusive después de cierta operación unitaria, para que con ello se compare el comportamiento que tiene el mismo frente a un agua residual con mayor carga contaminante. Elementos como el material filtrante o las variables de evaluación, también son factores que podrían ser cambiados con el fin de comparar los comportamientos de los biofiltros.

Para posteriores estudios, se recomienda ejecutar pruebas de estabilidad antes de comenzar a evaluar el sistema, como la de ácidos grasos volátiles (AGV), que indica la estabilidad de un sistema a través de la digestión anaerobia del medio, donde si existe una acumulación de AGV en un reactor se refleja desequilibrio dentro del mismo. Esto con el fin de comprobar si la actividad ejecutada por los microorganismos en los filtros se encuentra estabilizada y, por ende, evitar posibles ocurrencias de resultados negativos en los análisis de laboratorio del proceso de evaluación.

Es indispensable obtener una fuente de financiamiento para el estudio, con el fin de aumentar la cantidad de análisis realizados y de tal forma, observar el comportamiento del sistema en el paso del tiempo y determinar si existe alguna secuencia que se sigue en el proceso de remoción de contaminantes. Además, las muestras podrían tomarse de acuerdo a los días en los que se ejecute mayor número de actividades que generen agua residual, esto con el fin de garantizar que se hagan muestreos con un flujo constante dentro del sistema y también teniendo en cuenta lo estipulado en la norma NTC-ISO 5667-2 con respecto a toma de muestras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bejarano, M. y Escobar, M. (2015). Eficiencia del uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una planta de tratamiento de agua residual. Universidad de La Salle. Programa de ingeniería ambiental y sanitaria. Bogotá D.C. Colombia. Recuperado de http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/18014/41091011_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Belalcázar, A. (1991). Empleo de filtro anaerobios para reducir la contaminación de las industrias licoreras. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colombia. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/19484/1/15485-47118-1-PB.pdf>

- CEPIS - Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2004). Capítulo cinco: batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo. En: CEPIS. *Diseño de plantas de tecnología apropiada*. pp.182-233. Perú: CEPIS.
- Cienfuegos, R. (2011). Mecánica de fluidos. Conservación de la masa. Recuperado de http://grupo9fluidos.blogspot.com/2011/06/conservacion-de-la-masa_18.html
- CORPONARIÑO. (2017). Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico – Quebrada Miraflores. Recuperado de <http://www.corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhmirafloresp6.pdf>
- Fallas, J. (2012). Análisis de varianza. Comparando tres o más medidas. Recuperado de http://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-2/complementarias/analisis_de_varianza_2012.pdf
- Franco, L. y Ricaurte, S. (2018). Evaluación de una celda de combustible microbiana para el tratamiento del agua residual del campus universitario Meléndez. Universidad del Valle. Programa de ingeniería sanitaria y ambiental. Santiago de Cali. Colombia. Recuperado de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/11588/1/CB-0576308.pdf>
- Gualteros, L. y Chacón, M. (2015). Estudio de la eficiencia de lechos filtrantes para la potabilización de agua proveniente de la quebrada La Despensa en el municipio Guaduas, Cundinamarca, Vereda La Yerbabuena. Universidad de La Salle. Programa de ingeniería ambiental y sanitaria. Bogotá D.C. Colombia. Recuperado de http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/17426/41081016_2015.pdf?sequence=1
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1995). Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 5667-2. Gestión Ambiental. Calidad del agua. Muestreo. Técnicas generales de muestreo. I.C.S.: 13.060.01. Recuperado de

<http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000144-4dfdd4f559/NTC-ISO%205667-02-1995.%20Tecnicas%20generales%20de%20muestreo.pdf>

Menéndez, C., Pérez, J. y García, J. (2013). *Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales mediante filtros percoladores. Control de la operación, mantenimiento y muestreo*. La Habana. Cuba: Universidad Tecnológica de la Habana, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. 53p. En: https://www.researchgate.net/publication/284446077_Plantas_de_tratamiento_de_aguas_residuales_Filtros_percoladores

Metcalf y Eddy. (2012). Proyecto de instalaciones para el tratamiento biológico del agua residual. McGraw-Hill Inc. Recuperado de http://cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/instalacion_tratamiento_biologico.pdf

MINAMBIENTE - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Recuperado de <http://www.aguasdebuga.net/intranet/sites/default/files/Resoluci%C3%B3n%200631%20de%202015-Calidad%20vertimientos.pdf>

Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - RAS 2000. Sección II. Título E. Tratamiento de aguas residuales. Recuperado de http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_e_.pdf

MINVIVIENDA - Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico – RAS. República de Colombia. Recuperado de <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330%20-%202017.pdf>

Mora, J. (2016). La importancia de los recursos hídricos en los usos del suelo en la Península Ibérica. *Revista Jurídica do Instituto Superior Manuel Teixeira Gomes*. 9: 103-118. Recuperado de

<http://recil.ulusofona.pt/bitstream/handle/10437/8136/La%20Importancia%20de%20los%20Recursos%20H%C3%ADdricos.pdf?sequence=1>

- Padilla, E. (2010). Evaluación de un filtro anaerobio de flujo ascendente para tratar agua residual de rastro. Centro de investigación y asistencia en tecnología y diseño del estado de Jalisco, A.C. Guadalajara, Jalisco. Estados Unidos Mexicanos. Recuperado de <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/59/1/Edith%20Padilla%20Gasca.pdf>
- Pérez, J. (1991). Tratamiento de aguas. Filtración. Universidad Nacional. Bogotá D.C. Colombia. Recuperado de http://bdigital.unal.edu.co/70/6/45_-_5_Capi_4.pdf
- Pérez, R. (2000). Producción porcina y contaminación del agua en la Piedad, Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de investigaciones económicas. Ciudad de México. Estados Unidos Mexicanos. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/159.pdf>
- Pinto, J.D. & Chernicharo, C. A. (1996). Escória de alto-forno. Uma nova alternativa de meio suporte para filtros anaeróbios. In: Anais do III simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Rivera, W. y Valiente, C. (2003). Elaboración de un filtro de aplicación doméstica para la remoción de hierro y manganeso del agua, utilizando el proceso de aeración y contacto. Universidad de El Salvador. San Salvador. El Salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/5762/>
- Ruíz, C., Torrijos, M., Sousbic, P., Martínez, J. y Malleta, R. (2000). The anaerobic SBR process: basic principles for design and automation. Second international symposium on sequencing batch reactor technology. Volumen 1. Oral presentations. July 10-12. Norbonne France. pp. 102 - 109.

Torres, P., Rodríguez, J. y Uribe, I. (2003). Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: influencia del medio de soporte. *Revista Scientia et Technica*. 9(23):75-80.

UDENAR - Universidad de Nariño. (2016). Granja experimental Botana. Recuperado de <http://www.udenar.edu.co/project/granja-experimental-botana/>