

Evaluación de las aguas residuales del lavado de estanques multipropósito con cultivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*)

Evaluation of the wastewater from the washing of multipurpose ponds with rainbow trout farming (*Oncorhynchus mykiss*)

Avaliação das águas residuais da lavagem de estanques multipropósito com cultura de truta arco-íris (*Oncorhynchus mykiss*)

Mónica Alexandra Luna-Imbacuán,¹ Francisco Campos-Bermúdez,² Obeimar Medina-Gutiérrez³

¹ MSc, Universidad del Valle. Docente-Investigadora, Corporación Universitaria Autónoma del Cauca. Popayán, Colombia. monicaluna@uniautonomo.edu.co

² Estudiante último año programa Ingeniería ambiental, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. francampos@unicauca.edu.co

³ Estudiante último año programa Ingeniería ambiental, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. omedina@unicauca.edu.co

Fecha de recepción: 04/09/2015

Fecha de aceptación: 20/01/2016

Para citar este artículo: Luna-Imbacuán MA, Campos-Bermúdez F, Medina-Gutiérrez O. Evaluación de las aguas residuales del lavado de estanques multipropósito con cultivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria. 17(2):191-202

Resumen

En la producción piscícola se genera un flujo continuo asociado a la operación normal y uno intermitente por labores de limpieza de los estanques de siembra. Los estanques multipropósito (multipro) son sistemas novedosos que ofrecen ventajas frente a los estanques de diseño convencional, por lo que en el presente estudio se buscó determinar las características físicas, químicas y de tratabilidad de los efluentes de su lavado. Los estanques funcionaron a escala real con una densidad de siembra inicial aproximada de 5 kg/m³ y final de 8,9 kg/m³. El lavado se realizó cada 72 horas y se tomaron muestras compuestas para su análisis bajo los protocolos del método estándar. Se determinó que el efluente de lavado representó

un volumen del 1,5 % del originado en la operación normal diaria, presentó valores promedio de 128 mg/L en sólidos suspendidos totales (SST), 94 mg/L en demanda química de oxígeno (DQO), 25 mg/L en demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), 4,7 mg/L en nitrógeno total Kjeldahl (NTK) y 0,6 mg/L en fósforo total (PT), además un índice de biodegradabilidad de 0,30. Se estableció que este efluente presenta limitaciones para su tratamiento directo por procesos biológicos, por lo que se recomienda emplear operaciones físicas como la sedimentación primaria o la filtración en geotextil, seleccionadas según las características de las partículas presentes en la columna de agua.

Palabras clave: acuicultura, estanques piscícolas, calidad del agua

Abstract

Fish production generates two types of water flow: a continuous one related to the normal operation and an intermittent one associated to the cleaning of the seeding ponds. The multipurpose ponds (multipro) are novel systems that provide advantages compared to conventional design ones, so the recent study searches to was focused to determine the physical and chemical quality and treatability of their washing effluents. The multipurpose ponds (multipro), worked to a real scale, by using initial and final seed densities of 5 kg/m³ and 8.9 kg/m³ respectively. The ponds were cleaned every 72 hours, and different samples were taken to determine the chemical-physical characteristics following the standard methods. The main results show that

the effluent from cleaning represents a volume of 1.5 % of the total generated in the normal daily operation. Additionally, the effluent showed average values of 128 mg/L of total suspended solids (TSS), 94 mg/L of chemical oxygen demand (COD), 25 mg/L of biochemical oxygen demand (BOD₅), 4.7 mg/L of total Kjeldahl nitrogen (NTK) and 0.6 mg/L of total phosphorus (PT). The biodegradability index was 0.30, which implies a limited possibility for direct treatment by means of biological processes. It is suggested to study the primary sedimentation or filtration through a geotextile. The selection of the treatment unit is made according to the characteristics of the particles in the water column.

Keywords: Aquaculture, Fish ponds, Water quality

Resumo

Na produção piscícola gera-se um fluxo contínuo associado à operação normal e um intermitente por labores de limpeza dos estanques de sementeira. Os estanques multipropósito (multipro) são sistemas inovadores que oferecem vantagens frente aos estanques de desing convencional, pelo que no presente estudo buscou-se determinar as características físicas, químicas e de tratabilidade dos efluentes da sua lavagem. Os estanques funcionaram a escala real com uma densidade de sementeira aproximada inicial de 5 kg/m³ e final de 8,9 kg/m³. A lavagem se realizou cada 72 horas e tomaram-se amostras compostas para a sua análise, baixo os protocolos do método padrão. Determinou-se que o efluente

de lavagem rerepresentou um volume do 1,5 % do originado na operação normal diária, apresentou valores em média de 128 mg/L em sólidos suspensos totais (SST), 94 mg/L em demanda química de oxigênio (DQO), 25 mg/L em demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), 4,7 mg/L em nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e 0,6 mg/L em fósforo total (PT), além do mais um índice de biodegradabilidade de 0,30. Determinou-se que este efluente apresenta limitações para o seu tratamento direto por processos biológicos, pelo que se recomenda utilizar operações físicas como a sedimentação primária ou a filtração em geotêxtil, selecionadas segundo as características das partículas presentes na coluna de água.

Palavras chave: aquicultura, estanques piscícolas, qualidade da água

Introducción

Colombia posee una de las mayores ofertas hídricas del planeta, lo que le brinda condiciones especiales para el desarrollo de la actividad acuícola, la cual presentó, en el contexto nacional, un crecimiento del 13 % anual promedio en los últimos 27 años, con lo que se superó la tasa media de crecimiento del resto del sector agropecuario. Para el año 2011, la acuicultura representó el 51,4 % de la producción pesquera total; de esta manera, el país se posicionó en el sexto lugar en orden de importancia de la acuicultura en América Latina (Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca et al. 2013). La piscicultura, como principal sector productivo que conforma la acuicultura colombiana, en los últimos años no se había considerado como una actividad contaminante, sin embargo, el rápido crecimiento de esta, ha puesto en riesgo la sustentabilidad de las granjas piscícolas, por lo que agencias gubernamentales han reglamentado dicha actividad en otros países hace ya algunos años; no obstante, para Colombia el tema apenas cobra importancia y solo hasta el segundo período del año 2012, algunas autoridades ambientales iniciaron un incipiente proceso de vigilancia del uso del recurso hídrico por parte de dicha actividad.

La producción piscícola colombiana se orienta principalmente a las especies de trucha, tilapia, cachama y algunas especies nativas; en particular, para el año 2011, la producción de trucha representó el 7,58 % de la actividad piscícola, mientras la cachama y la tilapia el 21,44 % y 65,21 %, respectivamente. Los principales departamentos productores de trucha son: Antioquia, Boyacá y Cundinamarca y actualmente se ha extendido a Cauca, Huila, Nariño, Santander, Norte de Santander y Quindío, entre otros (Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca et al. 2013). Se estima que la producción de trucha en el departamento del Cauca alcanzó, en el año 2008, las 114 t/mes para lo cual se empleó cerca de 227 mm³/año de recurso hídrico (Fernández et al. 2008).

El desarrollo exitoso del cultivo de trucha requiere condiciones específicas ambientales y de manejo. Factores como la calidad y la cantidad de agua son determinantes en el cultivo, lo que restringe su

supervivencia a aguas muy limpias, de flujo rápido y baja temperatura. En este sentido, se ha establecido que se requiere un nivel de oxígeno en el rango 5,5 y 9 mg/L; el pH debe oscilar entre 7 y 8,5 unidades y la temperatura óptima para el engorde es de 15 °C (Parrado 2012). Bajo estas condiciones, la trucha arcoíris se cultiva principalmente en regiones de alta montaña (entre 2.000 y 3.000 msnm), lo que podría implicar la disminución de la calidad del recurso cerca a los sitios de nacimiento y el incremento en la presión por su demanda.

Durante la producción piscícola se generan residuos en suspensión y disueltos, constituidos principalmente por alimento no consumido, alimento sin digerir, heces y orina (Cripps y Bergheim 2000). Algunos autores mencionan que, del total de alimento adicionado a un estanque piscícola, entre el 70 % y el 75 % es bioasimilado, lo que significa que entre el 25 % y el 30 % se convierte en residuo fecal (Hussar et al. 2004). Aunque se ha establecido que la cantidad de residuos generados depende de variables como la especie, temperatura de crecimiento, tipo de alimento y prácticas alimenticias empleadas (Stewart et al. 2006a), autores como Dalsgaard et al. (2015) no encontraron efectos de los niveles de alimentación sobre la excreción de nitrógeno disuelto, el cual constituye, en promedio, el 81,6 % de los residuos de nitrógeno total. Por su parte, Letelier-Gordo et al. (2015) encontraron influencia de los niveles de proteína:energía (P:E) sobre la producción de NTK, siendo más alta (8,6 mg de N/g de alimento consumido) en heces de trucha arcoíris alimentadas con la mayor concentración de nitrógeno (P:E 23). Los autores no reportan influencia de los niveles de proteína sobre la generación de PT y sólidos totales (ST) (0,17-0,2 g de ST, y 7,9-11,2 mg de PT/g de alimento consumido).

La acumulación de residuos al interior del estanque puede ocasionar asfisia parcial en los peces y propiciar un ambiente para la proliferación de organismos patógenos, lo que genera pérdida de la calidad del agua de cultivo, estrés en los animales y posibles pérdidas económicas a los piscicultores. Esta situación hace necesaria la limpieza periódica de los estanques, y genera efluentes ricos en material en suspensión,

materia orgánica y nutrientes (Stewart et al. 2006b; Pfeiffer et al. 2008), con concentraciones de SST desde 100 mg/L hasta de 2.050 mg/L, valores de hasta 794 mg/L para DBO₅ y 1.060 mg/L para DQO, además del contenido de nutrientes como nitrógeno y fósforo, tanto en la fracción disuelta como en la particulada (Cripps y Bergheim 2000; True et al. 2004; De la Cruz y Salazar 2007; Pfeiffer et al. 2008). Lo anterior demanda una correcta disposición de este tipo de efluentes dado que su vertimiento directo a los cuerpos de agua puede ocasionar problemas tales como eutrofización, agotamiento de oxígeno disuelto, modificación del pH y otros que podrían alterar el equilibrio de los ecosistemas (Idaho Division of Environmental Quality s. f.). Frente al tema, instituciones académicas y productivas bajo el enfoque de producción más limpia han desarrollado un nuevo modelo de estanque piscícola denominado multipro (multipropósito) que permite la concentración de los contaminantes al interior del sistema, facilita las labores de mantenimiento y permite utilizar menores cantidades de agua sin afectar el desarrollo del pez (Universidad del Cauca et al. 2010), considerándose estas como ventajas para la producción frente a los estanques convencionales (geometría rectangular) típicamente empleados en el cultivo de peces a nivel mundial. Es así como el presente estudio buscó determinar las características físico químicas y el potencial de tratamiento de los efluentes provenientes del mantenimiento de este nuevo desarrollo, de modo

que se promueva la generación de una tecnología integral que, además de concentrar los contaminantes al interior del sistema, cuente con alternativas de solución para los efluentes generados en su mantenimiento.

Materiales y métodos

El estudio fue realizado en la estación piscícola Chiliglo ubicada en el municipio de Puracé, Cauca, Colombia. La estación cuenta con 21 estanques abastecidos con una fuente de agua superficial, de bocatoma en canal abierto y cuyo flujo es tratado antes del ingreso a los estanques, mediante dos unidades de desarenación.

Los ensayos se realizaron empleando el agua residual proveniente de un estanque multipro, con 600 ejemplares de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), con peso aproximado inicial de 100 g y monitoreados hasta alcanzar un peso de 250 g. El alimento fue suministrado diariamente con una porción correspondiente al 1,9% de la biomasa en la etapa de levante y 1,4% en la fase de engorde para temperatura promedio de 13,5 °C, dicha porción fue dividida en cinco raciones. El alimento se caracterizó por contener 43% de proteína en la fase de levante y 40% en etapa de engorde.

Las características del estanque multipro se presentan en la figura 1.

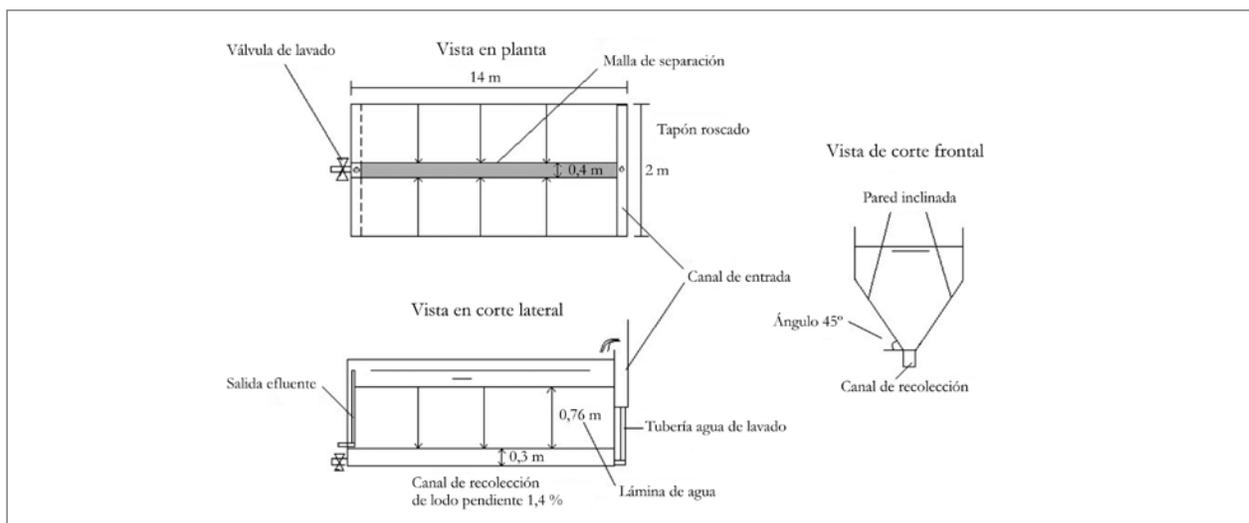


Figura 1. Estanque multipro para cultivo de peces (Universidad del Cauca et al. 2010).

Fuente: Elaboración propia

El estanque multipro operó a escala real con un caudal de agua superficial de $3,9 \pm 0,3$ L/s, el cual fue controlado por un vertedero rectangular ubicado a la entrada del sistema, lo que permitió establecer una velocidad del flujo de $18,65 \pm 0,3$ m/h. Para la extracción de los residuos acumulados en el estanque, se interrumpió el flujo de alimentación, a la vez que se promovió la inyección de agua a través de una tubería de fondo ubicada en el extremo inicial, de modo que cuando se abrió la válvula de apertura rápida se formó un flujo en corto circuito que permitió el arrastre del lodo acumulado en el canal (Universidad del Cauca et al. 2010). Esta operación se realizó cada 72 horas por un período de 30 días y se generó un flujo de agua residual por un tiempo aproximado de 8,5 min. La caracterización del efluente se consiguió mediante dos tipos de

muestreo para cada evento de lavado; el primero, con recolección de muestras puntuales cada 30 segundos, cada una de las cuales se analizó para el parámetro sólidos totales (ST). De otro lado, se tomó una muestra compuesta del efluente, la cual fue caracterizada mediante los parámetros físico químicos que se presentan en la tabla 1. Variables como temperatura, oxígeno disuelto y pH fueron medidos con equipo de campo directamente en el sitio, mientras que los restantes se determinaron con preservación de la muestra a 4 ± 2 °C, en el laboratorio de ingeniería ambiental de la Universidad del Cauca, donde fueron medidos bajo los protocolos establecidos en los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (American Public Health Association et al. 1998), según se relaciona en la tabla 1.

Tabla 1. Códigos del método estándar y referencia de equipos para procesamiento de muestras

Parámetro	Método	Equipo
Temperatura (°C)		Medidor multiparamétrico HACH -HQ40D Precisión OD: $\pm 0,01$ Precisión T: $\pm 0,1$
Oxígeno disuelto-OD (mg/L)		
pH		HACH-5050T Precisión: $\pm 0,02$
DQO (mg/L)	5220B	
DBO (mg/L)	2510B	
SST (mg/L)	2540D	
ST (mg/L)	2540B	
PT (mg/L)	4500C	
NTK (mg/L)	4500B	

Fuente: Elaboración propia

La determinación del caudal se realizó por el método volumétrico, midiendo el descenso del nivel de agua en el estanque, cada 30 segundos. Con base en los niveles de descenso y la geometría del estanque, se determinó el volumen evacuado en la unidad de tiempo. Las velocidades de sedimentación de las partículas se estimaron a partir del ensayo en columna de sedimentación, siguiendo la metodología propuesta por Camp (1946), en donde la muestra de agua residual se deja en reposo y se toman submuestras a una misma altura y a diferentes tiempos de sedimentación t_1, t_2, \dots, t_n . La carga superficial se

calculó dividiendo la altura de sedimentación, entre su respectivo tiempo. Para cada submuestra se determinó la fracción remanente de SST, dividiendo la concentración residual sobre la concentración inicial.

El tamaño de partícula se calculó de acuerdo a la teoría de sedimentación de partículas discretas propuesta en Metcalf & Eddy (2003) y teniendo densidades de partícula de 1.017 kg/m^3 para heces y 1.051 kg/m^3 para alimento de peces reportadas por Herrera (2005).

La carga contaminante se determinó durante toda la operación de lavado, midiendo concentración de ST y caudal de agua residual, en intervalos de 30 s, teniendo en cuenta la expresión propuesta por el Ministerio del Medio Ambiente (Colombia 1997):

$$Cc = Q \times C \times 0,0864 \times \frac{t}{24} \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde:

- Cc*: Carga contaminante (kg/día)
Q: Caudal promedio (L/s)
C: Concentración de la sustancia contaminante (mg/L)
 0,0864: Factor de conversión de unidades
t: Tiempo de vertimiento del usuario (h)

Resultados y discusión

En la tabla 2 se presentan los resultados de caracterización del agua residual del lavado del estanque, realizadas a partir de muestreos compuestos.

El efluente de lavado del estanque, es un flujo discontinuo que se genera cada 72 horas por un

tiempo cercano a los 8,5 min y en volumen de agua representa cerca del 1,5 % del volumen generado en la operación normal diaria, lo que sugiere una mayor viabilidad desde el punto de vista técnico para el tratamiento y disposición final.

Los efluentes de lavado llevan concentraciones promedio de SST superiores hasta en 37 veces, a las encontradas por Hoyos (2011), para el efluente de operación normal del estanque multipro con igual densidad de siembra. Los SST son aportados por el alimento no consumido, heces y material particulado de la fuente de suministro; para esta última, Hoyos (2011) determinó un aporte promedio de 3,55 mg/L. El autor estableció que al interior del estanque se retiene un 68,5 %, de los SST, los cuales posteriormente se evacuan en el proceso de lavado.

Los anteriores datos concuerdan con investigaciones realizadas por True et al. (2004), quienes mencionan que el efluente generado durante la limpieza presenta bajos flujos de agua (entre el 1 % y 15 % del flujo total de la granja), y altas concentraciones de sólidos (del orden de 100 mg SST/L). Así mismo, Yasnó y García (2007) reportan SST en el efluente del lavado de estanques rectangulares, en el rango de 4,2 y 422 mg/L

Tabla 2. Caracterización del efluente de lavado del estanque multipro

Parámetro	Promedio ± SD	Máximo	Mínimo
Q (L/s)	28,02	78,2	8,1
T (oC)	13,5±0,9	14,6	12,1
pH	6,5±0,22	6,90	6,20
OD (mg/L)	7,6±0,35	8,08	7,05
DQO (mg/L)	94±28,15	142	44
DBO5 (mg/L)	25,3±5,4	36,5	18,6
SST (mg/L)	128±71,79	290	47
PT (mg/L)	0,6±0,24	1,02	0,37
NTK (mg/L)	4,7±2,13	7,66	2,07

Nota: Rango de datos (n=10)

Fuente: Elaboración propia

durante un período de 14 min por día. Menores flujos de agua residual y altas concentraciones de SST pueden suponer mayor viabilidad técnica para el uso de la sedimentación como opción de tratamiento, pues se reporta que las eficiencias de estas unidades se incrementan a mayor concentración de sólidos en el efluente (Kelly et al. 1997).

La presencia de materia orgánica y nutrientes como el fósforo y el nitrógeno igualmente se asocia a la fuente superficial de abastecimiento y al alimento suministrado, el cual está compuesto, generalmente, por 42 % de proteína, 6 %-12 % de grasa, 22 %-28 % de carbohidratos, 1,00 % de fósforo y 10,02 % de nitrógeno (Hoyos 2011; Guevara 2003). Se aprecia que el NTK se encuentra en mayor proporción que el fósforo, lo cual es congruente, pues se reporta que, del total de la fracción sólida de nutrientes suministrada en el alimento y aportada por la fuente superficial, el 41 % de nitrógeno y el 26 % de fósforo es retenido y acumulado en el estanque multipro (Hoyos 2011). Lo que además permite inferir que parte de los nutrientes asociados a la fracción de partículas, podrían ser removidos mediante operaciones físicas de tratamiento y, en posteriores estudios, se podría evaluar su disposición y carácter fertilizante sobre cultivos.

Los datos obtenidos de cuantificación de materia orgánica, a través del parámetro DBO₅, muestran un comportamiento homogéneo, lo que se puede atribuir, en parte, al riguroso control sobre la alimentación suministrada. La DQO presentó una mayor variabilidad, dado que en algunos muestreos se evidenció un aporte no controlado de sólidos inorgánicos desde la fuente superficial, sobre todo en eventos de precipitación, en donde las unidades de tratamiento previas a la entrada de la piscícola no ejercieron función de desbaste. Las concentraciones de materia orgánica en el efluente de lavado son altas si se comparan con las que se presentan en el efluente de operación normal para un estanque convencional; De la Cruz y Salazar (2007) reportan valores para la DBO₅ y la DQO de 2,77 mg/L y 7,03 mg/L, respectivamente, concordando con Hinshaw y Fornshell (2002) quienes mencionan que los

efluentes de limpieza llevan altas cargas, asociado a los niveles de residuos acumulados en los estanques.

Con base en los datos de DBO₅ y DQO total, el efluente de estudio presenta un índice de biodegradabilidad (IB) promedio del $0,30 \pm 0,15$, el cual indica que son medianamente biodegradables de acuerdo a la clasificación propuesta por Crites y Tchobanoglous (2000). El bajo IB obtenido en este estudio podría estar asociado a las características del agua superficial de entrada a la piscícola. Hoyos (2011) reporta que la concentración de SST en el afluente del estanque multipro presentó valores entre 0,40 mg/L y 3,72 mg/L, variación que se asocia a las constantes precipitaciones en la zona de estudio y que traen consigo un mayor arrastre de partículas del suelo. Cripps y Bergheim (2000) indican que la concentración de sólidos inorgánicos es proporcional al nivel de pluviosidad.

Se aprecia que, a pesar de ser un agua residual, los valores en oxígeno disuelto se encuentran por encima de los 7 mg/L, correspondiente a un porcentaje de saturación del 83 %, lo que indica que durante el período de permanencia del lodo sedimentado en el estanque (72 horas), el proceso de descomposición de materia orgánica es aún incipiente y no genera grandes consumos de oxígeno, lo cual es benéfico para el cultivo.

Al comparar las concentraciones de contaminantes de los efluentes de lavado de estanques multipro para el presente estudio, frente a las reportadas por Stewart et al. (2006a) en el lavado de estanques convencionales, se aprecia que, en el caso de SST y PT, los efluentes del multipro son más concentrados hasta por seis y dos veces, respectivamente, a pesar de que la densidad de siembra para este estudio ($8,9 \text{ kg/m}^3$) es menor a la del estudio de referencia. Lo anterior permite suponer las ventajas del uso de los estanques multipro como tecnología de producción más limpia, que permite el control de la contaminación al interior del estanque, sobre todo por su desempeño en la concentración de contaminantes.

En la figura 2 se presenta el aporte de carga de ST durante el tiempo de lavado.

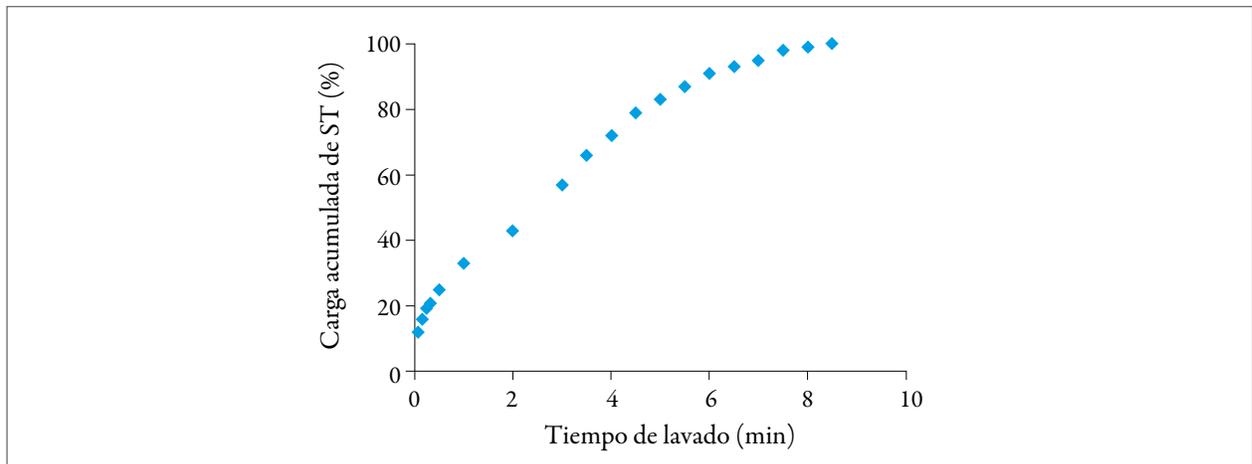


Figura 2. Carga acumulada de ST generada durante el tiempo de lavado.

Fuente: Elaboración propia

Se observa que en los primeros tres minutos de lavado del estanque se ha evacuado más del 50% de la carga vertida, lo que evidencia la potencia de arrastre del lodo sedimentado, generada por el lavado hidráulico propio de la configuración del estanque. Al finalizar los 8,5 minutos de lavado, se obtiene una carga acumulada de 4,1 kg de ST, producida por un promedio de 150 kg de biomasa. Estimando que se realizan 122 lavados por año y que la producción nacional de trucha para el año 2011 fue de 5.631 t (Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca et al. 2013), se puede proyectar una carga a las fuentes de agua superficial de 18.700 t de ST, lo que representa la contaminación aportada por una población de

395.980 habitantes, con dotación neta de 180 L/hab/día y aporte medio en ST de 720 mg/L reportados por Metcalf & Eddy (2003).

Dichos efluentes, aunque representen focos de contaminación de corta duración, deben ser tratados con el fin de no generar efectos adversos sobre los cuerpos de agua receptores, sobre todo por el aporte evidenciado en materia orgánica, sólidos en suspensión y nutrientes.

En la figura 3 se indican los resultados del seguimiento del lavado minuto a minuto en cantidad y calidad mediante el parámetro ST.

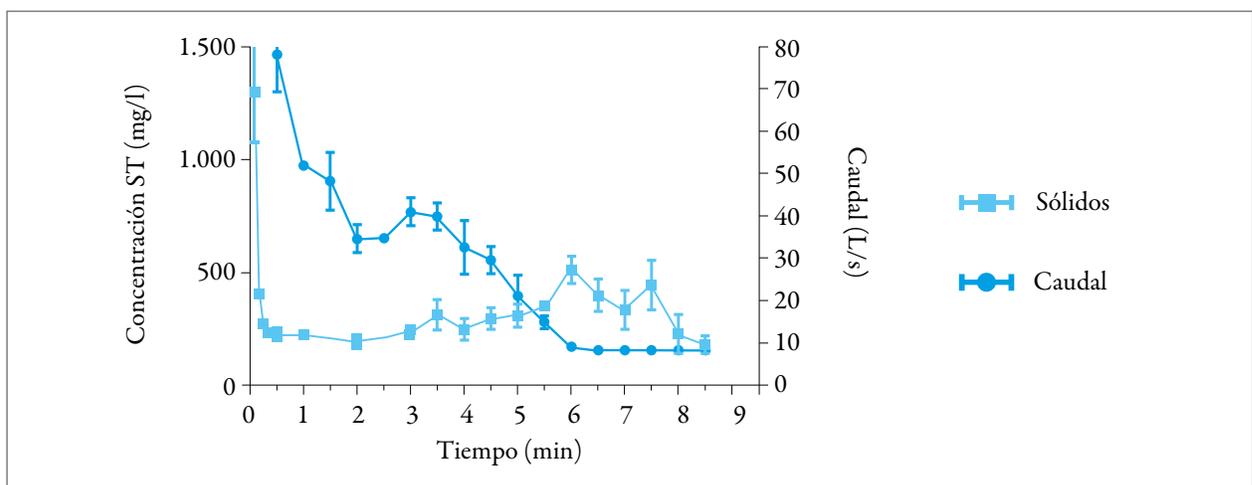


Figura 3. Seguimiento en el tiempo, al caudal y concentración de ST del efluente multipro.

Fuente: Elaboración propia

El efluente de lavado se caracteriza por presentar variabilidad durante su generación, tanto en concentración de ST como en el caudal de agua, condición a tener en cuenta en el diseño de unidades de tratamiento, sobre todo por los valores máximos que se presentan y que pueden generar variaciones en las eficiencias de los sistemas como lo reportado por Kelly et al. (1997). En el momento de apertura de la válvula de limpieza, se obtienen los valores pico, tanto en concentración de ST como en caudal. Le sigue el período de vaciado del estanque en donde el flujo de agua va en descenso y se presentan las concentraciones más bajas de ST del proceso. A partir del minuto 5,5 se observa una etapa del lavado caracterizada por presentar un incremento de la concentración de ST asociado a los menores caudales del proceso y al arrastre hidráulico del lodo acumulado en el fondo del canal, debido al flujo en corto circuito generado por la configuración del estanque multipro, característica que le confiere ventajas sobre los estanques convencionales de

geometría rectangular, pues disminuye la complejidad operacional de la limpieza, permite realizar un lavado efectivo del fondo del canal en corto período de tiempo (8,5 min) sin extraer el cultivo de peces, lo que optimiza las labores de mantenimiento de los piscicultores.

En los ensayos de sedimentación del efluente de lavado del estanque multipro, se determinó por observación que las partículas se sedimentaron como entidades individuales (sedimentación tipo I), lo que concuerda con lo expuesto por Cripps y Bergheim (2000), quienes reportan que las partículas de efluentes piscícolas pueden sedimentar discretamente. La figura 4 presenta la curva de sedimentación para el efluente de lavado de estanques a temperatura promedio de 14 °C y con valores de sólidos en suspensión en el rango 233,5-501,5 mg/L, la curva muestra la relación directa entre carga superficial y fracción remanente de SST en el punto de muestreo.

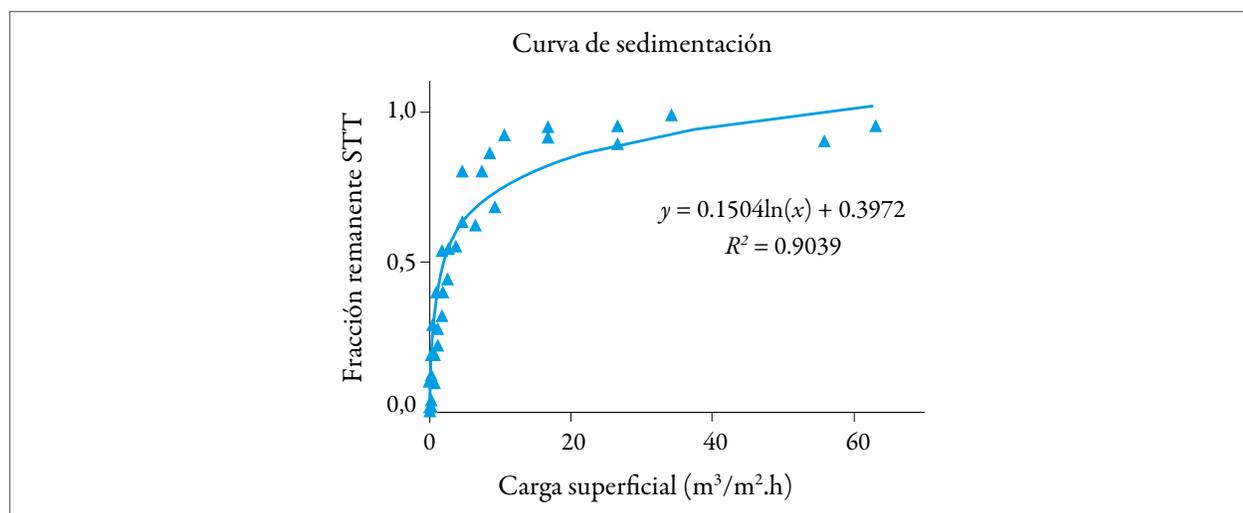


Figura 4. Fracción remanente de SST a diferentes valores de carga superficial.

Fuente: Elaboración propia

Las partículas suspendidas de los efluentes de lavado del estanque presentan velocidades de sedimentación en el intervalo 0,02-63 m/h. Fernández y Caicedo (2012) reportan valores entre 1,7 m/h y 100 m/h, para partículas en el efluente después de 48 horas de retención. El mayor tiempo de permanencia de las partículas al interior del estanque, en el presente

estudio (72 horas), promueve el incremento de los procesos de degradación y disolución, lo que genera un fraccionamiento y, por tanto, menores velocidades de asentamiento y se corrobora la relación entre el tiempo y la degradación de los sólidos en la columna de agua, como lo plantean Maillard et al. (2005).

Los datos de velocidades de sedimentación del presente estudio resultan similares a los reportados por Bergheim et al. (1998) quienes encontraron eficiencias de remoción de sólidos del 75 %-80 % en un tanque cónico de sedimentación a escala experimental con cargas superficiales entre 1,0 y 2,7 m³/m²/h, cargas que, al introducirlas en la curva de sedimentación de la figura 4, reportan eficiencias entre el 73 % y 80 %, respectivamente, estimadas teniendo en cuenta la línea de ajuste y su respectiva ecuación.

El uso de sedimentadores a escala real, como etapa primaria de tratamiento de los efluentes de lavado, se podría considerar si se emplea para su diseño una carga de 8,33 m³/m²/h, recomendada por Arboleda (2000), para sedimentadores horizontales de partículas con sedimentación tipo 1, pues se calcula que se requerirían áreas superficiales de 0,4 m² por cada litro por segundo de agua residual y se obtendrían eficiencias en reducción de SST cercanas al 60 %, consideradas como aceptables para el tratamiento

primario (Metcalf & Eddy 2003). Aunque para el caso de Colombia, en la norma de vertimientos (Resolución 631 de marzo de 2015), no se encuentran disposiciones específicas sobre los efluentes de acuicultura, las unidades de sedimentación recomendadas generarían para las mayores concentraciones de SST del presente estudio, efluentes con concentraciones menores a los 200 mg/L, que indican que se debe emplear unidades adicionales de tratamiento, ya que se ha reportado que estas concentraciones disminuyen en un 50 % la productividad primaria en los ecosistemas acuáticos (Bilotta y Brazier 2008).

En la tabla 3 se presentan los resultados del cálculo matemático de distribución del tamaño de partícula presente en el efluente del lavado del estanque multipro, los rangos de clasificación fueron seleccionados con base en lo planteado por estudios previos de caracterización del lodo (Idaho Division of Environmental Quality s. f.; Maillard et al. 2005).

Tabla 3. Distribución de tamaños de partícula en el efluente del estanque multipro

Rango de tamaño (μm)	% de ocurrencia
1,5-30	5
30-70	21
70-105	8
105-210	18
210-814	39
>814	8

Fuente: Elaboración propia

Se evidencia que el 92 % de las partículas presentan tamaños menores a 814 μm, aunque se ha reportado que las heces fecales completas y el alimento no consumido superan este tamaño, lo que indica que gran parte de las partículas se fraccionan. El rompimiento se asocia a la baja resistencia a la ruptura, cuando las partículas están sometidas a procesos de biodegradación y turbulencia en el estanque producto del movimiento de los peces y del arrastre hidráulico

generado en el momento de limpieza (Cripps y Bergheim 2000). Estudios realizados por True et al. (2004) reportan distribuciones de masa y tamaño de partícula similares a los encontrados en el presente estudio.

El tamaño de partícula encontrado en el efluente de lavado del estanque multipro, permite suponer la factibilidad del uso de geotextiles sintéticos con

tamaños de poro inferiores a los tamaños de partícula encontrados, de modo que la remoción de material en suspensión ocurra por procesos de cernido. Esta alternativa permitiría la remoción de contaminantes de los flujos de agua y, además, la obtención de un material deshidratado con posibilidades de disposición y uso en tierra, con el beneficio de que poseen macronutrientes necesarios para el crecimiento radicular.

Conclusiones

El efluente de lavado del estanque multipro se caracteriza por presentar concentraciones importantes en materia orgánica, sólidos en suspensión y nutrientes, además de presentar un bajo volumen de agua residual frente al generado en la operación normal diaria de la granja. Los resultados sugieren que, para aportar al control de la contaminación generada por las granjas piscícolas, desde el punto de vista técnico, el potencial de tratamiento se encuentra en el proceso de lavado.

Durante el lavado del estanque multipro, el efluente presenta una alta variabilidad en el caudal y la concentración de contaminantes, aspecto que se debe tener en cuenta en el diseño de sistemas de tratamiento, dado que pueden llegar a afectar la eficiencia de las unidades.

Para el caso de estudio se encontró que el efluente de lavado del estanque multipro, presentó un índice

de biodegradabilidad promedio de 0,30, lo que muestra baja susceptibilidad para su tratamiento directo por procesos biológicos. De otro lado, los tamaños y velocidades de sedimentación de las partículas presentes en el efluente demuestran la factibilidad del uso de operaciones físicas como primera fase de tratamiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero, logístico y académico a la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Universidad del Cauca y Universidad del Valle. Así mismo, expresan su agradecimiento en la asesoría profesional para el desarrollo de la investigación al doctor Javier Ernesto Fernández y la doctora Julia Rosa Caicedo.

Descargos de responsabilidad

El presente artículo se desarrolló como parte del trabajo de grado para optar al título de magister en Ingeniería de la Universidad del Valle, trabajo que tuvo en calidad de directora a la doctora Julia Rosa Caicedo y codirector al doctor Javier Ernesto Fernández. La ejecución fue posible gracias a la financiación por parte de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca (empresa a la cual se encontraba vinculada la autora principal, durante la fase de ejecución) y préstamo de las instalaciones de laboratorios de la Universidad del Cauca.

Referencias

- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 17^a ed. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos S. A.
- Arboleda J. 2000. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tomo I. 3a ed. Bogotá, Colombia: Mc Graw Hill.
- Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2013. Diagnóstico del estado de la Acuicultura en Colombia. Autoridad nacional de acuicultura y pesca; [consultado 2015 nov 12]. http://www.aunap.gov.co/files/Diagnostico_del_estado_de_la_acuicultura_en_colombia.pdf.
- Bergheim A, Cripps SJ, Liltved H. 1998. A system for the treatment of sludge from land-based fish-farms. *Aquat Living Resour.* 11(4):279-287.
- Bilotta GS, Brazier RE. 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Res.* 42(12):2849-2861.
- Camp TR. 1946. Sedimentation and the design of settling tanks. *Trans Amer Soc Civ Engrs.* 111(3):895-958.
- Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Decreto 901, Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se establecen las tarifas de estas. Bogotá: Diario Oficial, 1 de abril 1997; [consultado 2015 nov 14]. http://www.fedepanela.org.co/files/DECRETO_901_DE_1997.pdf.
- Cripps SJ, Bergheim A. 2000. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacult Eng.* 22(1-2):33-56.
- Crites R, Tchobanoglous G. 2000. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Dalsgaard J, Larsen BK, Pedersen PB. 2015. Nitrogen waste from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with particular focus on urea. *Aquacult Eng.* 65:2-9.
- De la Cruz C, Salazar A. 2007. Caracterización y estudio de tratabilidad del efluente de estaciones piscícolas [trabajo de grado]. [Popayán]: Universidad del Cauca.
- Fernández J, Caicedo J. 2012. Estanque multipro una alternativa para el control de los lodos en la producción de trucha. *Revista Electrónica de Ingeniería en Producción Acuicola.* 6:1-14. [consultado 2015 nov 12]. <http://revistas.udenar.edu.co/index.php/reipa/article/view/1511/1850>.
- Fernández J, De la Cruz C, Caicedo J. 2008 sin publicar. Evaluación de diez piscícolas de Trucha (*Oncorhynchus mykiss*) en el departamento del Cauca, Colombia. Características físicas y la generación del residuo.
- Guevara WN. 2003. Formulación y elaboración de dietas para peces y crustáceos. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann; [consultado 2015 nov 13]. <http://www.unjbg.edu.pe/coin2/pdf/01040800303.pdf>.
- Herrera C. 2005. Informe Técnico Gestión de residuos. Servicio de Evaluación Ambiental; [consultado 2015 nov 14]. http://www.e-seia.cl/archivos/Anexos_Catipulli_1_2.pdf.
- Hinshaw JM, Fornshell G. 2002. Effluents from raceways. En: Tomasso JR, editor. *Aquaculture and the Environment in the United States.* Louisiana, Estados Unidos: Aquaculture Society. pp. 77-104.
- Hoyos DE. 2011. Evaluación del impacto de la retención de sólidos suspendidos en los estanques de cultivo de trucha sobre la calidad fisicoquímica del agua para la producción de peces [tesis de maestría]. [Cali]: Universidad del Valle.
- Hussar GJ, Zuppi da Conceição CH, Paradelo AL, Barin DJ, Jonas TC, Serra W, Rodrigues JP. 2004. Uso de leitos cultivados de vazão subsuperficial na remoção de macronutrientes de efluentes de tanques de piscicultura. *Engambiental.* 1(1):25-34.
- Idaho Division of Environmental Quality. s. f. Idaho Waste Management Guidelines for Aquaculture Operations. [consultado 2015 nov 5]. https://www.deq.idaho.gov/media/488801-aquaculture_guidelines.pdf.
- Kelly LA, Bergheim A, Stellwagen J. 1997. Particle size distribution of wastes from freshwater fish farms. *Aquacult Int.* 5(1):65-78.
- Letelier-Gordo CO, Dalsgaard J, Suhr KI, Ekmann KS, Pedersen PB. 2015. Reducing the dietary protein:energy (P:E) ratio changes solubilization and fermentation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) faeces. *Aquacult Eng.* 66:22-29.
- Maillard VM, Boardman GD, Nyland JE, Kuhn DD. 2005. Water quality and sludge characterization at raceway-system trout farms. *Aquacult Eng.* 33(4):271-284.
- Metcalf & Eddy. 2003. *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse.* Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Parrado YA. 2012. Historia de la acuicultura en Colombia. *Aquatic.* (37):60-77.
- Pfeiffer TJ, Osborn A, Davis M. 2008. Particle sieve analysis for determining solids removal efficiency of water treatment components in a recirculating aquaculture system. *Aquacult Eng.* 39(1):24-29.
- Stewart NT, Boardman GD, Helfrich LA. 2006a. Treatment of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) raceway effluent using baffled sedimentation and artificial substrates. *Aquacult Eng.* 35(2):166-178.
- Stewart NT, Boardman GD, Helfrich LA. 2006b. Characterization of nutrient leaching rates from settled rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) sludge. *Aquacult Eng.* 35(2):191-198.
- True B, Johnson W, Chen S. 2004. Reducing phosphorus discharge from flow-through aquaculture I: facility and effluent characterization. *Aquacult Eng.* 32(1):129-144.
- Universidad del Cauca, Universidad del Valle, Centro Regional de Productividad e Innovación del Cauca, Ministerio de Agricultura y Desarrollo rural. 2010. Proyecto estudio, diseño y evaluación de un prototipo de estanque piscícola. Informe final Convenio 057/07 IICA-MADR. Popayán: UniCauca.
- Yasnó J, García C. 2007. Selección y diseño de alternativas para el tratamiento de afluentes y efluentes del proceso de producción piscícola caso trucha en el municipio de Silvia Cauca [trabajo de grado]. [Popayán]: Universidad del Cauca.