

DOI:10.18684/BSAA(13)30-39

EVALUACIÓN DE DIFERENTES DRENAJES EN TANQUES CIRCULARES PARA CULTIVO DE TRUCHA EN SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN

EVALUATION OF DIFFERENT DRAINAGES IN CIRCULAR TANKS FOR TROUT CULTURE IN RECIRCULATING SYSTEMS

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES DRENAGENS EM TANQUES CIRCULARES PARA CRIAÇÃO DE TRUTA EM SISTEMAS DE RECIRCULAÇÃO

ROBERTO GARCÍA-CRIOLLO¹, IVÁN ANDRÉS SÁNCHEZ-ORTIZ²

RESUMEN

La evaluación de diferentes alternativas de captura y remoción eficiente de sólidos en tanques de cultivo en sistemas de recirculación para acuicultura cobra importancia como primer mecanismo para garantizar un adecuado tratamiento de las aguas residuales y su posterior vertimiento o reuso. El objetivo de esta investigación fue evaluar durante un mes el desempeño de remoción aparente de sólidos sedimentables en 12 tanques de cultivo circulares de 250 L en un sistema de recirculación de agua para cuatro diferentes mecanismos de drenaje: D1-tubería perforada de fondo con salida lateral y rebalse externo, D2-rebalse lateral, D3-rebalse interno, D4-doble drenaje, y para tres tiempos de retención hidráulica Q1, Q2 y Q3 equivalentes a un recambio cada 25, 50 y 82 minutos. El experimento se desarrolló con alevinos de trucha arco iris con biomasa inicial de 1,6 kg/m³ alimentados a una tasa del 3% del peso vivo diario, se monitorearon los parámetros oxígeno disuelto, temperatura y pH. Hubo diferencias significativas tanto para los drenajes como para los tiempos de retención, los mejores resultados se obtuvieron para el D3-Q1, cuya combinación reportó una eficiencia media del 88,02% de remoción de sólidos, seguido del D1-Q1; el tratamiento con menor eficiencia fue el constituido por el D2-Q3.

Recibido para evaluación: 24 de abril de 2011. **Aprobado para publicación:** 10 de agosto de 2015.

- 1 Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Pecuarias, Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Grupo de Investigaciones en Acuicultura GIAC. Ingeniero en Producción Acuícola. Pasto, Colombia.
- 2 Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Pecuarias, Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Grupo de Investigaciones en Acuicultura GIAC. Ingeniero Civil, M. Sc. Pasto, Colombia.

Correspondencia: iaso@udenar.edu.co

ABSTRACT

The evaluation of different alternatives for effective solids capture and removal in fish culture tanks of recirculating systems becomes important as the first mechanism to guarantee an appropriate wastewater treatment and their subsequent dumping or reuse. The main objective of this research was to evaluate during a month the apparent solids removal performance on 12 fish culture tanks of 250 L in a recirculating aquaculture system with four different drainage systems: D1-bottom perforated tube with lateral outlet and external stand pipe, D2-external stand pipe, D3-internal stand pipe, D4-double drainage, and three hydraulic detention time Q1, Q2 and Q3 equivalents to one exchange each 25, 50 and 82 minutes. The experiment was done with rainbow trout fries for an initial biomass of 1,6 kg/m³ feed daily at a rate of 3% of living weight, the parameters dissolved oxygen, temperature and pH were monitored. There were significant differences between tanks for drainages and hydraulic retention times, the best results were obtained for the D3-Q1, which combination reported an average solids removal efficiency of 88,02%, followed by the D1-Q1; the treatment with the lower efficiency was the made up by the D2-Q3.

RESUMO

A avaliação de diferentes alternativas de captura e remoção eficiente de sólidos em tanques de criação em sistemas de recirculação para aquícultura cobra importância como primeiro mecanismo para garantir um adequado tratamento das águas residuárias e o seu posterior lançamento ou reuso. O objetivo desta pesquisa foi avaliar durante um mês o desempenho de remoção aparente de sólidos sedimentáveis em 12 tanques de criação circulares de 250 L num sistema de recirculação de água para quatro diferentes mecanismos de drenagem: D1-tubulação perfurada no fundo com saída lateral e transbordamento externo, D2-transbordamento lateral, D3-transbordamento interno, D4-dupla drenagem, e para três tempos de retenção hidráulica Q1, Q2 e Q3 equivalentes a uma troca de água a cada 25, 50 e 82 minutos. O experimento foi desenvolvido com alevinos de truta arco íris com biomassa inicial de 1,6 kg/m³ alimentados a uma taxa de 3% do peso vivo por dia, foi monitorado também oxigênio dissolvido, temperatura e o pH. Houve diferenças significativas tanto para as drenagens quanto para os tempos de retenção, os melhores resultados foram obtidos para o D3-Q1, cuja combinação reportou uma eficiência média do 88,02% de remoção de sólidos, seguido do D1-Q1; o tratamento com menor eficiência foi o constituído pelo D2-Q3.

INTRODUCCIÓN

La acuicultura ha experimentado un marcado crecimiento en los últimos años debido a factores como el agotamiento de las reservas de peces disponibles para la pesca extractiva. Según la FAO [1], la producción mundial de peces comestibles procedentes de la acuicultura se ha multiplicado por 12, a un índice medio anual del 8,8%, superando el crecimiento de la pesca y la producción de carne terrestre.

PALABRAS CLAVE:

Acuicultura, Remoción de sólidos, Sistemas cerrados

KEYWORDS:

Aquaculture, Solids removal, Closed systems.

PALAVRAS-CHAVE:

Aquícultura, Remoção de sólidos, Sistemas fechados.

El intensivo desarrollo de la industria de la acuicultura ha sido acompañado por el aumento en los impactos ambientales [2]. Las descargas de efluentes de esta actividad en los ambientes acuáticos presentan altas cargas de nutrientes, diversos compuestos orgánicos e inorgánicos tales como nitrógeno total, amonio, fósforo y materia orgánica (MO) [3].

Entre los efectos indeseables producidos por las aguas residuales (AR) se encuentra la desoxigenación del agua, la deposición de sólidos en los ríos, los olores indeseables, la afectación y/o muerte de peces, el crecimiento excesivo de hongos o plantas acuáticas, entre otros [4]. Tales efectos no son ajenos a los efluentes acuícolas; por tal razón, los impactos ambientales generados por la acuicultura pueden establecer nuevos límites para esta actividad.

El tratamiento de las AR es una estrategia tendiente a reducir los impactos ambientales producidos por el vertimiento de efluentes en los cursos de agua receptores; según von Sperling [5], dicho tratamiento se puede clasificar en: preliminar, cuyo objetivo es la remoción de sólidos de mayor tamaño; primario, que pretende la remoción de sólidos sedimentables y por ende parte de la MO; secundario, que busca la remoción de MO y eventualmente nutrientes; terciario, para la remoción de contaminantes específicos.

La necesidad y perspectivas de implementación de sistemas de tratamiento de las AR dependen del tipo de acuicultura que se practique. Entre los tipos de acuicultura se encuentran los cultivos: en estanques con volumen de agua estático, en sistemas abiertos con circulación del líquido, en sistemas de recirculación con reacondicionamiento de agua en sistemas cerrados [6]. En los sistemas de recirculación acuícolas (SRA) el líquido que sale de los tanques de cultivo en vez de ser vertida a un cuerpo de agua receptor es purificado y reutilizado, reduciendo de esta manera la cantidad de agua fresca que debe ser adicionada al sistema [7].

Los elementos constitutivos básicos de un SRA incluyen: unidades de cultivo (UC)- como tanques y acuarios-, sistema de remoción de sólidos, filtración biológica, aireación, sistema de transporte del agua y frecuentemente una forma de esterilización (como UV u ozono) [8].

En un SRA los residuos sólidos, o MO particulada, están constituidos principalmente por heces y alimento no consumido. Si los sólidos permanecen dentro

del sistema, su descomposición consumirá oxígeno y producirá amoníaco adicional así como otros gases tóxicos como el sulfuro de hidrógeno y por tal razón deben ser removidos lo más pronto posible del sistema [9]. Los residuos sólidos pueden clasificarse en cuatro categorías: sedimentables, suspendidos, flotantes y disueltos. En SRA los dos primeros son de principal interés, y en particular los sólidos sedimentables pues son los más fáciles de tratar y susceptibles de eliminarse con mayor rapidez de las UC [10].

El considerar los estanques en tierra como la opción más económica y adecuada para la producción piscícola a gran escala ha cambiado progresivamente por el incremento en los costos de la tierra, la escasez de agua de buena calidad y los avances tecnológicos en la producción acuícola, haciendo de la producción en tanques una opción más atractiva [11].

Existen diversas formas para tanques de cultivo entre las que están la rectangular, cuadrada, octagonal, ovalada y circular. Los tanques rectangulares (TR) se emplean comúnmente debido a que son fáciles de construir. Sin embargo, tienen asociados varios problemas, los peces capturados de la naturaleza que se ponen en TR tienden a amontonarse en sus esquinas y agotar el oxígeno o intentan nadar contra las mismas cansándose o lastimándose físicamente. La circulación en estos tanques se caracteriza a menudo por tener "zonas muertas" y con cortos circuitos [12]. El agotamiento del oxígeno puede ocurrir localmente o puede haber acumulación de los productos metabólicos en las áreas muertas, causando estrés o hasta la muerte en los animales. En TR con drenaje central, cuanto mayor es la relación largo ancho, se tendrá menor uniformidad en el flujo y mayor presencia de zonas muertas [13].

Por su parte, los tanques circulares (TC) con respecto a los TR presentan ventajas entre las que se están: las velocidades del agua son mayores, lo que hace que los peces recién capturados se adapten mejor; sin embargo, producen una demanda metabólica mayor haciéndoles gastar más energía, lo que puede encarecer su engorde; tienen una distribución más uniforme de animales y alimento; tienden a tener una mejor distribución de comida que los canales de agua, tienen mayor facilidad de autolimpiarse, y requieren de un flujo menor (a menos que la demanda de oxígeno sea el parámetro determinante del flujo debido a la carga de peces) [12, 14].

Los TC en la producción acuícola son atractivos pues: son fáciles de mantener, proveen agua de calidad uni-

forme y permiten operarse bajo una amplia gama de velocidades de rotación para optimizar la salud y condición de los peces [15].

Una característica importante en el funcionamiento de los TC es la relación entre el diámetro (D) y su profundidad (H). Algunos autores como fruto de estudios de los patrones de flujo en este tipo de tanques recomiendan relaciones D/H entre 5:1 a 10:1 [16, 17] o un poco menores relaciones del orden de 3:1 [15].

Una ventaja de los TC es su capacidad de auto limpieza, se pretende que la columna de agua esté en constante rotación dentro del tanque y que la velocidad de rotación sea lo más uniforme posible desde la pared hacia el centro como de la superficie hasta el fondo; además debe ser lo suficientemente rápida para permitir la auto limpieza. Las velocidades requeridas para mover los sólidos sedimentables al drenaje –cuya producción es función de la cantidad de alimento suministrado, con un valor del orden del 25% en base a materia seca– deben ser mayores de 15 a 30 cm/s [15].

De acuerdo con Lekang [7], es necesario un correcto diseño del sistema de entrada de agua al tanque para asegurar la homogénea distribución como mezcla del nuevo líquido afluente así como la auto limpieza de la unidad de cultivo. Para ello en los TC suele utilizarse tuberías con perforadas con disposición horizontal, vertical o combinada (un segmento horizontal y uno vertical).

La salida de los tanques normalmente tiene dos funciones: remover los residuos del tanque lo más pronto posible y mantener el correcto nivel del líquido dentro de la unidad de cultivo [7]. Las principales alternativas de sistemas de salida en TC son las de: rebalse interno, formadas por dos tubos concéntricos localizados en el centro del tanque; rebalse externo, que a su vez sirve como mecanismo de control de nivel por medio de un tubo concéntrico o una caja externa y las de doble drenaje, que divide el flujo que sale de la UC en una pequeña tubería que transporta los sólidos más densos, y una tubería con diámetro mayor transporta en un caudal más grande los sólidos suspendidos desde la parte superior de la columna de agua del tanque [15].

Una vez capturados y evacuados de manera oportuna los sólidos sedimentados en las UC, el tratamiento del AR deberá realizarse por medio de procesos físicos y/o biológicos a través de biofiltros. Los filtros biológicos más comúnmente utilizados en acuicultura son: biofiltros sumergidos, filtros percoladores, los con-

tactores biológicos rotativos (CBR) y los biofiltros de lecho fluidizado [11, 15].

En el tratamiento de efluentes de acuicultura cobra importancia la evaluación de diferentes sistemas de drenaje del AR y sólidos en las UC para identificar opciones que proporcionen mejores eficiencias de remoción de los residuos sólidos generados por las excretas de los peces y alimento no consumido con el fin de posibilitar la reutilización del efluente en SRA.

El objetivo del presente trabajo fue la evaluación en un SRA para cultivo de trucha arco iris de cuatro diferentes tipos de sistemas de drenaje en TC, para tres diferentes tiempos de retención hidráulica (TRH), con el fin de verificar su eficiencia en cuanto a la captura y evacuación de los sólidos generados en las UC.

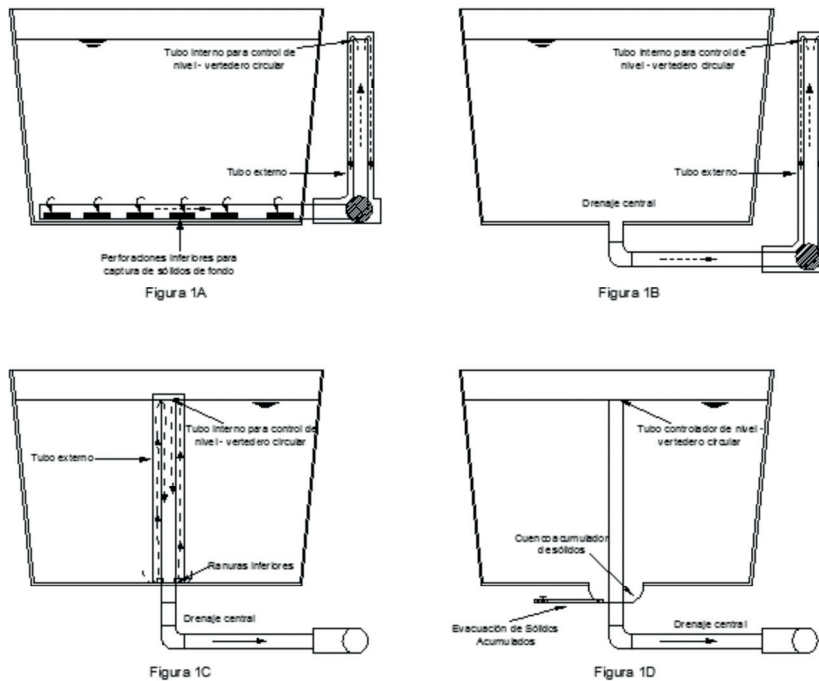
MÉTODO

Localización

El presente proyecto se realizó en el Laboratorio de Hidráulica y Sistemas de Recirculación del Programa de Ingeniería en Producción Acuícola (IPA) de la Universidad de Nariño, al noroeste de la ciudad de San Juan de Pasto, Departamento de Nariño, con una altitud de 2540 msnm, temperatura media de 14°C, latitud 0,1°09' N, longitud 77°08' W.

Adecuación de unidades experimentales

Se adecuaron 12 tanques de capacidad 250 L así: 3 TC con rebalse externo y tubería perforada de fondo con salida lateral, las perforaciones capturaban parte de los sólidos junto con el líquido drenado hacia un rebalse lateral (Drenaje D1, figura 1A); 3 TC con rebalse lateral, se instaló un drenaje central de fondo al que se le adaptó lateralmente un rebalse externo que controló el nivel por medio de un tubo concéntrico (Drenaje D2, figura 1B); 3 TC con rebalse interno, con dos tubos concéntricos, uno externo con ranuras en su base que forzaron al flujo a subir desde el fondo arrastrando los sólidos sedimentados, y uno interno que actúa como vertedero para controlar el nivel del agua (Drenaje D3, figura 1C); 3 TC con doble drenaje, donde un tubo central controló el nivel del agua y funcionó como vertedero circular para evacuación permanente del líquido de exceso y sólidos menos densos, en el fondo se dispuso un cuenco metálico para acumulación de los sólidos más densos, al que se adaptó un tubo de 0,5 in

Figura 1. Tipos de drenajes evaluados.

de diámetro para evacuar los sólidos acumulados dos veces al día (Drenaje D4, figura 1D).

Los tanques se llenaron hasta un nivel equivalente a 230 L, se les propició aireación permanente por medio de piedras difusoras de poro mediano conectadas a mangueras plásticas de 0,25 in de diámetro, que transportaban el aire proveniente de un aireador de 2,5 HP y se cubrieron con malla polisombra para evitar que los animales saltaran fuera de las UC.

Para controlar los caudales de recambio en cada TC se realizaron aforos volumétricos en las UC dos veces por día y se reguló y ajustó el flujo de entrada de agua con válvulas de compuerta metálicas dispuestas en la tubería de entrada de cada UC, los recambios practicados fueron: Caudal 1 (Q1), 1 L cada 6,56 s (0,152 L/s), igual a un recambio cada 25 min; Caudal 2 (Q2), 500 mL cada 6,54 s (0,0764 L/s), equivalente a un recambio cada 50 min; Caudal 3 (Q3), 200 mL cada 4,26 s (0,0469 L/s), igual a un recambio cada 82 min.

Material biológico

Se utilizaron alevinos de trucha arco iris (*Onchorynchus mykiss*) con un peso promedio de 50 g, procedentes de la estación de jaulas flotantes "INTIYACO"

de la Universidad de Nariño, localizada en la Laguna de La Cocha. La densidad de siembra evaluada fue de 8 animales/tanque para un total de 96 animales. Con base en lo anterior cada tanque tuvo una densidad inicial de biomasa de 1,6 kg/m³.

Adecuaciones preliminares

Se adecuó un sistema de tubería de PVC para distribución del agua (red en serie) y del aire (red maillada); un sedimentador convencional de flujo horizontal; un biofiltro de flujo ascendente en un tanque con capacidad de 1000 L con cámara externa para mantenimiento del nivel.

Transporte de los peces

Los animales se trasladaron desde las jaulas flotantes de la estación piscícola INTIYACO, hasta el Laboratorio de Hidráulica del Programa IPA de la Universidad de Nariño. Para ello se los sometió a un período de ayuno de 24 horas. Los animales se empacaron en bolsas plásticas calibre 3 con capacidad de 15 L a las que se les adecuó las puntas del fondo en forma redondeada para evitar esquinas muertas que pudieran comprimir los peces. Cada bolsa se llenó con 1/3 de agua y 2/3 de oxígeno, y mantuvo 15 alevinos durante un tiempo de 2 horas hasta la aclimatación.

Aclimatación en laboratorio

Las bolsas con los animales se introdujeron en tanques de 1,0 m³ por 15 minutos para equilibrar la temperatura; una vez transcurrido ese tiempo se agregó agua del tanque a las bolsas y al mismo tiempo se retiró y descartó el mismo volumen para equilibrar progresivamente el pH, cuya diferencia entre el líquido de las bolsas y el de los tanques fue de 0,3 unidades de pH; a cada bolsa se agregaron 15 g de sal marina, como tratamiento profiláctico. Los animales aclimatados se liberaron en la unidad experimental (UE) brindándole un periodo de adaptación de 7 días, tiempo en el cual se suministró alimento a saciedad.

Plan de manejo y siembra

Después de aclimatar los alevinos, se pesaron con una balanza portátil (marca OHAUS, modelo SPU4001, USA), con capacidad de hasta 4000 g y precisión de $\pm 0,1$ g y se repartieron 8 animales para cada UE. Los individuos restantes fueron utilizados hasta el final del experimento como reposición en caso de mortalidad en cualquiera de los tanques, ello para que las variables a evaluar no fueran afectadas por la ausencia de animales.

Alimentación

Se alimentó con balanceado comercial con 48% de proteína, 2.800 kcal/kg y gránulos de 3,5 mm de diámetro. La cantidad suministrada se calculó teniendo en cuenta la biomasa de las UEs, determinada con base en muestreos quincenales de los peces para verificar el peso y longitud, y a partir de una tasa de alimentación del 3%, distribuyéndose en tres comidas en el horario de 7 a.m., 12 m. y 5 p.m.

Periodo de estudio

Comprendió 2 fases: la primera fue un pre-ensayo para ajustar y adaptar los sistemas de drenaje, definir protocolos de manejo y regulación de caudales para cada tratamiento, se llevó a cabo entre 26 de abril y 10 de mayo de 2010; la segunda fase fue la experimentación propiamente dicha entre mayo 11 a junio 15 de 2010, en la que se evaluó el desempeño de los sistemas de drenaje para remoción de sólidos de las UC.

Durante el experimento se midieron y regularon diariamente los caudales de ingreso a cada una de las UC para controlar los TRH y se verificaron los niveles del agua en las UC, el sedimentador y el biofiltro; igual-

mente, se hizo recambio diario de 5% del volumen de líquido del sistema.

Monitoreo de parámetros fisicoquímicos

Los muestreos y análisis se realizaron diariamente en horas de la mañana, con base en los métodos normalizados establecidos por APHA *et al.* [18]: temperatura (T), método 2550B y oxígeno disuelto (OD), método 4500-O G método electrodo de membrana por medio de oxímetro portátil (marca YSI, modelo 550 A DO, USA), con precisión de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ para temperatura y $\pm 0,3$ mg/L para OD; pH, método electrométrico 4500-H⁺ B por medio de un pHmetro portátil (marca Martini, modelo pH 56, USA), con precisión de $\pm 0,05$ pH

Durante 29 días consecutivos se realizó el análisis de la eficiencia de remoción aparente de los sólidos (ERAS) en las UC, para ello se suspendió el ingreso de agua y de aire a las UC durante 5 minutos permitiendo así la sedimentación de los sólidos de mayor tamaño. Por medio de sifoneo se removieron 10 L de agua de fondo con los sólidos decantados. El líquido extraído se sometió a filtración a través de papel filtro previamente pesado, se realizó su secado parcial al aire y temperatura ambiente por 1 h, posteriormente los filtros con los sólidos retenidos se sometieron a secado en horno a 105°C durante 1 h. Después de su enfriamiento se pesaron con una balanza de precisión (marca METTLER, modelo AE160, Suiza), con capacidad de hasta 160 g y precisión de $\pm 0,1$ mg.

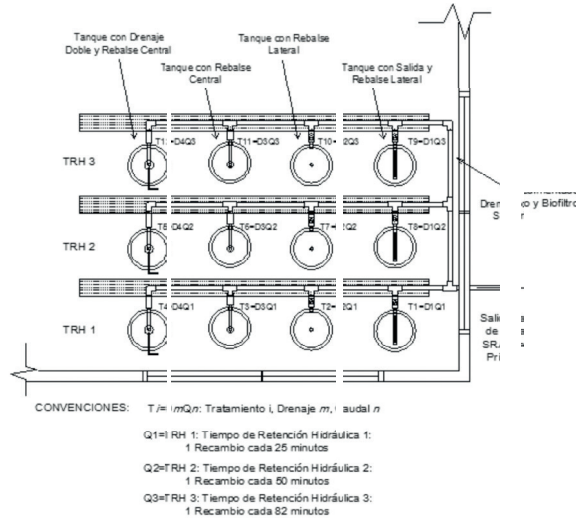
Diseño Experimental

El experimento consistió en un diseño factorial 4x3 (cuatro tipos de drenaje y tres tiempos de retención hidráulica). Los 12 tratamientos evaluados fueron D1Q1, D2Q1, D3Q1, D4Q1, D1Q2, D2Q2, D3Q2, D4Q2, D1Q3, D2Q3, D3Q3, y D4Q3. El experimento no contempló la presencia de réplicas, pues cada uno de los 12 tratamientos fue evaluado por medio de uno de los 12 tanques.

La distribución de cada una de las UE para los diferentes niveles de los dos factores se presenta en la figura 2.

Cada UE estuvo conformada un tanque de 250 L de capacidad con sistema de ingreso del agua por tubería vertical perforada para garantizar un flujo tangencial que favorezca la formación de un vórtice que acumule los sólidos en la zona central de fondo.

Figura 2. Configuración y distribución de los tratamientos en el laboratorio.



El modelo de medias del diseño experimental se expresa en la Ecuación 1.

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

y_{ijk} : Eficiencia de remoción de sólidos

μ : Media global

τ_i : Efecto del i-ésimo nivel del factor 1

β_j : Efecto del j-ésimo nivel del factor 2

$\tau\beta_{ij}$: Efecto debido a la interacción entre los dos factores

ε_{ijk} : Error experimental

Donde el subíndice $i=1,2,3,4; j=1,2,3$.

La variable evaluada en este estudio fue la ERAS en las UC como función del tipo de drenaje utilizado y del TRH aplicado. Para ello se calculó el peso seco final (PSF) de los sólidos colectados en cada tanque, que fue el resultado de restarle al peso del filtro + sólidos secos el peso inicial de cada filtro, el porcentaje de remoción aparente se obtuvo mediante la diferencia entre el peso de alimento proporcionado (PAP) en cada tanque menos el PSF dividido entre el PAP y multiplicado por 100.

Para un total de 324 datos calculados relativos a la ERAS en las UC (aproximadamente 26 datos por tanque, que se constituyeron en repeticiones en el tiempo) y para los datos de T, pH y OD se realizó el correspondiente análisis de varianza.

En términos generales la prueba de hipótesis se realizó para un nivel de confianza α de 0,05 (para P-valor $\leq 0,05$ se rechazó la hipótesis nula H_0) con base en las siguientes consideraciones de las hipótesis nula y alterna:

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4$$

$$H_1 : \tau_i \neq \tau_j, \text{ donde } i \neq j$$

De igual manera, para el Factor 2:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3$$

$$H_1 : \beta_i \neq \beta_j, \text{ donde } i \neq j$$

Y para la interacción:

$$H_0 : \tau\beta = 0$$

$$H_1 : \tau\beta \neq 0$$

Para discernir entre los valores de las medias se recurrió a la prueba de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras y se utilizó el paquete estadístico Statgraphics® Centurión XVI.

RESULTADOS

Remoción de sólidos

Con base en el análisis de varianza se pudo determinar que hubo diferencias significativas entre tratamientos tanto para el factor 1 (tipo de drenaje) como para el factor 2 (recambio), dicha situación se puede observar en los valores del cuadro 1:

Cuadro 1. Análisis de Varianza para Porcentaje de Remoción.

Fuente	SC	GL	CM	Razón-F	Valor-P
A:Drenaje	2770,4	3	923,467	2,89	0,0359
B:Caudal	4841,2	2	2420,6	7,56	0,0006
AB	2279,0	6	379,834	1,19	0,3129

SC: Suma de cuadrados; GL: Grados de libertad; CM: Cuadrado medio

Los resultados de la prueba de múltiples rangos de porcentajes de remoción para los dos factores se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Pruebas de Múltiple Rangos para Porcentaje de Remoción por Drenaje y Caudal.

Drenaje	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
D4	71,9429	1,9905	X
D2	73,3893	1,99132	X
D1	76,0749	2,02954	XX
D3	79,6131	1,97947	X
Caudal	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Q3	71,0323	1,79819	X
Q2	74,2922	1,69089	X
Q1	80,4406	1,69929	X

Con relación al tipo de drenaje se identificaron 2 grupos homogéneos, donde el D1 y el D3, que no presentaron diferencias estadísticamente significativas, reportaron eficiencias de remoción ligeramente mayores que las demostradas por el otro grupo; sin embargo, cabe resaltar que a su vez, los drenajes D1, D2 y D4 tuvieron desempeño similar entre sí y que el drenaje D1 fue común a ambos grupos.

Las bajas eficiencias presentadas por el drenaje 4 (figura 1D), pese a tener la tubería de salida según la configuración recomendada [7], se debieron a que la acumulación de sólidos en el cuenco del fondo únicamente fue removida dos veces por día; sin embargo, si se incorporase un sistema de doble drenaje con trabajo continuo se podría mejorar su eficiencia, como lo han reportado los sistemas desarrollados por Van Toever [19] o por la Universidad de Cornell [15]. El drenaje 2 reportó menores eficiencias debido a la mayor carga hidráulica requerida y mayor longitud de recorrido del flujo y sólidos hasta la salida del tubo de control de nivel (Fig. 1B), lo que pudo dificultar la expedita eliminación de los sólidos del tanque. Las mayores eficiencias presentadas por el D1 (figura 1A) se pudieron deber a la menor carga hidráulica requerida para evacuar el líquido y los sólidos acumulados en comparación a las de los drenajes 2 y 4.

Pese a la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre todos los tipos de drenaje, el aparente mejor desempeño presentado por el D3 se pudo

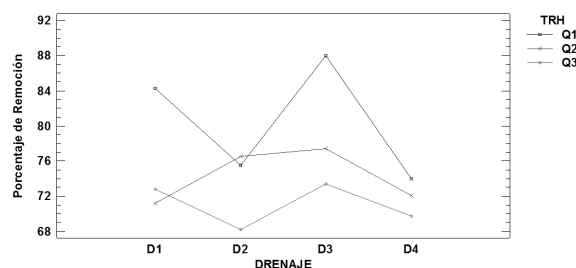
deber a la menor carga hidráulica requerida, así como la menor longitud de recorrido del agua efluente; adicionalmente, la configuración de tubos concéntricos redujo la sección disponible para el flujo del líquido y propició una velocidad que contribuye al arrastre de los sólidos. La mayor eficiencia demostrada por el D3 ayuda a evitar el deterioro de la calidad del agua de los tanques por liberación de MO particulada fina y disuelta debido al rompimiento de los sólidos sedimentados en la unidad de cultivo [20] o por liberación de amoníaco desde los lodos de fondo [21].

Se identificaron dos grupos en cuanto al desempeño de la eficiencia de remoción con respecto al caudal, se observó que la condición más favorable correspondió al caudal equivalente a 2 recambios por hora (Q1) que en promedio superó el 80% de eficiencia. La mayor cantidad de líquido circulante por unidad de tiempo garantiza un mayor arrastre de los sólidos en los tanques, situación que observaron Davidson y Summerfelt [22] en tanques con doble drenaje pues al reducir el recambio se requiere que una mayor fracción del caudal total sea evacuada por el drenaje central para compensar la falta de arrastre debida a una reducción de caudal de 2 recambios/hora a 1 recambio/hora.

La interacción entre los dos factores no presentó diferencias estadísticas significativas; sin embargo, se pudo apreciar que la condición más favorable en términos de generar la mayor ERAS correspondió al drenaje 3 (de fondo con rebalse lateral) y el caudal 1, seguida del drenaje 1 (tubería perforada de fondo y rebalse lateral) tal como se observa en la figura 3, reafirmando la importancia de las menores carga hidráulica requerida y longitud de recorrido para el líquido efluente.

Pese a las diferentes opciones de caudal, el drenaje tipo 4 presentó bajas eficiencias pues el rebalse central

Figura 3. Gráfico de interacciones entre los factores tipo de drenaje y caudal.



que mantiene el nivel del tanque solamente evacuó los sólidos menos densos y el drenaje de fondo, cuyo funcionamiento fue accionado dos veces por día no logró eliminar los sólidos más pesados de manera oportuna.

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda implementar en los 12 tanques la configuración de rebalse interno y por medio de proyectos de investigación similares continuar analizando la eficiencia de remoción de los sólidos en este tipo de unidades de cultivo para otros TRH, bajo diferentes densidades de siembra y para el cultivo de diferentes especies, ya que la densidad, tamaño y forma de las heces varía de manera importante entre ellas.

Oxígeno disuelto

Pese a que se manejaron tres diferentes caudales entre las UC -lo que contribuye al transporte de oxígeno con el líquido- no hubo diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones registradas en los tanques, pues cada UC tuvo una piedra difusora de poro fino con igual caudal de aire, lo que garantizó transferencia del gas hacia el agua para compensar su consumo por la respiración de las truchas; así mismo, la configuración de los TC proporciona una homogénea distribución del OD en las UC [23].

La concentración media de OD registrada en los tanques durante el experimento fue de 6,96 mg/L, superando así los 5,0 mg/L recomendados para sistemas con reuso de agua [24], permaneciendo siempre en los rangos recomendados por la literatura para cultivo de trucha [15, 25].

pH

No hubo diferencias significativas en los valores del pH entre los tratamientos (P-valor 0,6243). Su regularidad se pudo deber a los recambios garantizados por el caudal regulado dos veces por día. Los procesos biológicos desarrollados por las truchas y al interior del biofiltro alteran en cierta medida el pH en el agua; sin embargo, la sustitución parcial diaria del líquido contribuye a mantener los niveles homogéneos.

El pH promedio en las UC fue de 6,57, valor que estuvo en los rangos recomendados para el cultivo de trucha [26, 11, 15].

Temperatura

No hubo diferencias estadísticamente significativas (P-valor de 0,8849) entre el efecto medio de la temperatura de un nivel de tratamiento a otro ni entre factores. El promedio de la temperatura en las UC a lo largo del experimento fue de 17,6°C, valor que estuvo en el rango óptimo para el cultivo de la especie [25, 15].

CONCLUSIONES

Entre los tratamientos evaluados el que mejor resultado presentó respecto a la captura y remoción de sólidos fue el número 3 (rebalse interno), en el que quedó un remanente de sólidos del 11,98% respecto a la cantidad de alimento suministrado a la UC. Por tanto el sistema de drenaje con rebalse central y dos recambios por hora reportó una eficiencia del 88,02% de remoción aparente de los sólidos.

Los tipos de rebalse y TRH evaluados no afectaron el oxígeno disuelto, pH y temperatura en los tanques circulares de cultivo de trucha para la densidad de biomasa estudiada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen por su apoyo a: Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Consejo Facultad de Ciencias Pecuarias, a los Profesores M.Sc. Álvaro Burbano Montenegro y Marco Antonio Imués Figueroa y muy especialmente a los Estudiantes del Programa IPA, asignatura Núcleo Problémico I, Periodo A de 2010.

REFERENCIAS

- [1] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). The State of World Fisheries and Aquaculture 2012. Rome (Italy): FAO Fisheries and Aquaculture Department, 2012, 230 p.
- [2] CRAB, R., AVNIMELECH, Y., DEFOIRDT, T., BOSSIER, P. and VERSTRAETEET, W. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture*, 270(1-4), 2007, p. 1-14.

- [3] PIEDRAHITA, R.H. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture*, 226(1-4), 2003, p. 35–44.
- [4] ROMERO, R.J.A. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. 3 ed. Bogotá (Colombia): Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010, 1248 p.
- [5] VON SPERLING, M. Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales. Principios del tratamiento biológico de aguas residuales, Volumen 1. 1 ed. Pasto (Colombia): Centro de publicaciones Universidad de Nariño, 2012, 468 p.
- [6] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Nigerian Institute for Oceanography and Marine Research. Introduction to aquaculture. Port Harcourt (Nigeria): FAO Fisheries and Aquaculture Department, African Regional Aquaculture Centre, 1987, 40 p.
- [7] LEKANG, O.I. Aquaculture engineering. Oxford (United Kingdom): Blackwell publishing, 2007, 340 p.
- [8] WATSON, C.A. and HILL, J.E. Design criteria for recirculating, marine ornamental production systems. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 2006, p. 157–162.
- [9] MASSER, M.P., RAKOCY, J. and LOSORDO, T.M. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems Management of Recirculating Systems. Texas (USA): Southern Regional Aquaculture Center, SRAC Publication No. 452, 1999, 12 p.
- [10] LOSORDO, T.M., MASSER, M.P. and RAKOCY, J. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems. An Overview of Critical Considerations. Texas (USA): Southern Regional Aquaculture Center, SRAC Publication No. 451, 1998, 6 p.
- [11] LAWSON, T.B. Fundamentals of Aquacultural Engineering. New York (USA): Chapman & Hall, 1995, 355 p.
- [12] WEATHON, F.W. Acuicultura: Diseño y Construcción de Sistemas. 1 ed. México D.F. (México): AGT Editor, 1993, 704 p.
- [13] OCA, J. and MASALÓ, I. Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks. *Aquacultural Engineering*, 36(1), 2007, p. 36–44.
- [14] COLL, M.J. Acuicultura Marina Animal. 1 ed. Madrid (España): Ediciones Mundi-Prensa, 1991, 663 p.
- [15] TIMMONS, M.B., EBELING, M., WHEATON, F.W., SUMMERFELT, S.T. y VINCI, B.J. Sistemas de recirculación para la acuicultura. 1 ed. Santiago de Chile (Chile): Fundación Chile, 2002, 747 p.
- [16] BURROWS, R. and CHENOWETH, H.H. Evaluation of three types of fish rearing ponds. Research report 39. Washington, D.C. (USA): US Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, 1955, 29 p.
- [17] CHENOWETH, H.H., LARMOYEUX, J.D. and PIPER, G.G. Evaluation of circular tanks for salmonid production. *The Progressive Fish-Culturist*, 35(3), 1973, p. 122-131.
- [18] APHA, AWWA and WPCF. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 17 ed. Madrid (España): Ediciones Días de Santos S.A., 1992, 1605 p.
- [19] TIMMONS, M.B., SUMMERFELT, S.T. and VINCI, B.J. Review of circular tank technology and management. *Aquacultural Engineering*, 18(1), 1998, p. 51–69.
- [20] SUMMERFELT, S.T. An Integrated Approach to Aquaculture Waste Management in Flowing Water Systems. Roanoke (USA): Proceedings of the Second International Conference on Recirculating Aquaculture, 1998, p. 87-97.
- [21] YEARSLEY, R.D., JONES, C.L.W. and BRITZ, P.J. Effect of settled sludge on dissolved ammonia concentration in tanks used to grow abalone (*Haliotis midae* L.) fed a formulated diet. *Aquaculture Research*, 40(2), 2009, p. 166-171
- [22] DAVIDSON, J. and SUMMERFELT, S. Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m³) circular 'Cornell-type' dual-drain tanks. *Aquacultural Engineering*, 32(1), 2004, p. 245–271.
- [23] OCA, J. and MASALÓ, I. Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. *Aquacultural Engineering*, 52(1), 2013, p. 65–72.
- [24] COLT, J. Water quality requirements for reuse systems. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 2006, p. 143–156.
- [25] BLANCO, C.C. La trucha cría industrial. 1 ed. Madrid (España): Editorial Mundi Prensa, 1995, 503 p.
- [26] DRUMMOND, S.S. Cría de la Trucha. 1 ed. Zaragoza (España): Editorial Acribia S. A., 1988, 180 p.