

Remoción de sólidos en aguas residuales de producción intensiva de trucha en un sistema de recirculación cerrado*

Gloria Lucía Cárdenas Calvachi¹✉

Iván Andrés Sánchez Ortiz²

John Alexander Maya González³

Adriana Solarte Vásquez⁴

Cómo citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Cárdenas, G., Sánchez, I., Maya, J. y Solarte, A. (2015). Remoción de sólidos en aguas residuales de producción intensiva de trucha en un sistema de recirculación cerrado. *Revista UNIMAR*, 33(1), 229-236.

Fecha de recepción: 13 de noviembre de 2014

Fecha de revisión: 20 de febrero de 2015

Fecha de aprobación: 19 de mayo de 2015

RESUMEN

Todas las actividades productivas generan impactos negativos directos e indirectos al medio ambiente; la acuicultura no es ajena a esta realidad; por ello, se propuso un sistema de recirculación acuícola (SRA-Trucha) a fin de disminuir estos impactos, que contó con dos unidades de filtración física, dos unidades biológicas y una unidad de desinfección, lo cual permitió el óptimo desarrollo de la Trucha Arcoíris. El presente artículo se centra en la evaluación de la remoción de sólidos, en cuanto a sólidos totales (ST), sólidos suspendidos (SS), sólidos disueltos (SD), sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF). Se obtuvo remociones generales del SRA-Trucha para ST de 40,2 %, SS de 49,94 %, SD de 33,67 %, SV de 16,83 % y SF de 42,64 %, lo cual permite concluir que se asegura los valores admisibles de sólidos en el cultivo de Trucha Arcoíris, siendo la unidad de posfiltración la que presenta mayores remociones en todos los sólidos, presentándose como una buena alternativa de postratamiento de efluentes biológicos.

Palabras clave: remoción, Sistema de Recirculación Acuícola, sólidos, valores admisibles.

Removal of solids in intensive production's waste-water of trout in a closed circulation system

ABSTRACT

All productive activities generate direct and indirect negative impacts on the environment. Aquaculture is not immune to this reality. Therefore, to reduce these impacts, a recirculation aquaculture system (RAS-Trout) was proposed which featured two physical filtration units, two biological units and a disinfection unit that allowed the optimum development of Rainbow Trout. This article focuses on the evaluation of the removal of solids, in terms of total solids (TS), suspended solids (SS), dissolved solids (DS), volatile solids (VS) and fixed solids (FS).

General removal of RAS-Trout 40.2 % for ST, SS 49.94 %, SD 33.67 %, 16.83 % VS 42.64 % and SF were obtained, leading to the conclusion that assures the allowable values of solids in the culture of Rainbow trout being post filtration unit which has higher removals in all solid, posing as a good alternative for biological effluent post treatment.

Key words: removal, Recirculating Aquaculture System, Solids, Allowable Values.

* Artículo Corto Resultado de Investigación.

¹✉ Magister en Ingeniería Ambiental, Universidad Mariana; Especialista en Docencia Universitaria, Universidad de Nariño; Especialista en Alta Gerencia, Universidad de Nariño; Ingeniera Química, Universidad Nacional de Colombia; profesora asistente de la Universidad Mariana; integrante del Grupo de Investigación Ambiental GIA. Correo electrónico personal: glucardenas@gmail.com / glucardenas@umariana.edu.co

² Magister en Ingeniería Civil, Área de Ingeniería Ambiental y Recursos Hídricos (UNESP); Especialista en Docencia Universitaria, Universidad de Nariño; Especialista en Alta Gerencia, Universidad de Nariño; Ingeniero Civil, Universidad de Nariño; profesor asociado de la Universidad de Nariño; integrante del Grupo de Investigación GIAC. Correo electrónico: ivansaor@hotmail.com / iaso@udenar.edu.co

³ Ingeniero Ambiental, Universidad Mariana; Ingeniero Fundación Acción contra el Hambre. Pasto, Nariño, Colombia. Correo electrónico: jhonmayag@yahoo.es.

⁴ Ingeniera Ambiental, Universidad Mariana; Ingeniero HG Transportes y Servicios SAS. Correo electrónico: adrisol1220@hotmail.com

Remoção de sólidos em águas residuárias da produção intensiva de truta em um sistema de recirculação fechado

Todas as atividades produtivas geram impactos negativos diretos e indiretos ao meio ambiente; a aquicultura não está imune a esta realidade; portanto foi proposto um sistema de recirculação aquícola (SRA-truta) para reduzir esses impactos. O sistema contou com duas unidades de filtração física, duas unidades biológicas e uma unidade de desinfecção que permitiu o desenvolvimento ótimo de truta arco-íris. Este artigo centra-se na avaliação da remoção de sólidos, em termos de sólidos totais (ST), sólidos em suspensão (SS), sólidos dissolvidos (SD), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF).

Foram obtidas remoções gerais do SRA- truta para ST de 40 %, SS de 49,94 %, SD 33,67 %, SV 16,83%, e SF de 42,64%, levando à conclusão que garantiu os valores admissíveis de sólidos no cultivo da truta arco-íris, sendo a unidade de pós-filtração a que apresentou maiores remoções dos tipos de sólidos posando como uma boa alternativa de pós-tratamento de efluentes biológicos.

Palavras-chave: remoção, Sistema de Recirculação Aquicultura, sólidos, valores admissíveis.

1. Introducción

La acuicultura ha tenido un incremento anual de 8.9 % desde 1970 (FAO, 2004); este crecimiento da una idea de las dimensiones de esta industria, por lo cual es necesario interesarse en el entorno en que se desarrolla y los daños que puede ocasionar al medio ambiente; conocer esta información es de vital importancia para las personas que habitan regiones o poblaciones que llevan a cabo esta actividad, y por ende, que hacen uso de los recursos naturales, en este caso el agua.

En el desarrollo de la acuicultura se ha implementado una tecnología que permite el cultivo de peces a mayor intensidad; se trata del sistema de recirculación aquícola (SRA) en el que se hace énfasis en el estudio de la calidad del agua bajo parámetros como temperatura, pH, alcalinidad, nitrógeno y residuos sólidos. Estos últimos son filtrados y removidos (Timmons, Ebeling, Wheaton, Summerfelt y Vinci, 2002).

Los sólidos del agua residual de la producción aquícola generalmente están asociados a la materia orgánica, puesto que están compuestos por excretas, flóculos y alimentos no ingeridos, que tienen una fracción orgánica que oscila entre 50 y 92 % (Mirzoyan et al., 2008). Son indeseables en sistemas de recirculación aquícola, no solo por la estética sino más bien porque, sobre todo los sólidos de pequeño tamaño, reducen

la supervivencia de alevinos y dañan o provocan putrefacción de las aletas (Summerfelt & Penne, 2005).

El SRA-Trucha a escala piloto se evaluó para determinar si es posible remover sólidos hasta los valores admisibles por la Trucha Arcoiris (Sólidos suspendidos < 80 mg/L, Sólidos disueltos < 400 mg/L) en las aguas residuales generadas en un sistema intensivo de producción con recirculación cerrada, utilizando un sistema de tratamiento que consta de un prefiltro, un reactor biológico aerobio, un reactor biológico anóxico y un postfiltro.

2. Materiales y Métodos

El SRA-Trucha fue implementado con dos unidades de prefiltración antes del reactor aerobio y un reactor biológico aerobio de lecho fluidizado con tubos concéntricos que trataron la línea de agua residual superficial, un reactor anóxico de lecho expandido con medio plástico de soporte, que trató el agua residual del fondo de los tanques de cultivo y dos unidades de postfiltración que trataron el agua proveniente de las dos líneas de tratamiento biológico, con el fin de remover la mayor cantidad de sólidos del agua que retornó a los tanques de cultivo de truchas, pasando antes por la unidad de desinfección (UV), donde se necesita que la presencia de sólidos sea mínima. El esquema del SRA se presenta en la Figura 1.

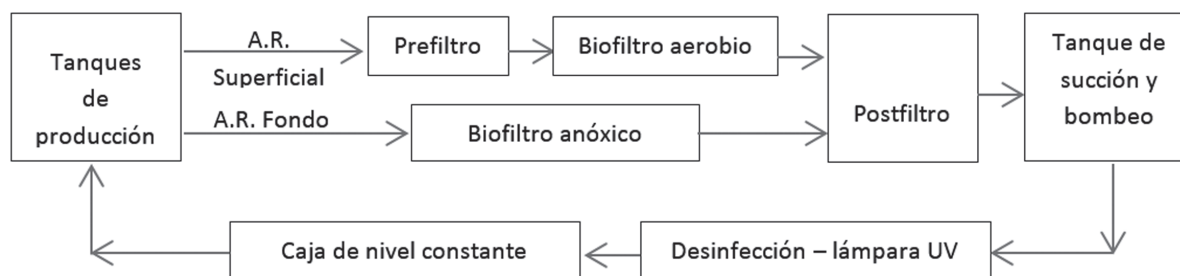


Figura 1. Esquema del SRA-Trucha.

Fuente: Cárdenas (2014).

Los filtros que se constituyen en las principales unidades de remoción de sólidos en el SRA, se diseñaron utilizando la tecnología FIME o filtración en múltiples etapas (OPS, OMS, & CEPIS, 2005). Para ello, se utilizaron tubos de PVC de 8 pulgadas de diámetro y 1 metro de largo. Internamente cuentan con 5 capas de diferentes granulometrías de grava y arena que va de mayor a menor tamaño en sentido del flujo ascendente. En la parte interior se adaptó una base de acrílico circular con orificios para distribuir el agua de manera uniforme por el material filtrante. En la Tabla 1 se muestra las diferentes capas y granulometrías utilizadas en la implementación de los filtros.

Tabla 1. Características de las capas del lecho filtrante

Granulometría Lecho Filtrante (mm)	Altura de las capas (m)	Altura total del Lecho (m)
19 – 25	0,25	Lecho Soporte 0,25 Lecho filtrante 0,6
13 – 19	0,20	
6 – 13	0,15	
3 – 6	0,15	
1.6 – 3	0,10	

Fuente: Maya y Solarte (2013).

Los reactores biológicos fueron inoculados utilizando el agua proveniente del recambio del tanque de aclimatación de los peces, con el fin de incorporar material bacteriano adaptado a la materia orgánica de la producción acuícola. Para el reactor aerobio se utilizó el agua de la superficie y para el reactor anóxico el agua del fondo del tanque, donde se tiene una mínima concentración de oxígeno disuelto.

Para la determinación de la remoción general de sólidos y en cada unidad del SRA, se tomaron muestras en los siguientes puntos:

Tabla 2. Puntos de muestreo

No.	Localización del punto de muestreo
1	Salida fondo tanques de cultivo
2	Salida superficial tanques de cultivo
3	Salida reactor anóxico
4	Salida prefiltro
5	Salida reactor de lecho fluidizado
6	Salida postfiltro

Fuente: Cárdenas (2014).

Para la realización de estos análisis se utilizaron las técnicas estandarizadas del manual de Métodos Estándar para el Análisis de Aguas y Aguas Residuales, como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3. Métodos de determinación de sólidos

Parámetro	Método de determinación
Sólidos totales	Gravimétrico – Método N° 2540 B
Sólidos disueltos	Gravimétrico – Método N° 2540 C
Sólidos suspendidos	Gravimétrico – Método N° 2540 D
Sólidos volátiles	Gravimétrico – Método N° 2540 E
Sólidos fijos	Gravimétrico – Método N° 2540 G

Fuente: APHA, AWWA y WEF (2012).

3. Resultados y Discusión

El comportamiento de la concentración de sólidos totales (ST), sólidos suspendidos (SS), sólidos disueltos (SD), sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF) en el SRA se presenta en la siguiente Tabla.

Tabla 4. Concentración promedio de sólidos (mg/L) en las unidades del SRA-Trucha

Punto	ST (mg/L)	SS (mg/L)	SD (mg/L)	SV (mg/L)	SF (mg/L)
1	508,37 ± 40,15	159,31 ± 27,9	349,06 ± 44,05	148,37 ± 70,25	360,00 ± 59,72
2	427,73 ± 55,15	125,50 ± 28,89	302,24 ± 59,91	115,54 ± 44,49	312,19 ± 47,31
3	436,93 ± 52,35	123,87 ± 32,38	313,18 ± 46,11	130,39 ± 64,53	306,54 ± 50,09
4	334,43 ± 55,40	87,02 ± 16,03	247,41 ± 60,36	80,21 ± 36,6	254,22 ± 44,06
5	330,00 ± 54,70	84,94 ± 15,83	245,06 ± 59,65	120,00 ± 69,42	210,00 ± 65,4
6	262,42 ± 40,66	63,71 ± 14,94	203,18 ± 42,91	84,25 ± 57,2	178,17 ± 58,93

Fuente: Cárdenas (2014).

Como se puede observar, el sistema de tratamiento implementado en el SRA-Trucha fue eficiente debido a que disminuyó de valores promedio de ST entre 508,4 y 427,7 a la entrada del sistema a 262,4 mg/L a la salida.

En la entrada del reactor aerobio se obtuvo concentraciones promedio de ST de 334,4 mg/L, condiciones que coinciden con las concentraciones de ST en la entrada de un reactor del mismo tipo, en donde, variaron entre 100 y 416 mg/L (Sánchez, 2009) y de 138 a 502 mg/L (Maignal, 2011). El prefiltro es importante para el reactor aerobio, puesto que se necesita que la materia orgánica se encuentre más disuelta que suspendida para ser oxidada en este reactor. Esto se logra con el prefiltro que disminuyó los SS desde valores promedio: 125,5 a 87,0 mg/L.

El comportamiento de la concentración de todos los tipos de sólidos fue relativamente estable a excepción de los SV, los cuales, asociados a la biomasa adherida al medio soporte (o biopelícula), variaron de manera considerable, debido a las constantes eventualidades suscitadas por reiterados cortes de energía que se

presentaron durante la investigación. Esta situación afectó en mayor proporción al reactor aerobio, porque los arranques del compresor ocasionaban sobrepresiones sobre el lecho, aumentando abruptamente la velocidad de circulación del medio trifásico, ocasionando mayor roce entre las partículas y las paredes del reactor y una eventual pérdida de biomasa del medio. Por esta razón, la concentración promedio de sólidos volátiles aumentó de 80,21 mg/L a la salida del prefiltro a 120 mg/L a la salida del reactor aerobio.

Para Summerfelt y Penne (2005), la concentración total de SS no debe exceder los 80 mg/L para mantener la salud óptima de peces en agua dulce. En promedio los SS iniciaron en valores de 159,3 y 125,5 mg/L, y después del sistema de tratamiento llegaron hasta 63,7 mg/L dentro de los valores recomendados por estos autores; comprobando así que los filtros granulares utilizados en esta investigación fueron eficientes en la eliminación de este tipo de sólidos como bien lo argumenta Timmons et al. (2002). Sin embargo, aún son ineficaces para alcanzar los valores de SS que otros autores proporcionan, específicamente para la Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*); Blanco (1995) y Amaya y Anzola (1988) recomiendan valores menores a 30 mg/L y Breton (2005) valores aún mayores de hasta 25 mg/L. Esta es una de las razones por la que muy posiblemente, se encontraron daños, aunque en porcentajes bajos, en la necrosis de aletas de las truchas evaluadas (Casanova y Mejía, 2013), índice de la influencia sobre el bienestar animal que se realiza de acuerdo con Summerfelt y Penne (2005).

Analizando los datos en términos de remoción, se obtiene la Tabla 5 que resume el comportamiento de la eficiencia de cada una de las unidades.

Tabla 5. Eficiencia de remoción de sólidos (%) en las unidades del SRA-Trucha

Unidad	ST	SS	SD	SV	SF
Global	40,16 ± 7,32	49,94 ± 13,33	33,67 ± 12,25	16,83 ± 90,25	42,64 ± 19,76
Reactor anóxico	14,04 ± 7,49	21,70 ± 17,46	10,27 ± 7,08	5,52 ± 40,38	14,45 ± 8,03
Línea aerobia	22,66 ± 9,12	30,59 ± 12,35	18,96 ± 10,53	-19,12 ± 110,57	31,11 ± 21,44
Prefiltros	21,57 ± 9,66	28,74 ± 13,24	18,14 ± 10,87	28,54 ± 23,87	17,90 ± 12,1
Reactor aerobio	1,32 ± 1,15	2,45 ± 1,39	0,96 ± 1,32	-57,37 ± 92,01	16,94 ± 20,89
Postfiltros	23,93 ± 6,63	28,53 ± 18,57	19,60 ± 10,87	33,62 ± 19,6	22,93 ± 13,93
Proc. Biológico	21,27 ± 7,78	29,54 ± 11,24	17,50 ± 9,26	-13,67 ± 91,77	28,36 ± 18,29

Fuente: Cárdenas (2014).

Las eficiencias de remoción de ST obtenidas (40,2%, $p > 0,05$) se pueden observar en la Figura 2 y se encuentran entre los valores obtenidos por Sánchez (2009) de 34,01 %, quien utilizó un decantador convencional y Maigual (2011) de 44,44 %, quien utilizó un sedimentador de columna para la eliminación de sólidos. La línea aeróbica alcanzó mayor eficiencia de remoción de ST con un 22,6 % ($p > 0,05$) frente al 14,4 % ($p > 0,05$) de la línea anóxica.

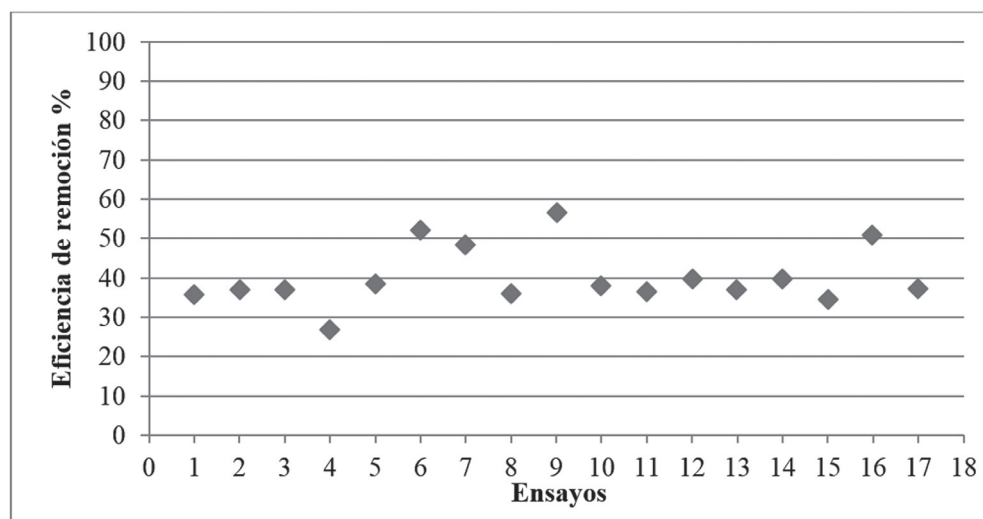


Figura 2. Eficiencia de remoción de sólidos totales.

Fuente: Cárdenas (2014).

De todos los sólidos, el SRA fue el más eficiente en la remoción de SS, donde removió casi la mitad de los generados. Este porcentaje es menor que el 64,45 % alcanzado por el sistema decantador-reactor aerobio de Sánchez (2009), el 71,71 % del sistema con sedimentador de columna-reactor aerobio de Maigual (2011), y el 98 % del sistema de Gallego, García, Díaz y Fall (2003), que contó con un filtro parabólico de mallas de 300 mm, un filtro percolador, un filtro de arena, un filtro de carbón activado y una lámpara ultravioleta para desinfección (Gallego et al., 2003). Con un nivel de confianza del 95 % (valor- $P = 0,106193$) tanto la línea aerobia como la línea anóxica del SRA son igualmente eficientes en la remoción de SS, sin embargo, dentro de la línea aerobia, el prefiltro fue el que más aportó en la eficiencia de remoción de SS, ratificando que la instalación de un sistema de eliminación de sólidos suspendidos antes del reactor de lecho fluidizado es necesario, teniendo en cuenta que según Weaver (2006), se debe evitar el muy complejo problema de la eliminación de sólidos en biofiltros de lecho fluidizado y el impacto de los sólidos en la acumulación de exceso de lodo.

De la misma manera, se comprobó la incidencia de los postfiltros en la remoción total de SS del sistema, obteniendo diferencias estadísticamente significativas (p -valor = 0,000685139), lo cual permite concluir

que el posfiltro sí aporta a la remoción de SS, aumentándola significativamente de 29,54 a 49,94 %.

La remoción general más baja fue registrada para SV (16,8 %, $p > 0,05$), que también fue el único que presentó eficiencias de remoción negativas, las cuales se dieron en el reactor aerobio, debido a inconvenientes por cortes energéticos mencionados anteriormente, cuyos arranques posteriores ocasionaron desprendimiento de la biomasa adherida al medio, la cual se asocia con los SV a la salida del reactor, muy inestables y mayores que los de la entrada. Esta es la principal razón por la cual la eficiencia fue inferior a la del SRA de Sánchez (2009), quien obtuvo un 21,10 % y la de Maigual (2011), quien obtuvo una eficiencia de remoción de SV de 45,65 %.

En el análisis general de las unidades de tratamiento que conformaron el SRA-Trucha, la unidad que presentó mayores remociones en todos los sólidos evaluados fue la unidad de postfiltración, alcanzando remociones para ST de 23,93 %, SD de 19,60 %, SS de 28,53 %, SV de 33,62 % y SF de 22,93 %. El postfiltro es una buena alternativa de tratamiento posterior al tratamiento biológico, siguiendo las recomendaciones dadas por investigaciones anteriores (Sánchez, 2009), donde se ha tenido el inconveniente de escape de material de soporte y sólidos de la propia biopelícula por el propio funcionamiento dinámico del reactor aerobio.

4. Conclusiones

La implementación del SRA-Trucha incluye básicamente dos sistemas de filtración de medio poroso de múltiples etapas como pre y postratamiento como sistemas físicos de tratamiento, dos reactores: uno anóxico de flujo ascendente con medio plástico de soporte, y otro aerobio de lecho fluidizado de tubos concéntricos con zeolita como medio de contacto como sistemas biológicos de tratamiento, y un sistema de desinfección con luz UV; estas unidades permiten una remoción eficiente de sólidos en el agua residual generada en la producción para poder ser reutilizada en un sistema cerrado.

En sólidos totales se alcanza una remoción total de 40,2 % ($p > 0,05$), y aunque todas las unidades aportan un porcentaje significativo, es la unidad de postfiltración la que presenta mayores remociones en todos los sólidos, presentándose como una buena alternativa de postratamiento de efluentes biológicos.

La eficiencia de remoción de los sólidos más alta fue la de los SS, donde se removió casi la mitad de los generados (49,94 %, $p > 0,05$), obteniendo una concentración promedio de 63,7 mg/L a la salida, la cual se encuentra dentro de los valores recomendados de SS para peces en agua dulce (< 80 mg/L), pero mayores que los valores recomendados para la Trucha Arcoíris (< 30 mg/L); sin embargo, este valor no tuvo afectación sobre la supervivencia, crecimiento y bienestar de la especie evaluada.

La evaluación de SRA-Trucha en cuanto a la remoción de sólidos permitió comprobar que es una alternativa de producción eficiente, segura y sostenible que permitirá obtener un producto alimenticio, de buena calidad y amigable con el ambiente.

Referencias

- Amaya, R. & Anzola, E. (1988). *Generalidades sobre el cultivo de la Trucha*. Bucaramanga, Colombia: Instituto Nacional de Recursos Naturales Renovables y del Ambiente INDERENA.
- APHA, AWWA & WEF. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (E. W. Rice, R. B. Baird, A. D. Eaton, & L. S. Clesceri, Eds.) (22a. ed., p. 1325). Washington: American Public Health Association, American Water Works Association & Water Environment Federation.
- Blanco, C. (1995). *La Trucha Cría industrial*. Madrid, España: Ediciones Mundi-prensa.
- Breton, B. (2005). *El cultivo de la Trucha*. Barcelona, España: Ediciones Omega.
- Cárdenas, G. (2014). *Evaluación de un sistema de tratamiento de agua residual de producción intensiva de Trucha (Oncorhynchus mykiss) en un sistema de recirculación cerrado a escala piloto*. (Trabajo de grado). Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia.
- Casanova, D. y Mejía, E. (2013). *Evaluación de dos tiempos de retención hidráulica en un sistema de recirculación vs aireación convencional y su efecto en las variables productivas y bienestar de ejemplares de trucha Arcoiris (Oncorhynchus mykiss)*. (Trabajo de Grado). Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia.
- FAO. (2004). State of World Fisheries and Aquaculture. Retrieved from www.fao.org
- Gallego, I., García, D., Díaz, C. y Fall, C. (2003). Sistema de recirculación de agua para cría de alevía de trucha arcoiris (*oncorhynchus mykiss*) y carpa común (*cyprinus carpio*). In: *Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas* (pp. 86-97). Buenos Aires, Argentina: RIPDA-CYTED; CIRA-UAMEX.
- Maigual, Y. (2011). *Utilização de reator aeróbio de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos no tratamento de águas residuárias da produção intensiva de tilapia com recirculação da água tratada*. Universidade Estadual Paulista.
- Maya, J. y Solarte, A. (2013). *Evaluación de la remoción de sólidos en aguas residuales de producción intensiva de Trucha en un sistema de recirculación cerrado a escala piloto*. (Trabajo de Grado). Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia.
- Mirzoyan, N., Parnes, S., Singer, A., Tal, Y., Sowers, K. & Gross, A. (2008). Quality of brackish aquaculture sludge and its suitability for anaerobic digestion and methane production in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Aquaculture*, 279, 35–41.
- OPS, OMS & CEPIS. (2005). *Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas*. Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Sánchez, I. (2009). *Remoção de nitrogênio de água residuária de produção intensiva de tilápias com recirculação utilizando reator de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos*. Dados. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita filho."

- Summerfelt, R. & Penne, C. (2005). Solids removal in a recirculating aquaculture system where the majority of flow bypasses the microscreen filter. *Aquacultural Engineering*, 33, 214–224. doi:10.1016/j.aquaeng.2005.02.003
- Timmons, M., Ebeling, J., Wheaton, F., Summerfelt, S. y Vinci, B. (2002). *Sistemas de recirculación para acuicultura*. Santiago de Chile: Fundación Chile.
- Weaver, D. (2006). Design and operations of fine media fluidized bed biofilters for meeting oligotrophic water requirements. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 303–310. doi:10.1016/j.aquaeng.2005.07.004