

Evaluación y modelación de generación de residuos en la producción trutícola con sistemas de recirculación acuícola

Daury García Pulido¹

Iván Gallego Alarcón²

Carlos Díaz Delgado¹

Chiekh Fall¹

Cristina Burrola Aguilar²

RESUMEN

La acuicultura en México ha crecido a pesar de presiones ejercidas sobre el recurso agua, por lo que se han buscado opciones que permitan su desarrollo y a la vez favorezcan el uso sostenible del agua. Una de estas alternativas son los sistemas de recirculación acuícola, sin embargo los modelos del comportamiento de los procesos involucrados en estos sistemas se han realizado en países desarrollados donde las características son diferentes a las encontradas en México, en este proyecto se procuró conocer y modelar la generación de residuos que limitan la producción de truchas en este estado. Para esto se construyó un sistema de producción trutícola formado por dos estanques circulares con un volumen de 5,3 m³ cada uno, acoplado a un tren de tratamiento. Se sembraron 4,600 truchas, se monitorearon durante 46 semanas, se realizaron muestreos biométricos para conocer el desarrollo de los organismos y se determinó la concentración en el agua de parámetros limitantes del proceso (DQO_T, SST, Nitrógeno Amoniacal Total, Nitritos y Nitratos). La biomasa alcanzada durante el ciclo de producción fue de 12 kg/m³. Esta cantidad de organismos generó residuos que se describen matemáticamente por las siguientes ecuaciones: Nitrógeno Amoniacal Total (mg/L)=0.008[biomasa(kg)]-0.36; DQO_T(mg/L)=0.482[biomasa(kg)]+10.72 y SST(mg/L)=0.088[biomasa(kg)]-0.727. En conclusión, estos

¹ Centro Interamericano de Recursos del Agua, UAEM. daurygp@gmail.com, cdiaz@uaemex.mx

² Centro de Investigación en Recursos Bióticos, UAEM. iga@uaemex.mx

modelos permiten estimar la producción de especies químicas que se generarán durante el ciclo de producción en función de la biomasa cultivada, obteniendo los valores de los parámetros necesarios que facilitarán el diseño de SRA a condiciones reales, ya que generalmente el diseño de trenes de tratamiento para aguas residuales acuícolas está basado en la cantidad de alimento balanceado suministrado y no involucra factores antrópicos.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción trutícola con recirculación de agua, son procesos donde el agua utilizada en los estanques se canaliza a un tren de tratamiento para reacondicionar el efluente permitiendo la vida acuática. Estos trenes de tratamiento tienen cuatro funciones básicas, circulación de agua, remoción de sólidos, biofiltración e intercambio gaseoso (Timmons et al., 2002).

La biofiltración es cualquier filtración en donde se utilizan organismos vivos para remover impurezas del agua (Suhr y Pedersen, 2010). En la truticultura esta función elimina las especies nitrogenadas tóxicas para los organismos acuáticos mediante el proceso de nitrificación, es decir, la oxidación del amonio a nitritos y a su vez a nitratos siendo estos últimos letales sólo a concentraciones muy altas (Eding et al., 2006).

El nitrógeno amoniacal total (NAT) es el principal producto final nitrogenado del metabolismo de los peces (Thomas y Piedrahita, 1998), siendo éste un parámetro limitante en la producción de truchas en sistemas de producción con recirculación de agua. Es decir, la concentración de NAT disuelto en el agua determina la capacidad de carga del estanque (Blanco, 1995).

El dimensionamiento de un biofiltro está basado normalmente en una combinación de las características del agua residual (carga orgánica) y el flujo de agua diario (Metcalf y Eddy, 1991; Zhu et al., 1998). Por lo que para el diseño un biofiltro es importante conocer las concentraciones de los parámetros limitantes existentes en el agua residual acuícola.

Actualmente se cuenta con diversos trabajos de investigación donde se ha determinado la producción de contaminantes en un cultivo acuícola (Zhu et al., 1999; Wagner et al., 1995; Thomas y Piedrahita, 1998). Sin embargo, estas tasas de producción de contaminantes han sido estudiadas bajo condiciones de laboratorio donde los factores ambientales y los parámetros que pueden afectar los niveles de producción de amonio son monitoreados y controlados cuidadosamente (Thomas y Piedrahita, 1998).

Por lo anterior, las tasas de producción de NAT reportadas varían cuando se trata de cultivos acuícolas donde las variables ambientales no son controladas; Esto puede ocasionar que se tenga un diseño de biofiltros sobre o sub dimensionados.

Este trabajo tuvo como objetivo modelar la producción de residuos de un cultivo de trucha arcoíris con recirculación de agua, en función de la biomasa producida para las condiciones comerciales de esta actividad en el Estado de México.

MATERIAL Y METODOS

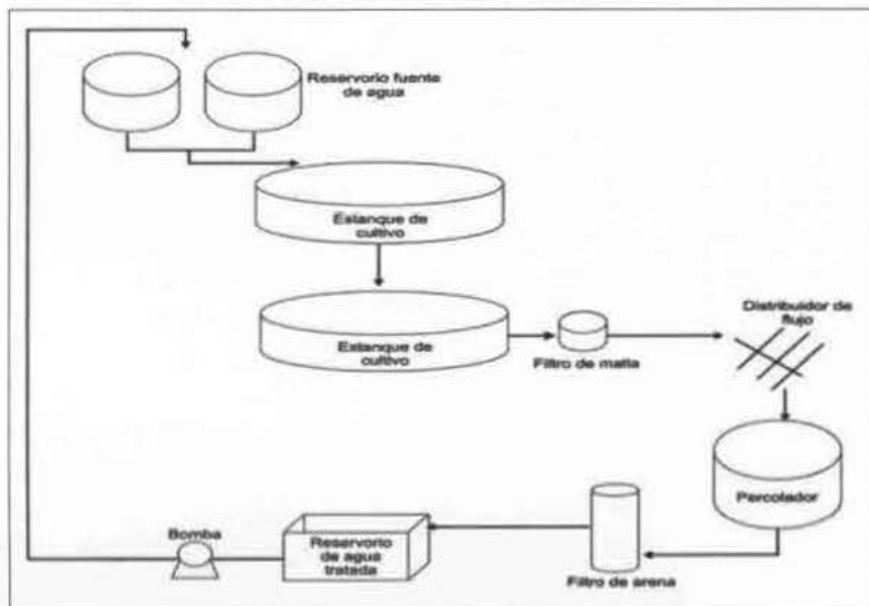
La investigación se realizó en las instalaciones del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA – UAEMex), con un sistema prototipo, el cual constó de dos estanques circulares y

un tren de tratamiento que reacondicionó el agua para su recirculación. En cada uno de los estanques se sembraron 2 300 organismos de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) con una longitud aproximada de 4 cm y peso promedio de 2 g que se llevaron hasta talla comercial (aproximadamente 350 g) durante un tiempo de cultivo de 46 semanas.

El estudio contó con agua de pozo profundo del acuífero del Valle de Toluca. El agua empleada fue la suficiente para llenar una vez el prototipo, para reponer el agua debido a pérdidas por evaporación, drenado de lodos, toma de muestras, operación de los trenes de tratamiento y posibles fugas. Este último volumen fue aproximadamente el 2 % del total del volumen de los estanques, el cual fue introducido diariamente. Así el volumen total de llenado fue de 14 m³.

El sistema prototipo se alimentó de un reservorio de agua de 2 m³ y suministró a los estanques de cultivo de manera constante 1.0 L/s. En todo momento, el abastecimiento de agua a este reservorio tuvo su origen en el tanque de agua tratada, la cual fue suministrada con ayuda de una bomba sumergible de un caballo de fuerza (figura 1).

Figura 1
ESQUEMA DEL SISTEMA PROTOTIPO



Los estanques en los que se llevó a cabo la investigación fueron de 2.6 m de diámetro, con una capacidad de 5.3 m³ cada uno, construidos en plástico con su interior de color blanco, ya que es el color menos estresante para la trucha (Papoutsoglou et al., 2005). De acuerdo con las recomendaciones de Timmons et al. (2002) la entrada de agua a los estanques se realizó de forma periférica induciendo un flujo de vortice con el fin de mantener con buena salud a los peces además de conducir los sólidos al centro y al fondo del estanque.

El efluente de los estanques se ubico en la parte central, donde con una trampa que funciona conforme al principio de hidrociclones (Timmons et al. 1998) los sólidos fueron capturados y separados junto con un pequeño caudal para su disposición final; El resto del caudal fue conducido al sistema de tratamiento para su reacondicionamiento.

Los organismos se alimentaron con pellet extruido de la marca "El Pedregal" y de acuerdo con las especificaciones del fabricante (Pedregal, 2005), la alimentación se realizó de forma manual. El cultivo de los peces cumplió un periodo de 46 semanas. La evaluación del cultivo se llevó a cabo bajo un seguimiento diario de la mortalidad y de un análisis quincenal de parámetros biométricos (longitud y peso).

Para las mediciones biométricas de los organismos se utilizaron dos tipos de métodos de muestreo; El primero de tipo sistemático, cada 15 días, iniciando el 15^{vo} día a partir de la siembra de los organismos y un segundo, para tomar la muestra de organismos de los estanques, el muestreo fue de tipo aleatorio simple donde el tamaño de muestra varió de acuerdo con la biomasa existente al momento de realizar el muestreo, garantizando una precisión del 5% con un nivel de confianza $(1 - \alpha)$ de 95 %.

Para conocer la producción de los residuos generados en el sistema, se analizaron los siguientes parámetros: demanda química de oxígeno total (DQO_T), NATy sólidos suspendidos totales (SST) en laboratorio; oxígeno disuelto (OD), temperatura y pH *in situ*.

El muestreo de los parámetros que se realizó *in situ* fue de manera diaria. En cuanto a la obtención de los valores de los parámetros de NAT, DQO_T y sólidos suspendidos totales, se efectuó mediante un muestreo aleatorio, con un tamaño de muestra de 39 observaciones. Los datos adquiridos se ordenaron y se realizó un análisis boxplot para identificar y verificar posibles datos dudosos o aberrantes entre los resultados. Los datos para cada parámetro se correlacionaron con la biomasa determinada de las mediciones biométricas de los organismos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema integral para el cultivo de trucha con recirculación de agua, se desarrolló bajo condiciones representativas de la zona centro del país, en específico para la zona centro sur del Estado de México.

En general, estos parámetros se encontraron dentro de los rangos reportados como favorables para el tipo de cultivo realizado (Klontz, 1991; Blanco, 1995). Sin embargo, el tiempo de retención del agua en cada estanque fue superior a lo recomendado por Timmons et al. (2002) el cual es de 45 minutos, no obstante este tiempo, fue muy similar al utilizado en granjas trutícolas del Estado de México (Gallego et al., 2007).

Desarrollo de las truchas en el sistema

En general el desarrollo de los organismos acuáticos fue congruente con lo reportado por Blanco (1995) para una temperatura promedio de 17°C. La densidad de trucha en el prototipo (hasta 12 kg/m³) fue similar a la encontrada en diferentes granjas trutícolas en el Estado de México.

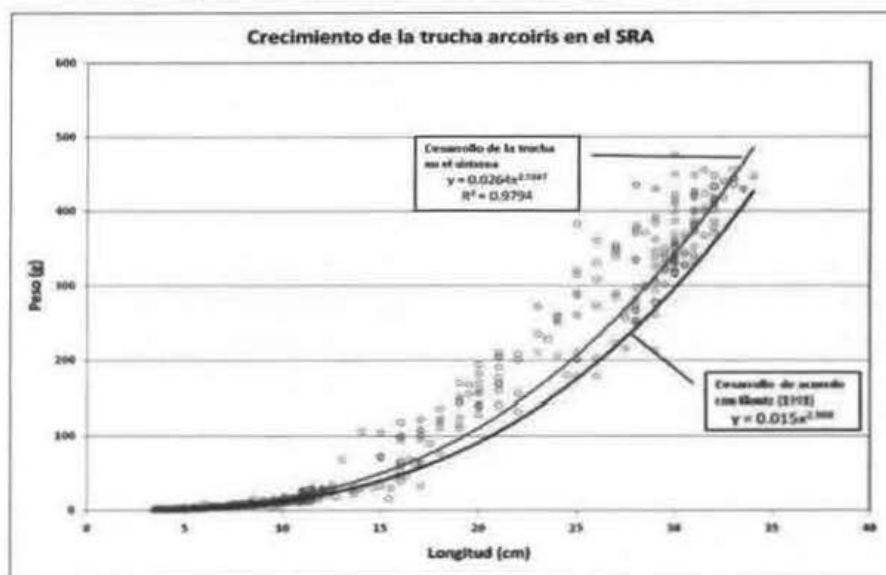
La condición corporal de los organismos se verificó dando un seguimiento a la relación longitud vs. peso, en la figura 2 se muestra que en el sistema prototipo SRA los organismos se desarrollaron de forma saludable y ampliamente satisfactoria.

Klontz (1991) reporta que el desarrollo de la trucha arcoíris depende de varios factores como la temperatura, el oxígeno disuelto, la densidad, etc., sin embargo, propone un modelo matemático del desarrollo con base en la relación existente entre la longitud y el peso de la trucha conforme con la ecuación 1:

$$y = 0.015x^{2.908} \quad (1)$$

Donde: x = peso (g), y = longitud (cm)

Figura 2
CRECIMIENTO (LONGITUD VS. PESO)
DE TRUCHA ARCOÍRIS EN EL SISTEMA PROTOTIPO PROPUESTO



Como se observa en la figura 2, el desarrollo del cultivo en el prototipo de esta investigación se encontró por arriba de lo esperado por el modelo propuesto por Klontz. Por lo anterior, se puede considerar que la trucha arcoíris se puede cultivar de manera adecuada en sistemas cerrados como el propuesto en este trabajo.

Oxígeno disuelto en los estanques

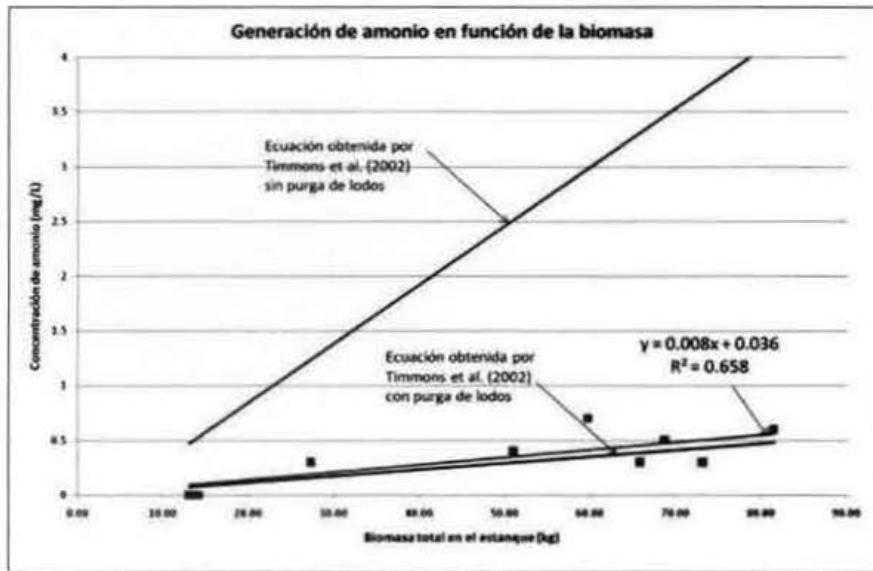
En el presente experimento no se determinó de forma explícita el balance del oxígeno en los estanques ya que no se contaba con el equipo adecuado. Sin embargo, se cuidó que la concentración de oxígeno en el agua no estuviera por debajo del valor crítico reportado por la literatura, lo que se logró con ayuda de tres difusores de burbuja fina conectados a un compresor y dos airlifts en cada estanque.

La posibilidad de control de la concentración de oxígeno disuelto en el agua de los estanques de cultivo es una de las ventajas en los sistemas acuícolas cerrados además de controlar la mayoría de los posibles parámetros limitantes del cultivo (Malone, 2000; Timmons et al., 2002).

Nitrógeno Amoniacal Total ($N-NH_4 + N-NH_3$)

Dentro de los parámetros limitantes más importantes para la vida acuática se encuentran el Nitrógeno Amoniacal Total (NAT), para el cual se encontró una relación entre la biomasa y la generación de NAT por los peces.

Figura 3
RELACION ENTRE LA BIOMASA Y LA PRODUCCIÓN DE AMONIO



Como se observa en la figura 3, se obtiene un modelo de regresión lineal, donde al aumentar la biomasa aumenta la producción del amonio, la relación encontrada se expresa en la ecuación 2, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.66$.

$$y = 0.008x - 0.036 \quad (2)$$

Donde: y = concentración de NAT (mg/L) en el efluente; x = biomasa del cultivo (kg).

Una propuesta presentada por Timmons et al. (2002), es representada en la ecuación 3, la cual permite estimar la producción de NAT esperada en kilogramos por día en función de la cantidad de alimento proporcionada a los peces. Esto es, la producción de amonio es igual al 3.0% de la cantidad del alimento suministrado cuando se trata de un sistema con purga de lodos.

$$y = 0.03 x \quad (3)$$

Donde: y = concentración de NAT (kg/día) en el efluente; x = alimento suministrado (kg).

Esta ecuación es comúnmente aceptada para el diseño de biofiltros, sin embargo, está condicionada a características óptimas del cultivo de los peces, ya que la fracción estimada de producción de

NAT por kilogramo de alimento se calcula para condiciones ideales, lo que no sucede en las granjas trutícolas (Thomas y Piedrahita, 1998).

La ecuación obtenida en esta investigación se ha enfocado a la cantidad de biomasa en el estanque y no al alimento, esto es porque en condiciones normales de cultivo la cantidad de alimento suministrada a los peces es variable, depende de la temperatura, oxígeno disuelto, concentración de contaminantes en el agua y acciones antrópicas.

La tabla 1 muestra una comparación de producciones de NAT esperadas para diferentes biomásas obtenidas en el experimento, tomando en consideración el criterio emitido por Timmons et al. (2002), la relación obtenida con los datos experimentales de este trabajo y los valores reales determinados en laboratorio.

Tabla 1

PRODUCCIÓN DE AMONIO ESPERADA POR EL CRITERIO DE TIMMONS ET AL (2002), LA ECUACIÓN DESARROLLADA Y LOS VALORES REALES DETERMINADOS EN LABORATORIO PARA EL EXPERIMENTO

Biomasa (Kg)	Alimento diario (kg) 2% de la biomasa	Producción de NAT (Timmons, et al. 2002) (mg/L)		Ecuación encontrada (mg/L)	Valor real (mg/L)
		Con purga de lodos	Sin purga de lodos		
27.32	0.55	1.85	0.19	0.25	0.30
50.98	1.02	3.58	0.35	0.44	0.50
59.69	1.19	4.16	0.41	0.51	0.30
73.14	1.46	5.09	0.51	0.62	0.60
81.44	1.63	5.67	0.57	0.69	1.40

Al analizar los datos calculados por la ecuación propuesta por Timmons et al. (2002) y la obtenida en este trabajo con una comparación de medias (*t-Student*), no se encontró diferencia significativa entre los valores ($t = 0.8893$, $p = 0.3869$), lo que lleva a proponer que ambas ecuaciones pueden ser utilizadas de manera indistinta. Sin embargo, al utilizar como indicador a la biomasa contenida en un estanque se incluyen los errores antrópicos propios en la alimentación de los cultivos acuícolas.

En la tabla 1, se puede apreciar también que el criterio reportado en la literatura con respecto a los valores esperados de producción de amonio por los peces para el cálculo de biofiltros (producción de NAT sin purga de lodos) es bastante conservador, por lo que utilizar la ecuación encontrada en este trabajo puede ayudar a forjar un criterio más realista para dimensionar sistemas eficientes de remoción de amonio.

Demanda química de oxígeno total (DQO_T)

Para contar con un parámetro de referencia en la generación de materia orgánica en los estanques, se monitoreó la demanda química de oxígeno total (DQO_T); el uso de este parámetro en lugar de la DBO₅ se debió a que al inicio del experimento, se obtuvieron valores de este último

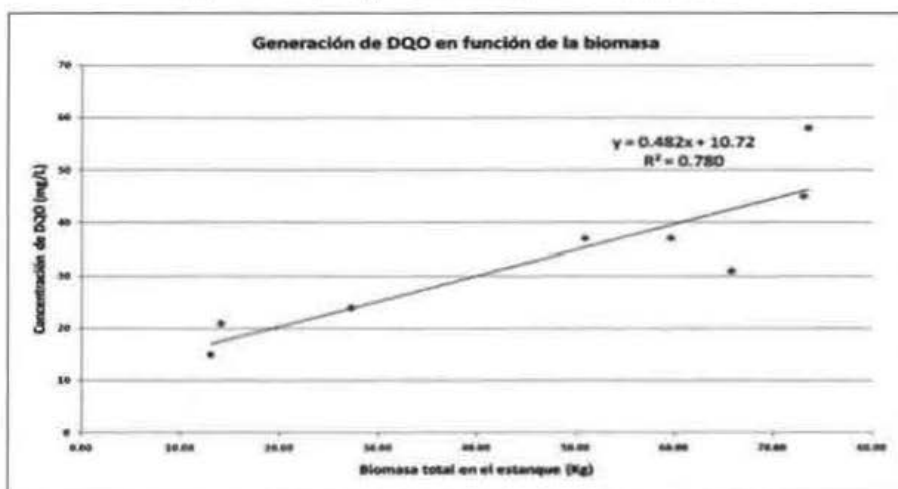
muy pequeños, los cuales se encontraron en el rango de error de la técnica utilizada para su determinación. No obstante se consideró que la determinación de la DQO_T podía ser un buen indicativo de lo que estaba ocurriendo con la materia orgánica si se toma en cuenta que se trató de un sistema cerrado y no hubo influencia de fuentes de contaminación externa.

Los datos encontrados permitieron estimar la DQO_T en función de biomasa contenida en los estanques, encontrándose que la producción de la DQO_T tiene una relación lineal con la biomasa en el cultivo (figura 4). Esta relación se describe por la ecuación 4 con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.78$.

$$y = 0.482x + 10.72 \quad (4)$$

Donde: y = concentración de DQO_T total a la salida del segundo estanque (mg/L),
 x = biomasa del cultivo (kg).

Figura 4
 RELACION ENTRE DQO_T Y LA BIOMASA EN EL SISTEMA PROPUESTO



Sólidos suspendidos totales (SST)

El retiro de los SST tan rápido como sea posible del efluente de los estanques es de vital importancia en el éxito de un SRA ya que de acuerdo con Chen et al. (2000), son uno de los parámetros más importantes en el tratamiento de agua residual acuícola, pues al hidrolizarse el nitrógeno orgánico contenido en los sólidos, liberan aproximadamente el 80% del total del NAT contenido en el efluente.

Con la intención de conocer la cantidad de SST producida por la biomasa, se determinó la cantidad de sólidos mediante su monitoreo en dos sitios estratégicos, el primero en la válvula de purga de lodos y el segundo en el efluente de los estanques.

Como se muestra en la figura 5, la producción de sólidos suspendidos totales sufrió un incremento en la producción considerablemente bajo con respecto al aumento de biomasa, esto debido a que la mayoría de los sólidos fueron retenidos en la trampa de captura de sólidos.

La producción generada de este parámetro en el efluente de los estanques se representa mediante la ecuación 5 con un R^2 de 0.79.

$$y = 0.088x + 0.727 \quad (5)$$

Donde: y = concentración de SST en el efluente (mg/L); x = Biomasa (kg)

Los SST recolectados en la trampa mostraron un incremento de tipo exponencial (ver figura 6), lo cual era de esperarse ya que el crecimiento de los peces guarda un comportamiento similar y la función principal de dicha trampa fue la de colectar la mayor cantidad de sólidos generados, permitiendo con ello que los SST en el efluente resultaran con una concentración poco variable durante todo el ciclo. Lo anterior concuerda con lo reportado por Malone (2000), donde menciona que al aumentar la cantidad de alimento balanceado se incrementa la producción de sólidos por parte de los peces y la cantidad de alimento suministrado a los organismos depende directamente de la biomasa en el estanque.

El comportamiento de la concentración de SST encontrada en la purga de lodos se describe mediante la ecuación 6, que relaciona la biomasa con los SST. El coeficiente de determinación para este caso fue $R^2 = 0.88$.

$$y = 5.497e^{0.042x} \quad (6)$$

Donde: y = Concentración de SST (mg/L); x = Biomasa (kg).

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en el desarrollo del sistema de recirculación acuícola (SRA) propuesto en esta investigación, esta tecnología es una alternativa viable para mitigar la escasez del recurso hídrico para la producción de alimento de alta calidad y gran valor nutritivo.

Figura 5
RELACIÓN ENTRE SST
EN EL EFLUENTE Y BIOMASA EN EL SISTEMA PROPUESTO

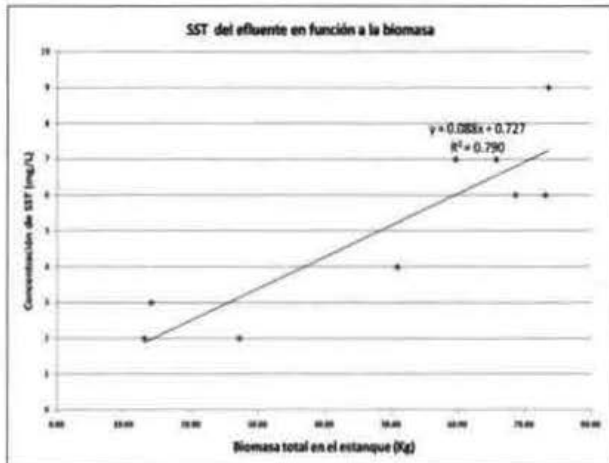
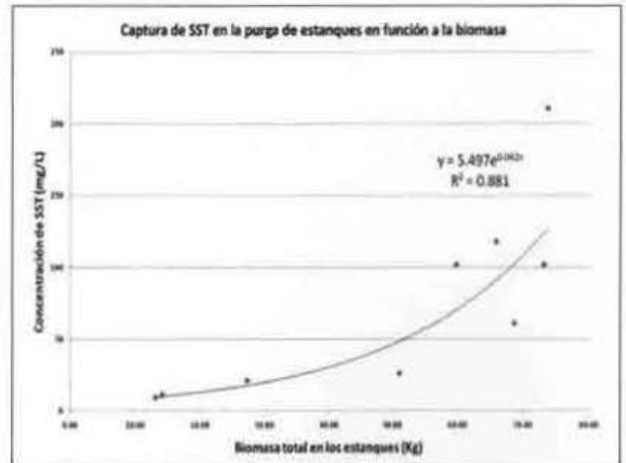


Figura 6
RELACIÓN ENTRE SST
DE LA PURGA DE LODOS Y BIOMASA



La configuración del tren de tratamiento utilizada (mallas, percolador y filtro de arena) fue la adecuada para producir 12 kg/m³ de trucha arcoíris a talla comercial (250 g), con un caudal de 1 L/s, lo que significó un ahorro de agua de hasta el 98% comparado con la tecnología vigente.

Es importante subrayar que para el diseño de un tren de tratamiento de un SRA, es necesario conocer la producción de especies químicas tóxicas generadas por la biomasa a cultivar, por lo que fue importante determinar la correlación que existe entre la producción de contaminantes y la biomasa presente. Los modelos matemáticos encontrados en este trabajo se presentan en la tabla 2.

Tabla 2
MODELOS MATEMÁTICOS QUE DESCRIBEN LA GENERACIÓN
DE PRODUCTOS CONTAMINANTES EN LOS ESTANQUES DEL SISTEMA ESTUDIADO

Descripción	Modelo matemático encontrado	R ²
Generación de NAT	NAT (mg/L) = 0.008[biomasa (kg)] - 0.36	0.65
Generación de DQO _T	DQO total (mg/L) = 0.482[biomasa (kg)] + 10.72	0.78
Generación de SST	SST (mg/L) = 0.088[biomasa (kg)] - 0.727	0.79

Estos modelos permiten estimar la producción de especies químicas que se generarán durante el ciclo de producción en función de la biomasa cultivada, obteniendo los valores de los parámetros necesarios que facilitarán el diseño de la biofiltración en los SRA para condiciones reales.

Esta investigación, con base en los modelos matemáticos obtenidos, propone un cambio en la forma en que se diseña un filtro biológico para el efluente de un sistema de cultivo de truchas.

El desarrollo de las truchas en el sistema de producción propuesto fue superior a lo reportado en la literatura, particularmente por Klontz (1991) sin llegar a tener el desarrollo ideal propuesto por Lagler et al., (1977).

REFERENCIAS

- Blanco C. C. *La trucha, cría industrial*. Mundi-prensa. 1995. 503 pp.
- Chen S., D. Stechey y Malone R. F. (2000). Suspended solids control in recirculating aquaculture systems. En: Timmons M. y T. Losordo (Edis). *Aquaculture water reuse systems: engineering, design and management*. Elsevier. pp 61-100.
- Eding E., Kamstra A., Verreth J., Huisman E. y klapwijk A. (2006). *Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review*. Aquacultural engineering. Núm 34. pp. 234 - 260.
- Klontz W.G. (1991). *Producción de trucha arcoiris en granjas familiares*. Universidad de Idaho. 88pp.
- Lagler K., J. Bardach, R. Miller y D. May Passino. (1977). *Ictiología*. AGT Editor SA. México. 489pp.
- Malone F. R. *Integrated design of recirculating aquaculture systems*. (2000). Aquaculture Engineering Society. News letter. Año 5. Núm 4. pp. 2-6

- Metcalf & Eddy. (1991). *Wastewater Engineering, treatment, disposal, reuse*. McGraw Hill. 1334pp.
- Papoutsoglou S., Karakatsouli N. y Chiras G. (2005). *Dietary L-tryptophan and tank colour effects on growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) juveniles reared in a recirculating water system*. Aquacultural engineering. Núm. 32. pp. 277 – 284.
- Pedregal. (2005). *Tablas de alimentación para 1000 truchas arcoiris con alimento Silver Cup*. Pedregal. 1pp.
- Suhr K.I. y P.B. Pedersen. *Nitrification in moving bed and fixed bed biofilters treating effluent water from a large commercial outdoor rainbow trout RAS*. Aquacultural Engineering. 42: 31-37.
- Thomas S. L. y Piedrahita R. H. (1998). *Apparent ammonia-nitrogen production rates of white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) in commercial aquaculture systems*. Aquacultural Engineering. Núm. 17. pp. 45-55.
- Timmons M. B., Ebeling J. M., Wheaton F. W., Sumerfelt S. T. y Vinci B. J. (2002). *Recirculating Aquaculture Systems*. (2a. ed.) Cornell University's Freshwater Institute. 769pp.
- Timmons M. B., Summerfelt S. T. y Vinci B. J. (1998). *Review of circular tank technology and management*. Aquacultural Engineering. Núm. 18. pp. 51-69
- Wagner E., T. Bosakowski y S. Miller. *Evaluation of the absorption efficiency of the Low Head Oxygenation System*. Aquacultural Engineering. 14: 49-57.
- Zhu S., B. Saucier, J. Durfey, S. Chen y B. Dewey. *Waste excretion characteristics of Manila clams (*Tapes philippinarum*) under different temperature conditions*. Aquacultural Engineering. 20:231-244
- Zhu S., J. Deltour y S. Wang. (1998). *Modeling the thermal characteristics of greenhouse pond systems*. Aquacultural Engineering. 18:201-217.