

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN CON FINES DIDÁCTICOS Y EXPERIMENTALES PARA LA ACUICULTURA

J. Quevedo, M. Álvarez

Escuela de Acuicultura, Universidad Católica de Temuco, Casilla 15-D
Temuco-Chile. qu Ruiz@uct.cl

RESUMEN

Los sistemas de recirculación en acuicultura están diseñados para permitir el cultivo de peces en alta densidad con un reducido consumo de agua. El presente trabajo evalúa el diseño y desempeño de un sistema de recirculación simple con fines experimentales y educativos. El sistema fue sembrado con 205 truchas de 188 gramos y evaluado durante 45 días, después de aclimatación del biofiltro. La concentración promedio de amonio no ionizado (NH_3) fue de 0,0047mg/l, con una tasa de remoción de 0,22g $\text{NH}_4\text{-N}/\text{m}^2/\text{día}$. La supervivencia fue de 97,5%. La densidad final del cultivo fue de 24,45kg/m³. Diariamente se renovó 2,97% del volumen de agua del sistema.

Palabras claves: Sistemas de recirculación, Acuicultura sustentable, Trucha arco iris.

ABSTRACT

Recirculation systems in aquaculture are design to allow growing fish in a high density with a low water consumption. The present article evaluate the design and performance of a simple recirculation system for experimental and educative purposes. The system was stocked with 205 rainbow trout of 188grams and evaluated during 45 days after biofilter acclimatation. The average concentration of non ionized ammonia (NH_3), was 0,0047mg/l, with a remove rate of 0,22g $\text{NH}_4\text{-N}/\text{m}^2/\text{day}$. The survival rate was 97,5%. The final density in the culture was 24,45kg/m³. Daily it was renewed 2,97% of the water volume of the system.

Key words: Recirculating aquaculture systems, Sustaintable aquaculture, Rainbow trout.

1. INTRODUCCIÓN

Recientemente la preocupación sobre el impacto social y ambiental, de ciertas formas de acuicultura, fundamentalmente acuicultura intensiva de especies carnívoras; ha dado lugar a numerosos seminarios, foros y publicaciones, donde el debate social y técnico están presentes. El uso de tecnologías limpias en la producción acuícola es una demanda de una sociedad cada vez más consciente de los efectos indeseables que generan los procesos pro-

ductivos en el medio ambiente. Para el consumidor consciente no es suficiente que el proceso productivo de un recurso determinado dé como resultado final un producto sano y libre de riesgos; se exige además que el proceso en sí sea respetuoso y compatible con el medio ambiente, considere la dignidad de los animales y genere un desarrollo social justo. En este sentido, el uso de tecnologías limpias como los sistemas que reciclan el agua del cultivo, pueden ofrecer una solución para minimizar los impactos ambientales.

La utilización de los sistemas de recirculación en acuicultura ha recibido atención desde la década de los 70. Los sistemas de recirculación son potencialmente deseables ya que permiten optimizar la cantidad y calidad de agua así como conservar la temperatura. Un sistema recirculado es, hasta cierto punto, independiente de los factores ambientales que influyen en el cultivo, lo cual asegura un mayor control de los parámetros que afectan el desempeño del mismo. Esto último permitiría que se pudieran cultivar peces de aguas frías en climas templados y viceversa, o especies marinas a muchos kilómetros del litoral o incluso, en un recinto urbano (LOSORDO, [21]).

Definir un sistema reciclado tan sólo por la reutilización de parte del agua en el mismo tanque podría llevarnos a confusión. Efectivamente, ¿se consideraría un sistema reciclado aquél que reutiliza el 25% del agua (75% sería flujo abierto)? La mayoría de los autores coinciden en definir los sistemas de recirculación en acuicultura como aquellos en los que al menos un 90% del agua es reciclada y acondicionada a través de componentes que aseguren su óptima calidad. Didácticamente podemos entender los sistemas reciclados como una reducción de un sistema abierto, en la que las funciones del caudal de agua que atraviesa el tanque (aporte de oxígeno y lavado de metabolitos, heces y resto de alimentos), es asumido por mecanismos que tratan el agua para que pueda ser nuevamente reutilizada en el tanque de cultivo. Deducimos de esto que los componentes que permiten acondicionar el agua, juegan un papel crítico en el desempeño de un sistema reciclado.

1.1. Consideraciones al diseño de sistemas reciclados

La tecnología de los sistemas reciclados requiere, según hemos indicado, del mantenimiento de niveles aceptables de al menos tres parámetros ambientales, esenciales para el cultivo de peces: 1) desechos sólidos, 2) compuestos nitrogenados, y 3) oxígeno disuelto (SODERBERG, [25]). Describimos brevemente algunas consideraciones al respecto.

1.1.1 Desechos sólidos

Proviene de las heces de los peces y del alimento ingerido (MASSER *et al.*, [22]). La descomposición por bacterias del material orgánico particulado provoca una disminución del oxígeno disuelto y una producción adicional de amonio, de ahí que los desechos sólidos deban ser inmovilizados y posteriormente eliminados del sistema (LOSORDO *et al.*, [18]). Los mecanismos para la eliminación de sólidos dependen en gran manera de su estado. LOSORDO [19] distingue tres categorías: sólidos precipitables, suspendidos y disueltos. Los sólidos precipitables se eliminan del sistema por filtración y decantación; los suspendidos (no sedimentan en condiciones estáticas), son eliminados por filtros de malla muy fina, y finalmente los sólidos disueltos orgánicos se eliminan por fenómenos de adsorción en un fraccionador de espuma.

Los sólidos precipitables comprenden el 60-70% de los sólidos totales en un sistema de intensivo de acuicultura (CHEN & MALONE, [4]); en estos casos, un tanque de sedimentación con un tiempo de retención de 15 minutos es suficiente para remover la mayoría

de los sólidos precipitables. Un deficiente mecanismo de eliminación de sólidos precipitables podría eventualmente dar lugar a la disgregación de los mismos y generar sólidos suspendidos. El tratamiento comúnmente usado para remover sólidos suspendidos es la filtración mecánica a través de microfiltros de diversa abertura de malla y filtros de medio granular; estos sistemas de filtración son muy eficientes pero caros de instalar y suponen un gasto de energía adicional, además de un mayor consumo de agua debido a que necesitan un frecuente retrolavado.

1.1.2 Compuestos nitrogenados

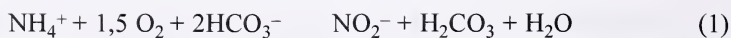
Desde el punto de vista de los sistemas reciclados, el origen de los compuestos nitrogenados en el sistema son fundamentalmente dos: los restos orgánicos (heces y alimento no consumidos) y los productos de excreción metabólica. El amonio no ionizado (NH_3) o amoníaco, es el principal producto de excreción del metabolismo de los peces, excretado mayormente a través de las branquias del pez a medida que éste asimila alimento (BLANCO, [2]). El NH_3 es extremadamente tóxico para la mayoría de los peces (MASSER *et al.*, [22] y SODERBERG, [25]), sin embargo en solución acuosa, el NH_3 pasa rápidamente a la forma ionizada NH_4^+ que es relativamente inocua. El equilibrio químico entre estas dos formas está determinado por el pH y la temperatura del agua.

La técnica más común para eliminar el amonio es la filtración biológica. Un biofiltro es un reactor biológico, un ente vivo por cierto, donde se produce el proceso de nitrificación; éste consiste en la oxidación de NH_4^+ a NO_3^- por la intervención de bacterias autótrofas (nitrosomonas y nitrobacter). Básicamente un biofiltro es un contenedor que alberga en su interior un sustrato sobre el cual pueden fijarse y desarrollarse las colonias de bacterias nitrificantes. La selección del tipo de sustrato para biofiltro debe considerar dos requisitos: 1) proporcionar la máxima superficie por unidad de volumen del biofiltro para proveer espacio para el crecimiento bacteriano y 2) tener una relación superficie/huecos adecuada para evitar obstrucciones del flujo por acumulación de sólidos. Lógicamente a medida que aumentan los espacios vacíos disminuye la superficie de filtración, y al revés, cuanto más pequeño sea el tamaño de los huecos (gran superficie biofiltrante), menor será el tamaño de los poros y más susceptible será el biofiltro a la obstrucción por sólidos en suspensión. De acuerdo con KLONTZ [13] el límite orgánico de tolerancia media de NH_3 para salmónidos es una constante exposición a valores en torno a 0,03mg/l o una exposición intermitente a <0,05mg/l. BUTTNER *et al.* [3] junto con HOCHHEIMER [9] sugieren concentraciones inferiores a 0,02 mg/l; mientras que EIKEBROKK [7] y HEINEN *et al.* [8] indican concentraciones máximas de 0,025mg/l y 0,01mg/l respectivamente.

Como se ha indicado, la nitrificación es la conversión del amonio ionizado (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-) y luego a nitrato (NO_3^-) vía ciclo de nitrógeno, (reacción 1y 2). El nitrito es tóxico a bajas concentraciones por lo que debería mantenerse por debajo de 0,1mg/l (BLANCO, [2]; SODERBERG, [25]; LAWSON, [15] y HOCHHEIMER, [9]), sin embargo KLONTZ [13] acepta un valor de 0,55mg/l, bastante más alto.

El nitrato no es esencialmente tóxico para los peces y puede acumularse a altas concentraciones. BLANCO [2] cita 800mg/l como límite de tolerancia y LAWSON [15] considera que a partir de 400mg/l comienzan a manifestarse problemas en los peces. El nitrato se controla en el sistema a través del drenaje y reposición con agua de renuevo o mediante sistemas integrados hidropónicos (RAKOCY, [23])

De acuerdo con WHEATON *et al.* [27] las ecuaciones químicas que describen la oxidación de amonio son:



Nitrosomonas y nitrobacter son afectados por factores ambientales tales como oxígeno disuelto, bicarbonato, temperatura, pH y el mismo sustrato sobre el que actúa nitrosomonas. Efectivamente el amoníaco (NH_3) es tóxico para las bacterias nitrificantes. SODERBERG [25] indica que una concentración de 0,1 a 1mg/l de NH_3 inhibiría la actividad de nitrobacter, mientras que nitrosomonas, como era de esperar, es más tolerante y se inhibe a concentraciones de 10 a 150mg/l. Por otra parte, la reacción de nitrificación produce iones H^+ que reducen el pH del agua, es por ello que los sistemas de recirculación requieren de la adición de un buffer (bicarbonato de sodio) para mantener el pH dentro de límites aceptables para el funcionamiento del biofiltro. Una alcalinidad de 70mg/l de CaCO_3 es recomendable para mantener altas tasas de nitrificación.

1.1.3. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto (OD) es, entre los factores críticos, el más importante en el manejo de un sistema recirculado (LANDAU, [14]). El consumo total de oxígeno en un sistema de recirculación es la suma del oxígeno consumido por la respiración de los peces, DBO y consumo de oxígeno por las bacterias nitrificantes del biofiltro (LOSORDO, [15]; LOSORDO *et al.*, [18]; LAWSON, [15] y HOCHHEIMER, [9]). En este sentido, es condición necesaria que el agua que atraviesa el biofiltro aporte una cantidad suficiente de oxígeno a las bacterias, ya que la nitrificación es un proceso oxidativo. Una concentración de oxígeno inferior a 2mg/l ha demostrado limitar la tasa de nitrificación (WHEATON *et al.*, [28] y MASSER *et al.*, [22]).

Dado que el aporte de oxígeno en el agua de renovación, o el generado en un filtro de cascada, es mínimo en comparación con las necesidades del sistema, se hace necesario implementar sistemas de oxigenación o aireación dependiendo de la especie e intensidad del cultivo.

1.2. Dimensionamiento del sistema

La literatura existente provee pocos antecedentes sobre el diseño de sistemas de recirculación en acuicultura. La mayoría de los procesos de diseño se basan en experimentos a escala piloto o por simple aproximación empírica. WHEATON *et al.* [29] presentan un método de diseño aplicable a un amplio rango de temperaturas y especies; de otra parte LOSORDO [17] describe un método de aproximación por balance de masas para el diseño de sistemas de recirculación basado en la ley de conservación de masa. Este método se somete a una serie de requisitos: 1) definir los límites del sistema, 2) identificar los flujos que cruzan dichos límites, 3) identificar el material que será balanceado, y 4) identificar los procesos de transformación que afectan el balance de masas dentro del sistema. Según esto podríamos de forma simple escribir:

$$\text{Acum} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo}$$

Bajo condiciones estáticas o de equilibrio, es decir, no hay acumulación (Acum) de productos, la ecuación anterior toma la siguiente forma:

$$0 = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo}$$

En nuestro estudio hemos diseñado los componentes del sistema reciclado según el método de aproximación por balance de masas, descrito por LOSORDO [15], se incorporan consideraciones y datos técnicos de otros autores, adaptando límites máximos y mínimos según el caso.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Supuestos del diseño

En nuestro diseño hemos considerado los siguientes supuestos:

- Los cálculos de diseño del sistema se realizaron para sostener un stock de trucha arcoiris con una densidad final de 25 kg/m³; lo que equivale a una biomasa final de 45 kg en un tanque de cultivo de 1,8 m³ de volumen útil. Se consideró un peso promedio final de 200 g.
- Alimentación a 2% del peso corporal al final del experimento.
- Temperatura media del agua 20°C (la experiencia se realizó en meses de verano).
- Concentración de oxígeno disuelto en el agua de renuevo de 8,8mg/l a temperatura de 20°C y una atmósfera de presión.
- Se asume concentraciones de amonio total y nitrato próximos a 0mg/l en el agua de renuevo.
- Concentración de amonio total (TAN, por sus siglas en inglés) máxima permitida en el tanque de cultivo de 5mg/l y una concentración máxima de NH₃ de 0,02mg/l a pH 7 y 20°C (BUTTNER *et al.*, [3] y HOCHHEIMER, [9]).
- Concentración máxima de NO₃ en tanque de cultivo de 400mg/l (LAWSON, [15]).
- Se asume una eficiencia (E) del biofiltro de 30% (LAWSON, [15]). Esta se define como la fracción de amonio total removido en una sola pasada a través del biofiltro.
- Concentración mínima de oxígeno permitida en la salida del biofiltro 2mg/l.
- Concentración mínima de oxígeno permitida en la salida del tanque de peces 5mg/l.

2.1.1. Tasa de producción de amonio

La tasa de producción de amonio total TAN se estimó a partir del modelo propuesto por LOSORDO [17] en el cual se relaciona la cantidad de alimento entregado con la producción de amonio según la siguiente formula:

$$P_{\text{NH}_4} = \text{BM} \times \% \text{PC} \times \% \text{P} \times 0,092 \times 10^6 \quad (3)$$

Donde P_{NH_4} es la tasa de producción de amonio (mgNH₄⁺/día); BM es la biomasa (kg); %PC es el porcentaje del peso corporal de alimento diario y %P es el porcentaje de proteína del alimento.

2.1.2. Caudal de renuevo

El caudal de renuevo del sistema se estimó para mantener una concentración de equilibrio de 400mg/l de NO₃. Se utilizó la aproximación de LOSORDO [17] en la que se asume que la remoción de amonio debido al recambio de agua es despreciable y la tasa de producción de nitrato es igual a la tasa de producción de amonio por un factor 3,43. Esta formula queda de la siguiente forma:

$$Q_r = P_{\text{NH}_4} \times 3,43 / C_{(\text{NO}_3)\text{salida}} \quad (4)$$

Donde Q_r es el caudal de recambio; P_{NH_4} es la tasa de producción de amonio; $C_{(\text{NO}_3)\text{salida}}$ es la concentración de nitrato máxima permitida y 3,43 es la cantidad de miligramos de nitrato que se producen por cada miligramo de amonio nitrificado (LOSORDO, [15]).

2.1.3. Caudal de recirculación basado en el amonio

El caudal de recirculación a través del biofiltro se calculó teniendo en cuenta una concentración de amonio total (TAN) máxima de 5mg/l. De acuerdo con LOSORDO [17] este caudal se puede estimar por la siguiente formula:

$$Q_f = P_{\text{NH}_4} - (Q_r \times C_{\text{NH}_4}) / C_{\text{NH}_4} \times E \quad (5)$$

Donde Q_f es el caudal de recirculación a través del biofiltro (l/hora); C_{NH_4} es la concentración máxima permitida de amonio total (mg/l) y E la eficiencia.

2.1.4. Tasa de consumo de oxígeno disuelto en el sistema

La tasa de consumo de oxígeno se estimó según el modelo de LAWSON [15], la cual está dada por:

$$C_{\text{OD}} = C_{\text{Peces}} + C_{\text{DBO}} + C_{\text{N}} \quad (6)$$

Donde C_{OD} es la tasa de consumo de oxígeno del sistema (mg/hora); C_{Peces} es el oxígeno consumido por los peces; C_{DBO} es el oxígeno consumido por la degradación de los sólidos orgánicos, y C_{N} es el oxígeno consumido por las bacterias nitrificantes. Cada uno de estos componentes tiene características propias; así por ejemplo el consumo de oxígeno de los peces viene determinada por la cantidad de alimento que se suministra al cultivo, el consumo de oxígeno debido a DBO viene determinado por la biomasa y por un valor K_{DBO} que representa la tasa de consumo de oxígeno necesaria para la degradación de desechos de los peces, esto corresponde para la mayoría de los peces a $500\text{mgO}_2 / \text{kg pez} / \text{día}$ (LAWSON, [15]). Finalmente el consumo de oxígeno por la nitrificación, (oxígeno consumido por las bacterias nitrificantes), se obtiene partiendo del hecho que por cada gramo de amonio oxidado a NO_3^- se consumen 4,57 g de O_2 (LOSORDO, [15]).

Basándose en estas ecuaciones se estimó el caudal de agua requerido para mantener una concentración mínima de oxígeno disuelto de 2mg/l en el efluente del biofiltro, asumiendo que la mínima concentración de oxígeno en la entrada del biofiltro debe ser de 5mg/l. Este caudal Q_f' es debido al oxígeno disuelto y es diferente al valor Q_f (5), que representa el caudal de recirculación a través del biofiltro debido a la carga de amonio del sistema. Entre estos dos valores Q_f y Q_f' , que no son otra cosa sino un caudal de agua a través del biofiltro, se escogió el mayor.

Finalmente se calculó la tasa de incorporación de oxígeno al sistema, ésta se estimó como un valor P_{OD} que correspondía al oxígeno disuelto necesario que se debe agregar al estanque de cultivo para mantener una concentración de 5mg/l de oxígeno.

2.1.5. Área activa del biofiltro

El área activa del biofiltro corresponde a la superficie de sustrato disponible para la fijación de las bacterias nitrificantes en el biofiltro. El área activa se obtiene dividiendo la

tasa de producción de amonio calculada, por una tasa de nitrificación teórica por unidad de superficie de fijación en función de la temperatura del agua. Siguiendo a SODERBERG [25] esta tasa de nitrificación estaría representada por:

$$N_r = (0,000006 \times T) - 0,0002 \quad (7)$$

Donde N_r es la tasa de nitrificación por unidad de superficie (lbsTAN/pie²/día) y T es la temperatura del agua (°F). En nuestro ensayo asumimos una temperatura de 20°C correspondiente a 68°F. Sustituyendo este valor en la fórmula anterior, obtenemos un N_r de $2,08 \times 10^{-4}$ lbsTAN / pie² / día; equivalente a 1,011gTAN / m² / día. Para obtener el área necesaria dividimos la tasa de producción de amonio calculada (3) por este valor teórico.

Seguidamente se determinó la cantidad de material necesario utilizado como sustrato de fijación para proveer el área activa calculada. El sustrato elegido fue malla plástica de 5mm de abertura. Para determinar el área de fijación que proporciona este material se cortó un cuadrado pequeño de 100 cm² (10 × 10cm). Partiendo del hecho de que los pequeños lados que forman la abertura de la red son cilíndricos, se midió el diámetro y la longitud de alguno de sus lados. De estas medidas se obtuvo un diámetro y longitud promedio que permitieron determinar el área de un lado de la abertura. Determinada ésta, sólo restó contar el número de barras en un cuadrado de malla plástica de 100 cm². Según esto, la superficie de 100 cm² correspondería en realidad a una superficie de fijación 153,8 cm².

2.2. Descripción del sistema

El sistema consistió en un circuito cerrado formado por un tanque de confinamiento de 1820 litros de volumen útil, construido en fibra de vidrio. Un tanque sedimentador circular de fondo cónico (pendiente 20°) de 423 litros de volumen útil el cual tenía en su parte inferior central un depósito cilíndrico de acrílico transparente para la acumulación de las heces. El agua entraba tangencialmente al sedimentador a través de un tubo de 63 mm, lo que permitía imprimirle un movimiento circular y facilitar la concentración de sólidos en el fondo. Se diseñó un biofiltro mixto constituido por dos unidades; la primera un biofiltro de cascada, formado por dos cajas plásticas apiladas a las que se le habían practicado numerosos agujeros, y la segunda un biofiltro sumergido de una caja plástica. En ambas unidades se dispuso la malla plástica como sustrato de fijación bacteriano; ésta se cortó en rectángulos de las dimensiones de las cajas plásticas usadas como soporte del biofiltro. Las dos unidades, de cascada y sumergido, encajaban en un tanque de madera de 218 litros protegido con resina y reforzado en las esquinas (Figura 1). Finalmente un tanque acumulador recibía el agua del biofiltro; éste estaba conectado a la red de agua dulce de renuevo, la entrada del agua se hacía mediante una tubería de 20 mm y se controlaba por una válvula de flotador que compensaba automáticamente las pérdidas de agua en el sistema. Una bomba centrífuga de 1HP (0,7 kw) modelo PENTAX CM100 con un caudal máximo de 90 litros/min a 1 metro de altura succionaba el agua desde el tanque acumulador dispuesto a continuación del biofiltro y proporcionaba el caudal de recirculación del sistema. La aireación se efectuó mediante un venturi (Mazzei, modelo 1078) dispuesto en la tubería de impulsión de la bomba y por la caída del agua a través del biofiltro de cascada lo cual facilitó la eliminación del CO₂. El recorrido del agua en el sistema fue el siguiente: el agua salía del tanque de los peces por el fondo y caía al sedimentador, seguidamente pasaba al biofiltro de cascada y de ahí a la primera sección del tanque de biofiltración, desde aquí pasaba por encima de una

pantalla deflectora y recorría el biofiltro sumergido de arriba abajo. El agua salía del biofiltro hacia el tanque acumulador y desde este punto era nuevamente succionada por la bomba y reenviada al tanque de peces completando el circuito.

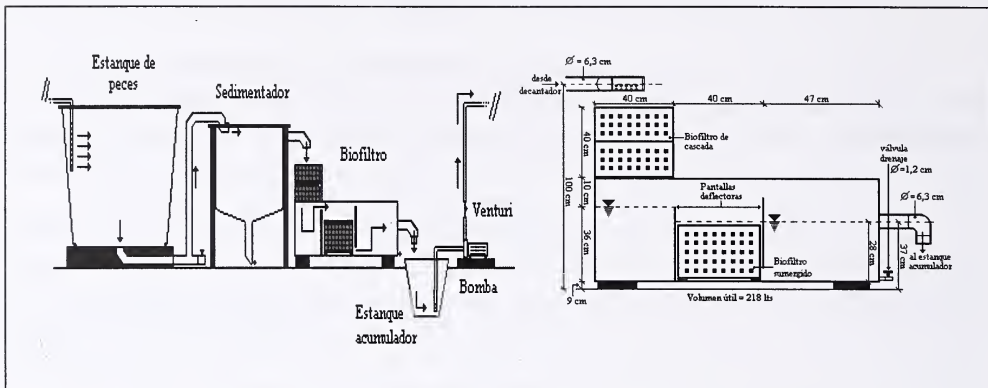


Figura 1.- Diseño del sistema recirculado (izquierda) y del biofiltro (derecha), con la unidad de cascada (arriba) y sumergido (abajo).

2.3. Acondicionamiento

Antes de confinar los peces en el sistema se procedió a acondicionar el biofiltro durante 36 días. El proceso de acondicionamiento se basó en el método descrito por DANIELS *et al.* [5] éste consiste en la adición de cantidades crecientes de cloruro amónico (NH_4Cl) hasta alcanzar la máxima carga de amonio esperada de acuerdo al previo dimensionamiento del sistema.

2.4. Siembra de peces

Se sembraron 205 ejemplares de trucha arco iris *Oncorhynchus mykiss* con un peso promedio de 188,87 g ($n=30$), equivalente a una biomasa y densidad de cultivo inicial de 38,7 kg y 21,2 kg/m^3 respectivamente. Se utilizó agua dulce de pozo mezclada con sal de mar hasta obtener una salinidad de 10 g/l. Los peces se alimentaron una vez al día a las 8:00 AM en forma manual con pellet comercial con un 53% de proteína. El alimento se entregó a saciedad para evitar permanencia de pellets no consumidos en el sistema. La cantidad de alimento entregada al inicio del experimento fue aproximadamente de 60g/día.

Diariamente se renovó cierta cantidad de agua que estuvo en directa relación con el drenaje de los sólidos acumulados en el depósito del tanque sedimentador. El agua extraída, fue recibida en baldes graduados para determinar el volumen cambiado al día. El proceso de eliminación de sólidos se realizó dos veces al día, en la mañana y la tarde. De acuerdo al volumen de agua cambiado, diariamente se agregó una cantidad de sal de mar para mantener la salinidad alrededor de 10g/l. Además se agregó diariamente una cantidad fija de 60g de bicarbonato de sodio (NaHCO_3) como buffer. Esta cantidad se determinó a partir del requerimiento estequiométrico para el bicarbonato durante la nitrificación. (SODERBERG, [25]).

2.5. Parámetros de calidad del agua

Con el fin de evaluar la calidad de agua durante el confinamiento de las truchas se analizaron los parámetros que tienen importancia en el cultivo de peces en sistemas reciclados (Tabla 2). Diariamente se analizó concentración de oxígeno disuelto, temperatura, salinidad, pH, TAN y nitrito, y semanalmente la alcalinidad total.

2.6. Evaluación del crecimiento de los peces

Con el fin de obtener parámetros técnicos de cultivo para la evaluación del crecimiento de los peces se registró el peso inicial y la longitud total inicial, mortalidad y la cantidad de alimento entregado diariamente. Con estos datos se calculó la tasa de crecimiento por unidades térmicas (CUT), el porcentaje de sobrevivencia, el índice de condición K y el factor de conversión alimenticia (FC) de los peces en el periodo de cultivo.

2.7. Eficiencia del biofiltro

Para evaluar la eficiencia del biofiltro se determinó la Tasa Diaria de Remoción de Amonio. Ésta se calculó para un periodo de 24 horas a partir de la diferencia entre la cantidad de amonio excretado calculada de acuerdo al alimento entregado en el día y la encontrada en el sistema al día siguiente antes de alimentar. Esta diferencia observada se expresó como miligramos de amonio por litro removido del sistema y expresada también como porcentaje de la carga diaria de amonio removido. De igual modo se obtuvo la cantidad de nitrato eliminada del sistema por el biofiltro y el porcentaje diariamente removido.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caudal de renuevo

Si bien se obtuvo en nuestro caso un Q_r teórico de 14,8 litros/hora, lo que supondría la adición diaria de 355 litros de agua de renuevo (13,8% del volumen total del sistema diariamente), este valor obtenido de forma teórica solo sería aplicable una vez que se alcanzase los 400mg/l de NO_3^- dentro del sistema, lo cual se lograría después de cuatro semanas bajo condiciones de máxima biomasa y máxima alimentación sin renovación de agua. En la práctica se tienen antecedentes de recambio de agua inferiores a 5% del volumen total del sistema. La tasa diaria de renovación de agua del sistema fue de 76,5 litros/día, correspondiente a 2,97% del volumen del sistema cambiado diariamente. Este valor es claramente inferior a los reportados por EIKEBROKK [7], 5% diario; LOSORDO *et al.* [20], 7,5% diario; ARBIV & VAN RIJN [1], 6% diario. Esto pudo deberse a la baja tasa de alimentación durante el experimento lo que dio lugar a una menor carga de heces, existiendo por tanto menos sólidos sedimentados que drenar en el decantador. El consumo total de agua del sistema reciclado durante el periodo de evaluación fue de 6016 litros que comparado con un sistema abierto que operase con el mismo caudal de recirculación (30 litros /min) durante 45 días, correspondería tan sólo a un 0,3% de su consumo.

Ítem	Unidad	Valor
Temperatura promedio durante el estudio	(°C)	21±0,38
Volumen estanque biofiltro	(Litros)	218
Superficie activa total de sustrato biofiltrante	m ²	41
Superficie específica de sustrato	(m ² /m ³)	360
Caudal de trabajo del biofiltro	(Litros/min)	50
Superficie filtro cascada (sección biofiltro)	(m ²)	0,2
Carga hidráulica (H) Filtro de cascada	(m ³ /m ² /día)	348

Tabla 1. Principales características de diseño y funcionamiento del biofiltro utilizado en el presente estudio.

3.2. Calidad de agua

En general la calidad de agua se mantuvo aceptable para el cultivo de truchas durante el periodo de evaluación. En la tabla 2 se resumen los datos obtenidos para los diferentes parámetros medidos. La temperatura del agua durante el presente estudio se mantuvo casi siempre por encima del límite de tolerancia para las truchas (BLANCO, [2]), con un valor promedio de 21°C y un máximo de 24°C. No se presentaron sin embargo cambios bruscos de temperatura dentro del sistema reciclado. De acuerdo con BLANCO [2] los cambios bruscos de temperatura son más peligrosos que una temperatura alta mantenida sin variación; esto podría explicar que en el presente experimento las truchas se aclimataran a las altas temperaturas del sistema y no evidenciaran síntomas de estrés. La poca variación de la temperatura del agua entre el día y la noche puso de manifiesto la capacidad de conservación del calor que poseen los sistemas de recirculación. Los datos de concentración de oxígeno obtenidos durante los primeros días del estudio se excluyeron del análisis por considerarse incorrectos (entre 20 y 30mg/l de oxígeno disuelto), esto se atribuyó a los altos niveles de nitrato presentes durante los primeros 22 días el cual interfiere sobre el Método Winkler. La concentración promedio de oxígeno a la salida del estanque fue de 5,62mg/litro valor que consideramos aceptable para el cultivo. Según esto, creemos que el sistema de inyección de aire dentro del estanque, a través del vénturi y la aireación en el biofiltro de cascada, fueron estrategias eficaces para mantener concentraciones de OD suficientes y satisfacer la demanda de los peces y de las bacterias nitrificantes.

El rango óptimo de pH para los peces es de 7 a 9 (HOCHHEIMER, [9]), sin embargo en sistemas reciclados éste debería mantenerse en un rango de 6,8 a 7,2 debido al aumento de la toxicidad del NH₃ a altos valores de pH. No conviene por otra parte, que el pH descienda por debajo de 6,5 ya que restaría eficiencia al biofiltro. Durante el estudio, el pH se mantuvo entre 6,1 y 7,9 con un valor promedio de 7,02. Sólo durante los primeros días se registró cierta inestabilidad con valores iguales o inferiores a 6,5 para posteriormente estabilizarse y mantenerse dentro del rango óptimo de seguridad antes mencionado.

Respecto a la alcalinidad, HOCHHEIMER [9] establece un rango muy alto entre 150 y 200mg/l de CaCO₃ para sistema reciclado; sin embargo SODERBERG [25] considera suficiente un nivel en torno a 75mg/l de CaCO₃ para mantener una buena tasa de nitrifica-

Parámetro	n(días)	Mínimo	Máximo	Promedio±IC 95%
Salinidad	45	8‰	11‰	9,08 0,25‰
Temperatura	45	17,5°C	23,5°C	21 0,38°C
Oxígeno disuelto	23	5,21mg/l	6,49mg/l	5,62 0,14mg/l
pH	45	6,1	7,69	7,02 0,12
Alcalinidad Total	7	69,89mg/lCaCO ₃	76,5mg/lCaCO ₃	72,78 2,52mg/lCaCO ₃
Amonio Total	45	0,083mg/l	4,00mg/l	0,80 0,27mg/l
Amonio no ionizado	45	0,0002mg/l	0,048mg/l	0,0047 0,003mg/l
Nitrito	45	0,04mg/l	30,5mg/l	10,74 3,72mg/l
Nitrito (desde el día 23)	23	0,04mg/l	0,23mg/l	0,12 0,018mg/l

Tabla 2. Resultados de los diferentes parámetros de calidad de agua medidos en el sistema durante el período de evaluación (45 días).

ción. En nuestro estudio se obtuvo un promedio de 72,68mg/l de CaCO₃ que podríamos considerar bueno y seguro para la nitrificación.

La concentración de amonio no ionizado (NH₃) promedió los 0,0047mg/l, valor que se sitúa por debajo del límite de seguridad establecido de 0,02mg/l. Este límite sólo fue ligeramente sobrepasado (0,033 a 0,048mg/l) en tres ocasiones.

En la figura 2 se muestra la variación de la concentración de nitrito junto con la concentración de amonio total (TAN). En los primeros días el valor máximo de seguridad establecido para el nitrito (0,3mg/l) fue ampliamente sobrepasado hasta llegar a 30,5mg/l el día 15, para caer bruscamente en los días siguientes y situarse en valores seguros alrededor de 0,12mg/l. Puede observarse que a partir del día 23 prácticamente toda la carga de nitrito en el sistema era removida.

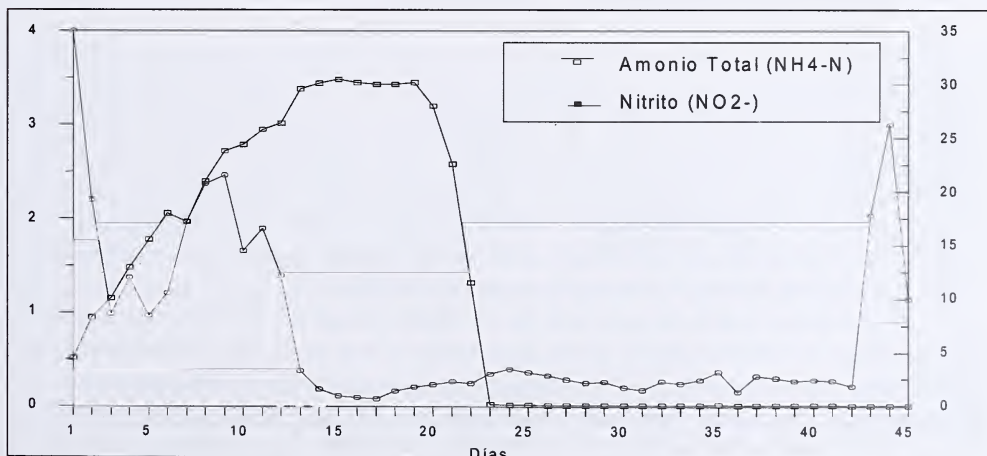


Figura 2. Concentración de amonio total TAN, y concentración de nitrito durante el periodo de evaluación. Obsérvese el retraso de 7 días de nitrobacter frente a nitrosomonas para la estabilización del biofiltro.

3.3. Crecimiento y supervivencia de los peces

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de la evaluación del crecimiento de las truchas cultivadas. En general los peces presentaron un comportamiento normal durante el tiempo de evaluación, con activa conducta de alimentación. En ninguna ocasión se observaron síntomas que pudieran dar cuenta de algún problema relacionado con la calidad del agua. A pesar de las altas concentraciones de nitrito, la mortalidad en todo el periodo fue de sólo 5 individuos, lo que arrojó un porcentaje de supervivencia de 97,56%.

Parámetro	Inicio	Final (día 45)
Nº de peces	205	200
Peso promedio (g)	188,87±8,68	220,13±18,87
Longitud total promedio (cm)	23,8±0,48	25,65±0,36
Biomasa (kg)	38,71	44,02
Densidad de cultivo (kg/m ³)	21,51	24,45
K (Índice de condición promedio)	0,014±0,0006	0,0129±0,0006
% de supervivencia		97,56
CUT (tasa de crecimiento)		0,002
Alimento entregado (g)		8235,05
Incremento en biomasa (g)		5308,35
FC (factor de conversión)		1,55

Tabla 3. Parámetros técnicos de cultivo obtenidos al inicio y al final del periodo de evaluación.

3.4. Eficiencia del biofiltro

Los niveles de amonio total (TAN) en el presente estudio permanecieron dentro del rango 0,083 a 4mg/l con un promedio de 0,8mg/l durante todo el periodo de evaluación. Este valor se encuentra dentro del rango de concentraciones documentadas por varios autores (EIKEBROKK, [7]; DE LOS REYES & LAWSON, [6]; SINGH *et al.*, [24] y LEKANG & KLEPPE, [16]). Teniendo en cuenta el pH y la temperatura, la concentración de amonio no ionizado (NH₃) en el presente estudio alcanzó un valor máximo de 0,048mg/l, día 44 de estudio, con un promedio de 0,0047mg/l. Este valor es mucho más bajo que el límite máximo de seguridad de 0,02mg/l preestablecido en este estudio.

El porcentaje medio de remoción fue de 82,6% (rango de 42-97%) para TAN y de 64,25% (rango 3,9-99,8%) para el nitrito. Igualmente la tasa media de remoción de amonio total fue de 0,22gTAN/m²/día, y 0,74gNitrito/m²/día para nitrito. Estos valores se encuentran dentro del rango de valores reportados en la literatura (KIKUCHI *et al.*, [11]; KAMSTRA *et al.*, [10]; TWAROWSKA *et al.*, [26]; LEKANG & KLEPPE, [16] y ZHU & CHEN, [30]). Las variaciones observadas en el porcentaje y tasa de nitrificación pueden atribuirse al regular estado de acondicionamiento del biofiltro al comenzar el experimento. Por otro lado, una

vez estabilizado el biofiltro, se observó que las respectivas tasas de remoción de TAN y nitrito variaron en forma directa con la carga diaria de estos compuestos. Este hecho coincide con lo señalado por EIKEBROKK [7] y posteriormente con KAMSTRA *et al.* [10] sobre la existencia de una relación lineal entre la carga de nitrógeno y la tasa de remoción. Esta variación puede ser atribuida a la fluctuación de la excreción de amonio durante el día, frecuencia de alimentación, tipo de alimento, edad de los peces; todos ellos factores que afectan a la producción de amonio total el cual tiene directa relación con la tasa de nitrificación. Por otra parte hay influencias de algunas variables de diseño como pueden ser el tipo de biofiltro y el tipo y superficie del medio filtrante que según KAMSTRA *et al.* [10] tienen un efecto en el desempeño del biofiltro, además del tiempo de retención hidráulico en el biofiltro, que según KIM *et al.* [12] está en directa relación con la tasa de remoción.

Con relación a la concentración de nitritos (NO_2^-), ésta presentó valores que variaron ampliamente desde 0,04 a 30,5 mg/l con un promedio de 10,74mg/l de NO_2^- . Estos altos niveles, durante los primeros 22 días del estudio sobrepasaron dramáticamente el nivel de tolerancia aceptado según KLONTZ [13] de 0,55 mg/l de NO_2^- . Sin embargo no se evidenciaron síntomas o signos de estrés, a causa de las altas concentraciones de este compuesto. La explicación para esta inesperada situación se atribuyó a la concentración salina presente en el sistema (10g/l). El ion cloro compite con el nitrito por su absorción en las branquias; una proporción de Cl^- 6 veces superior al NO_2^- es suficiente para contrarrestar los efectos del nitrito. SODERBERG [25] reporta la supervivencia de salmones coho expuestos a 30 mg/l de NO_2^- en una solución que contenía 148 mg/l de Cl^- .

Los niveles de NO_2^- desde su estabilización el día 23, promediaron los 0,12 mg/l con un rango entre 0,23 y 0,04 mg/l. Estos valores son similares a los reportados por EIKEBROKK [7], 0,27 mg/l; HEINEN *et al.* [8], entre 0,04 y 0,21 mg/l; DE LOS REYES y LAWSON [6], entre 0,17 y 0,35 mg/l; SINGH *et al.* [24], 0,27 mg/l y LEKANG & KLEPPE [16], entre 0,1 y 1mg/l.

Parámetro	Resultado		
	$\text{NH}_4\text{-N}$ (n = 45)	NO_2^- (n = 45)	NO_2^- (n = 23)
Carga diaria (g/día)	11,14±1,22	57,98±7,08	40,68±3,56
Tasa de remoción (g/día)	9,23±1,16	30,61±4,53	40,39±3,58
Carga diaria (g/m ² /día)	0,27±0,029	1,41±0,17	0,99±0,08
Tasa de remoción (g/m ² /día)	0,22±0,028	0,74±0,11	0,98±0,08
% de remoción	82,62±5,2%	64,25±11,74%	99,24±0,13%

Tabla 4. Resultados del desempeño del biofiltro mixto durante el período de evaluación del sistema.

La inestabilidad observada en la concentración de amonio total durante aproximadamente los primeros 13 días del estudio y de nitrito durante los primeros 22 días puede atribuirse a un irregular estado de acondicionamiento del biofiltro en el momento de comenzar la alimentación de las truchas. El tiempo de acondicionamiento, previo a la introducción de los peces, fue de 36 días (5 semanas). KIKUCHI *et al.* [11] reporta un periodo de acondi-

cionamiento de 60 días (8,5 semanas) en biofiltros marinos sumergidos con medios de biofiltración plásticos inoculados con bacterias comerciales. Del mismo modo, LEKANG & KLEPPE [16] reportan un tiempo de estabilización de 7 a 8 semanas en biofiltros de cascada en agua dulce. En el presente estudio, el tiempo transcurrido hasta la estabilización del biofiltro, 7 semanas para el amonio total y de 8,5 semanas para el nitrito, concuerda con lo documentado por estos autores. La curva de estabilización del nitrito y amonio total en el presente estudio coincide con lo esperado, ya que la población de nitrobacter comienza a establecerse a medida que el NO_2^- aumenta a causa de la oxidación del NH_4^- por nitrosomonas.

4. CONCLUSIONES

1. La adecuada pendiente del fondo del estanque decantador cónico es determinante para asegurar una eficiente remoción de sólidos. Si bien se obtuvieron resultados satisfactorios con una pendiente de 20%, es recomendable diseñar el decantador con pendientes mayores.
2. El sistema de aireación utilizado, compuesto por el inyector vórtice y el biofiltro de cascada, proporcionó niveles seguros de oxígeno disuelto para satisfacer la demanda de los peces y las bacterias en el biofiltro.
3. El biofiltro diseñado en el presente estudio proporcionó, una vez estabilizado, niveles seguros de amonio y nitrito para el cultivo de trucha.
4. El funcionamiento del sistema de recirculación permitió el cultivo de truchas con un muy bajo consumo de agua. Se obtuvo una tasa de renovación de 2,9% del volumen del sistema al día; y un consumo total de agua de 6016lts, que corresponde a un 0,3% del consumo de un sistema abierto en 45 días.
5. De acuerdo a lo observado en el estudio, una adecuada técnica de acondicionamiento del sustrato de biofiltración es factor clave para la estabilización del proceso de nitrificación, y por lo tanto, de los niveles de amonio y nitrito.
6. De acuerdo a los antecedentes, y lo observado en el presente estudio, el mantenimiento de una mínima salinidad (alrededor de 1‰) sería recomendable para proteger los peces ante niveles elevados de nitrito.
7. En sistemas de recirculación la eliminación de desechos sólidos se realizan por pulsos altamente concentrados; esto hace necesario un tratamiento para aprovechar el efluente en otras áreas, como por ejemplo, integración con cultivos hidropónicos, riego agrícola y enmienda de suelos arenosos que permita reducir el impacto ambiental.
8. La tecnología de recirculación, al permitir el mantenimiento de un cultivo con un bajo consumo de agua en un espacio reducido, abre la posibilidad de desarrollo de una “acuicultura urbana”; de insospechadas proyecciones económicas y sociales.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al financiamiento de la Universidad Católica de Temuco, proyecto DIUC

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ARBIV, R., and J. VAN RIJN. 1995. "Performance of a Treatment System for Inorganic Nitrogen Removal in Intensive Aquaculture Systems". *Aquacultural Engineering* 14:189-203.
- [2] BLANCO, M.C. 1994. *La Trucha, cría industrial*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- [3] BUTTNER, J.K., R.W. SODERBERG, and D.E. TERLIZZI. 1993. An Introduction to Water Chemistry in Freshwater Aquaculture. *NRAC Fact Sheet No. 170*. Northeastern Regional Aquaculture Center. University of Massachusetts, Dartmouth, Massachusetts. 4 p.
- [4] CHEN, S., and R.F. MALONE. 1991. Suspended Solids Control in Recirculating Aquacultural Systems. PP. 170-186. In: *Engineering Aspects of Intensive Aquaculture*. NRAES-49. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. Cornell University, Ithaca, New York.
- [5] DANIELS, W.H., L.R. D'ABRAMO, and L. DE PARSEVAL. 1992. "Design and Management of a Closed, Recirculating 'Clearwater' Hatchery System for Freshwater Prawns, *Macrobrachium rosenbergii* De Man, 1879". *Journal of Shellfish Research*, Vol. 11, No. 1, 65-73.
- [6] DE LOS REYES JR., A.A., and T.B. LAWSON. 1996. "Combination of a Bead Filter and Rotating Biological Contactor in a Recirculating Fish Culture System". *Aquacultural Engineering* 15:27-39.
- [7] EIKEBROKK, B. 1990. "Design and Performance of the BIOFISH Water Recirculation System". *Aquacultural Engineering* 9:285-294.
- [8] HEINEN, J.M., J.A. HANKINS, A.L. WEBER, and B.J. WATTEN. 1996. "A Semiclosed Recirculating-Water System for High-Density Culture of Rainbow Trout". *Progressive Fish Culturist* 58:11-22.
- [9] HOCHHEIMER, J.N. 1997. Water Chemistry in Recycle Systems. In: *Proceedings of the 1997 North Central Regional Aquaculture Conference*. CES-305. Edited by LaDon Swann, Illinois-Indiana Sea Grant Program.
- [10] KAMSTRA, A., J.W. VAN DER HEUL, and M. NIJHOF. 1998. "Performance and optimization of trickling filters on eel farms". *Aquacultural Engineering* 17:175-192.
- [11] KIKUCHI, K., H. HONDA, and M. KIYONO. 1994. "Ammonia Oxidation in Marine Biological Filters with Plastic Filter Media". *Fisheries Science* 60(2): 133-136.
- [12] KIM, S., I. KONG, B. LEE, L. KANG, M. LEE, and K.H. SUH. 2000. "Removal of ammonium-N from a recirculation aquacultural system using an immobilized nitrifier". *Aquacultural Engineering* 21:139-150.
- [13] KLONTZ, G.W. 1991. *A Manual for Rainbow Trout Producción on the Family-Owned Farm*. Nelson & Sons, Inc. Murray, Utah. 71 pp.
- [14] LANDAU, M. 1991. *Introduction to Aquaculture*. John Wiley & Sons, Inc. EE.UU.
- [15] LAWSON, T. 1995. *Fundamentals of Aquacultural Engineering*. Chapman & Hall. EE.UU.
- [16] LEKANG, O.I., and H. KLEPPE. 2000. "Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media". *Aquacultural Engineering* 21:181-199.
- [17] LOSORDO, T.M. 1991. An introduction to Recirculating Production Systems Design. PP. 32-56. In: *Engineering Aspects of Intensive Aquaculture*. NRAES-49. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. Cornell University, Ithaca, New York.

- [18] LOSORDO, T.M., M.P. MASSER, and J. RAKOCY. 1992a. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems; An Overview of Critical Considerations. *Southern Regional Aquaculture Center Publication N° 451*. Stoneville, MS, 6 p.
- [19] LOSORDO, T.M., J. RAKOCY, and M.P. MASSER. 1992b. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems; Component Options. *Southern Regional Aquaculture Center Publication N° 453*. Stoneville, MS, 11 p.
- [20] LOSORDO, T.M., P.W. WESTERMAN, and I. SCHEI. 1994. "An Evaluation of the Ecofish Tank System Technology for use in the Intensive Production of Tilapia Utilizing Water Reuse Technology". North Carolina State University, Raleigh, NC, USA.
- [21] LOSORDO, T.M. 1998. Recirculating Aquaculture Production Systems: The Status And Future. *Aquaculture Magazine* Vol. 24, N° 1:38-45.
- [22] MASSER, M.P., J. RAKOCY, and T.M. LOSORDO. 1992. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems; Management of Recirculating Systems. *Southern Regional Aquaculture Center Publication N° 452*. Stoneville, MS, 12 p.
- [23] RAKOCY, J.E. 1997. "Integrating tilapia culture with vegetable hydroponics in recirculation systems". Pag 163-184 in B.A. Costa-Pierce and J.E. Racocy, eds. *Tilapia Aquaculture in the Americas*, Vol. 1.1997. World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, EE.UU.
- [24] SINGH, S., J. EBELING, and F. WHEATON. 1999. "Water quality trials in four recirculating aquacultural system configurations". *Aquacultural Engineering* 20:75-84.
- [25] SODERBERG, R.W. 1995. *Flowing Water Fish Culture*. Lewis Publishers, EE.UU.
- [26] TWAROWSKA, J.G., P.W. WESTERMAN, and T.M. LOSORDO. 1997. "Water treatment and waste characterization evaluation of an intensive recirculating fish production system". *Aquacultural Engineering* 16:133-147.
- [27] WHEATON, F.W., J. HOCHHEIMER, and G.E. KAISER. 1990. Fixed Film Nitrification Filters for Aquaculture. *Scientific Article N° A-4904* Contribution N° 7946 of the Maryland Agricultural Experiment Station, University of Maryland. College Park, Maryland. 45 p.
- [28] WHEATON, F.W., and J.N. HOCHHEIMER. 1991a. Nitrification Filters in Aquaculture. *Scientific Article N° A-6221* Contribution N° 8390 of the Maryland Agricultural Experiment Station (Department of Agricultural Engineering), University of Maryland. College Park, Maryland. 41 p.
- [29] WHEATON, F.W., J. HOCHHEIMER, G.E. KAISER, and M.J. KRONES. 1991b. Principles of Biological Filtration. PP. 1-31. In: *Engineering Aspects of Intensive Aquaculture*. NRAES-49. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. Cornell University, Ithaca, New York.
- [30] ZHU, S., and S. CHEN. 1999 "An experimental study on nitrification biofilm performances using a series reactor system". *Aquacultural Engineering* 20:245-259.