

Trabajo de Grado

Dinámica de nutrientes en sistemas cerrados de recirculación en el cultivo de *Piaractus brachypomus*, *Oreochromis* sp y *Cyprinus carpio*, para su aplicación en la acuaponía

Ana Constanza Torres Mesa BSc.

Director:

Hernán Hurtado Giraldo Ph.D

Co-director:

Edwin Gómez Ramírez

Jurados:

Frank A. Chapman Ph.D

Germán E. Merino Ph.D

Julio González MSc.

2017

Maestría Biología Aplicada
Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA



RESUMEN

La acuicultura es un sector de producción en crecimiento, en el cual, parte de ella ha generado un impacto negativo al ambiente, lo que ha promovido la implementación de técnicas más amigables con el ambiente, como lo son: los sistemas cerrados de recirculación (SCR) y los sistemas acuapónicos (SA). Estas tecnologías han permitido el incremento de la densidad de siembra, reciclaje de nutrientes, manejo adecuado del agua, incremento de la biodiversidad, entre otros. Por lo tanto, estudiar la dinámica de nutrientes en SCR es importante para comprender el comportamiento entre el alimento, la biomasa y la especie. Esta información permitirá interrelacionar los nutrientes de un SCR y los requerimientos minerales de las plantas en un SA. Para este trabajo se utilizó un diseño completamente al azar 3x3, donde se evaluaron tres tratamientos (T) cultivo de *P. brachyomus* (T1), *O. sp* (T2) y *C. carpio* (T3), con tres repeticiones cada uno. Para la siembra y muestreos mensuales de los peces se siguieron las variables de peso (P), longitud total (LT) y estándar (LE), a partir de lo cual se obtuvieron parámetros productivos. El análisis de fisicoquímicos en los sistemas se realizó semanalmente para las siguientes variables: nitrógeno amoniacal total (NAT), nitrito (NO_2^-), calcio (Ca^{2+}), hierro (Fe^{2+}), potasio (K^+), manganeso (Mn^{2+}), pH y temperatura, mensualmente se enviaron muestras de agua para el análisis de nitrato (NO_3^-). Como resultados, la dinámica de los nutrientes, como el nitrógeno ($\text{NAT} + \text{NO}_3^-$) mostró que los niveles disminuían con respecto al crecimiento de las tres especies, para el K^+ en T1 se obtuvo que al aumentar la biomasa de peces las concentraciones bajaban, mientras que en T2 y T3 los niveles se mantuvieron relativamente estables durante los seis meses, para el caso del Ca^{2+} no se observaron diferencias entre los T, y durante el tiempo de cultivo se mantuvieron valores relativamente similares. Para los micronutrientes se obtuvo que el Fe^{2+} fue mayor en T2, seguido por T3 y por último T1, mientras que el Mn^{2+} mantuvo concentraciones mayores en T3, luego T2 y finalizando con T1. En cuanto al crecimiento de los peces T1 y T3, presentaron un mejor ajuste al modelo exponencial para las tres variables evaluadas, mientras que T2 mostró un crecimiento de tipo lineal. En conclusión, la dinámica de nutrientes en T1, T2 y T3 mostró que entre los macronutrientes evaluados, los niveles de NO_3^- fueron los más altos, seguido por el K^+ y el Ca^{2+} ; mientras que en los micronutrientes el Mn^{2+} fue superior al Fe^{2+} .

Palabras clave: producción limpia, sistemas cerrados de recirculación, peces tropicales, nutrición mineral

INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos en el sector agropecuario ha promovido el manejo de sistemas intensivos, como alternativa al incremento de la demanda de alimentos debido al acelerado crecimiento poblacional (Sommerville *et al*, 2014; FAO, 2014). Sin embargo, la mayoría de estos sistemas de producción han originado serios problemas ambientales como la degradación del suelo, contaminación del agua, deforestación y la emisión de gases de efecto invernadero (Beveridge y Little, 2008; Martins *et al*, 2011; Zofagros *et al*, 2014). Además, el cambio climático causa una disminución en los rendimientos de cultivo, disminución en la precipitación, incremento en la aridez de los suelos, aumento de temperatura, migración de especies a latitudes más elevadas, acidificación del suelo y el agua (FAO, 2016b). En consecuencia, con el fin de disminuir el impacto negativo sobre el ambiente, se han generado políticas cada vez más restrictivas, donde el nivel de producción sea compatible con la sostenibilidad, y su objetivo sea mediar y equilibrar las prioridades entre el crecimiento y la conservación, asegurando beneficios equitativos para las comunidades (Beveridge y Little, 2008; FAO, 2016a).

En la acuicultura, la intensificación derivada del aumento en la densidad de siembra, y las prácticas tradicionales han promovido un problema de contaminación ambiental caracterizado por el consumo de grandes cantidades de agua potable y su descarga con altos niveles de desechos al ambiente (Martins *et al*, 2010; Badiola *et al*, 2012; Edwards, 2015). Principalmente el nitrógeno (N: 30 – 65%) y el fósforo (P: 40%) son los nutrientes de mayor desecho en sistemas intensivos tradicionales, mientras que los sistemas cerrados de recirculación (SCR) y sistemas acuapónicos (SA) posibilitan reciclar estos nutrientes reduciendo la descarga y el gasto de agua, permitiendo su re-utilización en el sistema (Schneider *et al*, 2005; Edwards, 2015; Suhl *et al*, 2016; Rojas-Tirado *et al*, 2016).

En los SCR, estos compuestos sólidos y disueltos son acumulados a través de las heces, el alimento y la biomasa de bacterias, como productos ricos en nutrientes que pueden ser aprovechados como fertilizantes en SA (Diver, 2010; Martins *et al*, 2011). Sin embargo, falta investigación para definir la relación entre la biomasa de peces, tipo y número de plantas, tipo de alimento requerido y niveles de suplementación para obtener un mejor rendimiento de los nutrientes en los sistemas disminuyendo así su descarga al ambiente (Rafiee y Saad, 2005; Davidson *et al*, 2011; Pedersen *et al*, 2012; Buzby y Lin, 2014).

Las especies de estudio fueron, *Cyprinus carpio* puesto que es el pez más cultivado a nivel mundial con una producción por encima de los 4 millones de toneladas, donde China es su principal productor con una participación del 76.28%; mientras que *Oreochromis* sp. es la segunda especie más cultivada con una producción superior a los 3 millones de toneladas, donde Colombia para el 2014 ocupó a nivel mundial el octavo puesto de producción; por otro lado *Piaractus brachypomus* es una especie nativa, la cual es la segunda especie más cultivada en Colombia después de *O.* sp con valores alrededor de las 18 mil toneladas anuales, además de ser una especie nativa (FAO, 2016a).

Teniendo en cuenta, la necesidad de implementar técnicas de producción de alimentos más sostenibles y eficientes, es importante conocer la dinámica de nutrientes en SCR en el cultivo de *P. brachypomus*, *O.* sp y *C. carpio*, para así lograr hacer una extrapolación entre los minerales producidos por los peces, con los requerimientos de las plantas.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Este trabajo se llevó a cabo en el Invernadero de Ictiología y en el laboratorio de Fisiología Animal, campus Cajicá de la Universidad Militar Nueva Granada. Ubicada a 2558 msnm, con una temperatura promedio de 14°C.

Diseño de los sistemas de recirculación

Estos sistemas constaron de: Un tanque de peces de 1000 L conectado a un filtro mecánico de 200 L con 40 m² de polisombra al 65% para la retención de sólidos. Posterior a este, se encuentra el biofiltro constituido por un tanque de 1000 L, con una bolsa de anejo llena de fragmentos de tubería eléctrica corrugada con un área específica de 5.35 m². El retorno del agua se producía por medio de una manguera de 1/2", impulsada por una bomba de 1500 L/h para manejar recambio por hora de 1 - 1.5.

El tanque de peces y el biofiltro, a cada uno se le colocaron 4 líneas de aireación y sus respectivas piedras difusoras, conectadas a una turbina de aire de 1/2 HP. Dos turbinas de aire suministraron aireación a los nueve sistemas manteniendo concentraciones de oxígeno disuelto > 4 mg/L (Hernández *et al*, 2010; Carrascal, 2010; Martínez *et al*, 2011).

Condiciones experimentales

Se realizó la maduración química de los 9 sistemas de recirculación durante un mes utilizando una solución modificada de Masser *et al*, (1999) con sal marina (40 mg/l), bicarbonato de amonio (40 mg/l), fosfato dibásico de sodio (40 mg/l) y bicarbonato de sodio (250 mg/l) proporcionando las condiciones óptimas para el crecimiento de las bacterias nitrificantes a un pH de 8 - 8.5 (Cifuentes y Torres, 2012). La maduración de los sistemas se mantuvo hasta obtener concentraciones de NAT < 1.0 mg/L, NO₂⁻ < 0.5 mg/L y NO₃⁻ > 5 mg/L, luego se ajustó el pH en un rango de 6.0 - 6.5 con ácido nítrico al 37%, debido a que este compuesto al disociarse libera H⁺ y NO₃⁻, siendo que este último puede ingresar al ciclo del N del sistema (Sommerville *et al*, 2014).

Para la siembra de los peces, se evaluaron las variables de peso (P), longitud total (LT) y estándar (LE) y se evaluaron tres especies: *O. sp*, *P. brachypomus* y *C. carpio* (Tabla 1).

Tabla 1. Medidas de los individuos al momento de la siembra. Cada valor representa el promedio, \pm la desviación estándar. LT: Longitud Total, LE: Longitud Estándar, ind: individuo

	<i>P. brachypomus</i>	<i>O. sp</i>	<i>C. carpio</i>
Peso/ind (g)	10.65 \pm 2.61	19.05 \pm 2.73	4.72 \pm 1.26
Biomasa total (g)	416.36 \pm 18.58	1136.29 \pm 1.92	188.77 \pm 5.50
LT (cm)	8.01 \pm 0.65	10.54 \pm 0.56	6.49 \pm 0.57
LE(cm)	6.47 \pm 0.56	8.28 \pm 0.45	5.15 \pm 0.47
Densidad (peces/m ³)	40	40	60

Los sistemas se mantuvieron por seis meses con una temperatura entre los 25 - 27°C utilizando tres termostatos de 300 W por sistema (FAO 1994; Martins *et al*, 2009a y b; Poleo *et al*, 2011; Zhang *et al*, 2016). A los peces se les proporcionó alimento comercial al 32% de proteína cruda (PC) (Tabla 2) ajustado al porcentaje (%) de la biomasa.

Tabla 2. Relación entre tamaño del pez y cantidad de comida a suministrar (Cifuentes y Torres, 2012).

Peso corporal/individuo	Cantidad de comida en relación a la biomasa
1 – 20	7.0%
20 – 50	6.0%
50 – 80	5.0%
80 – 100	4.5%
100 – 200	4.0%
200-300	3.5%
300-500	3.0%

Registro del crecimiento y parámetros productivos

En los SCR mensualmente se muestreo el 10% de la población y se les registró P, LT y LE, a partir de los cual se calcularon los parámetros productivos (Tabla 3): factor de conversión alimenticia (FCA), tasa de crecimiento específico (TCE), factor de condición k (K), Ganancia en peso (GP) y Supervivencia (S).

Tabla 3. Parámetros productivos calculados mensualmente.

Parámetro productivo	Fórmula
Factor de Conversión Alimenticia (Aguilar <i>et al</i> , 2012).	FCA = alimento consumido / biomasa final
Tasa de Crecimiento Específico (Alatorre-Jacome <i>et al</i> , 2012).	TCE= (peso final – peso inicial)/(tiempo final – tiempo inicial)
Factor de condición K (Cifuentes <i>et al</i> , 2012)	K= peso/longitud ³
Ganancia de Peso (Alatorre-Jacome <i>et al</i> , 2012).	GP = peso final – peso inicial
Supervivencia (Aguilar <i>et al</i> , 2010)	S = (número de peces final/número de peces inicial)* 100

En estos sistemas se midieron semanalmente y las muestras se tomaron entre las 8:00 – 9:00 de la mañana, los siguientes parámetros fisicoquímicos: oxígeno disuelto (OD) y pH, con una multisonda Extech DO700. La temperatura se determinó con termómetros de máximas y mínimas sumergidos permanentemente en los sistemas. Los parámetros como dureza de carbonatos y dureza total se determinaron con kits para acuario, mientras que el NAT, NO₂⁻, Ca²⁺, Fe²⁺, Mn con un Spectroquant Multy[®] utilizando kits de alta sensibilidad de Merck[®]. Mensualmente el K⁺, NO₃⁻ y SO₄²⁻ se enviaron a un laboratorio de análisis de agua especializado. Con los datos obtenidos de NAT, temperatura y pH, se determinaron las concentraciones de NH₄⁺ y NH₃.

Análisis de datos

Se empleó un diseño completamente al azar efecto fijo balanceado (3X3), con efecto interactivo del tiempo, donde se implementó la técnica ANOVA. Antes de generar las ANOVAS se validaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas por medio de la prueba de Shapiro-Wilk. Luego se realizaron pruebas de Tukey para cada variable al nivel de significancia del 5% (p< 0.05 error tipo I). Adicionalmente se llevó a cabo un análisis descriptivo para determinar la media aritmética y desviación estándar, los cuales indicaron la dinámica o comportamiento asociada con cada variable. Se empleó el paquete estadístico R versión 3.3.1. de libre distribución en Internet (www.r-project.org).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámica de nutrientes en SCR de *P. brachypomus*, *O. sp* y *C. carpio*

Para la dinámica de nutrientes en los cultivos de *P. brachypomus*, *O. sp* y *C. carpio* (Figura 1 y 2, Tabla 4 y 5) se observó que los niveles de acumulación de macronutrientes se presentaron de mayor a menor en el siguiente orden: $\text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$, mientras que, entre los micronutrientes el Mn^{2+} fue mayor en relación al Fe^+ . Esta dinámica en las concentraciones de los nutrientes es similar a lo reportado por varios autores, como Rakocy *et al* (2006) y Nelson y Pade (2008), donde el NO_3^- es uno de los nutrientes de mayor concentración en los sistemas, mientras que los niveles de K^+ , Ca^{2+} , Mn^{2+} y Fe^+ son relativamente bajos. Para *O. sp* se ha establecido una correlación entre algunos minerales suplementados en la dieta y los minerales disueltos en el cultivo, dando como resultado que alrededor del 32.53% del N, 20.29% del Ca^{2+} , 11.46% del Fe^{2+} , 7.16% del K^+ y 6.81 del Mn^{2+} son excretados por los peces (Rafiee y Saad, 2005). No obstante, la excreción de nutrientes depende en gran medida del nivel de PC y calidad de alimento que se les suministre, además de la talla de los peces (Schneider *et al*, 2005; Rafiee y Saad, 2005; Timmons y Ebeling, 2007; Bernstein, 2011; Martins *et al*, 2011).

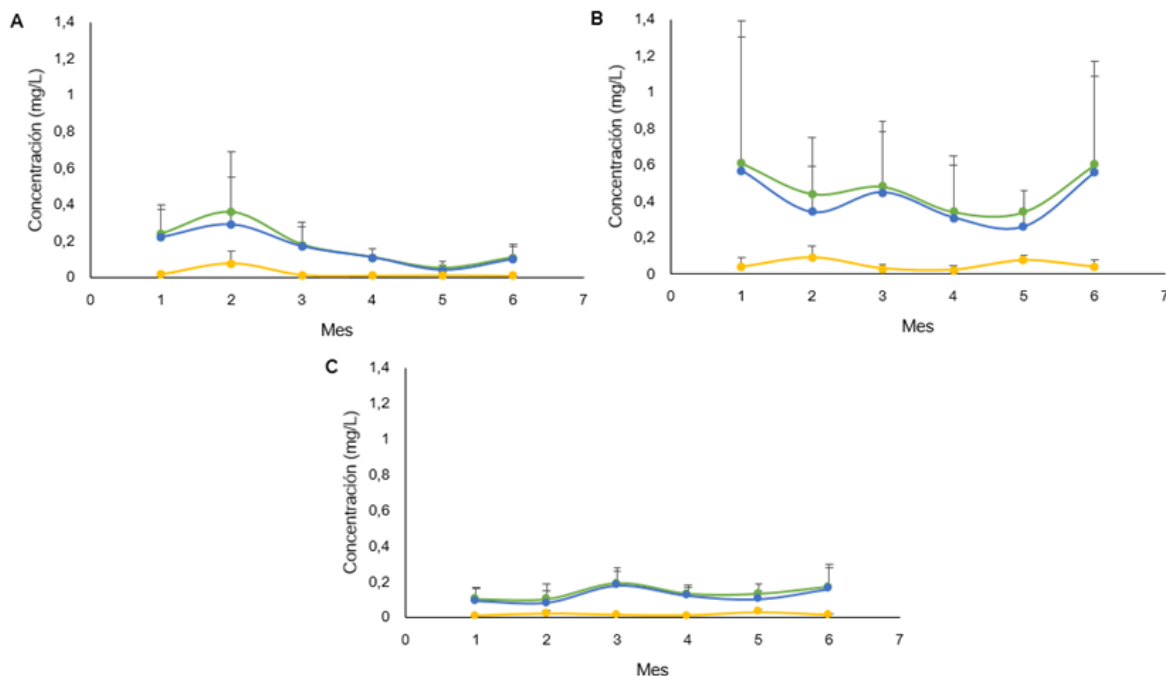


Figura 1. Dinámica de NAT, NH_4^+ y NH_3 en el cultivo de tres especies. Cada valor representa el promedio, \pm la desviación estándar. A: *P. brachypomus*, B: *O. sp* y C: *C. carpio*. Los colores muestran Verde: NAT, Azul: NH_4^+ y Amarillo: NH_3 .

Entre los compuestos nitrogenados (Figura 1), el NAT es un desecho de los peces y un compuesto disuelto que se presenta en dos formas: amonio ionizado (NH_4^+) y amonio no ionizado (NH_3) (Zhang *et al*, 2015), los cuales se encontraron dentro de los rangos reportados como adecuados para el crecimiento de *P. brachypomus* (0.18 ± 0.11 mg/L), *O. sp* (0.47 ± 0.12 mg/L) y *C. carpio* (0.14 ± 0.04 mg/L). Timmons y Ebeling (2007) reportan que el NAT debe encontrarse por debajo de 2 mg/L, mientras que el NH_3 debe ser < 1 mg/L, dado que en altas concentraciones actúa como un activador de respuesta endocrina al estrés incrementando los niveles de cortisol y generando daños fisiológicos como: inhibición de los mecanismos de excreción del NAT, alterando el balance ácido-base y afectando la regulación iónica en las branquias, si la condición es prevalente puede conducir a la muerte de los organismos (Kim *et al*, 2015; Li *et al*, 2016a).

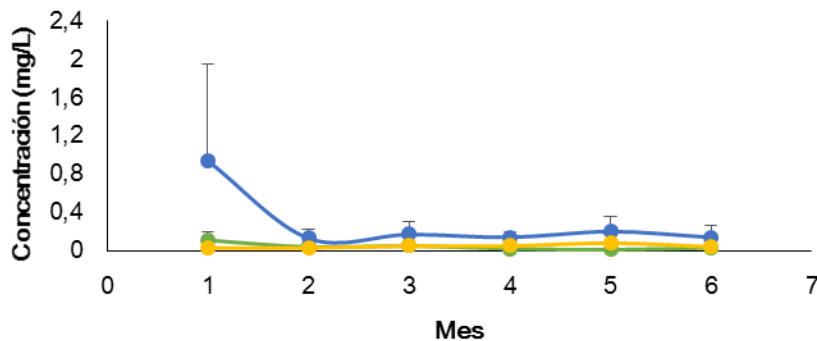


Figura 2. Dinámica de NO_2^- en el cultivo de tres especies. Cada valor representa el promedio, \pm la desviación estándar. Los colores representan, verde: *P. brachypomus*, azul: *O. sp* y amarillo: *C. carpio*.

Teniendo en cuenta, los efectos nocivos de altas concentraciones de NAT en los sistemas acuícolas, los SCR poseen un biofiltro con bacterias nitrificantes que convierten el NAT en NO_2^- y luego en NO_3^- (Colt *et al*, 2006; Eding *et al*, 2006; Christianson *et al*, 2015). Para evitar tales efectos, este componente en el sistema se dimensionó teniendo en cuenta la temperatura del agua entre 25 – 27°C, el área superficial efectiva, el porcentaje de PC, la biomasa de peces y una tasa de conversión de NAT $1.00 \text{ g/m}^2/\text{día}$, de acuerdo a lo mencionado por Timmons y Ebeling (2007), sin embargo, el medio filtrante podría seguir expandiéndose para incrementar el área superficial, si así lo requiriera el sistema. El NO_2^- es un ion altamente tóxico, pues tiene la capacidad de entrar al pez a través de las branquias por medio del intercambiador iónico $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ compitiendo con el Cl^- , para ingresar a los eritrocitos e interactuar con la hemoglobina reduciendo los niveles de oxígeno en la sangre (Jensen, 2003; Hvas *et al*, 2016). En el presente trabajo las concentraciones de NO_2^- (Figura 2) en los sistemas se mantuvieron en 0.04 ± 0.03 mg/L, 0.29 ± 0.32 mg/L y 0.05 ± 0.02 mg/L para *P. brachypomus*, *O. sp* y

C. carpio respectivamente, similar a lo obtenido por Poleo *et al* (2011), Martins *et al* (2009a y b) y Zhang *et al* (2016). En el cultivo de *O. sp* para la primera semana se observa una alta concentración de NO_2^- de 0.94 ± 1.01 mg/L, debido posiblemente a que las bacterias nitrificantes que oxidan este ion a NO_3^- no se encontraban totalmente establecidas al momento de la siembra para mantener una biomasa de 188.77 ± 5.50 g por lo tanto, la conversión no fue la esperada, cabe aclarar que en la segunda semana la concentración de NO_2^- bajo a 0.13 ± 0.10 mg/L.

En cuanto al NO_3^- , Honda *et al* (1993) y Timmons y Ebeling (2007) han mencionado que valores por debajo de 400 mg/L son adecuados para el crecimiento de las especies, como se observa en la tabla 4, las concentraciones en los SCR de *P. brachypomus*: 40.43 ± 16.72 mg/L, *O. sp*: 38.98 ± 9.06 mg/L y *C. carpio*: 39.03 ± 6.49 mg/L se encontraron muy por debajo del límite máximo de tolerancia de las especies. Además, se observa que a lo largo de los seis meses los niveles y las tasas de NO_3^- van disminuyendo, contrario a lo esperado, puesto que la cantidad de alimento aumentaba con el crecimiento de los peces. En SCR se ha descrito la pérdida entre el 1.5 al 1.9% de N a través de la producción de óxido nitroso (N_2O) y del 25 al 60% por nitrógeno atmosférico (N_2), tanto en condiciones anóxicas y/o aeróbicas, fomentada por: la inhibición del NO_2^- , la ausencia de la enzima nitrato oxido-reductasa, bajos niveles de carbono orgánico, entre otros; estos procesos son llevados a cabo por bacterias heterótrofas que se presentan principalmente en biofiltros y sedimentadores, donde hay acumulación de sólidos suspendidos. Aun así, los SA pueden disminuir la pérdida de N, debido a la presencia de plantas que asimilan este nutriente en forma de NH_3 y NO_3^- , e incrementando el área superficial específica para el crecimiento de bacterias nitrificantes (Hu *et al*, 2014; Hu *et al*, 2015; Wongkiew *et al*, 2017).

Tabla 4. Rangos de la concentración y tasas de producción de NO_3^- en el cultivo de *P. brachypomus*, *O. sp* y *C. carpio*.

Mes	Concentración de NO_3^- (mg/L)			Tasa de producción de NO_3^- (mg/L/día)		
	<i>P. brachypomus</i>	<i>O. sp</i>	<i>C. carpio</i>	<i>P. brachypomus</i>	<i>O. sp</i>	<i>C. carpio</i>
1	- 41,40	26,9 - 48,7	34,60 - 45,40	1,38	0,73	0,36
2	30,50 - 72,40	41,3 - 45,1	39,30 - 41,20	1,40	0,13	0,06
3	31,10 - 31,70	32,4 - 45,9	31,80 - 39,30	0,02	0,45	0,25
4	26,60 - 28,30	32,6 - 36,7	23,50 - 34,00	0,06	0,14	0,35
5	21,50 - 28,10	20,1 - 25,9	20,70 - 29,00	0,22	0,19	0,28
6	22,30 - 40,70	26,1 - 31,6	43,30 - 45,30	0,61	0,18	0,07
MIN*	$26,40 \pm 4,47$	$29,90 \pm 7,25$	$32,20 \pm 8,80$			
MAX*	$40,43 \pm 16,72$	$38,98 \pm 9,06$	$39,03 \pm 6,49$			

* Son los promedios de los valores mínimos y máximos, \pm representa la desviación estándar.

La dinámica observada para el K^+ (Tabla 5), mostró que en el cultivo *P. brachypomus* las concentraciones presentes en el agua disminuyeron ($p < 0.05$) mensualmente, mientras que *O. sp* no mostró ningún tipo de tendencia a lo largo de los seis meses cultivados, por el contrario, *C. carpio* mostró un incremento ($p < 0.05$) en los niveles de K^+ con el aumento de peso. Para *O. sp*, los niveles de este mineral son altos en comparación con el trabajo realizado por Rafiee y Saad (2005) donde evaluaron la concentración de nutrientes en cinco grupos con peces de diferentes tallas y biomasa, el grupo 1 fue de 20 ± 0.00 g/ind, grupo 2 de 39.70 ± 0.44 g/ind, grupo 3 de 80.38 ± 0.41 g/ind, grupo 4 de 113.62 ± 1.92 g/ind y el grupo 5 de 177.67 ± 1.81 g/ind, con un número total de peces de 75 por cada sistema, en un periodo de 21 días, los cuales fueron mantenidos con alimento al 24% PC dos veces al día. Las muestras fueron tomadas durante la primera semana con concentraciones entre 4.00 a 5.00 mg/L y para la tercera semana entre 5.94 a 8.33 mg/L, estas diferencias entre los sistemas de cultivo pueden ser explicadas por el diseño y manejo del sistema, debido a que Rafiee y Saad (2005) presentaban un sistema acuapónico con un tanque de peces y unas camas hidropónicas y al parecer en su diseño no incluían un biofiltro ni un clarificador, lo que podría generar acumulación de la materia orgánica (alimento sobrante, materia fecal, entre otros). Por el contrario, en este trabajo, la presencia de un filtro mecánico y su limpieza mensual posiblemente fomentó el crecimiento de bacterias heterótrofas que permiten descomponer la materia orgánica, incrementando los niveles de nutrientes disponibles para las plantas, por un proceso denominado mineralización, dicho proceso puede realizar en condiciones aeróbicas como anaeróbicas, por lo que en el filtro mecánico (anaeróbico) como en el biofiltro (aeróbico) es probable que ocurriera mineralización (Lennard, 2012; Sommerville *et al*, 2014).

En cuanto a *C. carpio*, Martins *et al* (2009a) reportaron que en una biomasa de 4.27 kg por sistema, el nivel de K^+ fue de 6.30 ± 1.30 mg/L, el cual es cinco veces menor al obtenido en el presente estudio 31.57 ± 9.06 mg/L con una biomasa de 3.36 ± 0.16 kg, estas diferencias pueden ser atribuidas a los altos recambios de agua manejados por Martins *et al* (2009a) de 1500 L/kg de alimento, mientras que en este trabajo la tasa de recambio fue aproximadamente de 264 L/kg de alimento. Sin embargo, es difícil establecer la cantidad de K^+ proveniente del alimento, puesto que no hubo un estudio bromatológico y solo se cuenta con el nivel de PC del 32%. Para el trabajo de Martins *et al* (2009a) es aún más incierto este aspecto, ya que los peces fueron mantenidos con alimento vivo (*Artemia nauplii*).

Para el Ca^{2+} se encontró que las concentraciones se mantuvieron en 20.39 ± 5.47 mg/L para *P. brachypomus*, 21.32 ± 2.21 mg/L en *O. sp* y 20.40 ± 1.06 mg/L para *C. carpio*, sin presentar diferencias significativas ($p > 0.05$). Concentraciones similares fueron obtenidas por Rafiee y Saad (2005) en el estudio del ciclo de nutrientes mencionado anteriormente. Por otro lado, en el trabajo de Martins *et al* (2009a), quienes evaluaron la acumulación de nutrientes en el desarrollo embrionario y larval de *C. carpio* en SCR con un bajo y alto recambio de agua de 30 L/kg de alimento y de 1500 L/kg de alimento evidenciaron que los niveles de Ca^{2+} fueron mayores de 45.00 ± 2.30 y 75.45 ± 5.85 mg/L, puesto que las dietas a base de fuentes animales contienen aproximadamente 100 veces más niveles de Ca^{2+} con respecto a las materias primas vegetales, lo cual concuerda con lo mencionado anteriormente, donde se presume que uno de los ingredientes principales del alimento es la soya (Vásquez, 2004), en cuanto que Martins *et al* (2009a) suministraron *A. nauplii*.

El Fe^{2+} presentó diferencias ($p < 0.05$) entre las tres especies evaluadas, siendo mayor para *O. sp* con valores de 54.08 ± 0.01 $\mu\text{g/L}$, seguido por *C. carpio* con concentraciones de 33.06 ± 0.01 $\mu\text{g/L}$ y por último *P. brachypomus* en 29.64 ± 0.01 $\mu\text{g/L}$ (Tabla 5). Además, en *P. brachypomus* se observó una disminución de este nutriente a lo largo del tiempo de cultivo ($p < 0.05$). Por el contrario, *C. carpio* presentó un incremento ($p < 0.05$) en las concentraciones de Fe^{2+} . Para el caso de *O. sp* las mayores ($p < 0.05$) concentraciones se presentaron entre el tercer y quinto mes. Los niveles de Fe^{2+} en *O. sp* fueron mayores a los reportados por Martins *et al* (2011), quienes evaluaron las concentraciones de diferentes metales pesados en SCR con diferentes tasas de recambio: baja de 30 L/kg de alimento, media de 70 L/kg de alimento y alta de 1500 L/kg de alimento, para el caso específico del Fe^{2+} este se mantuvo en 35.42 ± 9.41 $\mu\text{g/L}$, 25.3 ± 6.34 $\mu\text{g/L}$ y 2.08 ± 0.01 $\mu\text{g/L}$, respectivamente. Estas diferencias en los niveles de Fe^{2+} en el agua pueden ser causadas por diferentes factores; entre los más importantes están los ingredientes del alimento, es sabido que a medida que aumenta la inclusión de materias primas de origen animal (harinas de pescado, sangre, vísceras o plumas) se aumenta la liberación de Fe^{2+} en los sistemas (Vásquez, 2004). Otros factores importantes son: la edad del pez, estado de salud, condiciones en el tracto gastrointestinal, la cantidad y la forma química, puesto que las fuentes inorgánicas de Fe^{2+} son más fácilmente absorbidas que las orgánicas (Santosh, 2003; Torres-Novoa y Hurtado-Nery, 2012). Además, altas concentraciones de Ca^{2+} disminuyen la absorción del Fe^{2+} , puesto que este ion participa en la regulación de los fluidos intra e intercelulares (Flik *et al*, 1995). En la tabla 5, se observa que el Ca^{2+} no presentó diferencias entre las especies, mientras que en el Fe^{2+} la mayor liberación de este ion la presentó *O. sp*, seguida por *P. brachypomus* y por último *C. carpio*, lo cual pudo ser ocasionado por los requerimientos de este mineral para cada una de las

especies, presentando *C. carpio* una de las mayores demandas de este nutriente de 130 mg/K, aunque aún no se conocen las necesidades para las otras especies (Santosh, 2003; Vásquez, 2004).

En cuanto al Mn^{2+} se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las especies evaluadas: $176.20 \pm 0.18 \mu\text{g/L}$ para *P. brachypomus*, $230.94 \pm 0.07 \mu\text{g/L}$ para *O. sp* y $234.82 \pm 0.10 \mu\text{g/L}$ para *C. carpio* (Tabla 5). En el caso de *O. sp*, los valores obtenidos de este ion, son mayores a lo reportado por Catarina *et al* (2011) con concentraciones de $3.88 \pm 2.03 \mu\text{g/L}$, $6.00 \pm 3.29 \mu\text{g/L}$ y $0.70 \pm 0.01 \mu\text{g/L}$. De igual manera ocurrió con la especie *C. carpio*, al comparar los resultados con los de Martins *et al*, (2009a), se evidenció que la concentración es aproximadamente 47 veces mayor para la tasa de recambio bajo ($5.00 \pm 1.00 \mu\text{g/L}$) y 156 veces para la tasa de recambio alto ($1.50 \pm 0.05 \mu\text{g/L}$), estas diferencias pueden ser explicadas por la frecuencia en los recambios en los SCR, puesto que en el presente trabajo se realizaban mensualmente, en cambio en los trabajos de Catarina *et al* (2011) y Martins *et al*, (2009a) los cambios de agua se realizaban diariamente, lo que ocasionaba una mayor dilución de los minerales en los SCR. Además, según Vásquez (2004) es posible que el alimento suministrado en el presente trabajo contuviera una alta proporción de ingredientes de origen vegetal en especial soya quien aporta 30.6 mg/Kg de alimento siendo una de las materias primas con mayor contenido de Mn^{2+} y de las más utilizadas en el país.

Tabla 5. Dinámica de nutrientes durante el cultivo de tres especies. Cada valor representa el promedio, \pm la desviación estándar. Letras diferentes muestran diferencias significativas con $P < 0.05$, minúsculas: comparaciones a través del tiempo, mayúsculas: diferencias entre las especies.

	Mes	Biomasa por sistema (kg)	N mg/L (NAT+NO ₃ ⁻)	K ⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Fe ²⁺ µg/L	Mn ²⁺ µg/L
<i>P. brachypomus</i>	1	0.43 \pm 0.04 a	9.53	30.97 \pm 2.39 a	23.58 \pm 5.04 a	30.00 \pm 0.02 a	10.00 \pm 0.03 a
	2	1.36 \pm 0.07 b	-	20.88 \pm 4.04 b	20.62 \pm 5.57 a	39.33 \pm 0.03 b	20.00 \pm 0.02 b
	3	1.42 \pm 0.00 c	7.30	20.94 \pm 5.69 bc	18.91 \pm 1.67 ab	36.00 \pm 0.02 c	488.89 \pm 0.42 c
	4	2.60 \pm 0.03 d	6.48	14.48 \pm 3.02 c	20.70 \pm 0.98 ab	25.83 \pm 0.02 d	206.67 \pm 0.42 d
	5	3.23 \pm 0.17 e	6.38	16.47 \pm 1.68 c	17.39 \pm 1.17 b	24.17 \pm 0.01 e	231.67 \pm 0.22 e
	6	4.34 \pm 0.18 f	9.27	19.37 \pm 4.41 bc	21.15 \pm 2.08 ab	22.50 \pm 0.01 f	100.00 \pm 0.11 f
<i>O. sp</i>	1	1.14 \pm 0.02 a	11.47	21.23 \pm 4.24 a	18.63 \pm 2.42 a	40.83 \pm 0.02 a	183.33 \pm 0.08 a
	2	2.62 \pm 0.05 b	10.52	28.00 \pm 7.27 ab	17.98 \pm 1.19 a	43.33 \pm 0.03 b	333.33 \pm 0.27 b
	3	5.87 \pm 0.25 c	10.74	30.70 \pm 7.70 b	21.88 \pm 1.42 a	69.17 \pm 0.03 c	146.67 \pm 0.16 c
	4	9.93 \pm 0.76 d	8.55	28.10 \pm 8.04 ab	26.93 \pm 3.28 b	75.33 \pm 0.03 d	283.33 \pm 0.16 d
	5	15.05 \pm 0.99 e	6.11	27.38 \pm 7.27 ab	22.51 \pm 7.41 ab	55.83 \pm 0.03 e	301.67 \pm 0.13 e
	6	19.49 \pm 0.99 f	7.60	33.32 \pm 2.90 b	19.99 \pm 3.24 a	40.00 \pm 0.03 f	137.33 \pm 0.07 f
<i>C. carpio</i>	1	0.19 \pm 0.01 a	-	18.83 \pm 4.77 a	17.10 \pm 4.04 a	27.50 \pm 0.02 a	16.67 \pm 0.02 a
	2	0.34 \pm 0.00 b	9.38	21.81 \pm 8.43 ab	21.75 \pm 2.10 a	29.17 \pm 0.05 b	505.00 \pm 0.29 b
	3	0.57 \pm 0.05 c	9.02	21.07 \pm 3.65 ab	18.76 \pm 1.52 a	29.33 \pm 0.02 b	208.89 \pm 0.18 c
	4	0.98 \pm 0.02 d	7.78	24.67 \pm 3.98 ab	17.13 \pm 1.26 a	34.17 \pm 0.02 c	383.33 \pm 0.18 d
	5	1.79 \pm 0.06 e	6.65	28.80 \pm 3.28 b	21.75 \pm 2.07 a	37.50 \pm 0.03 d	80.00 \pm 0.09 e
	6	3.36 \pm 0.16 f	10.36	31.57 \pm 9.06 b	25.88 \pm 3.23 b	40.66 \pm 0.02 e	215.00 \pm 0.06 f
<i>P. brachypomus</i>	PROM	-	7.79 \pm 1.51 A	20.52 \pm 3.77 A	20.39 \pm 5.47 A	29.64 \pm 0.01 A	176.20 \pm 0.18 A
	MAX	-	9.53	30.97	23.58	39.33	488.89
	MIN	-	6.38	14.48	17.39	22.50	10.00
<i>O. sp</i>	PROM	-	9.17 \pm 2.09 A	28.12 \pm 2.80 B	21.32 \pm 2.26 A	54.08 \pm 0.01 B	230.94 \pm 0.07 B
	MAX	-	10.74	33.32	26.93	75.33	333.33
	MIN	-	6.11	21.23	17.98	40.00	137.33
<i>C. carpio</i>	PROM	-	8.64 \pm 1.45 A	24.46 \pm 2.55 C	20.40 \pm 1.06 A	33.06 \pm 0.01 C	234.82 \pm 0.10 C
	MAX	-	10.36	31.57	25.88	40.66	505.00
	MIN	-	6.65	18.83	17.10	27.50	16.67

Crecimiento de *P. brachypomus*

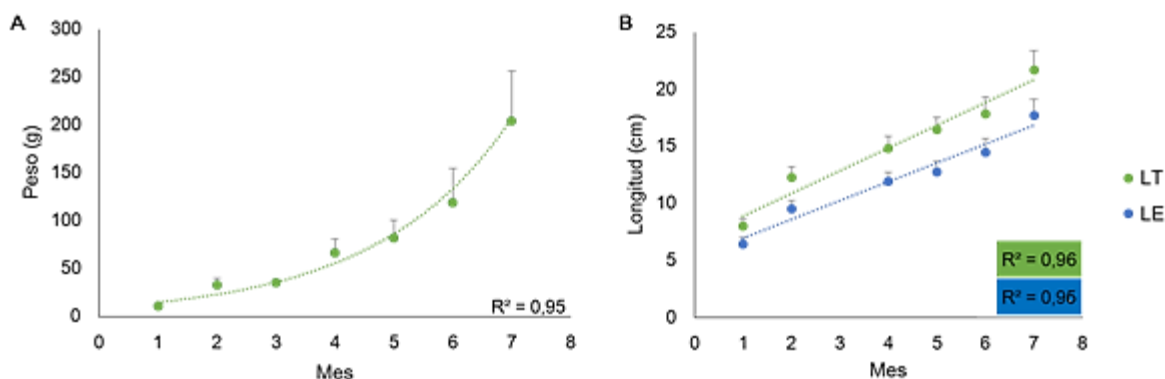


Figura 3. Crecimiento de *P. brachypomus* por un periodo de seis meses. Cada valor representa un valor promedio, \pm la desviación estándar. LT: Longitud Total y LE: Longitud Estándar.

Para *P. brachypomus* se encontró que el peso, longitud total y estándar (Figura 3) se ajustaron mejor al modelo de crecimiento exponencial (R^2 : 0.95, R^2 : 0.96 y R^2 : 0.96 respectivamente). En el trabajo realizado por Uchoi *et al* (2015) utilizaron estanques circulares de cemento de 380 L, por un periodo de 4 meses, con un peso inicial de 2.60 ± 0.55 g y un peso final de 24.36 ± 6.12 g, evaluando cinco estrategias diferentes de cultivo y comparando el monocultivo de *P. brachypomus* vs. el policultivo de este pez con *Catla catla*, *Labeo rohita* y *Cirrhinus cirrhosus*, además de variar el tipo de alimento en estanques fertilizados vs. alimento comercial al 30% PC, manejando una temperatura entre 26.6 ± 0.57 - 29.6 ± 0 °C, pH de 7.00 ± 0 - 8.83 ± 0.28 , NH_4^+ de 0.00 ± 0.00 - 1.11 ± 0.44 mg/L, KH entre 71.53 ± 1.23 - 121.53 ± 4.0 mg/L y OD de 4.23 ± 0.30 - 5.50 ± 0.41 mg/L, obteniendo para todos los tratamientos una GP de 21.56 ± 5.80 g, la cual es mucho menor a la obtenida en este trabajo comparando solo los cuatro primeros meses evaluados, mientras que la TCE de 1.85 ± 0.25 g/día y S de $91.77 \pm 7.76\%$ fueron similares a las reportadas por Uchoi *et al* (2015).

Vásquez-Torres *et al* (2011) quienes determinaron el requerimiento proteico en la dieta de juveniles de *P. brachypomus*, evaluando seis alimentos isoenergéticos de 3080 kcal/K con PC del 16, 20, 24, 28, 32 y 36% durante 60 días. Los individuos iniciaron con un peso de 15.52 ± 0.30 g en tanques de 500 L, donde se sembraron 20 peces en cada uno, manteniendo la temperatura de 26 ± 1.2 °C, pH de 7.3 ± 0.2 , KH entre 40 - 80 mg/L, NAT < 0.02 mg/L y el OD > 4.7 mg/L. Al final concluyeron, que la dieta con 32% PC presentó el crecimiento máximo en términos de GP de 46.5 ± 5.01 g, TCE de 2.25 ± 0.15 g/día y FCA de 1.1 ± 0.03 g/g de alimento, mayores a las obtenidas en el presente trabajo. Teniendo en cuenta que los parámetros descritos son similares en los estudios, las diferencias posiblemente

fueron causadas por el alimento, aunque cabe resaltar que en el presente estudio no se contó con un bromatólogo, además la dieta estaba formulada para otra especie, *O. sp* la cual es una especie de hábito alimenticio omnívoro, mientras que *P. brachypomus* es herbívora con tendencia a la frugivoría, por lo tanto es probable que la dieta halla carecido en algunos nutrientes esenciales necesarios para el adecuado crecimiento de *P. brachypomus* (Vásquez-Torres *et al* , 2011).

En el estudio realizado por Malpica *et al* (2014) evaluaron la relación entre el crecimiento compensatorio de alevinos de *P. brachypomus* durante diferentes periodos de restricción alimenticia, los cuales fueron, T1: grupo control donde hubo alimentación diaria, T2: restricción por una semana, T3: restricción alimenticia durante dos semanas, T4: restricción alimenticia por tres semanas y T5: restricción alimenticia por cuatro semanas. Emplearon 4559 individuos, con un peso inicial de 17.4 ± 6.1 g, los cuales fueron sembrados en estanques de 500 L a una densidad de 0.60 g/m^2 y a los cuales se les suministró alimento al 30% PC. En cuanto al FCA Malpica *et al* (2014) reportaron en el T1 un valor de 1.08 ± 0.50 , similar a lo obtenido en presente trabajo de 1.12, lo cual demuestra que un manejo adecuado de las condiciones en SCR permite un incremento de la densidad (40 peces/m^3) sin afectar la asimilación del alimento y su crecimiento.

Crecimiento de *O. sp*

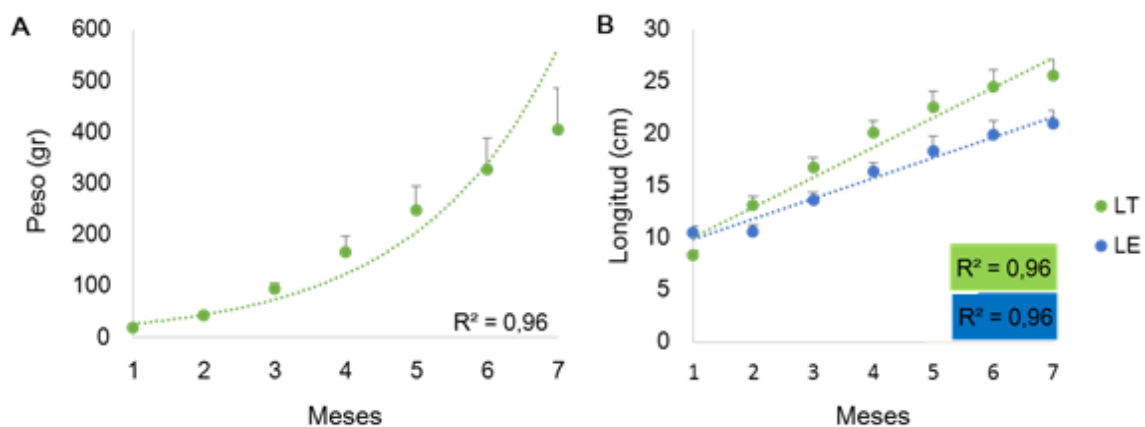


Figura 4. Crecimiento de *O. sp* por un periodo de seis meses. Cada valor representa un valor promedio, \pm la desviación estándar. LT: Longitud Total y LE: Longitud Estándar.

En el cultivo de *O. sp* se evidenció que el modelo lineal presentó un mejor ajuste a las variables de crecimiento evaluadas (Peso: $R^2:0.96$, longitud total: $R^2:0.96$ y longitud estándar: $R^2:0.96$) (Figura 4). dos Santos *et al.*, (2008) obtuvieron un mejor ajuste al modelo exponencial, mostrando que el

incremento en peso fue mayor en relación a la edad de los individuos, los cuales iniciaron con un peso de 1.5 g sembrados en tanques de 500 L, donde evaluaron el crecimiento de *O. sp.*, en relación a la temperatura de cultivo (22, 28 y 30°C). Esta diferencia en el modelo de crecimiento de ambos trabajos pudo ser causado por la talla inicial de los individuos, puesto que los estados tempranos de los organismos presentan una tasa de crecimiento mayor debido a que su metabolismo es acelerado y gran parte de los nutrientes son utilizados para incrementar su talla (Valvuela-Villareal y Vásquez-Torres, 2011; Torres-Mesa *et al*, 2015)

En cuanto a los parámetros productivos (Tabla 4), se obtuvo una GP: 396.56 g/ind, TCE: 1.71 g/día, FCA: 1.84 y S: 95.56%. Shnel *et al* (2002) trabajaron en SCR de cero recambio por un periodo de 331 días, donde los peces iniciaron con un peso de 28.4 g, a los cuales se les suministró alimento al 35% PC. Las variables fisicoquímicas obtenidas en este trabajo fueron las siguientes: temperatura entre 23 – 30°C, pH de 6.1 – 7.6, NAT de 4 mg/L y NO_2^- a 2 mg/L. Estos parámetros de cultivo permitieron obtener una GP de 472.4 g, TCE de 0.87 g/día y FCA de 2.03, mostrando tasas menores de crecimiento en comparación con el presente estudio, debido probablemente a las altas concentraciones de NAT y NO_2^- manejadas por Shnel *et al* (2002), puesto que estos compuestos son tóxicos para los peces generando efectos que van desde cambios en las funciones celulares, hasta problemas en el crecimiento y desarrollo de la especie (Ip y Chew, 2010)

Crecimiento de *C. carpio*

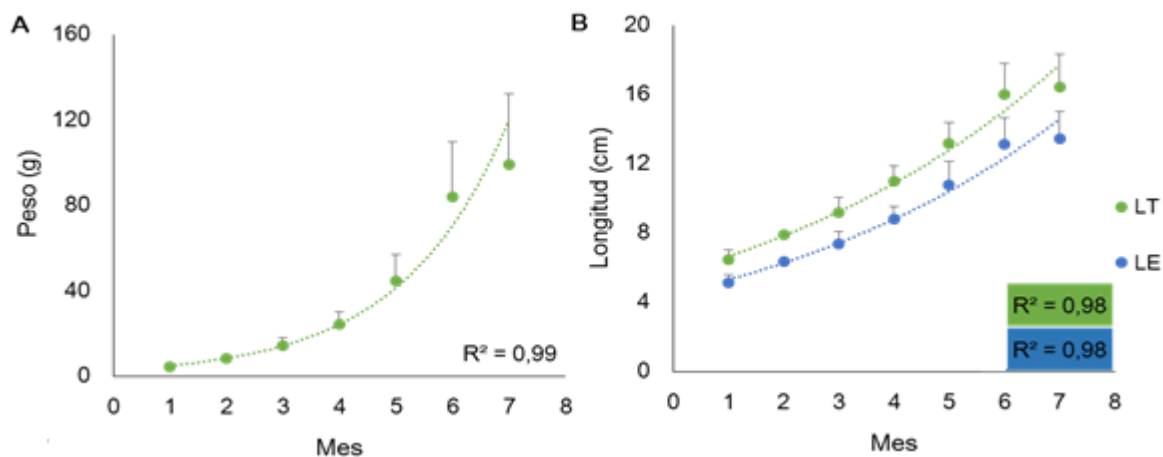


Figura 5. Crecimiento de *C. carpio* por un periodo de seis meses. Cada valor representa un valor promedio, \pm la desviación estándar. LT: Longitud Total y LE: Longitud Estándar.

El crecimiento de *C. carpio* presentó un mejor ajuste al modelo exponencial (Figura 5) para las tres variables evaluadas (Peso: $R^2:0.99$, longitud total: $R^2:0.98$ y longitud estándar: $R^2:0.98$), aun así, la especie durante los seis meses de cultivo mostró un menor crecimiento en comparación con lo reportado por Li *et al*, (2016b), quienes manejaron individuos con un peso inicial de 10.67 ± 0.01 g, y final de 73.86 g aproximadamente, lo cual produjo una GP cercana a 63.19 g/ind, TCE entre 3.24 a 3.36 g/día y FCA de 1.40 a 1.58, por un periodo de 59 días, mientras que en el presente estudio por un periodo de 90 días, la especie alcanzó un crecimiento similar de 14.27 ± 3.98 a 84.07 ± 25.68 g, una GP de 69.8 g/ind, TCE en 1.96 a 2.02 g/día y el FCA entre 2.08 – 4.53. Estas diferencias en las tasas de crecimiento y en la conversión del alimento, pudieron ser a causa de las dietas diseñadas en el trabajo de Li *et al* (2016b), donde se estimó el desempeño del crecimiento de los peces, cultivados en tanques de 130 L con una biomasa de 213.4 g a los cuales se les suministraron dietas con cantidades iguales de nitrógeno y lípidos al 34% de PC, las dietas evaluadas fueron las siguientes: dieta 1, donde se utilizó 100% a aceite de soya; dieta 2, fue 75% de soya y 25% con BSO (por sus siglas en inglés, aceites de larvas de mosca soldado); la dieta 3, contenía 50% de soya y de BSO; dieta 4, estaba compuesta 25% de soya y 75% de BSO, y la dieta 5: correspondía al 100% de BSO. Se puede apreciar que los lípidos estaban representados principalmente por BSO y de soya, los cuales contienen altos niveles ácido laurico y ácido linoleico, respectivamente. Estos dos ácidos grasos se clasifican entre los de cadena media, que se caracterizan por ser compuestos fisiológicamente activos, puesto que son utilizados principalmente como una fuente de energía reduciendo su acumulación en los organismos, por lo tanto, el uso de estas dietas posiblemente incremente la energía disponible para el crecimiento de los peces (Li *et al*, 2016b; Hur *et al*, 2017; Meital *et al*, 2017). Turchini *et al* (2009), han reportado que cambios de los ácidos grasos en la dieta puede resultar en diferencias en el crecimiento de las especies, posiblemente se deba a su capacidad de acumularse en el organismo, sin embargo, cabe aclarar que en el presente estudio se desconocen las materias primas del alimento y no se pudo realizar un estudio de ácidos grasos presentes en la dieta.

Tabla 6. Parámetros productivos de *P. brachypomus*, *O. sp* y *C. carpio*. Cada valor representa el promedio, \pm la desviación estándar. Las letras diferentes corresponden a diferencias significativas.

Parámetros productivos	Mes	<i>P. brachypomus</i>	<i>O. sp</i>	<i>C. carpio</i>
GP (g/ind)	1	20,76 \pm 0,81 a	25,16 \pm 1,87 a	3,77 \pm 0,09 a
	2	4,04 \pm 0,38 b	55,85 \pm 5,64 b	5,37 \pm 1,51 b
	3	29,78 \pm 7,48 c	58,39 \pm 4,51 b	11,46 \pm 0,19 c
	4	15,54 \pm 4,99 a	84,93 \pm 13,75 c	20,17 \pm 2,91 d
	5	29,50 \pm 4,39 c	72,07 \pm 20,11 bc	37,80 \pm 12,06 e
	6	94,86 \pm 21,39 d	97,47 \pm 18,09 c	14,83 \pm 14,74 abcd
TCE	1	3,62 \pm 0,30 a	2,82 \pm 0,16 a	1,98 \pm 0,06 a
	2	0,40 \pm 0,04 b	2,73 \pm 0,25 a	1,63 \pm 0,36 a
	3	2,02 \pm 0,39 c	1,54 \pm 0,13 b	2,02 \pm 0,15 a
	4	0,72 \pm 0,27 b	1,43 \pm 0,19 b	1,96 \pm 0,25 a
	5	1,04 \pm 0,16 d	0,86 \pm 0,24 c	2,00 \pm 0,57 a
	6	2,06 \pm 0,38 c	0,90 \pm 0,16 c	0,56 \pm 0,58 b
FCA (g/g)	1	2,71 \pm 0,10 a	1,06 \pm 0,08 a	4,08 \pm 0,09 a
	2	6,15 \pm 0,60 b	0,92 \pm 0,09 b	4,83 \pm 1,32 ab
	3	0,67 \pm 0,19 c	1,51 \pm 0,12 c	3,55 \pm 0,06 b
	4	1,79 \pm 0,69 d	1,08 \pm 0,16 a	2,08 \pm 0,31 c
	5	1,03 \pm 0,16 d	1,92 \pm 0,49 c	1,93 \pm 0,75 c
	6	0,87 \pm 0,20 d	1,64 \pm 0,32 d	11,26 \pm 12,47 abc
K	1	3,65 \pm 0,22 a	3,69 \pm 0,08 a	2,17 \pm 0,00 a
	2	3,44 \pm 0,00 a	3,60 \pm 0,15 a	3,54 \pm 0,15 b
	3	3,79 \pm 0,11 a	3,76 \pm 0,19 a	3,55 \pm 0,11 b
	4	3,98 \pm 0,10 a	4,21 \pm 0,10 b	3,68 \pm 0,07 c
	5	3,81 \pm 0,06 a	3,96 \pm 0,10 b	3,76 \pm 0,12 c
	6	3,61 \pm 0,08 a	4,08 \pm 0,04 b	4,22 \pm 0,19 d

Dinámica de nutrientes para la acuaponía

La acuicultura es una forma de producción que genera altos niveles de contaminación por medio de descargas de nutrientes al ambiente, lo cual ha promovido el desarrollo de tecnologías que permiten un mejor aprovechamiento de los recursos. La acuaponía se plantea a nivel mundial como una alternativa para disminuir el impacto negativo a través del uso de los desechos excretados de un sistema biológico (peces, principalmente) como nutrientes asimilables para el componente vegetal (Rakocy *et al*, 2006). Licamele (2009), concluyó en su trabajo que plantas cultivadas en acuaponía presentan rendimientos y calidad similar a los obtenidos en hidroponía, siempre y cuando se realicen

las enmiendas en los momentos apropiados teniendo en cuenta la fenología y fisiología de la planta. Por ello es importante hacer un adecuado seguimiento de las concentraciones de algunos nutrientes como son: N, PO₄²⁻, Mn²⁺ y Cu⁺, los cuales pueden llegar a ser producidos en los SCR en concentraciones similares a las proporcionadas en soluciones hidropónicas, mientras que otros nutrientes como el Fe²⁺, Ca²⁺ y K⁺ son liberados al sistema en cantidades menores a las requeridas por las plantas, por lo que regularmente deben ser suplementados en acuaponía (Rafiee y Saad, 2005; Suhl *et al*, 2016).

Tabla 7. Concentraciones de macro y micronutrientes en soluciones hidropónicas.

Nutriente	Soluciones hidropónicas ¹	Hoagland modificada ²	Solución hidropónica para fresa por estadio en invernadero ¹				
			Transplante	Antesis y primer fructificación	Segunda fructificación	Tercera fructificación	Cuarta fructificación
N (mg/L)	50 - 200	239	55 - 60	70 - 85	80 - 85	81 - 85	55 - 60
Ca (mg/L)	40 - 200	212	60 - 70	100	100	100	80
Mg (mg/L)	10 - 50	12	35 - 40	45	45	45	35
P (mg/L)	5 - 50	75	20 - 25	20 - 25	25 - 30	25 - 30	20 - 25
K (mg/L)	50 - 200	158	45 - 60	70 - 90	80 - 90	80 - 90	55 - 60
S (mg/L)	5 - 50	7	-	-	-	-	-
Fe (mg/L)	0.5 - 3.0	12	-	-	-	-	-
Mn (mg/L)	0.1 - 1.0	1	-	-	-	-	-

1. Silber y Bar-Tal, 2008

2. Zhang *et al*, 2017.

Para este trabajo, el Mn²⁺ se encontró entre 176.2±0.18 a 234.82±0.10 µg/L y el SO₄²⁻ 5.94±2.35 a 49.24±13.08 mg/L, concentraciones que son similares a lo reportado en hidroponía (Tabla 7). Lo anterior es conveniente teniendo en cuenta las importantes funciones que realizan estos minerales, por ejemplo; el Mn²⁺ es un micronutriente involucrado en diversos procesos fisiológicos, actúa también como un co-factor de varias enzimas implicadas en la fotosíntesis, participa en la biosíntesis de aminoácidos aromáticos y productos del metabolismo secundario. Por otro lado, el SO₄²⁻, hace parte de aminoácidos, proteínas, co-enzimas y metabolitos secundarios, además de participar en la producción de clorofila (Hawkesford *et al*, 2012; Broadley *et al*, 2012).

En cuanto al Fe²⁺, NO₃⁻, Ca²⁺ y K⁺, las concentraciones son menores a las presentes en las soluciones hidropónicas, como se muestra en la tabla 7 (Silber y Bar-Tal, 2008; Zhang *et al* 2017), lo cual concuerda con lo reportado por Rakocy *et al* (2006), Bernstein (2011), Nelson y Pade (2008). Aun así, en la acuaponía los nutrientes se producen de manera continua para el crecimiento de las plantas

por lo que no se evidencian deficiencias nutricionales de algunos de estos. No obstante, es habitual o común que en los SA se adicionen algunos compuestos, como hidróxido de potasio, hidróxido de calcio y quelato de hierro para suplir las necesidades de las plantas y ajustar el pH, por tal motivo es importante estudiar el balance o la relación planta-pece que permita mejorar el uso de nutrientes, disminuyendo la aplicación de fertilizantes (Rakocy, 2007; Nelson y Pade, 2008; Bernstein, 2011; Wongkiew *et al*, 2017). Por el contrario, en hidroponía se parte de una solución con altas concentraciones de minerales a partir de fertilizantes derivados principalmente de síntesis química, los cuales son asimilados por las plantas, disminuyendo los niveles de estos compuestos, por lo que es necesario preparar nuevamente otra solución nutritiva. Lo anterior ocasiona varios problemas: desperdicio o desecho de grandes volúmenes de agua y fertilizantes, ambientalmente promueve procesos de eutrofización, y finalmente genera mayores costos de producción (Holm, 2017). Además se ha comprobado que los SA pueden ser más productivos con respecto a los hidropónicos después de un año de funcionamiento, esto puede ser debido al aumento de redes tróficas por todos los organismos que interactúan en el sistema y a liberación de metabolitos que promueven el crecimiento y control de enfermedades en las plantas (Sommerville *et al*, 2014).

Tabla 8. Relación entre plantas, peces y alimento en SA.

Planta	No. de plantas	Pez	Ración diaria (g)	Porcentaje de PC	Autor
<i>Lactuca sativa</i>	25	<i>Oreochromis sp.</i>	60 - 100		Rakocy, 2007
<i>Lactuca sativa</i>			34		Ako, 2009a y 2009b
<i>Ipomoea aquatica</i>		<i>Clarias gariepinus</i>	15 - 42	32	Endut <i>et al</i> , 2010
<i>Origanum vulgare</i>	25	<i>Ciprinus carpio – Carassius auratus</i>	87 - 164	45	Cifuentes y Torres, 2012
<i>Lactuca sativa</i>	24	<i>Oreochromis sp.</i>	30	32	Imbachi, 2016
<i>Beta vulgaris var cicla</i>	25	<i>Oreochromis sp.</i>	30	32	Alturo, 2016
Plantas de follaje	25		40 - 50		Sommerville <i>et al</i> , 2014
Plantas de fruto	6 - 8		50 - 80		Sommerville <i>et al</i> , 2014

Cabe resaltar, que a pesar de haber mantenido concentraciones bajas en comparación con la hidroponía varios trabajos han demostrado que biomasa de peces entre los 3 a 5 kg por sistema son capaces de proporcionar la cantidad apropiada de nutrientes para producir 25 plantas/m² de lechuga, acelga, menta, albahaca, entre otras, realizando adiciones de quelato de hierro, hidróxido de calcio y de potasio (Ramírez *et al*, 2011; Cifuentes y Torres, 2012; Alturo, 2016; Imbachi, 2016).

Tabla 9. Área de cultivo y número de plantas de un SA, calculadas con la ración diaria de alimento.

Especie	Mes	Ración diaria (g)	Plantas de follaje		Plantas de fruto	
			Área de cultivo (m ²)	No. De plantas	Área de cultivo (m ²)	No. De plantas
<i>P. brachypomus</i>	1	90	3,00	75	7,50	45
	2	79	2,63	66	6,58	40
	3	106	3,53	88	8,83	53
	4	116	3,87	97	9,67	58
	5	120	4,00	100	10,00	60
	6	128	4,27	107	10,67	64
<i>O. sp</i>	1	43	1,43	36	3,58	22
	2	81	2,70	68	6,75	41
	3	140	4,67	117	11,67	70
	4	144	4,80	120	12,00	72
	5	210	7,00	175	17,50	105
	6	249	8,30	208	20,75	125
<i>C. carpio</i>	1	25	0,83	21	2,08	13
	2	39	1,30	33	3,25	20
	3	65	2,17	54	5,42	33
	4	66	2,20	55	5,50	33
	5	107	3,57	89	8,92	54
	6	106	3,53	88	8,83	53

A partir de la cantidad de alimento diario suministrado a los peces, se calculó el número y el área de plantas (Tabla 9) que se podrían mantener si los SCR se integran con un sistema hidropónico tomando los datos de referencia de Alturo (2016) y Sommerville *et al* (2014) (Tabla 8). Lo cual permitiría una producción máxima de 208 plantas de follaje en un área de 8.30 m² a una densidad de 25 plantas/m² o de 125 plantas de fruto en un área de 20.75 m² a una densidad de 6 plantas/m² en los sistemas manejados con *O. sp* con una ración diaria de alimento de 249 g, sin embargo, se debe tener en cuenta que se deben hacer las enmiendas correspondientes de Fe²⁺, Ca²⁺ y K⁺ para suplir los requerimientos nutricionales, principalmente a las plantas de fruto que tienen una mayor demanda de estos minerales.

CONCLUSIONES

1. En el cultivo de *P. brachypomus*, *O. sp* y *C. carpio* la dinámica de nutrientes mostró que entre los macronutrientes evaluados el NO_3^- presentó una mayor concentración, seguido por el K^+ y el Ca^{2+} ; mientras que los micronutrientes el Mn^{2+} fue superior al Fe^{2+} .
2. No se encontraron diferencias de las concentraciones de NO_3^- y el Ca^{2+} entre los cultivos de las tres especies.
3. Los niveles de K^+ y Fe^{2+} fueron mayores en el cultivo de *O. sp*, mientras que el Mn^{2+} presentó niveles más altos para *C. carpio*.
4. El crecimiento de *P. brachypomus* presentó un comportamiento exponencial y los parámetros productivos se encontraron dentro de los rangos adecuados para el desarrollo de la especie.
5. *O. sp* presentó un mejor ajuste al modelo de crecimiento lineal, además mostró un crecimiento significativamente mayor con respecto a las otras dos especies.
6. El modelo exponencial presentó un mejor ajuste al crecimiento de *C. carpio*, sin embargo, los individuos presentaron un bajo incremento en la talla, de acuerdo a lo descrito para esta especie.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Militar Nueva Granada, a la Vicerrectoría de Investigaciones y al programa de Maestría de Biología Aplicada por el apoyo en el desarrollo del proyecto CIAS 1457

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar F, Afanador-Téllez G y Muñoz-Ramírez A. 2010. Efecto del procesamiento de la dieta sobre el desempeño productivo de tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus* Var. Chitralada) en un ciclocomercial de producción. Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia, 57(2):104 - 118.
2. Ako H, Baker A. 2009a. Small-scale lettuce production with hydroponics or aquaponics. Sustainable Agriculture, SA-2. College of Tropical Agriculture and Human Resources. University of Hawaii at Manoa
3. Ako Hm, Baker A. 2009b. Nutrient fluxes in aquaponic systems. www.ctahr.hawaii.edu/mbbe/
4. Alatorres-Jacome O, Garcia F, Soto-Zarazua GM y Rico-Garcia E. 2012. Techniques to asses fish productivity in aquaculture farmers and small fisheries: an overview of algebraic methods. Journal of Applied Sciences, 12(9): 888 - 892.
5. Alturo CC. 2016. Crecimiento y producción de acelga (*Beta vulgaris* car cicla) roja y verde, bajo condiciones de cubierta plástica en un sistema acuapónico y uno de cama contenida. Trabajo de grado. Programa de Tecnología en Horticultura. Universidad Militar Nueva Granada. 33 p.
6. Badiola M, Mendiola D y Bostock J. 2012. Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. Aquaculture Engineering, 51: 26 - 35.
7. Bernstein S. 2011. Plants. En: Aquaponic Gardening: A step by step guide to raising vegetables and fish together. Ed: Bernstein S. Editorial: New Society Publishers, Canada. 153 – 171 pp.
8. Broadley M, Brown P, Cakmak I, Rengel Z y Zhao F. 2012. Function of nutrients: Micronutrients. En: Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Marschner P (ed). 191 - 248 pp, Tercera edición, Academic Press, San Diego, 651 p.
9. Buzby KM y Lin LS. 2014. Scaling aquaponics systems: Balancing plant uptake with fish output. Aquacultural Engineering, 63: 39 - 44.
10. Carrascal J, Torres-Mesa A, Hurtado-Giraldo H y Gómez-Ramírez E. 2016. Levante de carpa común (*Cyprinus carpio*) en sistemas cerrados de recirculación bajo condiciones de laboratorio. Revista Facultad de Ciencias Básicas, 12 (2): 124 – 135.
11. Christianson L, Lepine C, Tsukuda S, SAito K y Summerfelt S. 2015. Nitrate removal effectiveness of fluidized sulfur-based autotrophic denitrification biofilters for recirculating aquaculture systems. Aquaculture Engineering, 68: 10 - 18.
12. Cifuentes R, González J, Montoya G, Jara A, Ortiz N, Piedra P y Habit E. 2012. Relación longitud-peso y factor de condición de los peces nativos del río San Pedro (cuenca del río Valdivia, Chile). Gayana Especial, 75(2): 101 – 110.
13. Cifuentes ML y Torres AC. 2012. Evaluación del crecimiento de goldfish (*Carassius auratus*), carpa (*Cyprinus carpio*) y orégano (*Origanum vulgare*) en un sistemas acuapónico. Trabajo de grado. Programa de Biología Aplicada. Universidad Militar Nueva Granada. 81 p.
14. Colt J, Lamoureux J, Patterson RN y Rogers GL. 2006. Reporting standards for biofilter studies. Aquaculture Engineering, 34: 377 - 388.
15. Beveridge MCM y Little DC. 2008. The History of aquaculture in traditional societies. En: Ecological Aquaculture: The evolution of the blue revolution, Costa-Pierce BA (ed). 3 – 29 pp, Primera edición, John Wiley & Sons - Blackwell Science, Oxford, 400 p.
16. Davidson J, Good C, Welsh C y Summerfelt S. 2011. The effects of ozone and water exchange rates on water quality and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance in replicated water recirculating systems. Aquacultural Engineering, 44: 80 - 96.
17. Diver S. 2010. Aquaponics-integration of hydroponics with aquaculture. ATTRA, 1 – 8. <https://attra.ncat.org/attra-pub/download.php?id=56>.
18. Dos Santos VB, Yoshihara E, Fonseca RT y Reiz RV. 2008. Exponential Growth Model of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Strains Considering Heteroscedastic Variance. Aquaculture, 274(1): 96 – 100.
19. Eding EH, Kamstra A, Verreth JAJ, Huisman EA y Klapwijk A. 2006. Design and operation of trickling filters in recirculating aquaculture: A review. Aquaculture Engineering, 34(3): 234 - 260.

20. Edwards P. 2015. Aquaculture environment interactions: Past, present and likely future trends. *Aquaculture*, 447: 2 - 14.
21. Endut A, Jusoh A, Ali N, Wan Nik WB y Hassan A. 2010. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology*, 101: 1511 - 1517.
22. FAO. 1994. Entre la Acuicultura de los "Más Pobres" y la de los "Más Ricos". En: FAO Departamento de Pesca y Acuicultura. <http://www.fao.org/docrep/field/003/AB478S/AB478S00.htm#TOC>
23. FAO. 2014. The State of World Fisheries and Aquaculture. En: FAO Departamento de Pesca y Acuicultura. www.fao.org/3/a-i3720s.pdf
24. FAO. 2016a. Estadísticas de pesca y acuicultura. Producción mundial de acuicultura 1950-2014 (FishstatJ). En: FAO Departamento de Pesca y Acuicultura [en línea o CD-ROM]. Roma. Publicación 2016. <http://www.fao.org/fishery/statistics/software/fishstatj/en>
25. FAO. 2016b. El estado mundial de la agricultura y la alimentación: Cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria. En: FAO Departamento para la Alimentación y la Agricultura. www.fao.org/publications/sofa/2016/es/.
26. Flick G, Verboost PM y Bonga SEW. 1995. Calcium transport processes in fishes. *Fish Physiology*, 14: 317 - 342.
27. Hawkesford M, Horst W, Kichey T, Lambers H, Schjoerring J, Moller SI y White P. 2012. Functions of Macronutrients. En: Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Marschner P (ed). 135 - 189 pp, Tercera edición, Academic Press, San Diego, 651 p.
28. Hernández C, Gómez A y Hurtado H. 2010. Estudio preliminar de levante de juveniles de arawana plateada (*Osteoglossum bicirrhosum*) en sistemas cerrados de recirculación. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 6(1): 96 - 113.
29. Holm N. 2017. Why not organic hydroponics? <http://www.hydroponics.com.au/why-not-organic-hydroponics/>.
30. Honda H, Watanaba Y, Kikuchi K, Iwata N, Takeda S, Uemoto H, Furata T y Kiyono M. 1993. High density rearing of Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus* with a closed seawater recirculation system equipped with a denitrification unit. *Suisanzoshoku*, 41: 19 - 26.
31. Hvas M, Damsgaard C, Hog Gam LT, Thanh Hung DT, Jensen FB y Bayley M. 2016. The effect of environmental hypercapnia and size on nitrite toxicity in the striped catfish (*Pangasianodon hypophtalmus*). *Aquatic Toxicology*, 176: 151 - 160.
32. Hu Z, Lee JW, Chandran K, Kim S, Sharma K y Khanal SK. 2014. Nitrogen transformations in intensive aquaculture system and its implication to climate change through nitrous oxide emission. *Biosource Technology*, 130: 314 - 320.
33. Hu Z, Lee JW, Chandran K, Kim S, Brotto AC y Khanal SK. 2015. Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Biosource Technology*, 188: 92 - 98.
34. Hur SJ, Kim HS, Bahk YY y Park Y. 2017. Overview of conjugated linoleic acid formation and accumulation in animal products. *Livestock Science*, 195: 105 - 111.
35. Imbachi JF. 2016. Crecimiento de tres variedades de lechuga en un sistema acuapónico con tilapia roja en condiciones de invernadero. Trabajo de grado. Programa de Tecnología en Horticultura. Universidad Militar Nueva Granada. 32 p.
36. Ip YK y Chew SF. 2010. Ammonia production, excretion, toxicity, and defense in fish: a review. *Frontiers in physiology*, 1: 1 - 20.
37. Jensen FB. 2003. Nitrite disrupts multiple physiological functions in aquatic animals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 135: 9 - 24.
38. Kim SH, Kim JH, Park MA, Hwang SD y Kang JC. 2015. The toxic effects of ammonia exposure on antioxidant and immune responses in Rockfish, *Sebastes schlegelii* during thermal stress. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 40(3): 954 - 959.
39. Lennard W. 2012. Aquaponic system design parameters: Solids filtration, treatment and re-use. *Aquaponic Fact Sheet Series*, 1 - 10.

40. Li M, Gong S, Li Q, Yuan L, Meng F y Wang R. 2016a. Ammonia toxicity induces glutamine accumulation: oxidative stress and immunosuppression in juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 183 - 184: 1 - 6.
41. Li S, Ji H, Zhang B, Tian J, Zhou J y Yu H. 2016b. Influence of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae oil on growth performance, body composition, tissue fatty acid composition and lipid deposition in juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian). *Aquaculture*, 465: 43 – 52.
42. Licamele JD. 2016. Biomass production and nutrient dynamics in a aquaponics system. Trabajo de grado. Department of agriculture and Biosystems engineering. The University of Arizona. 172 p.
43. Malpica AM, Ramírez JA y Torres A. 2014. Evaluación de la Restricción Alimenticia sobre el Crecimiento Compensatorio en alevinos de Cachama Blanca (*Piaractus brachypomus*). *Revista Ciencia Animal*, (7): 59 – 74.
44. Martínez O, Gómez E y Hurtado H. 2011. Levante de goldfish (*Carassius auratus*) en sistemas cerrados de recirculación. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 7(2): 260 – 273.
45. Martins CIM, Pistrin MG, Ende SSW, Eding EH y Verreth JAJ. 2009a. The accumulation of substances in Recirculating Aquaculture Systems (RAS) affects embryonic and larval development in common carp *Cyprinus carpio*. *Aquaculture*, 291: 65 - 73.
46. Martins CIM, Ochola D, Ende SSW, Eding EH y Verreth JAJ. 2009b. Is growth retardation present in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* cultured in low water exchange recirculating aquaculture systems? *Aquaculture*, 298(1 - 2): 43 - 50.
47. Martins CIM, Eding EH, Verdegem MCJ, Heinsbroek LTN, Schneider O, Blancheton JP, Roque d'Orbcastel E y Verreth JAJ. 2010. New developments in recirculating systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquaculture Engineering*. 43: 83 – 93.
48. Martins CIM, Eding EH y Verreth JAJ. 2011. The effect of recirculating aquaculture systems on the concentrations of heavy metals in culture water and tissues of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Food Chemistry*, 126: 1001-1005.
49. Masser MP, Rakocy J y Losordo TM. 1999. Recirculating aquaculture tank production systems: Management of recirculating systems. *Southern Regional Aquaculture Center*, 452: 1 – 12.
50. Meital LT, Sandow SL, Calder PC y Russel FD. 2017. Abdominal aortic aneurysm and omega-3 polyunsaturated fatty acids: Mechanisms, animal models, and potential treatment. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids (PLEFA)*, 118: 1 - 9.
51. Nelson RL y Pade JS. 2008. *Aquaponic Food Production: Growing fish and vegetable for food and profit*. Editorial Nelson and Pade Inc, 121 p.
52. Pedersen LF, Suhr KI, Dalsgaard J, Pedersen PB y Arvin E. 2012. Effects of feed loading on nitrogen balances and fish performance in replicated recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, 338 - 341: 237 - 245.
53. Poleo G, Aranbarrio JV, Mendoza L y Romero O. 2011. Cultivo de Cachama Blanca en Altas Densidades y en Dos Sistemas Cerrados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(4): 429 – 437.
54. Rakocy JE, Masser MP y Losordo TM. 2006. *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics – Integrating Fish and Plant Culture*. Southern Regional Aquaculture Center, 454 <http://fisheries.tamu.edu/files/2013/09/SRAC-Publication-No.-454-Recirculating-Aquaculture-Tank-Production-Systems-Aquaponics-Integrating-Fish-and-Plant-Culture.pdf>
55. Rakocy J. 2007. *Aquaponics: Vegetable Hydroponics in Recirculating Systems*. En: *Recirculating Aquaculture Systems*. Timmons M y Ebeling J (Eds). 807 – 864 pp, Segunda Edición, Cayuga Aqua Ventures, 976 p.
56. Rafiee G y Saad CR. 2005. Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture*, 244: 109 – 118.
57. Ramírez LM, Pérez MM, Jiménez P, Hurtado H y Gómez E. 2011. Evaluación preliminar de sistemas acuapónicos e hidropónicos en cama flotante para el cultivo de orégano (*Origanum vulgare*: Lamiaceae). *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 7(2): 242 – 259.

58. Rojas-Tirado P, Pedersen PB y Pedersen LF. 2016. Bacterial activity dynamics in the water phase during start-up of recirculating aquaculture systems. *Aquaculture Engineering*, xxx: xxx - xxx.
59. Santosh PL. 2003. The minerals. En: *Fish nutrition*. Halver J y Hardy R (Eds). 259 – 308 pp, Tercera Edición, Academic press, San Diego, 500 pp
60. Schneider O, Sereti V, Eding EH y Verreth JAJ. 2005. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 32: 379-401.
61. Shnel N, Barak Y, Ezer T, Dafni Z y van Rijn J. 2002. Design and performance of a zero-discharge tilapia recirculating system. *Aquaculture Engineering*, 26(3): 191 - 203.
62. Silber A y Bartal A. 2008. Nutrition of substrate-grown plants. En: *Soilless culture, Theory and practice*. Raviv M y Lieth JH (Eds). 291 – 339 pp, Primera edición, Elsevier Science, 608 p.
63. Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A y Lovatelli A. 2014. Small-scale aquaponic food production. *Integrated fish and plant farming*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589, Roma, Italia, 262 pp.
64. Suhl J, Dannehl D, Kloas W, Baganz D, Jobs S, Gunther A y Schmidt U. 2016. Advance aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agricultural Water Management*, 178: 335 - 344.
65. Timmons M y Ebeling J. 2007. Biofiltration. En: *Recirculating Aquaculture*, Timmons M y Ebeling J (eds). 275 – 318 pp, Segunda Edición, Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, 975 p.
66. Torres-Mesa AC, Tovar-Bohórquez MO, Hurtado-Giraldo H y Gómez-Ramírez E. 2015. Excreción de nitrógeno amoniacal total a diferentes densidades de siembra de *Cyprinus carpio* en condiciones de laboratorio. *Orinoquía*, 19(1): 19 - 26.
67. Torres-Novoa DM y Hurtado-Nery VL. 2012. Requerimientos nutricionales para tilapia del nilo (*Oreochromis niloticus*). *Orinoquía*. 16(1): 63 - 68.
68. Turchini GM, Torstensen BE y Ng WK. 2009. Fish oil replacement in finfish nutrition. *Reviews in Aquaculture*, 1(1): 10 – 57.
69. Uchoi R, Shyama S, Golandaj A, Sreenath VR y Yadav RP. 2015. Growth potential of pacu, *Piaractus brachypomus* in different culture. *Approach*, 3(6): 8 – 13.
70. Valvueda-Villareal RD, Vásquez-Torres W. 2011. El peso corporal esta inversamente relacionado con la excreción de amonio en tilapia roja (*Oreochromis sp*). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 24(2): 191 - 200.
71. Vásquez W. 2004. Principios de nutrición aplicada al cultivo de peces. Primera edición. Editorial Juan XXIII Ltda. Villavicencio, Colombia, 101 pp.
72. Vásquez-Torres W, Pereira-Filho M y Arias-Castellano JA. 2011. Optimum dietary crude protein requirement for juvenil cachama *Piaractus brachypomus*. *Ciencia Rural*, 41(12): 2183 – 2189.
73. Wongkiev S, Hu Z, Chandran K, Woo LJ, Khanal SK. 2017. Nitrogen transformation in aquaponics systems: A review. *Aquaculture Engineering*, 76: 9-19.
74. Zhang L, Nawata M, De Boeck G y Wood CM. 2015. Rh protein expression in branchial neuroepithelial cells and the role of ammonia in ventilatory control in fish. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 186: 39 - 51.
75. Zhang S, Li M, Cheng J, Xu Z y Chen J. 2016. Response and environmental assessment of two Chinese conventional carps to water quality regulation in recirculating aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 74: 180 - 185.
76. Zhang J, Wang X y Zhou Q. 2017. Co-cultivation of *Chlorella* spp and tomato in a hydroponic system. *Biomass and Bioenergy*, 97: 132-138.
77. Zografos C, Goulden MC y Kallis G. 2014. Sources of human insecurity in the face of hydro-climatic change. *Global Environmental Change*, 29: 327 - 336.