



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

“Efecto de la Hiperoxigenación sobre la Calidad del Agua en un Sistema Biofloc para la Producción de Tilapia (*Oreochromis niloticus*)”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de:

Maestro en Ciencias Ingeniería en Biosistemas

Presenta

LQ. María de la Luz Sánchez Estrada

Dirigida por:

Dr. Juan Fernando García Trejo

Querétaro, Qro a junio de 2019.



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Efecto de la Hiperoxigenación sobre la Calidad del
Agua en un Sistema Biofloc para la Producción de
Tilapia (*Oreochromis niloticus*)

por

María de la Luz Sánchez Estrada

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-266695



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias Ingeniería en Biosistemas

“Efecto de la Hiperoxigenación sobre la Calidad del Agua en un Sistema Biofloc para la Producción de Tilapia (*Oreochromis niloticus*)”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias Ingeniería en Biosistemas

Presenta

LQ. María de la Luz Sánchez Estrada

Dirigida por:

Dr. Juan Fernando García Trejo

Dr. Juan Fernando García Trejo
Presidente

Dra. Ana Angélica Feregrino Pérez
Secretario

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio
Vocal

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa
Suplente

M en C. Leticia Félix Cuencas
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Junio, 2019.
México

RESUMEN

Incrementar la densidad de cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en la Tecnología BioFloc ha sido complicado para los acuicultores debido al consumo del oxígeno disuelto (OD) por los peces y por la comunidad microbiana presente, debido que la microbiota es parte esencial de la Tecnología BioFloc para fijar el amonio y por ende mantener los niveles de amonio y nitritos por debajo de 1 mg l⁻¹. El hecho de mantener la concentración de OD por encima de 4 mg l⁻¹ para la producción de tilapia y sobrevivencia del consorcio microbiano ha sido la principal limitante para aumentar la densidad de cultivo en la Tecnología BioFloc. El presente estudio evaluó el uso de una fuente de oxígeno al 90±3 % de pureza y otra fuente de aire en sistemas BioFloc para dos densidades de cultivo utilizando alevín de tilapia (*Oreochromis niloticus*) descendientes de Super macho. Cuatro tratamientos fueron evaluados en tanques con 200 l de agua. T1; aire y 45 alevines, T2; aire y 80 alevines, T3; oxígeno al 90±3 % de pureza y 45 alevines, T4; oxígeno al 90±3 % de pureza y 80 alevines. Los peces tenían un peso inicial de 2.04±0.54 g (media±DS). Las variables NO₂-N, NO₃-N, NH₃-N, PO₄³⁻, K⁺ y DQO se midieron semanalmente. El pH, la temperatura, el OD y los sólidos sedimentables (SS) se midieron diariamente, así como se realizaron biometrías cada semana.

Los resultados obtenidos del peso final individual del tratamiento T4 fue 50 % más respecto a T1, 35 % más respecto a T2 y 16% más respecto a T3. La supervivencia para los tratamientos T1 fue del 91 %, para T2 fue del 89 % y para T3 y T4 del 99 %. Se mejoró la calidad del agua en las variables de temperatura en los tratamientos T3 y T4 respecto los tratamientos T1 y T2. El pH mostró un decremento en los tratamientos T3 y T4, además de mantener las especies nitrogenadas tóxicas para los peces en valores seguros, por lo que este estudio sugiere aumentar la densidad de cultivo oxigenando con OD de alta pureza aplicado a la Tecnología BioFloc.

Palabras clave: Tecnología BioFloc, oxígeno de alta pureza, densidad de cultivo, Tilapia, Calidad de agua.

ABSTRACT

To increment the stocking density of tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Biofloc systems has been a difficult task that farmers have been dealing with along years. The main factor is that dissolved oxygen (DO) consumption by fish and the microbial community. It is important to point out that the microbiota is an essential part of the BFT to fix the ammonium and to keep the ammonium and nitrite levels below 1 mg l⁻¹. Keeping the DO concentration above 4 mg l⁻¹ for the tilapia production and to survival of microbiota has been the main limitation to increase the stocking density in BFT. The use of the oxygen at 90±3 % purity and another air source in biofloc systems were evaluated in this work. Two stocking densities of tilapia fingerlings (*Oreochromis niloticus*) were used. Four treatments were carried out in tanks with 200 l of water. T1; air and 45 fingerlings, T2; air and 80 fingerlings, T3; oxygen at 90±3% purity and 45 fingerlings, T4; oxygen at 90±3% purity and 80 fingerlings. The fish had an initial weight of 2.25±0.53 g mean±SD. The variables NO₂-N, NO₃-N, NH₃-N, PO₄³⁻, K⁺ and COD were analyzed weekly. The pH, temperature, OD and settleable solids (SS) were measured daily, as well as, the biometries were measured every week.

The results shows that the final weight of fish in treatment T4 was 50% higher in comparison with T1, around 35% more than T2 and 16% more than T3. The survival rate for T1 treatment was 91%, for T2 it was 89% and for T3 and T4 it was 99%. Moreover, there was an important improvement in water quality in several factors such as temperature (between the treatments T3/T4 and T1/T2), pH (noticeable decrement in the treatment T3/T4 in comparison with T1/T2) and nitrogen toxic values within the safety ranges. Supported on its results this investigation suggest the increment of stocking density by using high purity DO applied to BioFloc Technology.

Key words: BioFloc Technology, high purity oxygen, stocking density, Tilapia, water quality.

Esta tesis está dedicada a mi padre Narciso Sánchez, a mi esposo Aldo López y familia.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Autónoma de Querétaro por su programa de la maestría en ciencias Ingeniería en Biosistemas, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado durante el periodo de la maestría, Al cuerpo académico de bioingeniería, a los sinodales del presente proyecto empezando por mi director de tesis el Dr. Juan Fernando García Trejo, por permitirme participar en uno de sus proyectos de investigación, a la Dra. Ana Angélica Feregrino Pérez, Dra. Claudia Gutiérrez Antonio, Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa y a la M. en C. Leticia Félix Cuencas por su apoyo en la revisión del texto y sus atinados comentarios para mejorarlo.

Agradezco al laboratorio de Bioingeniería y especialmente a su equipo de trabajo, así como agradezco a mis compañeros y amigos comenzando con Hugo González Lara, Paola Putzu, Valeria Caltzontzin Rabell y Ruth Chávez Jaime por el apoyo incondicional al presente proyecto.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPITULO 1	11
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 <i>MOTIVACIÓN</i>	13
1.2 <i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</i>	16
CAPITULO 2	17
2. ANTECEDENTES	17
2.1 <i>TECNOLOGÍA BIOFLOC</i>	17
2.2 <i>CALIDAD DEL AGUA</i>	20
2.3 <i>FUENTES DE OXÍGENO Y SU IMPORTANCIA EN ACUICULTURA</i>	22
2.4 <i>TILAPIA (Oreochromis niloticus)</i>	26
2.4.1 Ciclo de Vida de la Tilapia	27
2.4.2 Sistemas de Cultivo.....	27
CAPITULO 3	29
3. HIPÓTESIS.....	29
CAPITULO 4	30
4. OBJETIVOS.....	30
4.1 <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	30
CAPITULO 5	31
5. MATERIALES Y MÉTODOS	31
5.1 <i>ESTABLECIMIENTO EXPERIMENTAL Y DISEÑO</i>	31
5.1.1 Sistema de aireación.....	31
5.1.2 Implementación del Sistema de Aireación	32
5.1.3 Diseño del Sistema Experimental	33
5.2 <i>OBTENCIÓN DEL MATERIAL BIOLÓGICO</i>	34
5.3 <i>APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA BIOFLOC</i>	34
5.3.1 Cálculos para la relación C:N 15:1	35
5.3.2 Reajuste de la cantidad de alimento suministrado a los peces.....	35
5.4 <i>ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA Y PRETRATAMIENTO DE LA MUESTRA</i>	37
5.4.1 Pretratamiento de la muestra	37
5.4.2 Medición de Temperatura, PH y Oxígeno Disuelto	37
5.4.3 Determinaciones de amonio, nitritos, nitratos, fosfatos, potasio y demanda química de oxígeno	38
5.5 <i>MEDICIONES BIOMÉTRICAS A LOS PECES</i>	39
CAPITULO 6	41
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
6.1 <i>Análisis de los datos Biológicos de los peces</i>	41
6.1.1 Índices de crecimiento.....	41
6.1.2 Crecimiento de alevín de Tilapia.....	42
6.1.3 Relación entre peso y longitud de los peces.....	43
6.2 <i>Análisis de la calidad del agua durante el experimento</i>	44
6.2.1 Comportamiento del OD durante el experimento	45
6.2.2 Comportamiento de la temperatura durante el experimento	46
6.2.3 Comportamiento del pH durante el experimento.....	47
6.2.4 Comportamiento del Amonio durante el experimento.....	48

6.2.5	Comportamiento de nitritos durante el experimento.....	49
6.2.6	Comportamiento de nitratos durante el experimento.....	50
6.2.7	Comportamiento de fosfatos durante el experimento	51
6.2.8	Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) durante el experimento.....	52
6.2.9	Comportamiento del potasio (K+) durante el experimento	53
6.2.10	Comportamiento de los Sólidos sedimentables (SS) durante el experimento	55
CAPITULO 7	56
1.	CONCLUSIONES	56
CAPITULO 8	57
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de los componentes del sistema SRA (Badiola et al., 2012).....	15
Figura 2. Esquema de la tecnología BFT para la formación de los flóculos bacterianos (Elaboración propia).....	18
Figura 3. Esquema de la calidad del agua en un periodo de 24 horas en transportación de tilapia con una densidad de cultivo de $182 \pm 2 \text{ kg m}^{-3}$ de tilapia. (Colt y Kroeger, 2013).	24
Figura 4. Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>) Fotografía tomada en la Universidad Autónoma de Querétaro (Campus Amazcala).	26
Figura 5. Esquema de los equipos y materiales de los sistemas de oxigenación y aireación. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 6. Esquema de la dimensión de cada estanque experimental. Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura 7. Esquema de la distribución de los tratamientos en los estanques.....	33
Figura 8. Esquema del establecimiento experimental de la Tecnología Biofloc. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 9. Esquema de un multímetro portátil, marca HACH, modelo HQ40D. Fuente: Catálogo HACH con # de producto HQ40D53000000.....	38
Figura 10. Esquema de la descripción de las medidas biométricas en la tilapia durante el muestreo. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 11 Esquema del comportamiento del peso individual de los peces (media \pm Error estándar)	43
Figura 12 Esquema del comportamiento de OD de los tratamientos durante el experimento	46
Figura 13 Esquema del comportamiento de la temperatura durante el periodo experimental	47
Figura 14 Esquema del comportamiento de pH de los tratamientos durante el experimento	48
Figura 15 Esquema del comportamiento del amonio durante el experimento	49
Figura 16 Esquema del comportamiento de los nitritos a partir de la semana 3.....	50
Figura 17 Esquema del comportamiento de los nitratos	51
Figura 18 esquema del comportamiento de los fosfatos.....	52
Figura 19 Esquema del comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	53
Figura 20 Esquema del comportamiento del potasio durante el experimento.....	54
Figura 21 Esquema del comportamiento de los sólidos sedimentables.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores asociados a la calidad del agua en sistemas BioFloc a diferentes densidades de cultivo (Sanchez-Estrada et al., 2018).	19
Tabla 2. Variables de la calidad de agua en sistemas BFT (Emerenciano et al., 2017).....	21
Tabla 3. Influencia del OD a diferentes concentraciones sobre el peso y la supervivencia. Elaboración propia	25
Tabla 4. El ciclo de vida de la Tilapia (Macías 2016).....	27
Tabla 5. Tipos de sistemas de producción acuícola (Barba et al., 2009).....	28
Tabla 6. Características de las sondas del modelo HQ40D Multi/2 Channels.	38
Tabla 7. Datos tomados del manual de Hach Company (2012).	39
Tabla 8 Índices de crecimiento de los peces (media \pm desviación estándar)	42
Tabla 9 Modelo ajustado peso -longitud total.....	44
Tabla 10 Calidad del agua durante el periodo experimental	44

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología BFT por sus siglas en inglés (*BioFloc Technology*) se posiciona como una alternativa para la producción acuícola. Esta tecnología puesta en marcha en Israel a finales del siglo XX e inicios del siglo XXI por su creador Yoram Avnimelech, se basa en aprovechar los desechos tóxicos de los peces principalmente $\text{NH}_3\text{-N}$ y $\text{NO}_2\text{-N}$ (Ebeling *et al.*, 2006). Esto se logra ajustando la relación carbono:nitrógeno a veinte partes por una (C:N 20:1) y así, el $\text{NH}_3\text{-N}$ es asimilado a biomasa microbiana como flóculos que sirven de alimento para los peces (Avnimelech, 1999). Las principales ventajas del uso de esta tecnología respecto a sistemas tradicionales y sistemas de recirculación acuícola es que no realiza recambios de agua durante el ciclo de producción, además disminuye la cantidad de alimento suministrado de un 30 a 80 % (Sanchez-Estrada *et al.*, 2018) e incrementa la rentabilidad de las operaciones (Luo *et al.*, 2014).

El éxito en la producción acuícola depende de la habilidad en el manejo de los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua para optimizar el crecimiento y la salud de los peces. Existen múltiples variables que influyen en la calidad del agua, pero afortunadamente pocas de ellas juegan roles decisivos. Estos parámetros son temperatura, sólidos sedimentables (SS) y pH, así como la concentración de oxígeno disuelto (OD), amonio (N-NH_3), nitritos (N-NO_2), dióxido de carbono (CO_2) y alcalinidad. Cada parámetro individualmente es importante, sin embargo la interrelación de todos los parámetros influyen en la salud y en la tasa de crecimiento de los peces (Boyd y S. Tucker, 1998). Respecto al suministro de O_2 , considerada como la principal causa de las pérdidas registradas en el cultivo de tilapia debido a que la concentración ideal de OD es de 5 a 6 mg l^{-1} (Iwama *et al.*, 1997), dos

escenarios han sido estudiados respecto a esta variable, el primero de ellos se ha experimentado una baja concentración de OD ($<3 \text{ mg l}^{-1}$) en producción de tilapia y se ha probado una afectación significativa en el crecimiento, el índice gonadosomático, el tamaño de los huevos y la fecundidad de la tilapia nilótica (Haug *et al.*, 2008) (Tran-Duy *et al.*, 2012). Por otro lado se ha estudiado que cuando la concentración se encuentra por encima de 8 mg l^{-1} el crecimiento de los peces es favorecido (Mallya, 2012),(Olsvik *et al.*, 2006), incluso en los estudios de Colt se sugiere suministrar oxígeno puro ya que las condiciones hiperóxicas pueden aumentar la tolerancia al amonio (Foss *et al.*, 2003), así como aumentar la densidad de cultivo (Colt y Watten, 1988).

La densidad de cultivo de tilapia varía de granja acuícola a granja acuícola, ya que depende de varios factores, entre ellos, disponibilidad y calidad de agua, fuente de oxígeno, espacio, capacitación del personal para manipular los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua, cantidad y calidad del alimento suministrado, incluso el tipo de sistema de producción (Badiola *et al.*, 2012). Por ejemplo, en sistemas convencionales de flujo continuo para 8 kg m^{-3} se necesita un recambio de agua de $1 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ (Qayyum Siddiqui *et al.*, 1991), lo cual lo hace un sistema insostenible con el medio ambiente, por otra parte se encuentran los sistemas de recirculación acuícola que depende de la tecnificación utilizada para reutilizar el agua que puede producir de 20 kg m^{-3} utilizando aire como fuente de oxígeno o hasta 120 kg m^{-3} utilizando oxígeno puro (Ebeling y Timmons, 2012) y por último los sistemas biofloc, que como producción sustentable sólo pueden cultivarse de 2 a 25 kg m^{-3} de tilapia (Sanchez-Estrada *et al.*, 2018), ya que necesita aireación continua para suministrar suficiente OD tanto para la comunidad microbiana como para los peces.

El objetivo del presente trabajo es proveer O_2 de alta pureza ($92\pm 3 \%$) a un sistema BFT, ya que a pesar de que se sabe que el OD de alta pureza favorece los rendimientos de producción acuícola, no se han reportado estudios aplicados a la

Tecnología BioFloc. Se llevaron a cabo cuatro tratamientos, utilizando alevines de tilapia (*Oreochromis niloticus*) descendencia de supermacho bajo la Tecnología BioFloc, variando las densidades de cultivo y la fuente de oxígeno disuelto. Los tratamientos T1, T2, T3 y T4 se describen a continuación. T1: 45 alevines de tilapia y T2: 80 alevines de tilapia, a ambos se les suministro aire como fuente de oxígeno; T3: 45 alevines de tilapia y T4: 80 alevines de tilapia con suministro de oxígeno al 93 ± 3 % de pureza como fuente de oxígeno.

Como resultado relevante, el peso final individual del tratamiento T4 fue 50 % más respecto a T1, 35 % más respecto a T2 y 16% más respecto a T3. La supervivencia para los tratamientos T1 fue del 91 %, para T2 fue del 89 % y para T3 y T4 del 99 %, estos resultados soportan las conclusiones de (Colt y Kroeger, 2013) donde sus resultados indican que la mortalidad incrementa en tratamientos con aire suministrado como fuente de OD. La calidad del agua se mejoró en cuanto a la variable de temperatura en los tratamientos T3 y T4 respecto los tratamientos T1 y T2. El pH mostró un decremento en los tratamientos T3 y T4, además de mantener las especies nitrogenadas tóxicas para los peces en valores seguros, por lo que este estudio sugiere aumentar la densidad de cultivo al utilizar OD de alta pureza en los sistemas BFT.

1.1 MOTIVACIÓN

La principal motivación para el desarrollo del presente trabajo fue incrementar la eficiencia de los sistemas de producción acuícola ya existentes, como es el sistema BFT para producción de tilapia, debido que es uno de los sistemas más prometedores para producir pescado de bajo costo por las cualidades que tiene al no hacer recambios de agua durante todo el ciclo de producción (Emerenciano *et al.*, 2017), además que puede disminuir la cantidad de alimento suministrado desde un 20 hasta un 80 % (Sanchez-Estrada *et al.*, 2018). Por lo que se pretende producir más en menos espacio al utilizar OD de alta pureza en lugar de aireación.

En segundo lugar se eligió la tecnología BFT por un lado al no hacerse recambios de agua se evita la liberación de efluentes contaminados que vayan a las aguas residuales o al medio ambiente sin un previo tratamiento y así contaminen los suelos con desechos orgánicos y compuestos tóxicos (Schwitzguébel y Wang, 2007), (Crab *et al.*, 2012), por otro lado debido al mal manejo de los antibióticos en la acuicultura, las bacterias patógenas se están volviendo resistentes a numerosos antibióticos y como resultado éstos ya no son efectivos en el tratamiento de enfermedades bacterianas, por lo que la tecnología biofloc constituye una posible medida alternativa para combatir las bacterias patógenas en la acuicultura (Crab *et al.*, 2012), (Defoirdt *et al.*, 2011).

En tercer lugar, se compara la Tecnología BioFloc con los Sistemas de Recirculación Acuícola (SRA), ya que ambas se consideran como una de las posibles soluciones sustentables y como oportunidades para seguir desarrollando la acuicultura en lugar de los sistemas convencionales de flujo continuo. Los países europeos como Reino Unido, Irlanda, Italia y Noruega han promovido los SRA (Badiola *et al.*, 2012) y varios países se están moviendo al SRA, por ejemplo, Las Islas Feroe, el 100% de su producción se realiza por SRA (Bergheim *et al.*, 2009).

Los SRA permiten un reciclado de agua de hasta un 90 a un 99 % de agua a través de la utilización de procesos diferentes para mantener la calidad del agua por medio de métodos físicos, químicos y biológicos, tal como se muestra en la Figura 1. La mayoría de las empresas que producen con SRA utiliza oxigenadores (alrededor de 88.2 % en Europa), lo que permite aumentar la densidad de cultivo, aunque también puede hacerse uso de aireadores, pero limita la densidad. Utilizar diferentes procesos en el SRA implica mayor energía, costo, conocimiento y capacitación para llevar a cabo cada operación unitaria (Badiola *et al.*, 2012).

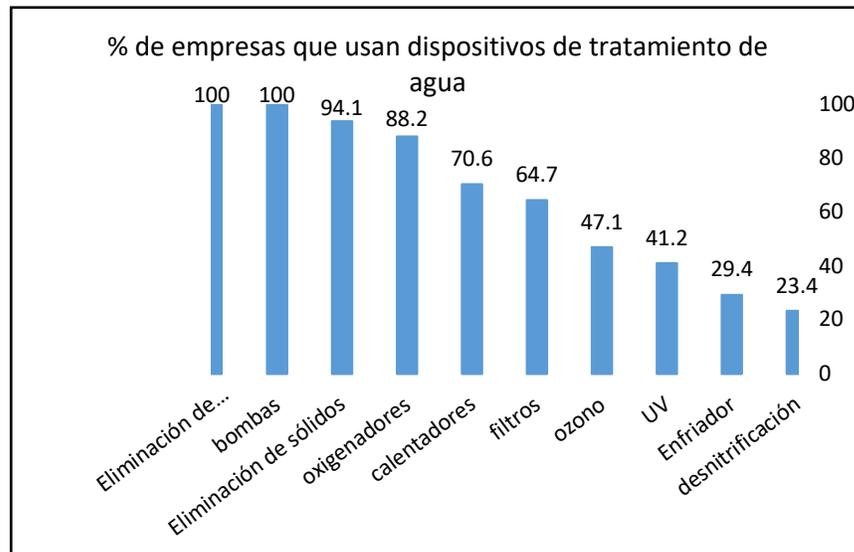


Figura 1. Esquema de los componentes del sistema SRA (Badiola et al., 2012).

Por otro lado, los sistemas BFT requieren principalmente suficiente O_2 lo que conduce a un gasto energético al igual que los SRA, no obstante, requiere conocimiento y capacitación, en cambio es de menor costo debido a que no se tratan los desechos de los peces si no que se favorece el crecimiento microbiano formando flóculos bacterianos para ser aprovechados como alimento para los peces. Al comparar la producción de tilapia en ambos sistemas, los resultados son mejores en BFT en cuanto a densidad final de cultivo y en el análisis parcial del costo de producción reveló que es más rentable para cultivar tilapia utilizando BFT que utilizando RAS (utilizando aireadores) (Luo et al., 2014).

Finalmente, el crecimiento demográfico que se espera para el año 2050 de 9 700 millones de personas requiere satisfacer la demanda de alimentos de alto valor nutricional para combatir la desigualdad e inseguridad alimentaria y la salud. Aunado otros motivos relevantes como el aumento de la competencia por recursos naturales como es el recurso hídrico, cambio climático, plagas y enfermedades (FAO, 2018).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La densidad de cultivo en sistemas biofloc se ha visto limitada principalmente por el tipo de sistemas de aireación utilizados que su función es satisfacer la demanda del consumo de O₂ tanto de los peces como de la microbiota presente, además de mantener la calidad de agua. Se sabe que en los SRA se puede aumentar la densidad de cultivo utilizando oxigenadores que suministran O₂ de alta pureza, ya que mejora la calidad de agua manteniendo los niveles de OD adecuados y por mayor tiempo, además de mantener el pH y la concentración de amoníaco a niveles adecuados. Lo que lleva a la siguiente pregunta ¿Tendrá un efecto benéfico en términos de producción y calidad del agua el uso de O₂ de alta pureza en sistemas biofloc?

CAPITULO 2

2. ANTECEDENTES

El sistema convencional de flujo continuo para producción de tilapia ocasiona una alta contaminación al medio ambiente (Collazos-Lasso y Arias-Castellanos, 2015). Debido a los efluentes descargados que contienen exceso de materia orgánica, compuestos nitrogenados, metabolitos tóxicos y elevadas tasas de requerimientos químicos y bioquímicos de oxígeno (Martinez-Porchas y Martinez-Cordova, 2012).

2.1 TECNOLOGÍA BIOFLOC

Una alternativa para los productores acuícolas es la tecnología biofloc por sus siglas en inglés biofloc technology (BFT) ya que es considerado un sistema responsable con el medio ambiente. Esta tecnología se basa en fijar el amonio disuelto en el agua por medio de comunidades bacterianas quimio/foto autótrofos y heterótrofas, ajustando el radio carbono:nitrógeno a veinte partes por una (C:N 20:1), de esta manera se asimila el amonio en biomasa microbiana, la cual floclula en agregados celulares que sirven como alimento para peces (Avnimelech y Kochba, 2009) y estos visualmente tienden a sedimentarse lentamente en el agua (Martinez-Porchas y Martinez-Cordova, 2012). Esta tecnología requiere dietas con contenido bajo proteico (Azim y Little, 2008) y una demanda de oxígeno elevada tanto para los peces como para satisfacer la demanda microbiológica (Emerenciano *et al.*, 2013). La fijación de amonio parte de los desechos orgánicos de los peces y del alimento que no es consumido principalmente. La combinación de lo anterior es continuamente reciclado y recirculado y logra un intercambio nulo o mínimo de agua (Avnimelech, 2007), ver Figura 2. El término “biofloc” se aplica a los cúmulos bacterianos que en general está constituido de un 60 a 70% de materia orgánica, incluyendo una mezcla heterogénea de microorganismos (microalgas, hongos, protozoos, nematodos, rotíferos, etc.) y de 30 a 40% de materia inorgánica como

coloide, cationes y células muertas (Younes, 2015).

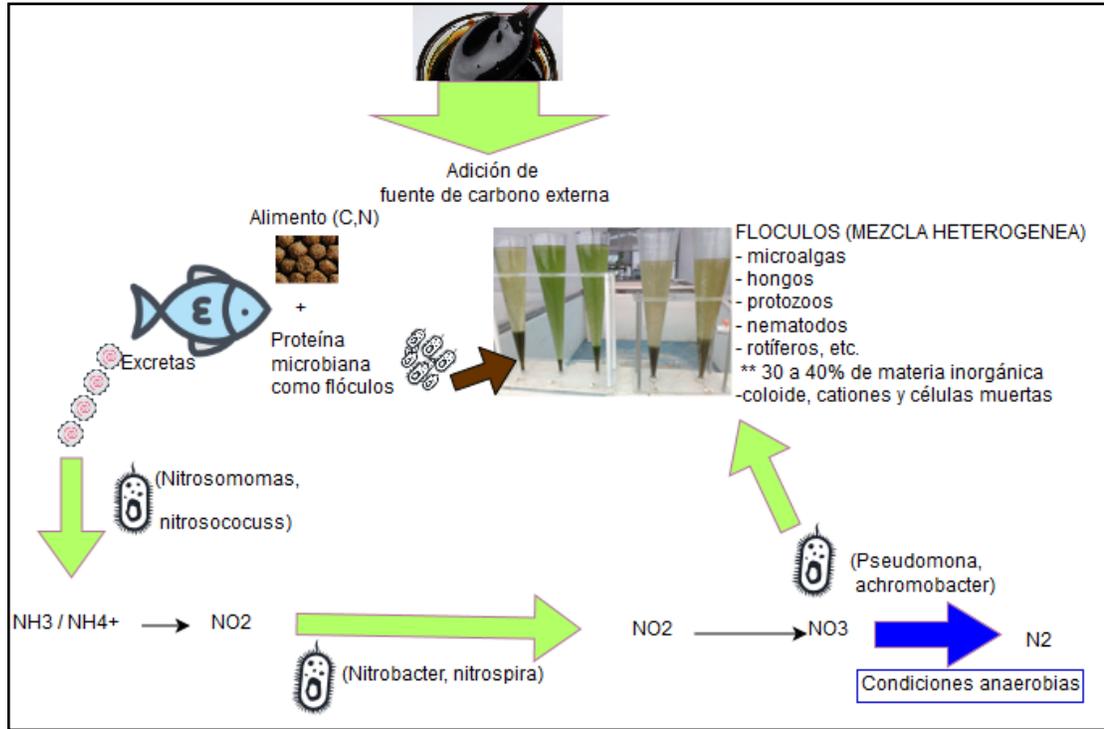


Figura 2. Esquema de la tecnología BFT para la formación de los flóculos bacterianos (Elaboración propia).

Los microorganismos juegan un papel clave en la tecnología BFT ya que mantienen la calidad del agua, principalmente por el control de la comunidad bacteriana sobre los microorganismos autotróficos como los subproductos nitrogenados que pueden ser absorbidos fácilmente por bacterias heterotróficas (Crab *et al.*, 2012). Las principales funciones de los microorganismos en los sistemas biofloc son: 1) Mantener la calidad del agua mediante la absorción de compuestos nitrogenados que generan proteínas microbianas "in situ". 2) Disminuir los costos de alimentación, ya que nutre a los peces utilizando a los flóculos como alimento y 3) competir entre patógenos (Emerenciano *et al.*, 2017), además que se ha comprobado la contribución de los flóculos microbianos contribuye cerca del 50% del requerimiento de proteína de pescado (Avnimelech, 2007). Por lo anterior el biofloc es considerado

la nueva "revolución azul".

Para garantizar una aplicación adecuada de la tecnología BFT, se han hecho estudios diferentes con fuentes de carbono orgánico, variando la relación C:N, el contenido proteico en el alimento y la cantidad de alimento suministrado de acuerdo a la biomasa total del pez, tal como es mostrado en la Tabla 1 para evaluar las mejores condiciones de crecimiento de tilapia.

Tabla 1. Factores asociados a la calidad del agua en sistemas BioFloc a diferentes densidades de cultivo (Sanchez-Estrada et al., 2018).

<i>Especies</i>	<i>Densidad de cultivo (Kg m⁻³)</i>	<i>Alimento suplementado de acuerdo a la biomasa total (%)</i>	<i>Contenido proteico en el alimento (%)</i>	<i>Fuente de carbono</i>	<i>Relación C:N</i>	<i>NO₂-N (mg l⁻¹)</i>	<i>NH₃-N (mg l⁻¹)</i>	<i>TAN (mg l⁻¹)</i>	<i>Peso diario ganado (g day⁻¹)</i>	<i>Supervivencia (%)</i>
<i>O. niloticus</i>	2.66	7.15	45	Melaza	15:1	7.03±10.61	-	1.17±3.50	0.67±0.01	80.00±17.43
<i>O. niloticus</i>	2.66	6	42	Melaza	15:1	5.94±10.59	-	0.73±2.02	0.57±0.02	81.33±12.85
<i>O. niloticus</i>	2.66	4	40	Melaza	15:1	8.14±13.65	-	0.73±2.69	0.61±0.02	80.00±10.58
<i>O. niloticus</i>	8.6	3	45	Melaza	10:1	0.77±0.90	0.18±0.06	-	1.09±0.16	94.60±2.03
<i>O. niloticus</i>	8.6	3	45	Melaza	12.5:1	0.83±0.90	0.18±0.06	-	1.03±0.14	94.60±2.03
<i>O. niloticus</i>	8.6	3	45	Melaza	15:1	0.97±1.14	0.19±0.06	-	1.07±0.13	94.60±2.03
<i>O. niloticus</i>	8.6	3	45	Melaza	17.5:1	0.74±0.84	0.19±0.06	-	0.97±0.12	94.60±2.03
<i>O. niloticus</i>	8.6	3	45	Melaza	20:1	0.94±1.13	0.19±0.06	-	0.95±0.11	94.60±2.03
<i>O. niloticus x O. aureus</i>	16	2	20	Melaza	16.6:1	-	-	-	2.22	100
<i>O. niloticus x O. aureus</i>	16	2	30	Melaza	16.6:1	-	-	-	1.63	97
<i>O. niloticus</i>	21	3	42	Melaza	20:1	0.39±0.25	0.30±0.10	-	3.63±0.07	95.67±0.02
<i>O. niloticus</i>	21	3	42	Melaza	20:1	0.36±0.21	0.39±0.17	-	3.64±0.06	99.57±0.01
<i>Oreochromis sp.</i>	2	-	32	Melaza	15:1	0.00-2.09	-	0.01-1.13	1.16±0.10	97.78 ± 0.77
<i>Oreochromis sp.</i>	4	-	32	Melaza	15:1	0.00-3.32	-	0.14-0.75	0.83±0.12	97.78 ±0.77
<i>Oreochromis sp.</i>	8	-	32	Melaza	15:1	0.00-5.85	-	0.11-1.04	0.52	93
<i>O. niloticus x O. aureus</i>	21	3	30	Almidón	20:1	-	-	-	0.28	84
<i>O. niloticus x O. aureus</i>	23	4	23	Starch	20:1	-	-	-	0.27	>90
<i>O. niloticus</i>	2	3	-	Trigo	15:1	1.55±0.04	1.62 ± 0.06	-	-	100.0 ±0.00
<i>O. niloticus</i>	2	3	-	Salvado de arroz	15:1	1.37±0.11	1.61 ± 0.05	-	-	98.41 ±1.00
<i>O. niloticus</i>	2	3	20	-	15:1	1.02±0.20	1.18 ± 0.21	-	-	97.88 ±1.15
<i>O. niloticus</i>	2	3	30	-	15:1	1.14±0.20	1.30 ± 0.19	-	-	98.94 ±0.70
<i>O. niloticus</i>	0.66	-	45	Melaza	-	16.93	-	0.41	0.56	66.2

Especies	Densidad de cultivo (Kg m ⁻³)	Alimento suplementado de acuerdo a la biomasa total (%)	Contenido proteico en el alimento (%)	Fuente de carbono	Relación C:N	NO ₂ -N (mg l ⁻¹)	NH ₃ -N (mg l ⁻¹)	TAN (mg l ⁻¹)	Peso diario ganado (g day ⁻¹)	Supervivencia (%)
<i>O. niloticus</i>	0.66	-	45	Melaza	6:1	24.75	-	0.42	0.59	74.54
<i>O. niloticus</i>	0.66	-	45	Melaza	6:1	20.8	-	0.54	0.6	75.93
<i>O. niloticus</i>	0.66	-	45	Melaza	6:1	23.44	-	0.67	0.55	75
<i>O. andersonii</i>	4.6	1.5	35	Harina de maíz	-	3.51±0.79	-	3.8±0.4	-	83
<i>O. niloticus</i>	8.8	1.5	35	Harina de maíz	-	3.51±0.79	-	3.8±0.4	-	97
<i>O. niloticus</i>	8.8	1.5	35	Harina de maíz	-	3.51±0.79	-	3.8±0.4	-	80
<i>O. mossambicus</i>	12	1.5	35	Trigo	20:1	1 - 2.5	-	3 - 8	-	100
<i>O. niloticus</i>	12	1.5	24	Trigo	20:1	1 - 2.5	-	1 - 3	-	100

El principal objetivo del uso de la tecnología BFT, es mantener la calidad del agua en la producción de peces como principal factor para obtener un cultivo saludable, así pues, el manejo de estos factores depende aproximadamente un 70% el crecimiento de los peces (Díaz, 2003).

2.2 CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua está determinada por sus propiedades fisicoquímicas que juegan roles críticos para la supervivencia de los peces. Estas variables son temperatura, sólidos sedimentables (SS) y pH, así como la concentración de oxígeno disuelto (OD), amonio (N-NH₃), nitritos (N-NO₂), dióxido de carbono (CO₂) y alcalinidad. Cada parámetro individualmente es importante, sin embargo, la interrelación de todos los parámetros influyen en la salud y en la tasa de crecimiento de los peces (Boyd y S. Tucker, 1998). Una fuente de carbono externa al estanque cambia los parámetros fisicoquímicos del agua, por lo que esta tecnología exige algunos requerimientos que deben considerarse en la manipulación.

En primer lugar, se requiere de una aireación constante con concentraciones de oxígeno disuelto mayores a 5 mg l⁻¹ con el fin de satisfacer la demanda de oxígeno de los microorganismos, algas y peces (Hernández *et al.*, 2014). Es recomendable

manipular el pH un en rango de 6.8 a 8.0, para favorecer un buen funcionamiento de los ciclos biológicos dentro del sistema. Las bacterias toman como sustrato a los sólidos totales disueltos (STD) para adherirse, por lo que un rango de 250 a 540 mg l⁻¹ es recomendable, por el contrario, por encima de 540 mg l⁻¹ pueden obstruirse las branquias de los peces. La temperatura ideal de la tilapia para ser cultivada es de 26 a 30 °C (SAGYP, 1997). El nitrógeno total amoniacal es un producto proveniente de la excreción de las heces y orina de los peces, así como el alimento no consumido y la materia en descomposición, en consecuencia, se sugiere mantener el nitrógeno amoniacal y nitritos menor a 1 mg l⁻¹ puesto que son altamente tóxicos para los peces (Emerson *et al.*, 2011) (Perschbacher y Stickney, 2016). Como rutina diaria es conveniente mantener los parámetros de la calidad del agua en los rangos recomendados de las variables que determinan la calidad del agua para producir tilapia en BFT (Emerenciano *et al.*, 2017), mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables de la calidad de agua en sistemas BFT (Emerenciano et al., 2017).

Variable	Rangos observados (Ideal y/o normal)	Observaciones
OD	Por encima de 4 mg l ⁻¹	Para la correcta respiración y crecimiento de los peces, camarones y microbiota
Temperatura	28 a 30 °C	Además del pescado o camarón, temperaturas bajas (alrededor de 20 °C) podría afectar el desarrollo microbiano
pH	6.8 a 8	Valores menores a 7 es normal en BFT pero puede afectar el proceso de nitrificación
Salinidad	Depende de las especies cultivadas	Es posible generar BFT por ejemplo de 0 a 50 ppt
TAN	< 1 mg l ⁻¹ es el ideal	Los valores tóxicos son dependientes del pH
Nitrito	< 1 mg l ⁻¹ es el ideal	Parámetro crítico (difícil de controlar, se debe prestar atención por ejemplo en el nivel de proteína de alimentación, salinidad y alcalinidad)
Nitrato	0.5 a 20 mg l ⁻¹	En estos rangos generalmente no es tóxico
Ortofosfato	0.5 a 20 mg l ⁻¹	En estos rangos generalmente no es tóxico

Variable	Rangos observados (Ideal y/o normal)	Observaciones
Alcalinidad	> a 100 mg l ⁻¹	Altos valores de la alcalinidad puede ayudar a la asimilación del nitrógeno por las bacterias heterotroficas y el proceso de nitrificación por las bacterias quimioautotróficas.
Sólidos suspendidos	5 a 20 ml l ⁻¹ alevines de tilapia y de 20 a 20 para juveniles y adultos de tilapia	Altos niveles de sólidos suspendidos (medidos en el cono Imhoff) contribuirá para el consumo de OD por la comunidad heterotrófica y eclosión de las branquias.
STD	< 500 mg l ⁻¹	Altos niveles de STD contribuirá para el consumo de OD por la comunidad heterotrófica y eclosión de las branquias.

OD (Oxígeno disuelto); TAN (Nitrógeno total amoniacal por sus siglas en inglés "Total Ammonia Nitrogen"); STD (Sólidos totales disueltos).

2.3 FUENTES DE OXÍGENO Y SU IMPORTANCIA EN ACUICULTURA

El oxígeno disuelto es el tercer costo en inversiones acuícolas como sistema de aireación, por lo que se debe elegir muy bien qué tipo de aireación puede utilizarse para satisfacer la demanda de OD tanto de la microbiota como de los peces, además de ser el principal parámetro fisicoquímico que limita la productividad, debido a que afecta la supervivencia y el crecimiento de los peces (Iwama *et al.*, 1997). La mayoría de los acuicultores trabajan similarmente en rangos de 3 a 7 mg l⁻¹ para mantener la supervivencia de los organismos aeróbicos y peces, por lo que es esencial proporcionar suficiente aireación u oxigenación para satisfacer esta alta demanda de oxígeno y mantener la concentración de oxígeno a niveles seguros (Hargreaves, 2013) asimismo evitar mortalidades, enfermedades, baja eficiencia en conversión de alimento y poner en riesgo la calidad de agua (Perschbacher y Stickney, 2016).

En 1988 Colt afirma que el uso de oxígeno puro puede aumentar la capacidad de carga de un sistema de cultivo de peces (Colt y Watten, 1988) como se observa en la Figura 1, el 88 % de las empresas que producen peces, lo hacen bajo el Sistema de Recirculación Acuícola utilizando oxigenadores. Por otra parte, un estudio realizado por Foss en 2002 se encontró que por encima de 9.6 mg l⁻¹ de oxígeno disuelto, los peces crecen significativamente (Foss *et al.*, 2002). Pese al hecho de

manejar oxígeno líquido en un cultivo de peces que permite manejar mayor densidad de peces por metro cúbico de agua (Díaz, 2003) en 2013 Colt realizó un estudio para transporte de tilapia bajo condiciones de oxigenación, aireación y mezcla aire-oxígeno puro, observando que no existe diferencia significativa en la calidad de agua y la supervivencia de los peces inyectando oxígeno puro y mezcla de oxígeno-aire (Colt y Kroeger, 2013), por lo que este estudio sugiere la utilización de oxígeno de alta pureza que es de menor costo a diferencia del oxígeno puro, además da mayor fiabilidad que los aireadores o agitación mecánica.

En el transporte comercial de tilapia, no es raro que el oxígeno disuelto oscile entre 10 y 15 mg l⁻¹ durante la carga y 30-35 mg l⁻¹ al final del transporte (Colt *et al.*, 2011), estas concentraciones son de oxígeno puro ya que es separado de los gases de Nitrógeno y Argón presentes en el aire. Las presiones de gas totales están por debajo de la saturación (Colt *et al.*, 2011) de lo contrario si se utilizará O₂ suministrado por aireadores, la enfermedad de la burbuja aparece en los peces. Esta enfermedad es causada por un aumento en la presión del gas disuelto en el agua por encima de la presión ambiental (súper saturación), frecuentemente la causa es por la presión parcial del nitrógeno (Bohl, 1997). La agencia de protección ambiental de los Estados Unidos ha establecido una súper saturación del gas del 110 %, ya que una concentración más alta conduce a la enfermedad de la burbuja. En el caso de la tilapia el nivel de sobresaturación segura es entre 102 % y 106 %, arriba de 106% induce la mortalidad crónica (Saeed y A al-Thobaiti, 1997). Es importante mencionar que la solubilidad de los gases en el agua se ve afectada por la temperatura (Colt, 1986), salinidad y altitud (Swann, 1997). También se debe de tomar en cuenta que algunos subproductos del metabolismo del oxígeno son altamente tóxicos, por lo que deben evitarse niveles muy altos de oxígeno disuelto (> 25 mg l⁻¹), especialmente para huevos y larvas pequeñas (Colt, 2006).

Las afirmaciones anteriores de poder aumentar la densidad de carga utilizando oxígeno de alta pureza en un cultivo de peces está directamente relacionado con

que el OD de alta pureza tiene una influencia positiva en algunos de los parámetros más críticos de la calidad del agua, como es el pH y el amonio, lo que ayuda a disminuir la mortalidad de los peces. En la Figura 3 se puede observar la influencia del suministro de O₂ puro y en mezcla con aire y se muestra que no existe diferencia significativa al utilizar uno u otro sistema de oxigenación para los parámetros de pH y NH₃ ayudando a disminuir la concentración de éstos a diferencia de usar aire como fuente de oxígeno (Colt y Kroeger, 2013).

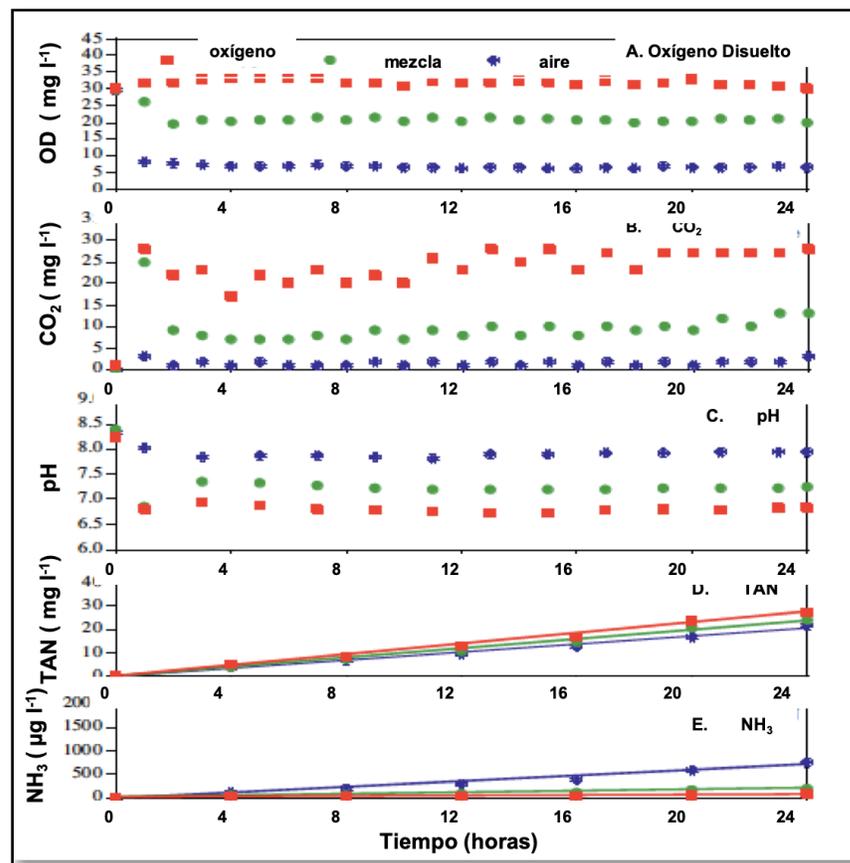


Figura 3. Esquema de la calidad del agua en un periodo de 24 horas en transportación de tilapia con una densidad de cultivo de $182 \pm 2 \text{ kg m}^{-3}$ de tilapia. (Colt y Kroeger, 2013).

En cuanto a la ganancia de peso y supervivencia de los peces, se puede observar

en la Tabla 3 la influencia de utilizar diferentes concentraciones de OD, observando una influencia positiva entre mayor sea la concentración de OD.

Tabla 3. Influencia del OD a diferentes concentraciones sobre el peso y la supervivencia. Elaboración propia

OD (mg l ⁻¹)	% supervivencia	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Condiciones relevantes de cultivo	Referencia
~ 30 a 35	99	-	-	Se utilizó oxígeno puro y como especie tilapia	(Colt y Kroeger, 2013)
~ 20	97	-	-	Se utilizó una mezcla oxígeno puro-aire y como especie tilapia	
~ 7	67	-	-	Se utilizó aire y como especie tilapia	
~ 4	-	~ 70	~ 95 ^b	Se utilizó aireación y como especie spotted wolffish	(Foss <i>et al.</i> , 2002)
~ 6	-	~ 70	~ 110 ^b		
~ 9.6	-	~ 70	~ 128 ^a		
~ 14.5	-	~ 70	~ 135 ^a		
7.39±0.61 ^a (6.0–9.74)	100	~ 100	~ 212 ^a	Se utilizó aireación con una Bomba Modelo Vertical y como especie tilapia en sistemas BFT	(Malpartida Pasco <i>et al.</i> , 2018)
6.85 ±0.44 ^b (5.71–9.4)	96	~ 100	~ 202 ^b	Se utilizó aireación con una Bomba Modelo Blower y como especie tilapia en sistemas BFT	

~ Significa una aproximación de los valores reales, debido de que los datos se obtuvieron visualmente de los gráficos de los artículos. OD (Oxígeno disuelto)

Cabe mencionar que no se han encontrado estudios de utilizar oxígeno disuelto de alta pureza en la tecnología BFT, pero en un estudio para tratar el agua en 2016 Cheng observa que al oxigenar el agua a 8 mg l⁻¹ antes de ser pasada por un biofiltro se remueven contaminantes con mayor facilidad como son NH₄⁺ - N, Fe total y Mn²⁺ (Cheng, 2015), lo que en este trabajo posiblemente ayudará a un sistema biofloc a controlar variables no deseables.

2.4 TILAPIA (*Oreochromis niloticus*)

El género de la Tilapia es de origen africano, pertenece a la familia de los ciclidos de aguas dulces y salobres (Díaz, 2003). Su nombre científico es *Oreochromis niloticus* (Linné y Salvius, 1758), ver Figura 4. El principal uso de la especie es para consumo humano con una amplia aceptación por los consumidores y por lo tanto ampliamente comercial (CONABIO, 1758).



Figura 4. Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fotografía tomada en la Universidad Autónoma de Querétaro (Campus Amazcala).

Las principales características de cultivo de tilapia son que crece rápidamente, su reproducción es bien conocida, es una especie resistente a enfermedades, factores físicos y químicos, acepta variedades de alimento y soporta una densidad alta de cultivo alcanzando pesos de 400 a 700 gramos en un periodo de 6 a 9 meses, según el sistema de cultivo empleado (Martínez, 2006). Se ha observado que en sistemas BFT es la especie que más se ha adaptado y con buenos rendimientos (Day *et al.*, 2016).

2.4.1 Ciclo de Vida de la Tilapia

El ciclo de la tilapia (Tabla 4) tiene cuatro etapas: Alevín, cría, juvenil y adulto (Macías, 2016). Durante las etapas de crecimiento, los machos crecen mejor en comparación con las hembras (Toguyeni et al., 1996), esto es debido a que el crecimiento de las hembras se ve afectado por el proceso de maduración sexual. El crecimiento por parte de los machos está correlacionado con el inicio de la espermatogénesis y en las hembras el crecimiento está dado por el proceso de la ovogénesis (Bhatta et al., 2013).

Tabla 4. El ciclo de vida de la Tilapia (Macías 2016).

Ciclo	Tiempo de vida	Tamaño (longitud)	Generalidades
Alevín	Etapa posterior al embrión y a la eclosión: 3 a 5 días	0.5 a 1.0. cm	Posee un saco vitelino en el vientre que es de dónde se alimenta después de la eclosión
Cría	5 días a 2 meses	1.0 a 5.0 cm	Comienzan a aceptar el alimento balanceado
Juvenil	2 meses de edad	5.0 a 10.0 cm	Son aptos para aceptar el alimento balanceado
Adulto	3.5 meses de edad	18 a 25 cm	Pesan entre 150 a 300 g

2.4.2 Sistemas de Cultivo

En la Tabla 5 se muestran los sistemas de cultivo de la tilapia según la densidad de siembra y el manejo. De los cuatro sistemas de cultivo (Mayorga Castañeda *et al.*, 2011) el sistema Intensivo y el sistema súper-intensivo son practicados principalmente por los productores industriales donde los recambios de agua, la aireación artificial, gasto de energía y el alimento balanceado, son de principal importancia, así como la infraestructura de producción de tilapia que puede ser en estanques, corrales, jaulas y tanques (FAO, 2014).

Tabla 5. Tipos de sistemas de producción acuícola (Barba et al., 2009).

Factores	Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo	Superintensivo
Densidad de siembra	Hasta 3 peces m ⁻³	De 4 a 15 peces m ⁻³	De 80 a 150 peces m ⁻³	Hasta 600 peces m ⁻³
Tecnificación del sistema	Embalses formados por la construcción de presas	Utilizan estanques de 0.5 a 3 hectáreas con recambios de agua del 15 al 30 % diario y se utilizan aireadores	Se utilizan estanques pequeños de 500 a 1000 m ² (recambios de agua de 250 a 600 l s ⁻¹)	Estanques de concreto o geomembrana de 100 a 500 m ³ y jaulas flotantes
Alimentación	Natural, producto de fertilizaciones	Suplementado con el 17 al 25 % de proteína	Balanceado entre 25 a 45 % de proteína	Balanceado entre 25 a 45 % de proteína
Producción	Hasta 500 kg ha ⁻¹ ciclo ⁻¹	Hasta 2.5 kg m ⁻³ ciclo ⁻¹	Hasta 30 kg m ⁻³ ciclo ⁻¹	Mayor a 30 kg m ⁻³ ciclo ⁻¹

CAPITULO 3

3. HIPÓTESIS

En un sistema de producción de tilapia bajo la Tecnología BioFloc y oxígeno disuelto al 92 ± 3 % de pureza suministrado se podrá aumentar la densidad de cultivo teniendo un rendimiento en términos de producción significativamente mayor con respecto a un sistema BFT aireado, además de mejorar la calidad del agua.

CAPITULO 4

4. OBJETIVOS

Implementar un sistema de hiperoxigenación en sistemas BFT para la producción de tilapia donde el oxígeno disuelto de alta pureza ($92\pm 3\%$) suministrado mantendrá la calidad del agua y se podrá aumentar la densidad de cultivo.

4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer el diseño experimental de los tratamientos.
- Implementar un sistema de oxigenación para los tratamientos a diferentes densidades de población.
- Implementar la Tecnología BioFloc bajo los tratamientos establecidos.
- Monitorear las variables fisicoquímicas de la calidad de agua y crecimiento de los peces.

CAPITULO 5

5. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro Campus Amazcala. El poblado de Amazcala pertenece al municipio del Marqués, Qro., el cual se localiza en el sector Suroeste del estado, entre los 20° 31' y 20° 58' de latitud Norte. Su longitud se encuentra entre los 100° 24' del Oeste a 1850 m sobre el nivel del mar. Colinda al Oeste con el municipio de Querétaro, al Norte con el estado de Guanajuato, el Este con el municipio de Colón, y al Sur con los municipios de Huimilpan y Pedro Escobedo. La temperatura media oscila entre los 18 °C y los 24 °C, con un clima predominante subtropical, templado semi seco.

El trabajo se realizó dentro del invernadero de peces de la Universidad Autónoma de Querétaro campus Amazcala con cubierta de material plástico blanco lechoso.

5.1 ESTABLECIMIENTO EXPERIMENTAL Y DISEÑO

5.1.1 Sistema de aireación

El oxígeno fue proporcionado para los tratamientos T1 y T2 por un aireador con un Compresor Active Aqua con potencia de 112 W, VOLT/FREQ: AC 110 ~120 V/60Hz con salida de 110 L min⁻¹ y presión > 0.035 Mpa. Para los tratamientos T3 y T4 se utilizó un generador de oxígeno marca TOPAZ que proporciona oxígeno al 93% ± 3% de pureza marca AirSep con un flujo de oxígeno de 0.31 m³hr⁻¹ y presión de 62 kPa y de requerimientos eléctricos 120 V~± 10%, 60 Hz, 5.0 A. Para los cuatro tratamientos se utilizaron como difusores de oxígeno barras de piedra porosa de 30 cm de largo y el oxígeno fue transportado por mangueras Jring de silicona con diámetro interno de 4 mm y 6 mm de diámetro externo (ver Figura 5).



Figura 5. Esquema de los equipos y materiales de los sistemas de oxigenación y aireación (Elaboración propia)

5.1.2 Implementación del Sistema de Aireación

Los estanques fueron llenados con 200 l de agua y se colocaron difusores de oxígeno a cada estanque (ver Figura 6). El aireador y oxigenador repartieron el O_2 a 6 tanques cada uno. Una vez que el O_2 se distribuyó homogéneamente en los estanques se tomaron medidas de la concentración de O_2 durante dos días para medir su comportamiento.

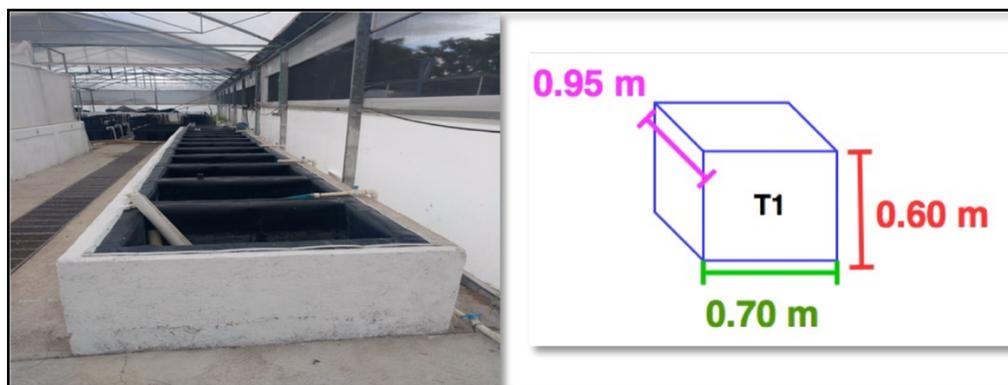


Figura 6. Esquema de la dimensión de cada estanque experimental (Elaboración propia)

5.1.3 Diseño del Sistema Experimental

En total 12 unidades experimentales con dimensiones 0.95 m de largo, 0.70 de ancho y 0.60 m de fondo (Figura 6). Se utilizaron 12 tanques de concretos forrados con geomembrana y capacidad de 400 l aunque fueron llenados con 200 l de agua. El experimento consta de cuatro tratamientos por triplicado con una distribución al azar (Figura 7), llevados a cabo durante ocho semanas donde:

T1: 45 alevines de tilapia y aire como fuente de oxígeno.

T2: 80 alevines de tilapia y aire como fuente de oxígeno.

T3: 45 alevines de tilapia y oxígeno al $93\% \pm 3\%$ de pureza como fuente de oxígeno.

T4: 80 alevines de tilapia y oxígeno al $93 \pm 3\%$ de pureza como fuente de oxígeno.

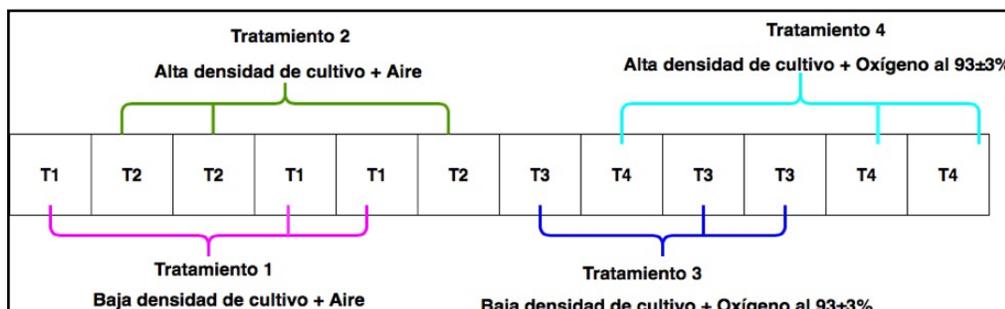


Figura 7. Esquema de la distribución de los tratamientos en los estanques

5.2 OBTENCIÓN DEL MATERIAL BIOLÓGICO

Los organismos utilizados en el experimento fueron alevines de tilapia (*Oreochromis niloticus*) descendientes de Súper macho, los cuales fueron obtenidos de la granja acuícola Zidedho (ubicada en Carretera Ixmiquilpan-Progreso s/n, Maguey blanco, Ixmiquilpan, Hidalgo) de tres semanas de edad con un peso promedio de 2.04 ± 0.54 g (media \pm DS). Los organismos fueron seleccionados al azar y se colocaron en los tanques experimentales con agua limpia durante tres semanas de aclimatación. Las primeras dos semanas la alimentación fue del 10% de la biomasa total de los peces con alimento balanceado de contenido proteico del 30% (Purina ; Agribands Purina México, S.A. de C.V. Estado de México, MEX). El alimento se suministró dos veces al día a las 09:00 y 16:00 hrs. Se realizaron biometrías semanalmente. Durante los quince días no hubo recambio de agua con la finalidad de que se acumulara el amonio.

5.3 APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA BIOFLOC

A partir de la tercera semana se partió del principio de la tecnología BFT, como no hubo recambio de agua durante quince días en los estanques experimentales, el amonio se acumuló durante ese periodo, por lo que, tal como lo planteó Avnimelech en 1999 por primera vez, se manipuló las proporciones de nitrógeno y carbono para inducir el control de nitrógeno amoniacal. Así las bacterias que naturalmente se encontraban en el agua fueron alimentadas con una fuente de carbohidratos externa, y el control de amonio se dio mediante la posterior absorción de nitrógeno por la síntesis de proteínas microbianas haciendo un ajuste de C:N 15:1 como varios autores lo manejan (ver Tabla 1) de acuerdo a (Pérez-Fuentes *et al.*, 2016), (Widanarni *et al.*, 2012) y (Martins *et al.*, 2017). Las variables de la calidad del agua fueron monitoreadas hasta la cuarta semana, tomándola como semana 1, que fue cuando la maduración del biofloc se completó.

5.3.1 Cálculos para la relación C:N 15:1

La fuente de carbono externa que se utilizó fue melaza líquida y fue analizada la cantidad de carbono en el laboratorio de Bioingeniería. Una vez que se conoció la concentración de carbono en melaza, se realizaron los análisis de la concentración de nitrógeno amoniacal $\text{NH}_3\text{-N}$ en agua de cada estanque de los tratamientos. A continuación se realizaron los siguientes cálculos para realizar el ajuste Carbono:Nitrógeno C:N a 15:1. Véase el siguiente ejemplo:

Partiendo de los Datos:

% C en melaza = 47.1885 g

$[\text{NH}_3\text{-N}] = 1.29 \text{ mg l}^{-1}$

$$1.29 \text{ mg NH}_3 - \text{N} \left(\frac{200 \text{ l solución total en estanque}}{1 \text{ l de solución}} \right) = 258 \text{ mg NH}_3 - \text{N total}$$

Conversión : $258 \text{ mg NH}_3 - \text{N} = 0.258 \text{ g NH}_3 - \text{N}$

Si para cada g de $\text{NH}_3 - \text{N}$ se necesita 15 de Carbono, entonces:

$$(0.258 \text{ g NH}_3 - \text{N})(15) = 3.87 \text{ g Carbono se necesitaron}$$

$$3.87 \text{ g Carbono} \left(\frac{100 \text{ g melaza}}{47 \text{ g Carbono}} \right) = 8.234 \text{ g melaza}$$

Entonces, se le agrega 8.234 g de melaza al estanque de 200 litros. Este ejercicio se hizo para cada estanque y el ajuste C:N se realizó semanalmente y en caso de que fuera necesario, se recuperaba agua por evaporación, sin embargo durante el periodo experimental no hubo recambios de agua.

5.3.2 Reajuste de la cantidad de alimento suministrado a los peces

A partir de la adición de la melaza los estanques fueron cubiertos con malla sombra como se muestra en la Figura 8. Esto con la finalidad de inhibir un poco el

crecimiento de algas y favorecer el crecimiento microbiano debido a que se observó acumulación de microalgas durante los primeros quince días. Como parte de la aplicación de la tecnología BFT es disminuir la cantidad de alimento suministrado, entonces se hizo un reajuste del 10 % del alimento suministrado de acuerdo a la biomasa total de los peces pasó a un 1.5 % a partir de la semana 3 de acuerdo a (Azim y Little, 2008) y (B. Day *et al.*, 2016) (Tabla 1). Se utilizó el mismo alimento balanceado de contenido proteico del 30% (Purina; Agribrands Purina México, S.A. de C.V. Estado de México, MEX) y se continuó suministrando dos veces al día en horario de 09:00 y 16:00 hrs durante todo el experimento.



Figura 8. Esquema del establecimiento experimental de la Tecnología Biofloc. Elaboración propia

5.4 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA Y PRETRATAMIENTO DE LA MUESTRA

Las variables fisicoquímicas tomadas en cuenta para controlar y monitorear la calidad del agua fueron oxígeno disuelto, temperatura, pH, amonio, nitritos, nitratos, fosfatos, potasio, demanda química de oxígeno, sólidos sedimentables y alcalinidad.

5.4.1 Pretratamiento de la muestra

Se tomaron muestras de agua de los estanques experimentales y fueron llevadas al laboratorio del departamento de Bioingeniería del Campus Amazcala, ahí fueron centrifugadas y luego se decantaron desechando los flóculos compactados. Posteriormente se realizaron las determinaciones de interés.

5.4.2 Medición de Temperatura, PH y Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto (OD), la temperatura y el pH fueron medidos directamente en los estanques experimentales con un multimetro portátil de la marca HACH modelo HQ40D Multi/2 channels (Figura 9) para agua, con características de medición mostradas en la Tabla 6. Todos los días se monitoreo el OD y temperatura por la mañana entre 8:30 y 9:30 am y semanalmente el pH en el mismo horario. Adicionalmente se realizaron corridas de 24 horas para monitorear el comportamiento del OD y temperatura cada quince días en un tanque seleccionado al azar.



Figura 9. Esquema de un multímetro portátil, marca HACH, modelo HQ40D. Fuente: Catálogo HACH con # de producto HQ40D53000000.

Tabla 6. Características de las sondas del modelo HQ40D Multi/2 Channels.

	Sonda de OD	Sonda de Temperatura	Sonda de pH
Rango de medida	0.1 – 20.0 mg l ⁻¹ (ppm) 1 – 200 % de saturación	0 - +60 °C (32 - 140 °F)	0 - 14
Resolución	0.1	0.1	Seleccionable 0.001 / 0.01 / 0.1
Otro dato de interés			3 puntos de calibración

5.4.3 Determinaciones de amonio, nitritos, nitratos, fosfatos, potasio y demanda química de oxígeno

Para las determinaciones de amonio, nitritos, nitratos, fosfatos, potasio y DQO se tomó una muestra cada semana y se le dio un pretratamiento ya descrito anteriormente. El espectrofotómetro que se utilizó para hacer las determinaciones fue de la línea HACH, modelo HALPV4419900002, DR 6000 UV VIS. Los métodos utilizados son descritos en la Tabla 7.

Tabla 7. Métodos utilizados en las determinaciones de la calidad del agua. Datos tomados del manual de Hach Company (2012)

Analito	# método	Tipo de método	Rango de medición
Amonio	8038	Método de Nessler (USEPA)	0.02 a 2.50 mg l ⁻¹
Nitritos	8507	Método del sulfato ferroso	0.002 a 0.300 mg l ⁻¹
Nitratos	8171	Método de reducción de Cadmio	0.1 to 10.0 mg l ⁻¹
Ortofosfatos	8048	Método del ácido ascórbico (USEPA)	0.02 to 2.50 mg l ⁻¹
Potasio	8049	Método del tetrafenilborato	0.1 to 7.0 mg l ⁻¹

5.5 MEDICIONES BIOMÉTRICAS A LOS PECES

Las mediciones de la longitud total, la longitud parcial, la base mínima y la altura de los peces fueron monitoreadas semanalmente con un Vernier marca Mitutoyo Absolute IP67 Figura 10 y el peso fue medido con una Balanza Analítica marca Sartorius.

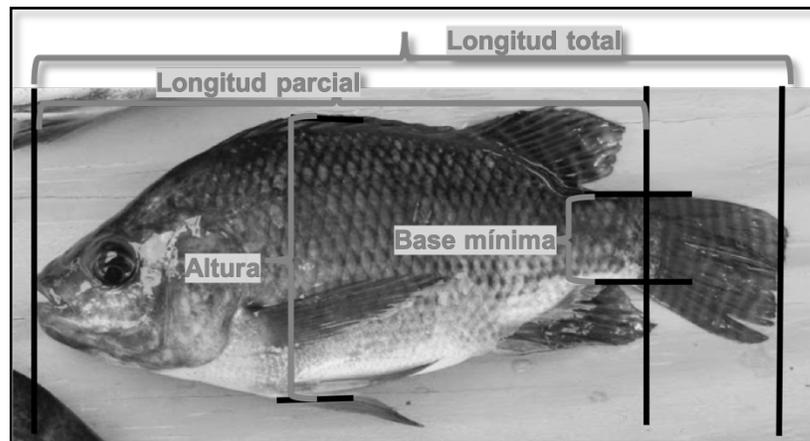


Figura 10. Esquema de la descripción de las medidas biométricas en la tilapia durante el muestreo. Elaboración propia

Con los datos obtenidos de la longitud total y el peso del pez se calculó el tipo de crecimiento mediante una relación peso-longitud total. Así la pendiente de la ecuación obtenida fue calculada. Los datos obtenidos nos ayudan a visualizar si estado de crecimiento es saludable o no. El tipo de crecimiento isométrico nos indica que el organismo creció de manera proporcionada en todas sus partes y se refleja en aquellos valores de pendiente lo más cercano a 3, si el crecimiento es alométrico negativo el valor obtenido es menor a 3 y si es alométrico positivo el valor de la pendiente es mayor a 3 y esto implica que el pez engorda conforme aumenta de longitud (Riedel *et al.*, 2007).

CAPITULO 6

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Análisis de los datos Biológicos de los peces

Los resultados de los datos biométricos que se analizaron cada semana fueron: El crecimiento, el tipo de crecimiento y los índices de crecimiento para todos los tratamientos.

6.1.1 Índices de crecimiento

El peso inicial de los peces no muestra diferencia significativa en el análisis de varianza (ANOVA) que se realizó, por lo cual el experimento comenzó bajo las mismas condiciones de peso. El tratamiento T4 fue el que mejor resultado dio respecto a los demás al final del experimento en cuanto a peso, supervivencia y rendimiento neto. Los tratamientos T3/T4 que fueron suplementados con oxígeno al 92 ± 3 % de pureza muestran mejores resultados respecto a los tratamientos aireados T1/T2, como se muestra en la Tabla 8. El peso final obtenido del tratamiento T4 es 50 % más respecto a T1, 35 % más respecto a T2 y 16% más respecto a T3, además obtener un rendimiento neto mayor. En los tratamientos T3 y T4 la supervivencia fue del 99 %, por lo que es recomendable utilizar OD de alta pureza en los sistemas BFT.

Tabla 8 Índices de crecimiento de los peces (media \pm desviación estándar)

Variable	Tratamientos			
	T1	T2	T3	T4
Peso inicial (g)	1.99 \pm 0.75	2.08 \pm 0.27	2.22 \pm 0.42	1.87 \pm 0.61
Peso final (g)	7.47 \pm 0.31 ^d	9.82 \pm 0.36 ^c	13.43 \pm 0.49 ^b	14.88 \pm 0.38 ^a
Supervivencia (%)	91	89	99	99
Peso ganado individual (g)	5.25	7.60	7.92	10.19
Rendimiento neto (kg m ⁻³)	1.55 \pm 0.09	3.75 \pm 0.24	2.98 \pm 0.04	6.25 \pm 0.07

6.1.2 Crecimiento de alevín de Tilapia

La Figura 11 muestra el comportamiento del peso semana a semana y se compara el comportamiento de los tratamientos airados y oxigenados. Se puede observar que en la semana cero no existe diferencia significativa entre tratamientos, sin embargo, a partir de la semana 2, el tratamiento T3 comienza a tener diferencia significativa respecto a T4 hasta la semana 5, no obstante, en la semana 7 en el tratamiento T4 tuvo un incremento mayor y homogéneo en la biomasa de los peces. Así mismo el tratamiento T2 a partir de la semana 3 comienza a tener diferencia significativa hasta el final del experimento, debido a que el sistema siempre mantuvo el OD alrededor de 7 mg l⁻¹, el cual es bastante aceptable y la aireación para el tratamiento T1 y T2 se encontraba sobrada para la densidad de cultivo en ambos tratamientos.

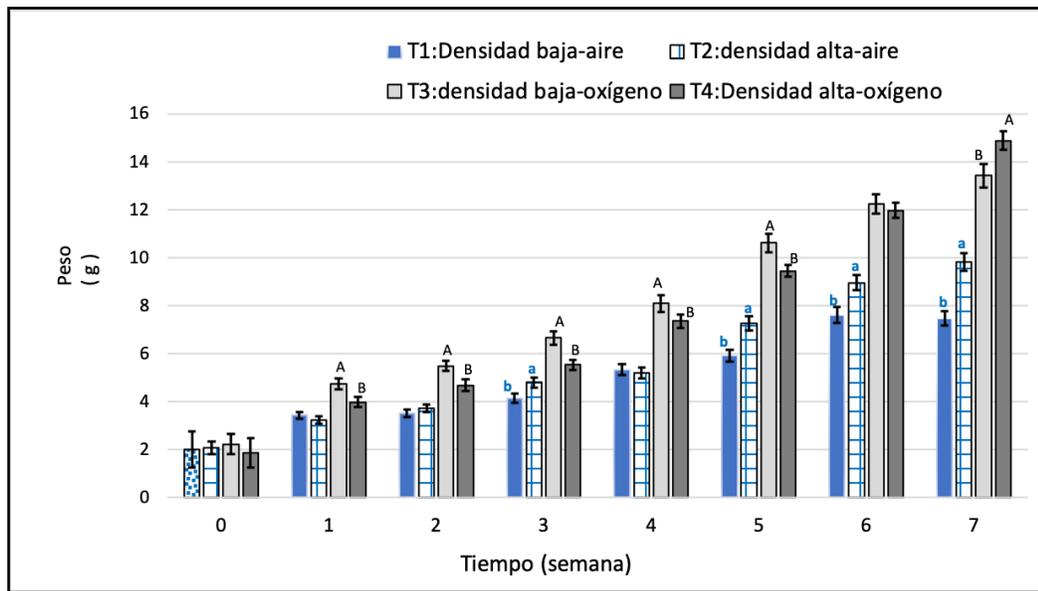


Figura 11 Esquema del comportamiento del peso individual de los peces (media \pm Error estándar)

6.1.3 Relación entre peso y longitud de los peces

Las relaciones entre longitud total y peso fueron analizadas mediante una relación de los tratamientos al inicio y al final del experimento. Se tomó la pendiente de la ecuación obtenida y se observó que el tratamiento T4 mostró mejor resultado al final del experimento ya que el valor de la pendiente más cercana al valor 3 indica un crecimiento isométrico de acuerdo con Riedel et al., 2007 y el crecimiento que dio en T4 fue isométrico, esto quiere decir que los peces crecen homogéneamente hacía lo ancho y largo. El crecimiento alométrico negativo fue el caso del tratamiento T1 quiere decir que el pez creció pronunciadamente más largo y el crecimiento alométrico positivo quiere decir que el pez crece más a lo ancho como fue el caso de los tratamientos T2 y T3 (se puede decir que eran unos “peces gordos”). En la Tabla 9 se muestra el gráfico del modelo ajustado peso-longitud total que nos dio el valor de la pendiente.

Tabla 9 Modelo ajustado peso-longitud total

Tratamiento	Pendiente semana 1	Pendiente semana 7
T1	2.8289	2.8601
T2	2.7608	3.1794
T3	2.8021	3.2976
T4	2.5702	3.0676

6.2 Análisis de la calidad del agua durante el experimento

Los análisis de la calidad del agua se comenzaron a medir después de las tres semanas de aclimatación de los peces ya en el sistema BFT. Se tomó como semana 1 cuando se midieron las variables de calidad del agua. Los resultados obtenidos de la calidad de agua se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10 Calidad del agua durante el periodo experimental

Variable	Tratamientos				
		T1	T2	T3	T4
OD (mg l⁻¹)	inicial	7.08±0.08	7.18±0.02	12.45±0.28	12.05±0.25
	final	7.51±0.01	7.33±0.05	11.53±0.82	10.52±0.25
Temperatura (°C)	inicial	22.26±0.27	22.10±0.05	23.23±0.03	23.43±0.12
	Final	20.9±0.20	21.06±0.21	22.06±0.13	22.40±0.15
pH	Inicial	8.88±0.07	8.87±0.01	8.56±0.16	8.67±0.03
	Final	8.61±0.03	8.45±0.01	8.16±0.04	7.99±0.03
Nitrógeno amoniacal (mg l⁻¹)	Inicial	0.24±0.03	0.28±0.005	1.09±0.40	0.29±0.02
	Final	0.39±0.01	0.40±0.02	0.56±0.07	0.54±0.01
Nitrito (mg l⁻¹)	Inicial	0.114±0.025	0.020±0.001	0.038±0.008	0.092±0.036
	final	0.004±0	0.01±0	0.007±0.001	0.004±0.002
Nitrato (mg l⁻¹)	inicial	20.70±5.01	16.46±4.59	11.03±2.76	19.4±4.91

	final	14.63±0.44	22.33±3.51	3.83±1.56	17.2±1.65
Ortofosfato (mg l⁻¹)	Inicial	0.86±0.22	0.17±0.04	17.76±0.74	21.36±2.74
	final	5.33±0.36	6.71±0.50	40.53±0.54	44.56±1.56
Potasio (mg l⁻¹)	Inicial	22.3±4.6	20.9±0.8	17.7±0.7	21.3±2.7
	final	48.3±7.6	44.5±2.1	40.5±0.5	44.5±1.5
SS (ml l⁻¹)	Inicial	9.8±1.6	26.1±7.9	24.3±5.2	7.33±2.0
	final	32±6.5	46±3.0	41±19.6	34±5.03
DQO (mg l⁻¹)	Inicial	120.6±5.4	160±18	107.4±6.6	107.8±4.7
	final	58.4±9.8	50.6±1.6	39.3±7.0	46.0±5.7
Alcalinidad (mg CaCO₃ l⁻¹)	Inicial	184.5±7.5	202±10	171.5±3.7	219±2.88
	final	159.0±6.2	150.3±2.3	235.7±18.5	198±7.9

OD=oxígeno disuelto, SS=sólidos sedimentables. Los datos muestran las medias ± Error estándar del inicio y fin del periodo. T1= aire + densidad baja; T2= aire + densidad alta; T3= OD al 93±3% de pureza + densidad baja y T4= OD al 93±3% de pureza + densidad alta

6.2.1 Comportamiento del OD durante el experimento

El oxígeno disuelto para los tratamientos T1 y T2 mostró el mismo comportamiento durante el tiempo con valores de 7.23 ± 0.37 mg l⁻¹ (media±DS) y no se observó algún efecto antes y después de la adición de la melaza para favorecer el crecimiento bacteriano, el OD siempre fue suficiente para mantener la demanda del consumo de OD por los peces y por la comunidad microbiana. Por otro lado, los T3 y T4 tuvieron un comportamiento similar, el OD se mantuvo en valores de 12.16 ± 1.39 mg l⁻¹ (media±DS) satisfaciendo tanto a la demanda de oxígeno de la comunidad microbiana como a la demanda de los peces. El comportamiento se puede observar en la Figura 12.

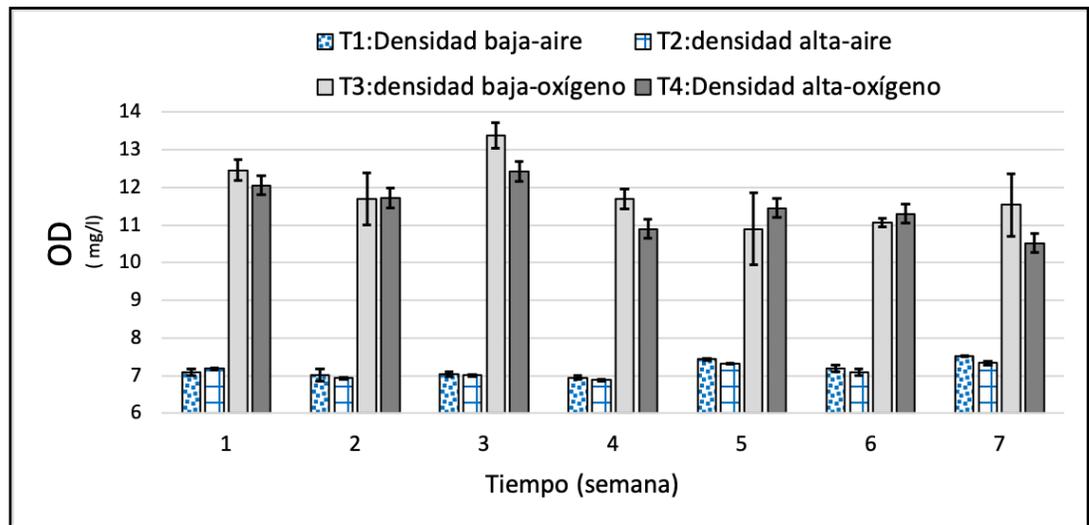


Figura 12 Esquema del comportamiento de OD de los tratamientos durante el experimento

6.2.2 Comportamiento de la temperatura durante el experimento

La temperatura fue una variable no controlada. El periodo de experimentación fue de 10 semanas contando las primeras tres de aclimatación de los peces en las cuales hubo precipitaciones y estuvo mayormente nublado. El comportamiento de la temperatura en periodos de 24 horas fue monitoreados cada 15 días en tanques seleccionados al azar y el rango de temperatura que mostraron en un día cualquiera fue de 22.50 ± 1.36 °C (media \pm DS) para los tratamientos T1 y T2. Para los tratamientos T3 y T4 tuvieron una temperatura de 24.08 ± 1.46 °C (media \pm DS). La Figura 13 muestra la temperatura que se midió a las 8:30 am y se observa que los tratamientos T1 y T2 no muestran diferencias significativas entre ellos durante las semanas. Sin embargo, existe una influencia del OD sobre la temperatura en los tratamientos T3 y T4, lo cual puede deberse a la diferencia de la densidad de la cantidad de biomasa entre T3 y T4. Durante todo el experimento existió diferencia significativa entre los tratamientos aireados T1/T2 y oxigenados T3/T4, por lo que el uso de OD de alta pureza favorece el mantenimiento de la temperatura coincidiendo con los resultados de Colt, 2013.

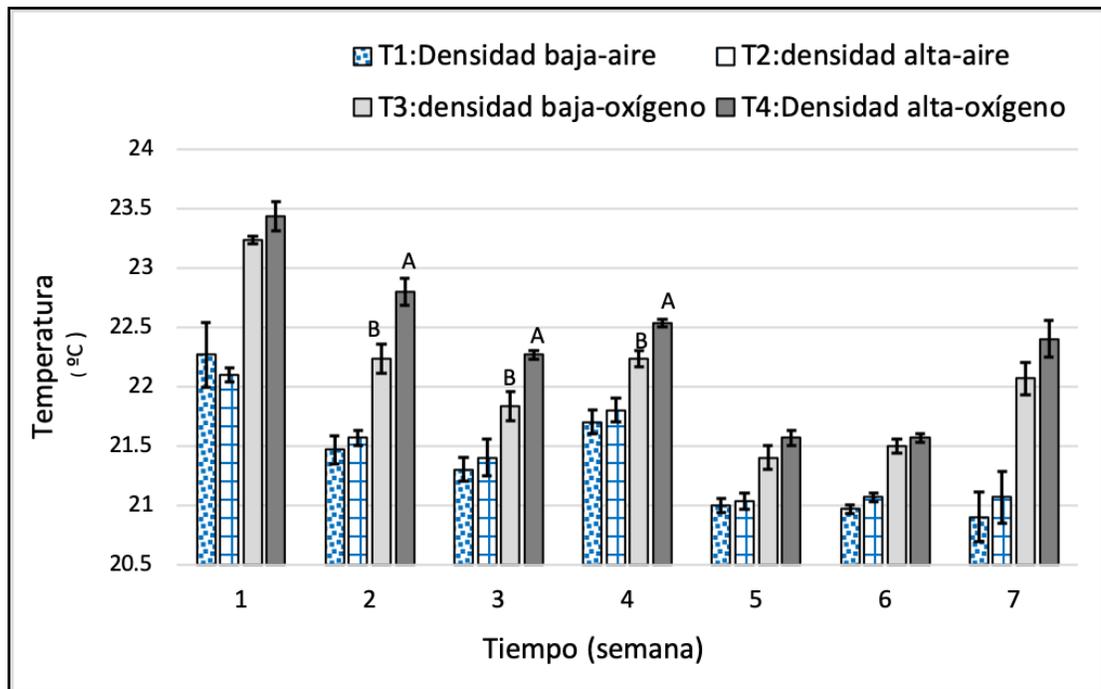


Figura 13 Esquema del comportamiento de la temperatura durante el periodo experimental

6.2.3 Comportamiento del pH durante el experimento

El pH del agua del poblado de Amazcala perteneciente al municipio del Marqués, Qro., tiene un pH de alrededor de 8.5 a 9.0, esta agua es de pozo y cuando se inició el experimento antes de colocar a los peces el pH era de 8.97. Los resultados observados en la Figura 14 mostraron un comportamiento al paso del tiempo en decremento para todos los tratamientos por el uso de la Tecnología BioFloc. Los tratamientos T3 y T4 mostraron un decremento significativo en el pH respecto a los tratamientos T1 y T2, aunque el tratamiento T4 fue el que mejor resultado mostró de al final del experimento mostrando siempre una tendencia clara en la disminución del pH. En la Figura 14 se puede observar los comportamientos de los tratamientos. A partir de la semana 3 se observa para todos los tratamientos diferencias significativas entre T1 y T2, que a pesar de que tienen el mismo tipo de aireación se observa esta diferencia que puede ser influenciada por la densidad de cultivo,

igualmente pasó con el tratamiento T3 y T4. La calidad de agua mejoró al paso del tiempo en cuanto a la variable de pH y los resultados de biomasa obtenida del tratamiento T4 es soportado mediante el resultado de pH, donde un pH entre 6.8 a 8 es el ideal para producir tilapia, tal como lo menciona Emereciano, 2017 en la Tabla 2, por lo que la influencia del OD de alta pureza mejora la calidad de agua y favorece el crecimiento de tilapia en aguas ligeramente alcalinas.

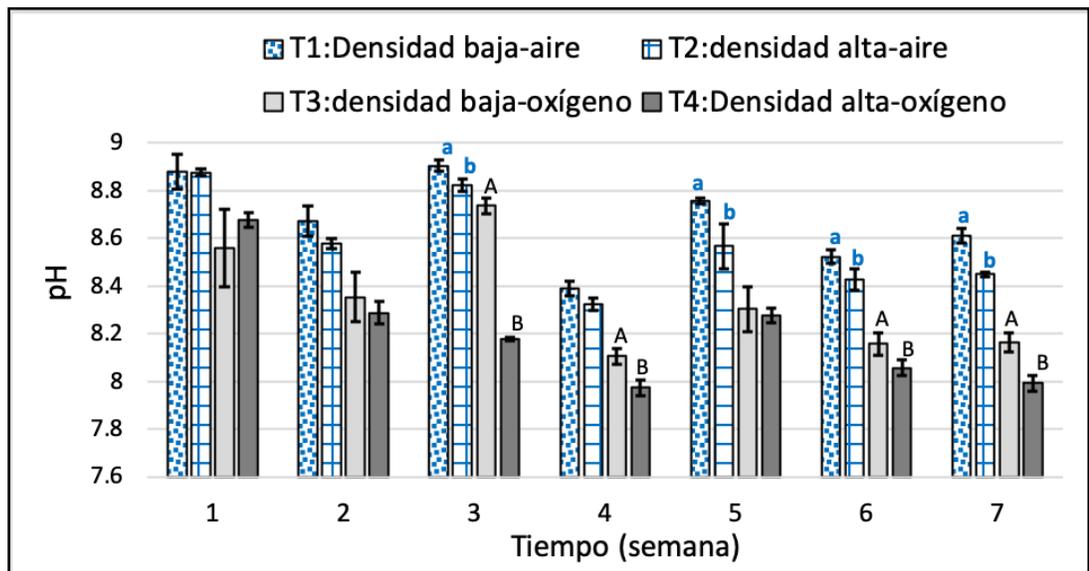


Figura 14 Esquema del comportamiento de pH de los tratamientos durante el experimento

6.2.4 Comportamiento del Amonio durante el experimento

El nitrógeno amoniacal en el tratamiento T3 tuvo un comportamiento más inestable en la semana uno respecto a los demás tratamientos. Durante las primeras tres semanas de aclimatación de los peces no se monitoreo el amonio, sin embargo, se dejó acumular durante dos semanas y se añadió melaza en relación 15:1 partes favoreciendo el crecimiento las bacterias heterotróficas que aprovecharon la fuente de nitrógeno asimilándolo. El $\text{NH}_3\text{-N}$ se mantuvo estable y sin diferencias significativas entre los tratamientos T1-T2 y T3-T4, este comportamiento es normal

para los sistemas BFT como se mostró en la Tabla 2. Sin embargo, se observó que el tratamiento T4 a partir de la semana 4 comienza a incrementar su concentración de amonio, resultado que coincide con el incremento de la biomasa en la semana 4 de la Figura 11, donde a mayor cantidad de biomasa, mayor es la cantidad de amonio producido. La concentración de $\text{NH}_3\text{-N}$ siempre se mantuvo por debajo de 1 mg l^{-1} (Figura 15) tal como lo menciona Emerenciano, 2017 en la Tabla 2.

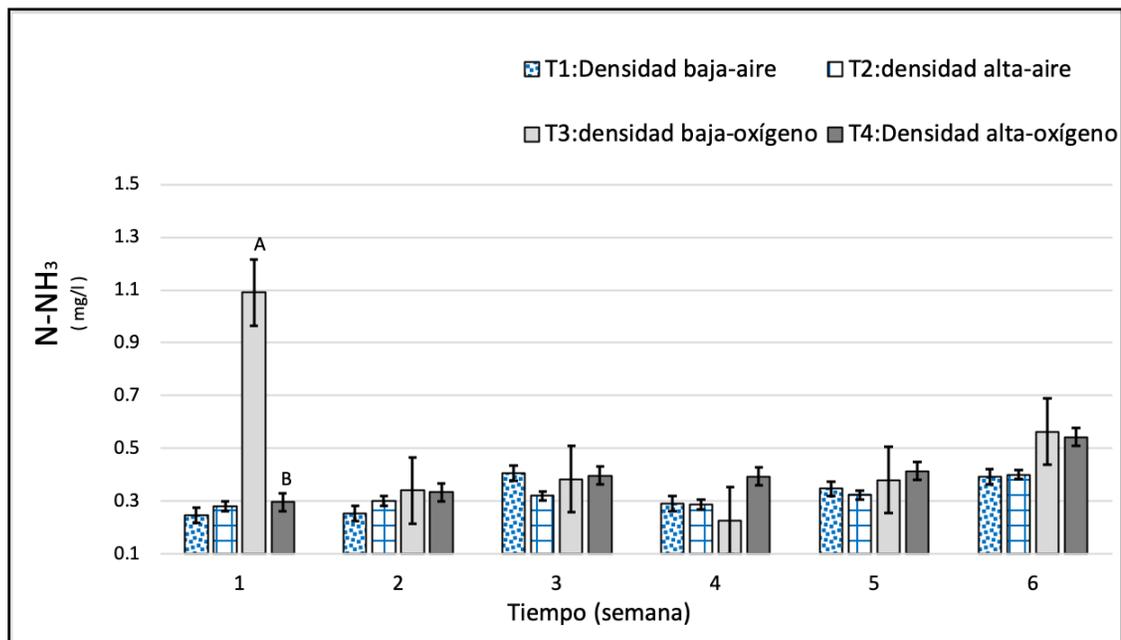


Figura 15 Esquema del comportamiento del amonio durante el experimento

6.2.5 Comportamiento de nitritos durante el experimento

El comportamiento de los nitritos durante el experimento se observa en la Figura 16. A partir de la semana 3 se muestran las concentraciones de nitritos en la figura debido a que durante la semana 1 y 2 los valores de nitritos no fueron detectables por el instrumento, ya que aparentemente se salían de los rangos de medición. Cabe señalar que durante estas dos semanas se presentaron mortalidades en los tratamientos T1 y T2. Después de la tercera semana, la estabilidad de las concentraciones de nitritos se mantuvo, esto también se atribuye al tiempo que

requiere estabilizarse el sistema biofloc, ya que lleva un tiempo de tres a cuatro semanas que las bacterias heterotróficas mantengan los niveles de nitritos por debajo de 1 mg l^{-1} a partir de la adición de la melaza, incluso llegaron a dar valores de cero en la última semana de medición en los tratamientos T3 y T4 ya que el sistema BFT se encontraba estabilizado. Los valores de nitritos se mantuvieron muy por debajo de 1 mg l^{-1} en todos los tratamientos, como es común de los sistemas BFT (Avnimelech, 1999).

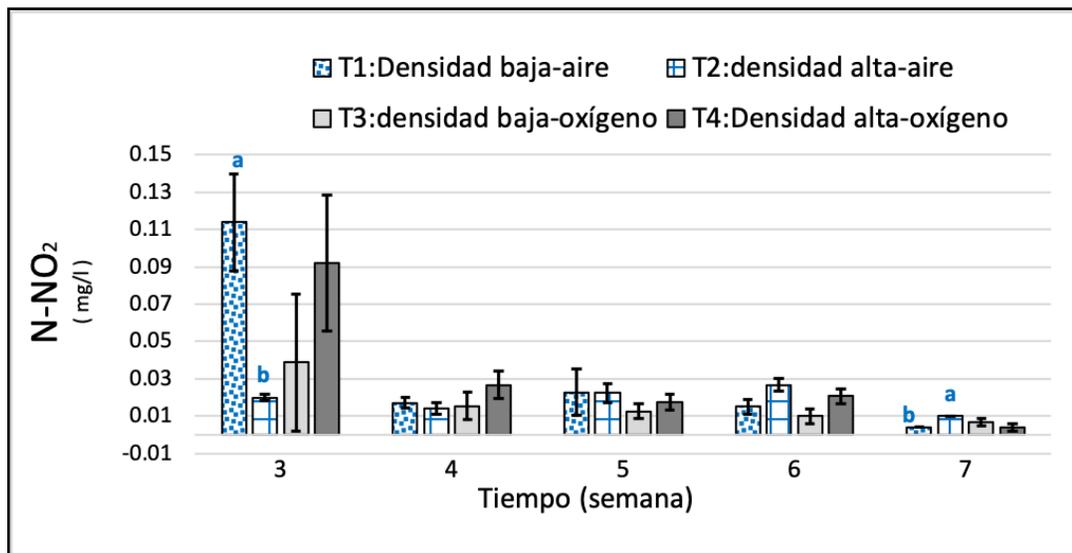


Figura 16 Esquema del comportamiento de los nitritos a partir de la semana 3

6.2.6 Comportamiento de nitratos durante el experimento

El comportamiento de los nitratos de todos los tratamientos inicialmente comenzó entre 10 y 25 mg l^{-1} sin diferencias significativas entre ellos. No obstante, entre la semana 4 y 5 comenzaron a incrementar debido a que la biomasa de los peces también comenzó a incrementar con diferencias significativas entre los tratamientos como ya se mencionó en la Figura 11. Los tratamientos T1 y T2 comenzaron a tener diferencias significativas a partir de la semana 5, en donde T2 como es el tratamiento de mayor biomasa por lo que el resultado es congruente. A partir de la

semana 3 el tratamiento T4 tiene mayor concentración de nitratos respecto al tratamiento T3 a causa de que la biomasa fue mayor. Al final del experimento la tendencia de los tratamientos va en incremento a partir de la semana 4, sin embargo, los tratamientos T3 y T4 mantienen su concentración de nitratos en menor proporción a diferencia de los tratamientos T1 y T2, donde claramente se observa una influencia positiva del efecto del OD de alta pureza sobre la concentración de nitratos. Los rangos ideales de la concentración de nitratos (Tabla 2) que menciona Emerenciano en 2017 son de 0.5 a 20 mg l⁻¹. Por lo tanto, la calidad del agua fue mantenida durante el periodo de experimentación para esta variable (Figura 17).

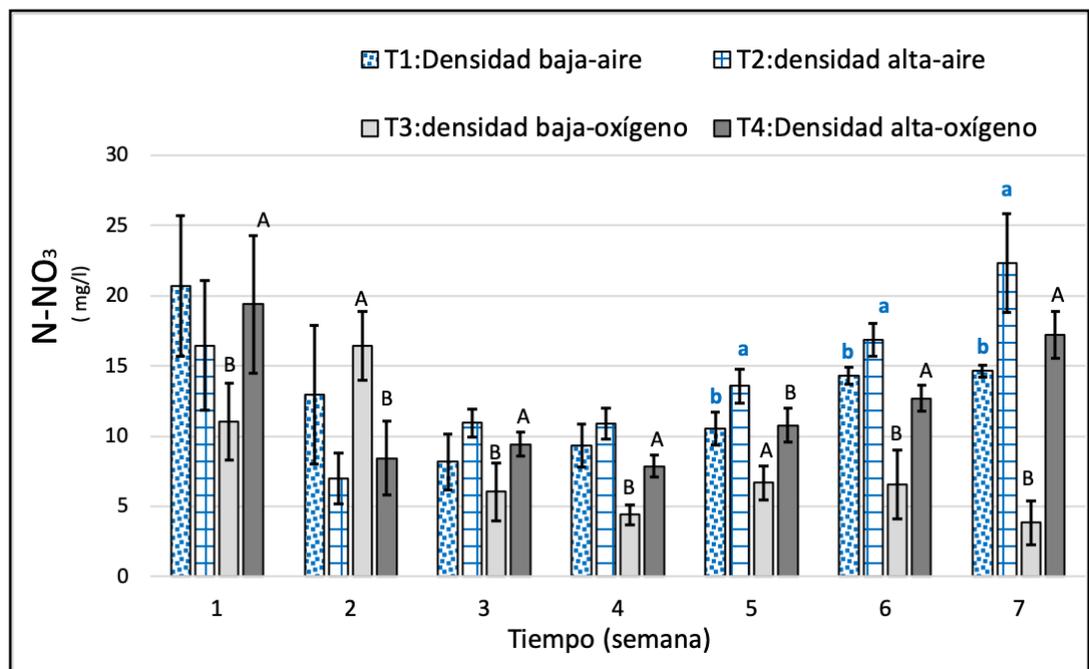


Figura 17 Esquema del comportamiento de los nitratos

6.2.7 Comportamiento de fosfatos durante el experimento

El comportamiento de fosfatos para todos los tratamientos fue incrementando en el tiempo. Al final del experimento los tratamientos T1 y T2 mantuvieron su concentración por debajo de 10 mg l⁻¹ a diferencia de los tratamientos T3 y T4 que

debido a la alta disponibilidad de O_2 en los estanques, las especies inorgánicas de fósforo reaccionaron con el oxígeno para formar ortofosfatos, de tal forma que las concentraciones de estos tratamientos terminaron entre 40 y 45 $mg\ l^{-1}$ como se muestra en la Figura 18. A pesar de que en la Tabla 2 se muestran los rangos sugeridos de la calidad de agua para ortofosfatos de 0.5 a 20 $mg\ l^{-1}$ no se observaron afectaciones para los peces con las concentraciones obtenidas.

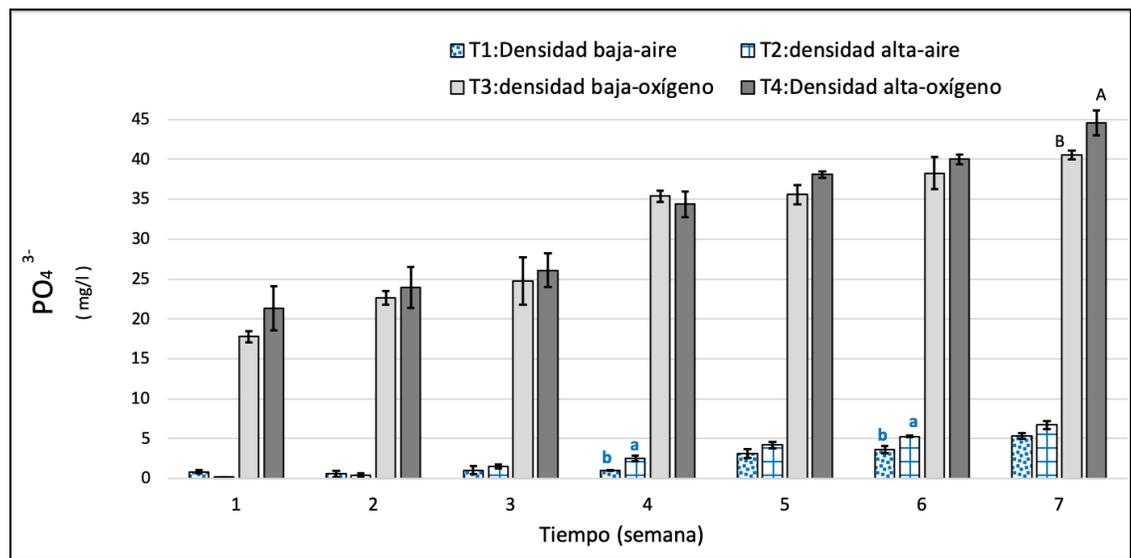


Figura 18 esquema del comportamiento de los fosfatos

6.2.8 Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) durante el experimento

El comportamiento de la demanda química de oxígeno mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas en una muestra líquida y se muestra en la Figura 19. En los cuatro tratamientos la demanda química de oxígeno fue elevada, por lo tanto, se muestra un decremento en la concentración en sistemas BFT. Estos resultados coinciden con el incremento de la concentración de ortofosfatos observados en la Figura 18.

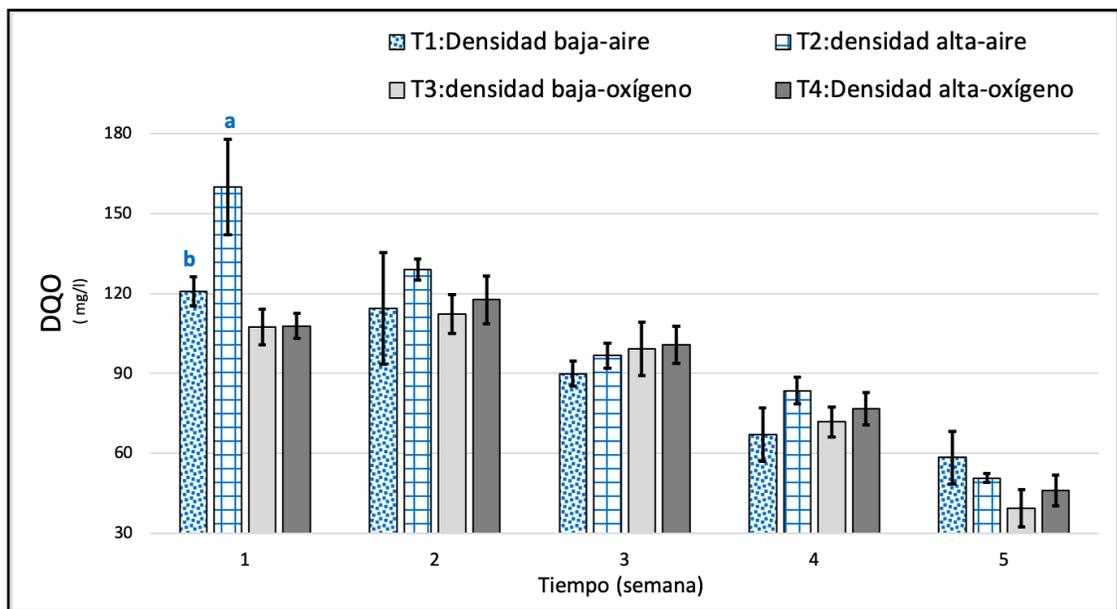


Figura 19 Esquema del comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

6.2.9 Comportamiento del potasio (K⁺) durante el experimento

La concentración de potasio durante el periodo experimental se fue acumulando para los cuatro tratamientos (Figura 20), no se observa ninguna diferencia significativa entre los tratamientos aireados y oxigenados, por lo que el oxígeno de alta pureza no tiene ningún efecto sobre la concentración de K⁺.

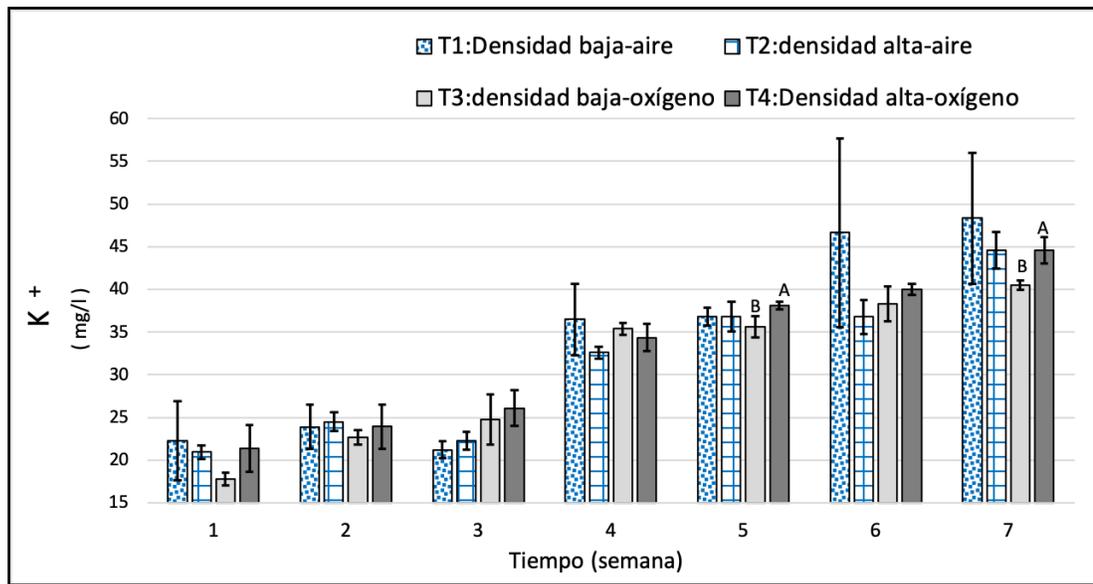


Figura 20 Esquema del comportamiento del potasio durante el experimento

6.2.10 Comportamiento de los Sólidos sedimentables (SS) durante el experimento

Los tratamientos T1 y T2 muestran diferencias significativas para sólidos sedimentables durante el periodo de experimentación, este resultado es lógico debido a que la densidad de cultivo en el tratamiento T2 es mayor que T1. En cambio, con los tratamientos oxigenados T3/T4 no se observó diferencia significativa durante el periodo de experimentación, los sólidos sedimentables se comportaron muy inestables, sin embargo, no se observó algún efecto perjudicial de esta variable sobre los peces (Figura 21).

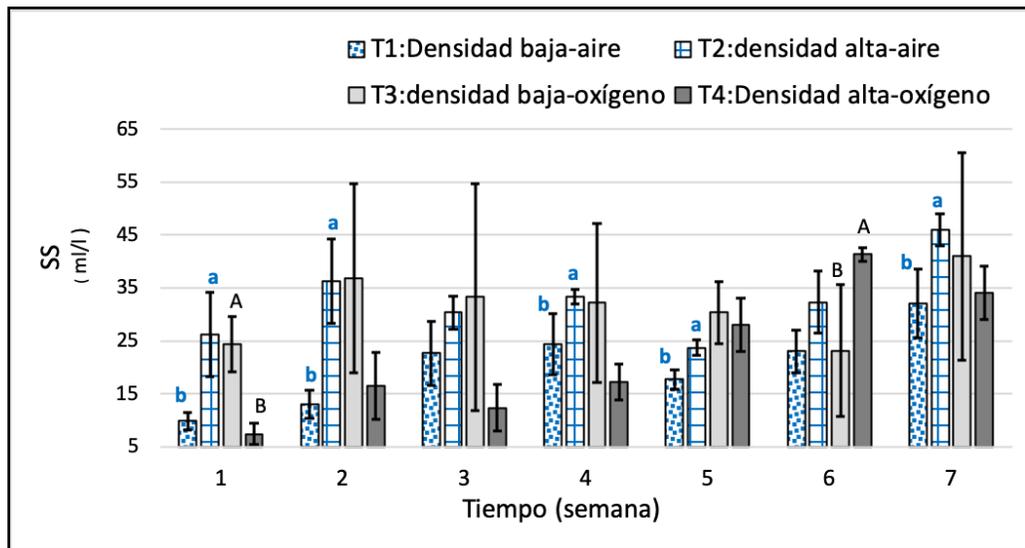


Figura 21 Esquema del comportamiento de los sólidos sedimentables

1. CONCLUSIONES

En el presente estudio se evaluó el efecto de oxígeno disuelto al 92 ± 3 % de pureza suministrado en sistemas BFT en comparación con sistemas BFT tradicionales que son aireados. Bajo dos condiciones de densidad de cultivo de alevín de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) descendientes de supermacho fueron evaluados. Los tratamientos fueron: T1: 45 alevines de tilapia y aire como fuente de oxígeno; T2: 80 alevines de tilapia y aire como fuente de oxígeno; T3: 45 alevines de tilapia y oxígeno al $93\% \pm 3\%$ de pureza como fuente de oxígeno y T4: 80 alevines de tilapia y oxígeno al $93 \pm 3\%$ de pureza como fuente de oxígeno. Los resultados obtenidos concluyen que es posible aumentar la densidad de cultivo en un sistema BFT hiperoxigenado, debido a que el tratamiento T4 obtuvo un rendimiento significativamente mayor en términos de producción respecto a los demás tratamientos. El peso final obtenido del tratamiento T4 fue 50 % más respecto a T1, 35 % más respecto a T2 y 16% más respecto a T3. Además la supervivencia fue del 99 % los tratamientos T3 y T4, por lo que la hipótesis propuesta se cumple en términos de productividad y calidad de agua, visto que mejoró la calidad del agua en las variables de temperatura que se obtuvieron valores mayores respecto a los sistemas aireados, así como en el pH hubo un decremento en los sistemas oxigenados que es muy favorable para el tipo de agua que se tiene en el poblado de Amazcala, además de mantener las especies nitrogenadas tóxicas para los peces en valores seguros, por lo que este estudio sugiere aumentar la densidad de cultivo al utilizar OD de alta pureza en los sistemas BFT.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Avnimelech, Y. 1999. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture* 176: 227-235.
- Avnimelech, Y. 2007. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. *Aquaculture* 264: 140-147.
- Avnimelech, Y., y M. Kochba. 2009. Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in bio floc tanks, using ¹⁵N tracing. *Aquaculture* 287: 163-168.
- Azim, M. E., y D. C. Little. 2008. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* 283: 29-35.
- B. Day, S., K. Salie, y H. Stander. 2016. A growth comparison among three commercial tilapia species in a biofloc system.
- Badiola, M., D. Mendiola, y J. Bostock. 2012. Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering* 51: 26-35.
- Barba Macías, E., Valdés, M., y Flores, C.E.J. 2009. Manual para el uso de la tecnología EM en granjas de tilapia en Tabasco. (No. EE/639.3097263 B3)
- Bergheim, A., A. Drengstig, Y. Ulgenes, y S. Fivelstad. 2009. Production of Atlantic salmon smolts in Europe—Current characteristics and future trends. *Aquacultural Engineering* 41: 46-52.
- Bhatta, S., Iwai, T., Miura, T., Higuchi, M., Maugars, G., y Miura, C. 2013. Differences between male and female growth and sexual maturation in tilapia (*Oreochromis mossambicus*). *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*. 8(2): 57-65.
- Bohl, M. 1997. Gas bubble disease of fish. *Tierärztliche Praxis*. 25(3): 284-288
- Boyd, C., y C. S. Tucker. 1998. *Pond Aquaculture Water Quality Management*. p 8-86.

- Cheng, Q. 2015. Competitive mechanism of ammonia, iron and manganese for dissolved oxygen using pilot-scale biofilter at different dissolved oxygen concentrations. *Water Supply* 16: 766-774.
- Collazos-Lasso, L. F., y J. A. Arias-Castellanos. 2015. Fundamentos de la tecnología biofloc (BFT). Una alternativa para la piscicultura en Colombia. Una revisión. *Orinoquia* 19: 77-86.
- Colt, J. 1986. Gas supersaturation — Impact on the design and operation of aquatic systems. *Aquacultural Engineering* 5: 49-85.
- Colt, J. 2006. Water quality requirements for reuse systems. *Aquacultural Engineering* 34: 143-156.
- Colt, J., y E. Kroeger. 2013. Impact of aeration and alkalinity on the water quality and product quality of transported tilapia—A simulation study. *Aquacultural Engineering* 55: 46-58.
- Colt, J., T. Momoda, R. Chitwood, G. Fornshell, y C. Schreck. 2011. *Water Quality in Tilapia Transport: From the Farm to the Retail Store*.
- Colt, J., y B. Watten. 1988. Applications of pure oxygen in fish culture. *Aquacultural Engineering* 7: 397-441.
- CONABIO. 1758. *Oreochromis niloticus Linnaeus*. p 14. Ponderación de Invasividad de Especies Exóticas en México (SIEI), México.
- Crab, R., T. Defoirdt, P. Bossier, y W. Verstraete. 2012. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. *Aquaculture* 356-357: 351-356.
- Day, S. B., Salie, K., y Stander, H. B. 2016. A growth comparison among three commercial tilapia species in a biofloc system. *Aquaculture International* 24(5):1309-1322.
- Defoirdt, T., P. Sorgeloos, y P. Bossier. 2011. Alternatives to antibiotics for the control of bacterial disease in aquaculture. *Current opinion in microbiology* 14: 251-258.
- Díaz, A. M. 2003. *Biología, Cultivo y Comercialización de la Tilapia*. AGT Editor. S.A.

- Ebeling, J. M., y M. B. Timmons. 2012. Recirculating Aquaculture Systems. Aquaculture Production Systems.
- Ebeling, J. M., M. B. Timmons, y J. J. Bisogni. 2006. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture* 257: 346-358.
- Emerenciano, M., G. Gaxiola, y G. Cuzon. 2013. Biofloc Technology (BFT): A Review for Aquaculture Application and Animal Food Industry. p 301-328.
- Emerenciano, M., L. R. Martinez-Cordova, M. Martinez-Porchas, y A. Miranda-Baeza. 2017. Biofloc Technology (BFT): A Tool for Water Quality Management in Aquaculture. p 91-109.
- Emerson, K., R. Russo, R. E. Lund, y R. V. Thurston. 2011. Aqueous Ammonia Equilibrium Calculations: Effect of pH and Temperature.
- FAO. 2018. El futuro de la alimentación y la agricultura: Vías alternativas hacia el 2050. *Version Resumida*. 64 pp.
- Foss, A., T. H. Evensen, y V. Øiestad. 2002. Effects of hypoxia and hyperoxia on growth and food conversion efficiency in the spotted wolffish *Anarhichas minor* (Olafsen). *Aquaculture Research* 33: 437-444.
- Foss, A., T. Vollen, y V. Øiestad. 2003. Growth and oxygen consumption in normal and O₂ supersaturated water, and interactive effects of O₂ saturation and ammonia on growth in spotted wolffish (*Anarhichas minor* Olafsen). *Aquaculture* 224: 105-116.
- Hargreaves, J. A. 2013. Biofloc Production Systems for Aquaculture. Southern Regional Aquaculture Center No. 4503: 12.
- Haug, L., S. Stefansson, y J. Kolding. 2008. Effect of ambient oxygen on growth and reproduction in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*).
- Hernández, M., C. I. Pérez-Rostro, J. A. Pérez-Fuentes, y M. P. Hernández-Vergara. 2014. Biofloc, a Technical Alternative for Culturing Malaysian Prawn *Macrobrachium rosenbergii*. p 87-104. IntechOpen.
- Iwama, G. K., A. Takemura, y K. Takano. 1997. Oxygen consumption rates of tilapia in fresh water, sea water, and hypersaline sea water. *Journal of Fish*

- Biology 51: 886-894.
- Linné, C. v., y L. Salvius. 1758. Caroli Linnaei...Systema naturae per regna tria naturae :secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis. Impensis Direct. Laurentii Salvii, Holmiae :.
- Luo, G. *et al.* 2014. Growth, digestive activity, welfare, and partial cost-effectiveness of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in a recirculating aquaculture system and an indoor biofloc system. *Aquaculture* 422-423: 1-7.
- Macias Intriago, J. 2016. Estado y Estructura Poblacional de la Tilapia Negra *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758)(Perciformes:Cichlidae) En la represa la Esperanza, Quiroga-Manabi. Maestría. Universidad de Guayaquil.
- Mallya, Y. J. 2012. The effects of dissolved oxygen on fish growth in aquaculture. *International Aquafeed Magazine*.
- Malpartida Pasco, J. J., J. W. Carvalho Filho, C. M. de Espirito Santo, y L. Vinatea. 2018. Production of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* grown in BFT using two aeration systems. *Aquaculture Research* 49: 222-231.
- Martínez, M.A.S. 2006. Manejo del cultivo de tilapia. Nicaragua, BIDEAUSAID, p15.
- Martinez-Porchas, M., y L. R. Martinez-Cordova. 2012. *World Aquaculture: Environmental Impacts and Troubleshooting Alternatives*.
- Martins, G. B., F. Tarouco, C. E. Rosa, y R. B. Robaldo. 2017. The utilization of sodium bicarbonate, calcium carbonate or hydroxide in biofloc system: water quality, growth performance and oxidative stress of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* 468: 10-17.
- Mayorga Castañeda, F., Corral Ávila, R., Gutiérrez Ahumada, H., Arriaga Haro, V. and Pérez Hernández, J. 2011. *Guía Empresarial para el Cultivo, Engorda y Comercialización de la Tilapia (Mojarra)*.
- Olsvik, P. A. *et al.* 2006. Effects of hypo- and hyperoxia on transcription levels of five stress genes and the glutathione system in liver of Atlantic cod

- Gadus morhua. Journal of Experimental Biology 209: 2893.
- Pérez-Fuentes, J. A., M. P. Hernández-Vergara, C. I. Pérez-Rostro, y I. Fogel. 2016. C:N ratios affect nitrogen removal and production of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* raised in a biofloc system under high density cultivation. *Aquaculture* 452: 247-251.
- Perschbacher, P. W., y R. R. Stickney. 2016. *Tilapia in Intensive Co-culture*. John Wiley & Sons Ltd.
- Qayyum Siddiqui, A., M. S. Howlader, y A. E. Adam. 1991. Effects of water exchange on *Oreochromis niloticus* (L.) growth and water quality in outdoor concrete tanks.
- Saeed, M., y S. A al-Thobaiti. 1997. Gas bubble disease in farmed fish in Saudi Arabia.
- SAGYP. 1997. *Estudio de Desarrollo y Producción de Tilapia AquaTIC*. Secretaria de Agricultura, Pesca y Alimentación, Buenos Aires, Argentina.
- Sanchez-Estrada, M. d. I. L. *et al.* 2018. Factors to increase the stocking density using BioFloc Technology in tilapia production : A mini review. In: 2018 XIV International Engineering Congress (CONIIN). p 1-5.
- Schwitzguébel, J.-P., y H. Wang. 2007. Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China.
- Swann, L. 1997. *A Fish Farmer's Guide to Understanding Water Quality*. Department of Animal Sciences. Sea Grant Program Purdue University, Illinois-Indiana
- Toguyeni, A., Baroiller, J., Fostier, A., Le Bail, P., Kühn, E., Mol, K. y Fauconneau, B. 1996. Consequences of Food Restriction on Short-Term Growth Variation and on Plasma Circulating Hormones in *Oreochromis niloticus* in Relation to Sex. *General and Comparative Endocrinology*. 103(2): 167-175
- Tran-Duy, A., A. A. van Dam, y J. W. Schrama. 2012. Feed intake, growth and metabolism of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in relation to dissolved oxygen concentration. *Aquaculture Research* 43: 730-744.

- Widanarni, J. Ekasari, y S. Maryam. 2012. Evaluation of Biofloc Technology Application on Water Quality and Production Performance of Red Tilapia *Oreochromis* sp. Cultured at Different Stocking Densities. HAYATI Journal of Biosciences 19: 73-80.
- Younes, A. F. 2015. Effect of Restricted Feeding Level and Water Renewal on Water Quality and Nile Tilapia Growth Performance Under Biofloc Culture, Cairo University, Egypt.