

Tecnología biofloc: datos, estudios y experiencias para el desarrollo de la acuicultura latinoamericana**Biofloc technology: data, works and experiences for development of the latin american aquaculture**

DOI:10.34117/bjdv6n2-187

Recebimento dos originais: 30/12/2019

Aceitação para publicação: 18/02/2020

Thiago Marinho-Pereira

Doctorando en Ciencias Pesqueras en los Trópicos por la Universidad Federal do Amazonas
 Profesor en la Universidade Federal do Oeste do Pará
 Rua Vera Paz, s/n – Salé
 Santarém, Brasil – CEP: 68040-255.
 Correo electrónico: tmarinhopereira@gmail.com

Charles Hanry Faria Junior

Doctor en Ciencias Pesqueras en los Trópicos por la Universidade Federal do Amazonas
 Profesor en la Universidade Federal do Oeste do Pará
 Rua Vera Paz, s/n – Salé
 Santarém, Brasil – CEP: 68040-255.
 Correo electrónico: charleshanry@yahoo.com.br

Luz Marina Guevara Rincón

Graduación en Zootecnia por la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
 Directora General en el Sistemas Acuícolas del Caribe S.A.S
 Aguachica, Colombia
 Correo electrónico: luzmargue86@hotmail.com

Elton Nunes Britto

Doctor en Biología de Agua Dulce y Pesca Interior por el
 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
 Profesor en el Instituto Federal de Educação, Ciencia e Tecnologia do Pará
 Av. Mal. Castelo Branco, s/n – Interventoria
 Santarém, Brasil – CEP: 68020-570
 Correo electrónico: eltonnbritto@hotmail.com

Bruno Adan Sagratzki Cavero

Doctor en Biología de Agua Dulce y Pesca Interior por el
 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
 Profesor en la Universidade Federal do Amazonas
 Av. Gen. Rodrigo Otávio Jordão Ramos, 1200 – Coroado I
 Manaus, Brasil – CEP: 69067-005
 Correo electrónico: basc@ufam.edu.br

Paulo Henrique Rocha Aride

Doctor en Biología de Agua Dulce y Pesca Interior por el
 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
 Profesor en el Instituto Federal de Educação, Ciencia e Tecnologia do Amazonas
 Av. Cosme Ferreira, 8045 – São José Operário

Manaus, Brasil – CEP: 69083-000
Correo electrónico: aride@ifam.edu.br

Adriano Teixeira de Oliveira

Doctor en Diversidad Biológica por la Universidade Federal do Amazonas
Profesor en el Instituto Federal de Educação, Ciencia e Tecnologia do Amazonas
Av. Sete de Setembro, 1975 – Centro
Manaus, Brasil – CEP: 69020-120
Correo electrónico: adriano.oliveira@ifam.edu.br

RESUMEN

Este trabajo presenta la tecnología biofloc para el cultivo de peces y crustáceos en ambientes tropicales. Se muestran, a través de diversos estudios los beneficios del uso del biofloc, con la presentación de conceptos sobre lo que es biofloc y sus constituyentes biológicos y nutricionales, la explicación sobre la importancia del uso y establecimiento de la relación carbono-nitrógeno y las diferentes herramientas para aireación del agua. Así, se busca sumar experiencias, datos y trabajos académicos con la proposición de metodologías eficientes para que el uso de la tecnología biofloc permita el aumento de la densidad y productividad en los cultivos. El uso de la tecnología biofloc es altamente significativa para la eficiencia y gestión de las fincas productoras de pescado, contribuyendo a: 1) disminución de los impactos sobre los ambientes por la reducción del consumo del agua y el mejor aprovechamiento de los nutrientes; 2) reducción de costos de alimento; 3) menor cantidad de efluentes; 4) mejor aprovechamiento de los recursos hídricos y suelo; 5) mayor productividad, ganancia y control de los animales bajo situaciones de cultivo.

Palabras-Clave: Acuicultura, Biofloc, cultivo intensivo, heterotrófico, nitrificante, relación carbono-nitrógeno.

ABSTRACT

This work seeks to present the biofloc technology for the farming of fish and other aquatic organisms in tropical environments. The benefits of its use are shown by various studies, with the presentation of concepts about what biofloc is, and its biological and nutritional constituents, the explanation about the importance of the use and establishment of the carbon-nitrogen ratio and the different tools for water aeration. We seek to register experiences, data and academic work proposing efficient methodologies to allow to increase crop density and productivity through the use of BFT technology. The use of biofloc technology is highly significant for the efficiency and management of fish producing farms, contributing to: 1) reduction of impacts on the environment through the decrease of water consumption and better use of nutrients; 2) feed cost reduction; 3) lower amount of effluents; 4) better use of water resources and land; 5) higher productivity, gain and control of animals being cultivated.

Keywords: Aquaculture, biofloc, intensive culture, heterotrophic, nitrifying, carbon-nitrogen relationship.

1 INTRODUCCIÓN

La producción mundial de peces a escala industrial es algo imperativo por el hecho de que los recursos pesqueros mundiales han alcanzado su límite de explotación y ya no tienen la capacidad de garantizar el abastecimiento de la población del planeta, la cual viene creciendo a una tasa anual de 1,5% (UN, 2014). Para el año 2016, datos preliminares señalan un consumo *per cápita* mundial de

pescado entre 20,3 y 20,5kg, un nuevo record. En ese mismo año la producción total de la acuicultura fue de 80×10^6 t de peces; $30,1 \times 10^6$ t de plantas acuáticas y $37,9 \times 10^3$ t de productos no alimentarios; con un valor estimado total de US\$ $243,5 \times 10^9$ (FAO, 2018).

Para Latinoamérica la situación no es muy diferente. La FAO prevé una significativa expansión de la producción acuícola en Latinoamérica y el Caribe, alcanzando una producción de $2,5 \times 10^6$ t, un crecimiento de casi 25% en comparación con los niveles presentados el 2010, cuando la región produjo $1,8 \times 10^6$ t. Entre los mayores productores de la región, Chile (8ª posición mundial en producción y 7ª en exportación) pasó el histórico liderazgo continental de Brasil (13ª posición mundial), produciendo en 2016 (dato productivo más actual) casi 1×10^6 t, mientras Brasil produjo $\sim 600 \times 10^3$ t, con un consumo continental anual *per capita* de 9,8kg (FAO, 2018).

A la par de que existe la necesidad de aumentar la producción pesquera a través de la acuicultura suplir la demanda de peces, hay una restricción muy grande por utilizar la intensificación como herramienta de cultivo. En un intento de disminuir impactos ambientales, sanitarios y económicos asociados al proceso de intensificación de la acuicultura, la tecnología 'biofloc' (BTF; una tecnología basada en el reciclaje de nutrientes, en particular del nitrógeno por medio del cultivo de biomasa bacteriana en el mismo lugar del cultivo de los organismos acuáticos de interés) promete popularizar el cultivo de peces, generando pocos efluentes y mayor facilidad en el control de patógenos que se aprovechan de la mala calidad de agua para parasitar a peces y camarones (Azim y Little, 2008; Emerenciano *et al.*, 2013; Bossier y Ekasari, 2017).

El cultivo BFT ha presentado resultados muy interesantes, una vez que en la mayoría de los casos no existe un gran requerimiento hídrico, solo una reposición debido a la evaporación, con un mayor control sobre los factores de bioseguridad de las fincas acuícolas y también por factores económicos, logísticos y financieros, una vez que la construcción de los estanques requieren menor tiempo para instalación y curado. Ello trae para los inversionistas un menor tiempo para retorno del capital, importante índice económico conocido como *payback* (Taw, 2010).

El cultivo con BFT se tornó popular en los medios académicos desde la década de 1990, con trabajos que presentaban el control del nitrógeno inorgánico por la manipulación de la relación carbono:nitrógeno (C:N) en el agua (van Rijn y Rivera, 1990; Hopkins *et al.*, 1995; Avnimelech, 1999). Esta tecnología ha sido foco y meta de muchas investigaciones en todo el mundo, pero aún necesita de una mayor divulgación a productores y otros miembros de la comunidad académica en general, desmitificando su implantación, uso y gestión, para que pueda cumplir así su función reduccionista en relación con el uso de recursos naturales para su operación (Ahmad *et al.*, 2017).

2 RELACIÓN CARBONO-NITRÓGENO**2.1 NITRÓGENO EN LA DIETA DE ORGANISMOS ACUÁTICOS Y SU INTERACCIÓN CON EL AMBIENTE**

Uno de los mayores problemas en acuicultura intensiva es la acumulación de nitrógeno inorgánico en el agua y la dificultad en su remoción (Avnimelech, 1999). Para producir 1kg de pez vivo se necesitan entre 1 y 2kg de alimento, pero 75% de éste no es aprovechado por los peces y va a la columna de agua, bien sea por excreción o simplemente por no ser consumido, permaneciendo en los efluentes del cultivo (Craig y Helfrich, 2017).

El nitrógeno (N_2) es un elemento presente en las proteínas (en media, 16% del total de una proteína es N_2). Los peces necesitan de proteínas ya que 65 a 75% del total de su materia seca corporal está conformado de polipéptidos con grupo amino-terminal. Los polipéptidos son responsables por la estructura (queratina, músculo y colágeno) y los mecanismos de regulación del metabolismo de las enzimas y hormonas (Fracalossi y Cirino, 2013).

Solo la ingestión regular de proteína (y por ende de N_2) puede suplir los aminoácidos esenciales para las funciones que garantizan el proceso de crecimiento hipertrófico (combinación de lisina, metionina y treonina) y la ingestión de los aminoácidos que son responsables por evitar antagonismos con la lisina, como es el caso de la arginina. O sea, es muy difícil bajar los elevados niveles de proteína de la dieta en peces debido a su importancia en las más variadas funciones, principalmente en relación con crecimiento y bienestar del animal (Righetti *et al.*, 2011).

Al establecer la dieta de peces en cultivo es imprescindible considerar que solo 25% del alimento llega a ser consumido. Eso significa que en caso de que la alimentación proporcionada sea de 2% de la biomasa al día tendríamos: a) 20g de alimento/kg de biomasa al día; b) 6,04g de proteína/kg de alimento de 32% de PB al día; c) 1,02g de N_2 /kg de biomasa al día; d) con 75% enviado al medio acuático, sea por el alimento no consumido o por vía de las excretas, 0,79g de N_2 /kg o 79kg·t de biomasa al día estarán disponibles para convertirse compuestos inorgánicos y tóxicos para los animales, tales como NH_4^+ (ion amonio), NH_3 (amonio no ionizado) y NO_2^- (nitrito) (Bakar *et al.*, 2015).

El principal producto de la excreción de los peces en sistemas de cultivo es el amonio, resultado del catabolismo de las proteínas. La interacción entre las formas tóxicas del N_2 en el agua, resultante del proceso denominado amonificación, es dependiente, principalmente, de los niveles de pH, de la temperatura y salinidad (Vinatea-Arana, 2004). Por eso, para bajar los niveles de N_2 inorgánico en el agua, una de las soluciones más usadas es cambiar el agua del medios, una vez que concentraciones continuas entre 0,01 y 0,05ppm de NH_4^+ y de 0,5ppm de NO_2^- son perjudiciales para las especies acuáticas más sensibles (Kubitza, 2011).

2.2 CÁLCULO DE LA RELACIÓN C:N PARA FORMACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL BIOFLOC

El uso de la técnica de recambio de agua para bajar los niveles de N₂ en la columna de agua trae problemas, como lo son el riesgo de fuga de los animales de cultivo, la transmisión y propagación de patógenos peligrosos para la acuicultura y medio ambiente, y los elevados costos por renovación de agua por bombeo. Así, el abordaje más interesante es el de aprovechar, y consecuentemente reducir, ese N₂ inorgánico para la producción de proteínas microbianas por la adición de fuentes de carbono (Avnimelech, 2007).

Las bacterias y otros microorganismos usan carbohidratos como fuente principal de alimento para generar energía y crecer. La capacidad de incorporación de C por parte de los microorganismos puede alcanzar entre 40-60% y el N₂ es necesario para que las células microbianas puedan producir nuevas células, donde el material básico es la proteína. O sea, la utilización microbiana de carbohidratos es acompañada de una inmovilización de N₂ inorgánico, un proceso microbiano que casi todas las especies de microorganismos llevan a cabo. Por eso, la adición de carbohidratos es una manera muy eficiente de reducir y minimizar la concentración de N₂ inorgánico en el agua (Avnimelech, 1999).

La relación óptima de 20:1 para C:N fue establecida por Avnimelech (1999) y es esencial para ofrecer las condiciones básicas para producción de proteína microbiana. Así, hay dos maneras de calcular la adición de C en el medio acuático (Tabla 01): por la concentración de nitrógeno amoniacal total (NH₃ + NH₄⁻) en el medio acuático (C_{agua}) y 2) por el nitrógeno presente en el alimento diariamente proporcionado para los animales en cultivo (C_{alimento}). Para el uso de estas ecuaciones debe tenerse en cuenta que el alimento ya tiene una relación C:N inicial, que debe ser considerada en el momento del cálculo (Tabla 02) (Kubitza, 2011).

Tabla 01. Cálculos para adición de carbono al medio acuático

$C_{\text{agua}}^1 = \frac{\text{TAN} \times (\text{C:N})}{F_C (\%)}$	$C_{\text{alimento}}^2 = \frac{\text{PB} \times \text{N} \times \text{RA} \times (\text{C:N})}{F_C (\%)}$
C _{agua} : cantidad de C para adición en función del agua	C _{alimento} : cantidad de C para adición en función del alimento
TAN: (NH ₃ + NH ₄ ⁻)	PB(g): cantidad de proteína bruta en 1kg de alimento
C:N: relación carbono:nitrógeno	N: % de nitrógeno en la PB (16%)
F _C : nivel de C (%) que hay en la fuente de C escogida	RA (residuo alimentario): % de alimento que no es consumido por los animales (en general, 75%)
	C:N: relación carbono:nitrógeno
	F _C : nivel de C (%) que hay en la fuente de C escogida

Tabla 02. Relaciones C:N presentes en alimentos según contenido de proteína bruta

Proteína bruta en el alimento (%PB)	Relación C:N
15	21,5:1
16	20:1
20	16:1
24	12:1
30	10,8:1
36	9:1
40	8:1

La fuente de carbono más usada para formación de los flocs es la melaza. La melaza es el resultado del proceso de la refinación del azúcar y, generalmente posee entre 45-50% de sustancias derivadas del azúcar, como sacarosa, glucosa y fructosa, con 30% de C, y está disponible en presentación líquida (Silva *et al.*, 2009) o en polvo (Brol *et al.*, 2017). Otras fuentes de carbono que también pueden ser utilizadas son el azúcar (31% de C), harina de yuca (46% de C) (Silva *et al.*, 2017) y residuo de cervecería (45,8% de C) (Gandini, 2013). Este último producto registró resultados muy satisfactorios frente a melaza y harina de yuca en cultivo de camarón *L. vannamei* (Gandini *et al.*, 2016). La adición de fuentes de C orgánico y la manutención de niveles óptimos de O₂ disuelto en el agua estimulan el desarrollo de bacterias heterotróficas, aumentando la eficiencia del sistema acuático en retener N₂ inorgánico y formando los flocs bacterianos que poseen elevados niveles de aminoácidos y otros elementos esenciales (Silva *et al.*, 2009).

3 QUÉ ES BIOFLOC?

3.1 LA COMUNIDAD MICROBIANA PRESENTE

Los primeros registros experimentales del uso de biofloc para fines acuícolas fueron llevados a cabo en el *Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer* con diferentes especies de camarones, en el inicio de los años 1970 (Emerenciano *et al.*, 2013). Son dos las categorías principales de poblaciones bacterianas en sistemas BFT: heterotrófica amonio-asimilativa y quimioautotróficas nitrificantes. El cambio de color del biofloc de verde para marrón es debido a pasaje a transición de una dominancia algal-autotrófica para una dominancia biofloc-bacteriana. La cantidad de bacterias varía entre 1×10^6 y 1×10^9 /ml de masa de biofloc y la materia seca entre 10 y $30 \text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$, con tamaño de partícula entre 100 y $1000 \mu\text{m}$ (Ahmad *et al.*, 2017), con baja densidad relativa y baja velocidad de precipitación en la columna de agua ($1-3 \text{m} \cdot \text{h}^{-1}$) (Sears *et al.*, 2006).

Azim y Little (2008) identificaron tres grandes grupos taxonómicos asociados al biofloc en cultivo *indoor* de tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*): Protozoa, Rotífera y Oligochaeta. Entre los protozoarios dominaron *Paramecium*, *Tetrahymena* y *Petalomonas*; para Rotífera dominaron *Lecane*, *Trichocerca*, *Polyarthra* y *Asplanchna*; y para Oligochaeta solo fue encontrado *Tubifex*. Los flocs identificados tenían una talla que varió entre 50 y 200µm.

Bakar *et al.* (2015) encontraron géneros de microalgas en sistemas BFT para cultivo de African catfish (*Clarias gariepinus*) que incluyeron *Scenedesmus*, *Cyclotella*, *Chaetoceros*, *Oocystis*, *Tribonema*, *Skeletonema*, *Micratinium*, *Anabaena*, *Gomphospaeria*, *Coelastrum*, *Oscillatoria* y *Protococcus*, y para zooplancton identificaron *Rotaria* y *Brachionus*.

Brol *et al.* (2017) estudiaron el cultivo de tilapias nilóticas en el sistema BFT en Brasil y caracterizaron la comunidad planctónica, la cual presentó variaciones en la densidad en función del tiempo. Ostrácodos y rotíferos fueron los más abundantes. Los rotíferos siempre estuvieron asociados con la existencia del biofloc, al paso que son responsables por la catálisis de los flocs y consumo de bacterias en el sustrato presente en el medio acuático.

A partir del análisis de las investigaciones relatadas se puede sugerir que la composición del biofloc presenta amplias diferencias. Fuentes de C utilizadas, intensidad de luz, relación depradador-presa, región del mundo, fuente de agua y otros factores más pueden contribuir para que esa diferencia sea muy significativa entre un experimento y otro. Pero existen algunos parámetros físicos principales (Tabla 03) para su identificación y caracterización, ya que se considera que solo hasta 20% de la fracción orgánica de los bioflocs son células microbianas vivas, entre 30-40% es materia orgánica y 60-70% son compuestos inorgánicos (Avnimelech, 2007; De Schryver *et al.*, 2008).

Tabla 03. Principales parámetros y métodos para la caracterización de bioflocs en sistemas BFT

Parámetro	Definición	Determinación	Rango
Sólidos suspendidos (TSS)	Cantidad de partículas presente en una muestra del agua (mg·l ⁻¹)	Las partículas son separadas del agua por filtración o centrifugación y deshidratadas <i>overnight</i> a 100°C.	0,2-1,0g·l ⁻¹
Sólidos volátiles suspendidos (VSS)	Cantidad de materia orgánica en forma de partícula en una muestra del agua (g·l ⁻¹)	Después de secado, los sólidos son calentados a 600°C. El SS disminuye el rendimiento del parámetro VSS.	SDD
Sólidos Sedimentables (SSD)	El volumen ocupado por la materia disponible en una muestra del agua (ml·l ⁻¹)	Obtenido a partir del volumen del floc después de 20min de sedimentación en un cono Imhoff	10-30ml·l ⁻¹

SDD: sin datos disponibles. Adaptado de De Schryver *et al.* (2008), Gaona *et al.* (2015), Brol *et al.* (2017).

La floculación de las comunidades microbianas es un proceso complejo. Su función está relacionada con el objetivo de agregar partículas de talla pequeña, creando agregados mayores y listos para el consumo de los peces. Los mayores constituyentes encontrados en la matriz biofloculante son polímeros macromoleculares como las glicoproteínas, polisacáridos, proteínas, lípidos, celulosa y ácidos nucleicos. Esas estructuras forman una matriz que encapsula células microbianas, resultando en un rápido y fácil proceso de formulación flocular. Bacterias heterotróficas con actividad biofloculante tienen un papel destacado en la formación y desenvolvimiento del biofloc (Jiang *et al.*, 2019).

Para promover la eficiencia en la agregación de biomasa microbiana es importante comenzar el inóculo inicial con especies que tengan características de agregación, condiciones de cultivo con niveles aceptables de relación C/N, pH, O₂ disuelto, temperatura y velocidad de agitación del agua de los tanques son factores importantes para la actividad de esos organismos (De Schryver *et al.*, 2008).

3.2 COMPOSICIÓN NUTRICIONAL

El biofloc es una comida natural disponible 24 horas al día a los animales en cultivo. La constante aireación y agitación de la columna de agua, así como la adición de fuentes de C, posibilita la descomposición aerobia y manutención de los niveles óptimos de los flocs microbianos en suspensión, permitiendo su continuo mantenimiento y reproducción. Bajo niveles ideales de la relación C:N, el N₂ inorgánico es inmovilizado por las células de las bacterias, mientras los substratos orgánicos son metabolizados. La conversión del amonio total en proteína microbiana, diferentes fuentes de C, habilidad del animal para ingerir y digerir el alimento y la densidad de los bioflocs en el agua son los responsables por los elevados niveles de proteína bruta y por el valor nutricional del biofloc presentes en sistemas BFT (Ahmad *et al.*, 2017). En la Tabla 04 se presentan algunos de los valores nutricionales encontrados en la literatura.

Tabla 04. Reportes de composición centesimal de bioflocs disponibles en la literatura

Composición BFT*	Azim y Little (2008)	Ballester <i>et al.</i> (2010)	Ekasari <i>et al.</i> (2016)
Proteína bruta	38%	30%	35%
Lípidos	3%	5%	5%
Cenizas	12%	40%	20%
Fibras	6%	8%	8%
Extracto libre de N ₂	41%	17%	33%

* Composición en la materia seca

Para entender las diferencias presentes entre los trabajos (Tabla 04) es necesario analizar las metodologías utilizadas en cada uno de los estudios. Azim y Little (2008) emplearon exclusivamente harina de trigo como fuente de C para cultivo de tilapia nilótica *Oreochromis niloticus*, añadida a una tasa del 60% en la alimentación diaria. Ballester *et al.* (2010) evaluarán el cultivo de *Farfantepenaeus paulensis* en sistemas intensivos BFT *outdoors* usando melaza y salvado de trigo como fuente de C y una relación C:N de 20:1. Silva *et al.* (2013) usaran salvado de trigo y melaza en el cultivo de *Litopenaeus vannamei* bajo sistema BFT, considerando una relación de 6g de C para convertir 1g de TAN en biomasa bacteriana. Por último, Ekasari *et al.* (2016), evaluando la aplicación de la tecnología BFT en la producción de alevinos de *Clarias gariepinus*, utilizaron solo melaza en una relación de 10:1 para estimular el crecimiento de biomasa heterotrófica.

Muchas son las especies de interés para la acuicultura que posee mecanismo de filtración del biofloc en suspensión, pudiendo reciclar los nutrientes, heces y materia orgánica disponibles en el medio acuático, reduciendo los costos de inversión y mantenimiento alimentar (Luo *et al.*, 2014). El mecanismo de filtración funciona como una bomba de succión, realizando filtración por flujo cruzado con presencia de moco en los rastros branquiales que sirve para la adhesión de las partículas. Esas partículas adheridas en el moco son enviadas para el esófago y después engullidas. En especies más eficientes, como es el caso de la tilapia, hay un mecanismo que regula el proceso de producción del moco que es dependiente del tamaño de la partícula adherida (Silva, 2016).

Como en acuicultura el costo del alimento representa algo cercano al 60% del costo total de producción (Sonoda *et al.*, 2016), el consumo de bioflocs disponibles en el agua puede generar reducciones de hasta 30% en la tasa de conversión de alimento (FCR: *feed conversion ratio*) en comparación con los sistemas tradicionales (Azim y Little, 2008; Silva *et al.*, 2013; Brol *et al.*, 2017).

4 AIREACIÓN EN LA TECNOLOGÍA BFT

Los principales objetivos de la aireación en acuicultura son remover gases como N₂ y CO₂ del agua y de elevar el nivel de la concentración de O₂ disuelto. Cuanto más O₂ es inyectado en el medio acuático menor es la cantidad de renovación de agua que el sistema necesita. La cantidad y la velocidad de transferencia de los gases al medio acuático depende, básicamente, de dos factores: momento de transferencia de masa (cuando hay entrada o salida de gases en el agua) y momento de equilibrio, donde hay las condiciones necesarias para que los gases se queden en equilibrio (Lekang, 2013).

El aireador, equipo responsable de elevar la concentración de O₂ disuelto en el agua, ha sido proyectado para crear condiciones lo más cerca posible a las condiciones de equilibrio entre el gas disponible en el aire atmosférico y el gas del medio acuático. En equilibrio con el aire atmosférico,

la solubilidad del O₂ en el agua aumenta con la reducción de la temperatura y salinidad de agua, así como con la elevación de la presión atmosférica (Boyd, 1998).

El recambio de gases entre agua y aire atmosférico ocurre cuando hay una diferencia de presión de O₂ entre aire y agua. El agua estará saturada de O₂ cuando se alcanza el límite de saturación conocido como concentración de saturación (C_S). Cuando la concentración del O₂ disuelto en el agua (C_M) sea mayor que C_S va a ocurrir difusión de O₂ del agua hacia el aire y va a ocurrir a la inversa cuando C_M sea menor que C_S. Para saber si el agua está debajo o encima del límite de saturación, es necesario que utilizar la siguiente ecuación (Boyd, 1998):

$$\% \text{ saturación O}_2 = \frac{C_M}{C_S} \times 100$$

donde C_S: concentración de O₂ disuelto (mg·l⁻¹) en estado de saturación para la temperatura (°C) y salinidad (mg·l⁻¹) medidas, y C_M: concentración de O₂ disuelto medida (mg·l⁻¹)

La tabla de solubilidad de O₂ en el agua (Boyd, 1998) trae informaciones importantes sobre las relaciones que existen entre O₂, temperatura y salinidad. Una de las informaciones importantes de la tabla es indicar un límite de solubilidad por encima del cual el O₂ empezará a fluir del agua hacia el aire. Además, cuando el suministro de O₂ esté por encima del límite de saturación durante períodos prolongados, se pueden generar condiciones que resultan en una enfermedad conocida como ‘embolia gaseosa’ o ‘enfermedad de las burbujas’ (en inglés, *gas bubble disease*; GBD), que puede provocar burbujas bajo la piel, exoftalmia, burbujas entre los radios de las aletas, burbujas en la membrana mucosa, entre otras patologías, produciendo elevadas mortalidades de los animales sometidos a esas condiciones (Boyd y Ahmad, 1987).

Para la llevar a cabo el suministro de O₂ en acuicultura existen tres métodos de aireación principales (Ghomi *et al.*, 2009; Pasco, 2015):

1) *flujo de agua* (aireadores tipo Venturi): el efecto de auto aspiración de aire o efecto Venturi se basa en los principios del tubo de Venturi, utilizando un eyector que emplea el vacío creado por la conducción forzada para mezclar O₂ con el agua a través de una tubería perpendicular al flujo de agua (Piccin *et al.*, 2010). Por este método la eficiencia media de aireación (SAE) es de 1,1 kgO₂/kWh;

2) *flujo de aire* (sopladores y compresores tipos blowers): sistema que utiliza sopladores, compresores, tuberías y difusores de aire para conducir aire atmosférico a través de burbujas al medio acuático. Según la ley de Laplace, una burbuja pequeña posee una tensión superficial mayor que una más grande con la misma presión circundante. Por eso, este sistema usa mangueras o discos difusores que van a producir micro o nano-burbujas, aumentando el tiempo de contacto entre burbuja y agua, facilitando la consecuente difusión del aire en la columna de agua. Por este método la SAE media es de 0,8 kgO₂/kWh;

3) *turbulencia* (aireadores tipo *splash* y de paleta): la aireación de turbulencia usa la relación inversa entre el espesor de los films o películas en la interfase agua-aire y el flujo laminar para transferir gases del aire para el medio acuático. A mayor turbulencia en la superficie del agua, menor va a ser el espesor de las películas que separan agua y aire, facilitando el proceso de transferencia de los gases presentes en el aire atmosférico, en especial el O₂. Por este método la SAE media de los aireadores ‘*splash*’ es de 2,03kgO₂/kWh y la SAE media de los aireadores ‘paleta’ es de 1,55 kgO₂/kWh.

Los tres métodos de aireación son eficientes y pueden ser empleados de forma complementaria. Los criterios para su empleo deben evaluar si fueron diseñados para condiciones de agua limpias, de cultivo, o para aplicaciones relacionadas con estaciones de tratamiento de agua potable. La mayoría de los aireadores vienen con especificaciones técnicas acerca de la tasa de transferencia de O₂ estándar (SOTR, kgO₂/h) (Boyd y Ahmad, 1987), pero esa tasa de transferencia puede ser modificada por la presión atmosférica, por diferentes condiciones de equilibrio y saturación de agua en los tanques, por temperatura y salinidad. Por eso, es de fundamental importancia la realización de pruebas en condiciones productivas reales para determinación de la tasa de transferencia de O₂ (TTO) de los aireadores en cada situación específica.

Para aireadores del tipo difusores, la ecuación es más sencilla, una vez que hay información sobre la cantidad de aire que está siendo llevado al medio acuático:

$$TTO_{\text{blower}} = \frac{P_{\text{aire}} \cdot O_2 \cdot Q}{1000}$$

donde TTO_{blower} : tasa de transferencia de O₂ por flujo de aire (kgO₂/h), P_{aire} : peso de 1litro de aire atmosférico (1,288g), O₂: concentración de O₂ presente en el aire atmosférico (21%), y Q: flujo del aire atmosférico (l·h⁻¹)

Para sistemas de turbulencia (‘*splash*’, ‘paleta’ y ‘Venturi’), donde es necesario hacer una medición de la variación de la concentración en el agua, la ecuación es más compleja. Es importante resaltar que, debido al factor de solubilidad del O₂, los aireadores, en media, son 1,5% menos eficiente por cada grado de aumento de la temperatura:

$$TTO_{\text{difusión}} = \frac{(OD_{\text{Final}} - OD_{\text{Inicial}}) \cdot V}{1.000.000}$$

donde $TTO_{\text{difusión}}$: tasa de transferencia de O₂ por difusión atmosférica (kgO₂/h), OD_{Final} : concentración de O₂ disuelto después de 1h de medición (mg·l⁻¹), OD_{Inicial} : concentración de O₂ disuelto antes de empezar el teste (mg·l⁻¹), y V: volumen del reservorio (lit)

Después de definir la TTO para el sistema de aireación escogido, es necesario conocer su eficiencia en relación a su potencia (ESA). La ESA es fundamental para conocer la eficiencia real del sistema y para proyectar la potencia eléctrica necesaria y sus costos de producción relativos a los gastos con energía eléctrica.

$$ESA = \frac{TTO}{POT}$$

donde ESA: eficiencia del sistema de aireación (kgO₂/h/cv), TTO: tasa de transferencia de O₂ (kgO₂/h), y POT: potencia del sistema (cv).

La atención prestada a la cantidad del flujo que va a permitir la formación del floc es muy importante y debe ser establecida para cada caso, tanque por tanque. La información acerca de los diferentes niveles de potencia y de como interactúan con el proceso de floculación trae ventajas, permitiendo determinar el rango de potencia para el óptimo crecimiento de biofloc y el rango de potencia para la producción de flocs de diferentes tallas, una vez que los peces adultos prefieren flocs de mayores tallas, así como los juveniles prefieren flocs de tallas menores (De Schryver *et al.*, 2008).

Para proyectar la cantidad de O₂ necesaria para cada tanque es necesario conocer quienes son los consumidores de O₂ del tanque. El consumo de O₂ para especies tropicales de peces puede ser determinado por la siguiente ecuación (Kubitza, 1998):

$$COD = \left(\frac{1.000}{\text{peso}} \right) \cdot (\text{peso})^{0,82}$$

donde COD: consumo de O₂ en mg·h⁻¹·kg⁻¹ de pez, y peso: peso medio de los peces (g).

Los otros consumidores serán los demás organismos presentes en el medio acuático, por ejemplo los bioflocs heterótrofos responsables por convertir N₂ del medio acuático en proteína microbiana y que van a demandar aireación las 24 horas del día. Esa respiración de los organismos es difícil de prever, pero se puede hacer una estimación de la misma apagando el sistema de aireación por una hora y del total de la disminución del O₂ en el tanque, estimar lo que es debido a respiración de los peces. Así, también es posible hacer una previsión sobre cuánto tiempo el sistema soporta sin recibir aireación, como prueba en caso de emergencia.

Hay reportes y pruebas para uso y eficiencia de aireadores ‘*splash*’, ‘paletas’, ‘Venturi’ y de flujo de aire usando mangueras o discos difusores en cultivos de peces bajo sistemas BFT (Pasco, 2015). Pero para definir cual es la mejor opción es necesario conocer el sistema que va a ser empleado y sus respectivas características. Los aireadores superficiales (‘*splash*’ y ‘paletas’) son más eficientes para reducir la espesura de los films que hay entre agua y aire, lo cual facilita la difusión del O₂ atmosférico en el medio acuático. Sin embargo, al ser accionados, los sistemas de aireación superficiales rápidamente saturan de O₂ la superficie de agua y en el resto de la columna de agua el incremento de O₂ disuelto acaba ocurriendo de manera muy lenta (Boyd y Ahmad, 1987). Ya los aireadores sub-superficiales (‘Venturi’ y flujo de aire) son más eficientes para mezclar la columna de agua, considerando la producción ascendente de burbujas, lo cual dificulta la deposición de materia orgánica en el fondo de los tanques, mezclando todos los componentes existentes y permitiendo que no se formen capas que permitan superposición de los flocs. En la literatura se reporta el uso de más de un sistema de aireación por tanque, siempre en busca de una mayor eficiencia en los procesos de

suministro de O₂ por caballo de fuerza (HP) y una mejor mezcla de la columna de agua (Crab *et al.*, 2009; Zhen *et al.*, 2013; Correia *et al.*, 2014).

5 CONCLUSIONES

Para enfrentar los desafíos cada vez mayores de producir alimentos más baratos en menos tiempo y considerando parámetros de rastreabilidad y sustentabilidad, la tecnología BFT sigue ganando espacio frente al cultivo tradicional. Mientras los sistemas tradicionales usan grandes extensiones de tierras y gran volumen hídrico, produciendo una gran cantidad de residuos y efluentes en los cursos de agua naturales, los sistemas BFT facilitan la ejecución de un cultivo más racional que busca una gestión con bioseguridad. La reducción de los costos de la alimentación y el valor nutricional de los bioflocs también es otro factor fundamental que debe contribuir para la propagación de la tecnología BFT en las regiones y países donde aún no es usada comúnmente.

REFERENCIAS

- AHMAD, I. et al. Biofloc technology: an emerging avenue in aquatic animal healthcare and nutrition. **Aquacult. Int.**, v. 25, p. 1215-1226, 2017.
- AVNIMELECH, Y. Carbon and nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. **Aquaculture**, v. 176, p. 227–235, 1999.
- AVNIMELECH, Y. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. **Aquaculture**, v. 264, p. 140-147, 2007.
- AZIM, M.; LITTLE, D.C. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. **Aquaculture**, v. 283, p. 29-35, 2008.
- BAKAR, N.S.A. et al. Optimization of C/N ratios for nutrient removal in aquaculture system culturing African catfish, (*Clarias gariepinus*) utilizing Bioflocs Technology. **Int. Biodeter. Biodegrad.** v. 102, p. 100-106, 2015.
- BALLESTER, E.L.C. et al. Effect of practical diets with different protein levels on the performance of *Farfantepenaeus paulensis* juveniles nursed in a zero exchange suspended microbial flocs intensive system. **Aquacult. Nutr.**, v. 16, p. 163-172, 2010.
- BROL, J. et al. Tecnologia de bioflocos (BFT) no desempenho zootecnico de tilapias: efeito da linhagem e densidades de estocagem. **Arch. Zootec.**, v. 66, n. 254, p. 229-235, 2017.
- BOSSIER, P.; EKASARI, J. Biofloc technology application in aquaculture to support sustainable development goals. **Microb. Biotechnol.**, v. 10, p.1012-1016, 2017.

- BOYD, C.E.; AHMAD, T. **Evaluation of Aerators for Channel Catfish Farming**. Auburn, EUA: Auburn University, 52 p. 1987.
- BOYD, C.E. **Water Quality for Aquaculture**. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn, EUA: Auburn University, 39 p., 1998.
- CORREIA, E.S. et al. Intensive nursery production of the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* using two commercial feeds with high and low protein content in a biofloc-dominated system. **Aquacult. Eng.**, v. 59, p. 48-54, 2014.
- CRAB, R. et al. Bioflocs technology application in over-wintering of tilapia. **Aquacult. Eng.**, v. 40, p. 105-112, 2009.
- CRAIG, S.; HELFRICH, L.A. **Understanding Fish Nutrition, Feeds and Feeding**. Petersburg, EUA: Virginia State University, Publication 420-256, 4 p., 2017.
- DE SCHRYVER, P. et al. The basics of bio-flocs technology: the added value for aquaculture. **Aquaculture**, v. 277, p. 125-137, 2008.
- EKASARI, J. et al. Biofloc technology application in African catfish fingerling production: The effects on the reproductive performance of broodstock and the quality of eggs and larvae. **Aquaculture**, v. 464, p. 349-356, 2016.
- EMERENCIANO, M. et al. Biofloc Technology (BFT): A review for aquaculture application and animal food industry. En MATOVIC, M.D. (2013) **Biomass Now - Cultivation and Utilization**. InTech Online, p. 301-328, 2013.
- FAO. **The State of World Fisheries and Aquaculture - Meeting the Sustainable Development Goals**. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 227 p., 2018.
- FRACALOSSO, D.M.; CYRINO, J.E.P. **Nutriaqua: Nutrição e Alimentação de Espécies de Interesses para a Aquicultura Brasileira**. Florianópolis, Brasil: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática, 375 p., 2013.
- GANDINI, F.A. **Avaliação do Resíduo de Cervejaria e Outras Fontes de Carboidratos para o Sistema de Bioflocos e o Crescimento do Camarão Branco, *Litopenaeus vannamei***. 49 f. Tesis (Doctorado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- GANDINI, F.A. et al. Avaliação de diferentes fontes de carboidratos para o sistema de bioflocos e crescimento do camarão branco. **Bol. Inst. Pesca**, v. 42, p. 831-843, 2016.
- GAONA, C.A.P. et al. Effect of different total suspended solids levels on a *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) BFT culture system during biofloc formation. **Aquacult. Res.**, p. 1-10, 2015.
- GHOMI, M.R. et al. An experimental study of nozzle diameters, aeration depths and angles on standard aeration efficiency (SAE) in a venturi aerator. **Water Pract. Technol.**, v. 4, n.3, p. 1-8, 2009.

- HOPKINS, J.S. et al. Effect of two protein levels and feed rate combinations on water quality and production of intensive shrimp ponds operated without water Exchange. **J. World Aquacult. Soc.**, v. 26, p. 93-97, 1995.
- JIANG, J. et al. Screening of a high bioflocculant-producing bacterial strain from an intensive fish pond and comparison of the bioflocculation effects with *Rhodococcus erythropolis*. **Aquacult. Res.**, v. 50, p. 1047-1056, 2019.
- KUBITZA, F. Qualidade da água na produção de peixes – Parte III (Final). **Panor. Aquicult.**, v. 8, n. 47, p. 35-39, 1998.
- KUBITZA, F. Criação de tilápias em sistemas de bioflocos sem renovação de água. **Panor. Aquicult.**, v. 21, n. 125, p. 14-23, 2011.
- LEKANG, O.I. **Aquacultural Engineering**. West Sussex, UK: Wiley-Blackwell, 433pp, 2013.
- LUO, G. et al. 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**, v. 422-423, p.1-7, 2014.
- RIGHETTI, J.S. et al. Redução da proteína em dietas para tilápias-do-nilo por meio da suplementação de aminoácidos com base no conceito de proteína ideal. **Rev. Bras. Zootec.**, v. 40, p. 469-476, 2011.
- SEARS, K. et al. Density and activity characterization of activated sludge flocs. **J. Environ. Eng.**, v. 132, p. 1235-1242, 2006.
- SILVA, U.L. et al. Efeito da adição do melaço na relação carbono/nitrogênio no cultivo de camarão *Litopenaeus vannamei* na fase berçário. **Acta Sci.**, v. 31, p. 337-343, 2009.
- SILVA, A.F. et al. Efeito das altas densidades de estocagem no crescimento e sobrevivência de *Litopenaeus vannamei* na fase final de engorda, cultivados em sistemas de bioflocos (BFT). **Ciênc. Anim. Bras.**, v. 14, p. 279-287, 2013.
- SILVA, M.A. **Níveis de proteína bruta em dietas para a tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) cultivada em sistema de bioflocos em duas fases de crescimento**. 84 f. Tesis (Doctorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2016.
- SILVA, U.L. et al. Carbon sources and C:N ratios on water quality for Nile tilapia farming in biofloc system. **Caatinga**, v. 30, p. 1017-1027, 2017.
- SONODA, D.Y. et al. Modelo de preço de ração para peixe no período de 2001 a 2015. **iPecege**, v. 2, n. 3, p. 57-71, 2016.
- PASCO, J.J.M. **Aeração em cultivos superintensivos de tilápias *Oreochromis niloticus*, em bioflocos e com troca mínima de água**. 120 f. Tesis (Doctorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2017.

PICCIN, J.S. et al. Otimização de sistema de autoaspiração de ar tipo Venturi para tratamento de água ferruginosa. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, v. 14, p. 531-537, 2010.

TAW, N. Biofloc technology expanding at white shrimp farms. **Global Advocate**, v. may/June, p. 24-26, 2010.

UN. **The World Population Situation in 2014: A Concise Report**. Department of Economic and Social Affairs. Nueva York, EUA: United Nations, 38 p., 2014.

VAN RIJN, J.; RIVERA, G. Aerobic and anaerobic biofiltration in an aquaculture unit-nitrite accumulation as a result of nitrification and denitrification. **Aquacult. Eng.**, v. 9, p. 217-234, 1990.

VINATEA-ARANA, L. **Princípios Químicos de Qualidade da Água em Aquicultura: Uma Revisão para Peixes e Camarões**. Florianópolis, Brasil: UFSC, 2 ed, 231 p., 2004.

ZHEN, M.A. et al. The effect of three culture methods on intensive culture system of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). **J. Ocean Univ. China**, v. 12, p.434-440, 2013.