

Tecnología biofloc en la acuicultura: estado de avance, desarrollo y aplicación

Biofloc Technology in Aquaculture: Progress, Development and Application Status

Tecnologia de bioflocos na aquicultura: estado de progresso, desenvolvimento e aplicação

Gabriel E. Escobar-Rodriguez¹ , Jorge. A. Zambrano-Navarrete² , Miguel. A. Landines-Parra³ 

Artículo de investigación

Recibido: 08 de septiembre de 2022

Aceptado: 27 de febrero de 2023

Publicado: 16 de junio de 2023

RESUMEN

La producción acuícola con tecnología biofloc se ha constituido como una alternativa técnica emergente que favorece la eficiencia en el uso del agua, permite la recuperación de nutrientes disueltos y sedimentados en el agua y reduce las emisiones contaminantes. A lo largo de este documento se muestran sus bases técnicas generales, los tipos de biofloc, los tipos de comunidades microbianas predominantes y su papel en el manejo y aprovechamiento de compuestos nitrogenados. Por otro lado, se discute la necesidad de mantener un adecuado balance de carbono y nitrógeno (C:N), así como las diversas fuentes de carbono (C) empleadas a nivel experimental y comercial para cumplir con dicho propósito. De igual forma, se tratan aspectos fundamentales como las condiciones de calidad y cantidad de agua para operar estos sistemas, y los compuestos a ser monitoreados como parte del esquema de manejo. Finalmente, se explora el valor del biofloc como recurso alimenticio, la importancia de la selección

- 1 Departamento de Producción Animal. Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia Universidad Nacional de Colombia. Email: geescobarr@unal.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0421-4295>
- 2 Docente Ocasional, Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá Colombia. Email: [jazambranon@unal.edu.co](mailto:jzambranon@unal.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7886-1255>
- 3 Profesor Asociado, Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá Colombia. Email: fisiopeces@unal.edu.co - malandinezp@unal.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3261-8297>

Como Citar (Norma Vancouver): Escobar GE, Zambrano JA, Landines-Parra MA. Tecnología biofloc en la acuicultura: estado de avance, desarrollo y aplicación. Orinoquia, 2023;27(1):e-826 <https://doi.org/10.22579/20112629.826>

La Revista Orinoquia es una revista de acceso abierto revisada por pares. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Internacional Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY 4.0), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se acredite el autor y la fuente originales.

Consulte <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

OPEN ACCESS



de especies acuícolas compatibles con esta técnica, los resultados favorables obtenidos en materia de respuesta inmune, resistencia a enfermedades, biocontrol y uso de probióticos en el marco de la bioseguridad, la sostenibilidad económica, así como las ventajas, desventajas y perspectivas en la aplicación de este método productivo.

Palabras claves: floc microbiano, producción acuícola, recuperación de nutrientes, calidad del agua.

ABSTRACT

Biofloc technology (BFT) in aquaculture is an emerging technique that enhances water-use efficiency, enables the recovery of dissolved and settled nutrients, and reduces polluting emissions. This document presents the technical bases foundation of BFT, including biofloc categories, types of microbial communities, and their role in managing nitrogen compounds. Additionally, it discusses the importance of maintaining an appropriate carbon-to-nitrogen (C:N) ratio, as well as the carbon sources used at both experimental and commercial levels to achieve this balance. Fundamental aspects such as water quality requirements to operate BFT systems and the key compounds that must be monitored as part of a comprehensive management strategy are also addressed. Finally, the feeding value of biofloc, species compatibility, effects on immune response and disease resistance outcomes, biocontrol strategies, the use of probiotics within a biosafety framework, economic sustainability, advantages, disadvantages, and future perspectives on the application of this production method are explored.

Key Words: Biofloc, aquaculture production, nutrient recovery, water quality.

RESUMO

A produção aquícola utilizando a tecnologia de bioflocos surgiu como uma alternativa técnica emergente que promove o uso eficiente da água, permite a recuperação de nutrientes dissolvidos e sedimentados na água e reduz as emissões poluentes. Este documento apresenta as bases técnicas gerais, os tipos de bioflocos, as comunidades microbianas predominantes e seu papel no manejo e utilização de compostos nitrogenados. Por outro lado, discute-se a necessidade de manter um equilíbrio adequado de carbono e nitrogênio (C:N), bem como as diversas fontes de carbono (C) utilizadas em níveis experimentais e comerciais para cumprir esse propósito. Da mesma forma, são abordados aspectos fundamentais como as condições de qualidade e quantidade de água para operação desses sistemas, bem como os compostos a serem monitorados como parte do esquema de gestão. Por fim, explora-se o valor do bioflocos como recurso alimentar, a importância da seleção de espécies aquícolas compatíveis com esta técnica, os resultados favoráveis obtidos em termos de resposta imune, resistência a doenças, biocontrole e

utilização de probióticos no âmbito da biossegurança, sustentabilidade econômica, bem como as vantagens, desvantagens e perspectivas da aplicação deste método de produção.

Palavras chave: *flocos microbianos, produção aquícola, recuperação de nutrientes, qualidade da água.*

INTRODUCCIÓN

La acuicultura es considerada como una actividad altamente productiva que contribuye a alcanzar la seguridad alimentaria de las naciones (FAO, 2020). Sin embargo, es cuestionada por competir con la población humana y con otros sistemas de producción animal por el uso del agua, atribuyéndole efectos negativos sobre los cuerpos de agua que la abastecen y sobre los cuales produce vertimientos que afectan el ambiente. Teniendo en cuenta lo anterior, en los últimos años se han desarrollado técnicas escalables a nivel comercial, las cuales buscan reciclar los nutrientes no aprovechados y los que son excretados por las especies en sistemas de producción aquícola. En ese sentido, la tecnología de cultivo en biofloc se centra en el establecimiento y consolidación de consorcios microbianos que sirven como fuente de alimentación suplementaria junto con la reutilización intensiva y permanente del recurso hídrico (Medina, 2018).

Los sistemas de producción aquícola en floc microbiano también llamado biofloc o BFT (por sus siglas del inglés), nacieron en la década de los años 70 y su conocimiento ha evolucionado en aspectos como el mantenimiento del balance C:N, mediante la adición de fuentes exógenas de C, la crianza selectiva de comunidades bacterianas, el manejo de sólidos suspendidos junto a la reducción de las descargas de efluentes al medio, entre otros (Emerenciano *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2019).

Desde la perspectiva económica, esta técnica permite reutilizar los nutrientes depositados en el fondo de los estanques (heces y alimento no consumido), a través del uso de sistemas de aireación y suspensión, facilitando su aprovechamiento por

parte de comunidades microbianas en condiciones aerobias, las cuales posteriormente son ingeridas por los organismos de cultivo como fuente alimenticia suplementaria, generando reducción en los costos de alimentación de hasta 16% según estudios en sistemas superintensivos de camarón blanco (Jatobá *et al.*, 2014).

A nivel nutricional, los consorcios microbianos que componen el biofloc poseen un contenido de proteína, lípidos, cenizas, vitaminas y minerales equiparable con el de materias primas proteicas convencionales, por lo cual es considerada como una materia prima nutritiva para uso en sistemas de producción animal (Martínez-Córdova *et al.*, 2015; Becerril-Cortés *et al.*, 2017).

A nivel zootécnico, la técnica BFT ha mostrado beneficios en el mejoramiento de las tasas de crecimiento y sobrevivencia, así como en la reducción de las tasas de morbilidad y de conversión alimenticia de las especies aquícolas cultivadas (Becerril-Cortés *et al.*, 2017).

El objetivo del presente documento es servir como referente para conocer el estado de avance, desarrollo y aplicación de esta técnica productiva en acuicultura, así como caracterizarla para conocer sus ventajas y desventajas frente a otras formas de producción.

GENERALIDADES

De acuerdo con Collazos y Arias (2015), los principales avances conceptuales sobre la producción aquícola BFT se dieron en la década de los 80, cuando se reconoció el papel fundamental de los microorganismos acuáticos en el aprovechamiento

to del C orgánico como fuente de energía, y del N para síntesis de proteína (Avnimelech, 2007), fomentando el establecimiento de redes tróficas sustentadas en las relaciones simbióticas entre los organismos que las integran (Collazos y Arias, 2015). El N presente en el medio de cultivo es aprovechado por parte de los microorganismos, dando lugar a la síntesis de proteína microbiana que posteriormente es consumida como suplemento dietario en sistemas acuícolas intensivos. En tales condiciones, se hace necesaria la adición de C exógeno, con el fin de mantener proporciones adecuadas entre este elemento y de N, de tal forma que se maximicen las tasas de crecimiento poblacional de microorganismos, fomentando reducciones en las concentraciones de desechos nitrogenados en el medio de cultivo. Existen trabajos de investigación previos orientados a estudiar las características, ventajas y desventajas de diversas fuentes de carbono en sistemas Biofloc (Crab *et al.*, 2012; Emerenciano *et al.*, 2013).

En tales condiciones se hace necesario el monitoreo y manejo de parámetros operacionales del cultivo como temperatura, oxígeno disuelto, pH, alcalinidad, niveles de carbono orgánico, niveles de materia orgánica, sólidos suspendidos totales, tasa de aireación, tasa de mezcla, tamaño de los flóculos y la relación relativa entre poblaciones de microorganismos (Dauda, 2020). El manejo de dichos parámetros permite definir las condiciones bajo las cuales se desarrollaría el cultivo, posibilitando el establecimiento de la vía fotoautotrófica en la que el predominio de poblaciones de algas participan en la transformación de amoníaco a nitrato; de la vía quimioautotrófica en la que el metabolismo bacteriano garantiza también dicha transformación y de la vía heterotrófica por la cual se transforman los nutrientes en biomasa microbiana que abunda en estas redes y que puede ser aprovechada por los organismos de cultivo, incluso como materia prima para formulación de raciones (Himaja, 2016; Dauda, 2020). La aplicación de la técnica BFT en acuicultura, ha incrementado la productividad y ha traído beneficios a nivel sanita-

rio por los efectos probióticos de inhibición competitiva de patógenos (Emerenciano *et al.*, 2013).

TIPOS DE SISTEMAS BFT

Existen múltiples variables a considerar para clasificar los sistemas de producción acuícola BFT como el ambiente disponible (espacio cerrado o al aire libre), nivel de intensividad (sea semiintensivo, intensivo o superintensivo), la especie de cultivo a emplear (peces, crustáceos, moluscos o policultivo), la fuente de C empleada, las características de los equipos de soporte a la aireación empleados o el perfil nutricional del alimento balanceado suministrado, las cuales fomentan el desarrollo de diversos tipos de biofloc (Liu *et al.*, 2021; Abakari *et al.*, 2020). Sin embargo, existe consenso en que un criterio correcto para la clasificación de los sistemas BFT corresponde a la ruta empleada para la transformación del N amoniacal en biomasa microbiana. En ese sentido, los sistemas pueden clasificarse en fotoautotróficos, quimioautotróficos y heterotróficos (Dauda, 2020).

Los sistemas BFT pueden también clasificarse de acuerdo a la disposición del equipamiento utilizado y las condiciones del ambiente generado en:

- (a) Sistemas de crecimiento suspendido, los cuales se caracterizan por mantener el sustrato (materia orgánica) y la masa activa de fitoplancton, bacterias heterótrofas y quimiotrofas suspendida mediante fuerte aireación mecánica (Abdel-Fattah *et al.*, 2020; Hargreaves, 2006), los cuales son sistemas ampliamente utilizados en Colombia por su simplicidad.
- (b) Biorreactores de membrana de crecimiento adjunto (AGB por sus siglas en inglés *Attached Growth Biofilters*), que se caracterizan por transportar los sustratos desde las unidades de cría hasta los reactores especializados llamados biofiltros en donde se realizan acciones específicas y los cuales son de flujo lineal formando un tren de tratamiento. Esto favorece que en su interior se produzca el proceso de nitrificación, que a su vez

reduce la cantidad de sólidos en suspensión (Davidson *et al.*, 2008; Hargreaves, 2006), haciendo posible la retención de biomasa microbiana para luego emplearla como materia prima en la de raciones (p.ej. harina de biofloc).

(c) Reactores de biopelícula de cama móvil (MBBR por sus siglas en inglés *Moving Bed Biofilm Reactor*), en donde se lleva a cabo un tratamiento de tipo aeróbico similar al AGB, pero incluyendo en el biorreactor una serie de objetos de alta superficie específica de contacto con el agua donde se desarrollan las biopelículas con los microorganismos. La eficiencia del proceso depende de manera directa del medio depositado en el reactor, el nivel de oxígeno disuelto y la carga orgánica tratada (Jiang *et al.*, 2021; Liang *et al.*, 2021; Ødegaard *et al.*, 2000; Wang, 2021), asemejándose a los biofiltros en sistemas RAS y que han dado lugar a la creación de sistemas integrados denominados BioRAS (Khanjani *et al.*, 2024).

(d) *Tecnología perifitón*, que hace uso de la biota autotrófica y heterotrófica (que incluye bacterias, hongos, protozoos, fitoplancton, zooplancton y un amplio rango de invertebrados) que es consumida por peces y crustáceos de cultivo. Factores como la intensidad de luz y la disponibilidad de los nutrientes, afectan la eficiencia de producción de la biomasa de perifitón (Rajkumar *et al.*, 2015; Asaduzzaman *et al.*, 2008).

COMPOSICIÓN DE LAS COMUNIDADES MICROBIANAS EN LOS SISTEMAS BFT

Dentro de la gama de microorganismos presentes en los sistemas BFT se incluyen organismos unicelulares, autótrofos, heterótrofos, procariontes, eucariontes y metazoarios (rotíferos, formas larvales de organismos, nauplios de crustáceo y nemátodos) (Sherr, 2000). La estructura de la población microbiana está directamente relacionada con las rutas de transformación del N amoniacal

predominantes en el sistema BFT, las cuales a su vez dependen de las condiciones de manejo químico-nutricional y ambiental del cultivo. En los sistemas BFT organismos fotoautótrofos (compuestos principalmente por microalgas de los géneros *Spirogyra*, *Anabaena* y *Oscillatoria*) coexisten con organismos quimioautótrofos y heterótrofos, lo cual indica que las rutas de biotransformación del N amoniacal se pueden desarrollar simultáneamente. La composición microbiológica en los sistemas BFT dependerá también de factores como la fuente de C y de la relación C/N, entre otros muchos factores (Dauda, 2020).

Teniendo en cuenta la diversidad de los mecanismos para la transformación de compuestos nitrogenados a través de diferentes rutas, se considera que el manejo programado de las comunidades bacterianas influye en el éxito de los sistemas BFT, promoviendo la asimilación de algas, la oxidación bacteriana quimioautotrófica y asimilación bacteriana heterotrófica. La asimilación exclusiva de N por parte de las algas encontraría limitaciones por su baja capacidad para incorporar nutrientes, por lo cual se debe promover también el desarrollo de poblaciones bacterianas, las cuales muestran mejores tasas de asimilación de N (Dauda, 2020). Por otro lado, la acción de las bacterias quimioautotróficas en el proceso de nitrificación contribuye a la oxidación del amoníaco para formar nitrito (NO_2) y posteriormente nitrato (NO_3), que posee menor nivel de toxicidad. Los organismos quimioautótrofos están representados principalmente por los géneros *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus* y *Nitrosovibrio* para la oxidación de amoníaco a NO_2 y por los géneros *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira* y *Nitrospina* para la oxidación de NO_2 a NO_3 (Ebeling *et al.*, 2006; Ray *et al.*, 2011). Otros estudios muestran que los *phyla* de bacterias que predominan en el sistema BFT corresponden en orden descendente a proteobacterias, actinobacterias, saccharibacterias y bacteroides (Liu *et al.*, 2021).

RUTAS DE TRANSFORMACIÓN DE LOS COMPUESTOS NITROGENADOS EN SISTEMAS BFT

Estudios previos indican que los peces asimilan tan solo entre el 15 y 30% del N del alimento balanceado suministrado. El resto del N en un sistema acuícola está representado en alimento no consumido y en las excreciones amoniacales potencialmente tóxicas y de cuya oxidación se da lugar a la presencia de NO_2 y NO_3 , que pueden afectar también la calidad del agua de cultivo. Así, dietas proteicas ricas en N originan altas concentraciones de compuestos nitrogenados en la columna de agua (Azim *et al.*, 2008; Ray *et al.*, 2011).

En sistemas BFT, la vía autotrófica basada en comunidades algales se aprovecha a través de la fotosíntesis de compuestos nitrogenados inorgánicos, CO_2 y la energía lumínica procedente del sol, siendo este último uno de los factores más limitantes durante los ciclos diarios de transformación de compuestos nitrogenados, generando además un alto consumo de oxígeno durante las horas de baja o nula disponibilidad lumínica (Azim *et al.*, 2008; Ebeling *et al.*, 2006). Otros aspectos limitantes de la vía fotoautotrófica están relacionados con la variabilidad de la biomasa algal en el medio de cultivo (por efectos de la luminosidad y la disponibilidad de nutrientes, entre otros), la cual puede llevar al incremento de la demanda bioquímica de oxígeno y a la producción de compuestos tóxicos de origen algal (Dauda, 2020).

Por otro lado, la vía de transformación de compuestos amoniacales a partir de la acción de organismos quimioautótrofos desarrolla el proceso de nitrificación en el que se produce la oxidación del N amoniacal a NO_2 y de NO_2 a NO_3 por acción bacteriana. La eficiencia en la realización de estos procesos depende de factores como la concentración de oxígeno disuelto, pH, temperatura, alcalinidad, relación C:N, concentración de amoníaco y NO_2 presentes, entre otros (Ebeling *et al.*, 2006;

Ray *et al.*, 2011). En ese sentido, las bacterias nitrificantes son autótrofas debido a que como fuente de carbono emplean CO_2 con altos requerimientos de oxígeno (Dauda, 2020).

Finalmente, los microorganismos heterótrofos asimilan nitrógeno presente en formas orgánicas para sintetizar proteínas celulares de manera similar a como lo hacen los grupos autotróficos, pero siendo dependientes de las concentraciones de C orgánico y de oxígeno disuelto en el medio (Ebeling *et al.*, 2006; Ray *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2020). Es decir, el incremento en la relación C:N estimula el crecimiento de las poblaciones de organismos heterótrofos en los sistemas BFT a costa de las poblaciones fotoautótrofas y quimioautótrofas de las cuales se alimentan (Dauda, 2020).

IMPORTANCIA DE LA RELACIÓN C:N EN SISTEMAS BFT

En los sistemas BFT, la relación C:N influye directamente en la composición y la dinámica de las comunidades microbianas, afectando la calidad del agua y la disponibilidad de nutrientes para las especies de cultivo. La presencia de microorganismos pertenecientes a las tres principales rutas de metabolización del N permite el equilibrio en el sistema y el establecimiento de cadenas tróficas (Jatobá *et al.*, 2014). En general, las redes autotróficas requieren principalmente de energía luminosa, CO_2 y nutrientes inorgánicos y producen biomasa algal y oxígeno a través de la fotosíntesis (Azim *et al.*, 2008), requiriendo además relaciones C:N >6 (Dong *et al.*, 2021). Entre tanto, los organismos quimioautótrofos utilizan compuestos nitrogenados como el amonio (Altamente tóxico para las especies de cultivo) para producir biomasa en bajas cantidades y con el beneficio de realizar la oxidación de amonio, nitritos y nitratos, cada uno de menor toxicidad que el anterior, respectivamente (Ray *et al.*, 2011). Sin embargo, ambas vías autotróficas son lentas y no producen suficiente cantidad de biomasa alimenticia suplementaria. Por otra parte, los microorganismos heterótrofos descontaminan rápidamente el agua a través de la

producción de nuevas células para lo cual requieren de relaciones altas de C:N (>15) y gran cantidad de oxígeno disuelto para mantener un óptimo crecimiento poblacional y calidad del agua estable (Ebeling *et al.*, 2006; Ray *et al.*, 2011). Los microorganismos heterótrofos en sistemas BFT muestran mayor variabilidad debido a que bacterias, protozoos y hongos que descomponen materia orgánica disuelta pertenecen a este grupo (Azim *et al.*, 2008). Además, generan biomasa consumible por la especie de cultivo y nutrientes inorgánicos aprovechables por los organismos autótrofos (Ebeling *et al.*, 2006; Azim *et al.*, 2008).

Se ha demostrado que bajo condiciones aerobias la descomposición de materia orgánica es más eficiente, permitiendo a los microorganismos aprovechar entre 40 y 60% para la producción de biomasa (Avnimelech, 1999; Azim *et al.*, 2008).

Para optimizar el proceso de producción de biomasa microbiana, la relación C:N puede modificarse a través de la inclusión de diferentes fuentes de C y/o reduciendo el contenido de proteínas en el alimento (Avnimelech, 1999; Hargreaves, 2006; Xu *et al.*, 2016). Generalmente se procura mantener la proporción C:N (>15) para que las condiciones sean favorables para el crecimiento de la población bacteriana heterotrófica (Xu *et al.*, 2016; Luo *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019). Sin embargo, algunos autores sugieren que una relación C:N de 10 es suficiente para el desarrollo adecuado del sistema (Avnimelech, 1999; Crab *et al.*, 2012; Ray *et al.*, 2011; Mirzakhani *et al.*, 2019).

FUENTES DE CARBONO EN SISTEMAS BFT

Las bacterias heterotróficas aprovechan el C orgánico como fuente energética y estructural para el desarrollo de nuevas células (Luo *et al.*, 2017; Ray *et al.*, 2011). Las diferentes fuentes de C pueden generar variaciones en la composición de las poblaciones en los ambientes BFT (Azim *et al.*, 2008;

Li *et al.*, 2018; Ray *et al.*, 2011), lo cual puede deberse tanto a factores de manejo como la eficiencia con la que se mantiene la relación C:N del sistema, como a las propiedades físicoquímicas del agua como pH, alcalinidad, temperatura y salinidad (Ebeling *et al.*, 2006) y puede llegar a tener efectos dentro de los organismos cultivados debido a que las diferentes especies microbianas colonizan el intestino de los organismos cultivados, actúan como probióticos y afectan la estructura poblacional del microbioma y su función fisiológica (Li *et al.*, 2018), produciendo una protección inmunológica potencial (Dauda, 2020). Por lo anterior, es muy importante definir la fuente de C en el sistema, debido a que se ha encontrado que la inclusión de diferentes fuentes de C conduce a diferentes perfiles proteicos, de carbohidratos y ácidos grasos del biofloc producido (Ray *et al.*, 2011).

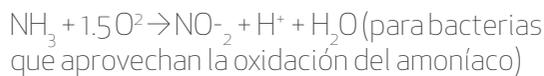
Entre las fuentes de carbohidratos habitualmente incluidas se pueden encontrar la glucosa, el glicerol, acetato, sacarosa, melaza, harina de yuca, harina de arroz, entre otras. Dichas fuentes son usadas de forma común en sistemas productivos con el fin de aumentar la relación C:N (De Souza *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2018). No obstante, estas requieren de una adición constante, contribuyendo a aumentar la tasa de consumo de oxígeno debido a la rápida degradación por parte de los microorganismos (Ridha *et al.*, 2020). Por ello, se han buscado alternativas como fuentes naturales de C, generalmente ricas en celulosa como pajas y henos, las cuales no requieren ser adicionadas con alta frecuencia y son de bajo costo (Li *et al.*, 2018). Estas fuentes consisten en carbohidratos complejos y menos solubles con lenta tasa de eliminación de amoníaco (Dauda, 2020). Sin embargo, estos compuestos pueden generar efluentes con carbono orgánico disuelto y alterar el color del agua de cultivo (Li *et al.*, 2018).

Por otro lado, se han estudiado fuentes alternativas de carbono, entre las que se encuentran polímeros biodegradables como biocarbón (Iber *et al.*, 2025), polihidroxibutirato-hidroxivalerato (PHBV),

polibutileno succinato, β -ácido hidroxibutírico (PHB) y policaprolactona (Li *et al.*, 2018), que además contribuyen a la oxidación del amoníaco (Li *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019).

IMPORTANCIA DEL OXÍGENO EN SISTEMAS BFT

El oxígeno es el elemento más limitante en sistemas BFT debido a que de su concentración y disponibilidad dependen parámetros determinantes de la calidad del agua de cultivo, como la tasa de oxidación de amonio, la degradación de materia orgánica y la proliferación de microorganismos aerobios (Adineh *et al.*, 2019; Dauda, 2020). El uso de oxígeno en ambientes BFT es indispensable dentro de los procesos de oxidación del amoníaco y de nitrito, así:



Además de afectar a los organismos de cultivo, la disponibilidad de oxígeno regula el equilibrio microbiano y aumenta la actividad metabólica de las bacterias quimioautótrofas y heterótrofas (Hargreaves, 2006). Por otra parte, los microorganismos autótrofos, al aprovechar el nitrato y realizar fotosíntesis, contribuyen a la producción de oxígeno durante el día, lo que a su vez incrementa la productividad primaria; este proceso se puede medir a través de la detección de clorofila- a y el aumento de sólidos suspendidos totales (SST) formados por microalgas (Dauda, 2020; Poli *et al.*, 2019). Sin embargo, durante la noche consumen oxígeno, haciendo necesarios sistemas de monitoreo de oxígeno (Contreras *et al.*, 2020; Ray *et al.*, 2011) y de aireación para garantizar las condiciones óptimas en el sistema (Zhang *et al.*, 2025).

Por lo anterior, para mantener niveles adecuados de oxígeno y evitar hipoxia, se hace indispensable el uso de aireadores que incorporan o *blowers* que

inyectan aire a través de difusores, cuya potencia debe estar correlacionada con el tamaño de los estanques, la densidad del biofloc, el tamaño de los organismos en producción (y su demanda de oxígeno), así como con las condiciones ambientales (Dauda, 2020; Liu *et al.*, 2021).

Para presupuestar la demanda total de oxígeno en sistemas BFT se debe considerar el requerimiento de oxígeno de la especie cultivada además el de la microbiota (Zhang *et al.*, 2025). El requerimiento de oxígeno de las especies cultivadas es muy variable y depende de factores fisiológicos y ambientales. Por ejemplo, para *Piaractus mesopotamicus* en BFT se calculó un requerimiento de oxígeno de 6.68 mg/L, con una variación de ± 0.4 (Bacchetta *et al.*, 2020), mientras que para la especie *Pimephales promelas* el valor recomendado es de 6 mg/L (Park *et al.*, 2017), para la especie *Oreochromis niloticus* se ha encontrado un requerimiento mínimo de 5 mg/L (de Oliveira Alves *et al.*, 2017).

CALIDAD DE AGUA EN SISTEMAS BFT

La calidad del agua en sistemas BFT afecta directamente la salud de los organismos y la estabilidad del ecosistema microbiano (Alkhamis *et al.*, 2023). Un parámetro determinante de la calidad del agua en sistemas BFT es el amonio excretado por la especie de cultivo, dado que este compuesto es tóxico incluso en concentraciones muy bajas, con dependencia de otros parámetros como el pH y la temperatura.

En las explotaciones tradicionales la eliminación del N amoniacal total (NAT) se realiza mediante sistemas de biofiltración o de grandes recambios de agua, no obstante, esto impide la recuperación y el aprovechamiento del N (Azim *et al.*, 2008). En contraste, en los sistemas BFT este compuesto es aprovechado por los microorganismos, promoviendo la formación de biomasa microbiana a tra-

vés de la descomposición de productos orgánicos de desecho y siendo estimulada por la adición de fuentes externas de C, el suministro de alimento diario de balanceado y recambios de agua mínimos (Ebeling *et al.*, 2006; Ray *et al.*, 2011).

La acumulación de biomasa microbiana y materia orgánica en el agua incrementa los sólidos suspendidos totales (SST), produciendo el aumento de la turbidez en los estanques. Estos sólidos están compuestos por flóculos microbianos, materia orgánica coloidal, polímeros orgánicos, restos de alimento no digerido y células muertas (Contreras *et al.*, 2020). En sistemas BFT gran parte de estos flóculos pueden ser aprovechados, sin embargo, en exceso impiden el paso de la luz reduciendo la tasa de fotosíntesis de los organismos autótrofos, además de causar congestión en las branquias de peces (Alkhamis *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2025). Los niveles adecuados de SST dependen de la especie en producción y se miden mediante precipitación en conos Imhoff (Xie *et al.*, 2012). Para camarón blanco *L. vannamei* que SST entre 400 y 600 mg L⁻¹ son adecuados para su producción (Schveitzer *et al.*, 2013).

Finalmente, los procesos microbianos en sistemas BFT (tanto autótrofos como heterótrofos) demandan carbonatos, lo que produce cambios directos en parámetros como la alcalinidad y el pH del medio de cultivo. La liberación de CO₂ proveniente de la respiración de los organismos disminuye el pH (Alkhamis *et al.*, 2023; Dauda, 2020). Para estabilizar estos parámetros, se pueden emplear aditivos como bicarbonato de sodio, cal o NaOH, dependiendo de los requerimientos específicos de la especie en cultivo. Otra alternativa es el uso de torres de extracción de gases, aunque su implementación implica un consumo energético adicional (Ebeling *et al.*, 2006; Ray *et al.*, 2011).

BIOFLOC COMO ALIMENTO EN ACUICULTURA

Los flóculos microbianos son una fuente rica de compuestos bioactivos entre los cuales se incluyen clorofilas, vitaminas liposolubles, ácidos grasos poliinsaturados, carotenoides, fitoesteroles y taurina (Yu *et al.*, 2023; Yu *et al.*, 2020; Anand *et al.*, 2014; Azim y Little, 2008; de Schryver, 2008), además, se han encontrado propiedades estimulantes de las enzimas digestivas que resultan en un mejor aprovechamiento de nutrientes (Li *et al.*, 2018; Long *et al.*, 2015).

En el caso de la tilapia de Mozambique (*O. mossambicus*), se ha evaluado el biofloc como alimento, encontrando que su bajo contenido de materia seca (MS, 1.4%) es un factor limitante que se acentúa con la presencia de peces en los estanques BFT, hallándose una correlación inversamente proporcional entre la MS del biofloc y la densidad de peces presentes en dicho ambiente (Avnimelech, 2007).

A pesar de dicha limitación, el biofloc posee una proteína cruda superior al 20%, lo cual permite considerarlo como fuente proteica no convencional para consumo directo y transformable en harina para incluir en alimentos concentrados (Shao *et al.*, 2017; Azim *et al.*, 2008).

Shao *et al.* (2017) encontraron que en camarón *Litopenaeus vannamei* se puede sustituir hasta el 15% de la harina de pescado de la dieta con harina de biofloc, sin afectar la tasa de crecimiento, ni la actividad de las enzimas digestivas. Resultados similares fueron encontrados en *Penaeus monodon* (Anand *et al.*, 2014).

SELECCIÓN DE ESPECIES ACUICOLAS PARA SISTEMAS BFT

La selección de especies acuícolas compatibles con la técnica BFT se ha sustentado en el estudio de parámetros zootécnicos en especies de cultivo, así como sobre su capacidad para tolerar una alta concentración de sólidos suspendidos (Avnimelech, 2007). A nivel reproductivo se evalúan aspectos como la cantidad de huevos producidos y la supervivencia de las postlarvas. Algunos ejemplos de especies piscícolas que reúnen condiciones de adaptabilidad a BFT son la carpa común *Cyprinus carpio* y la tilapia *Oreochromis niloticus* (Bacchetta et al., 2020; Manzoor et al., 2020; Ridha et al., 2020). Para el caso de tilapia, se han realizado estudios sobre su capacidad para realizar crecimiento compensatorio, con resultados positivos (Azim et al., 2008; Gallardo-Collí et al., 2020).

Burford et al. (2004) encontraron que la especie *Litopenaeus vannamei* consume floc microbiano, siendo compatible con el reciclaje de nutrientes, la reducción de los costos de alimentación y el ajuste al contenido proteico en las raciones en sistemas BFT. En concordancia, el estudio de Wasielesky et al. (2002) señala que la especie presenta mayores tasas de crecimiento tras la ingesta de floc microbiano, comparado con sistemas tradicionales de producción.

En especies como cangrejos y camarones se han logrado mejoras en la productividad, la rentabilidad y la viabilidad del producto en el mercado al cultivarlas en sistemas BFT (Contreras-Sillero et al., 2020; Martínez-Montaña et al., 2020; Pérez-Fuentes et al., 2013). Gran parte de las investigaciones en producción de crustáceos en sistemas de BFT se han centrado en camarón blanco, catalogándola como una especie idónea para alcanzar altos niveles de productividad esperados bajo esquemas BFT (Holstein, 2019; Wasielesky et al., 2006; Xu et al., 2013). En ese sentido, se ha encontrado que los sistemas BFT de camarón emplean hasta un 12% adicional de agua de recambio y

buscan emplear fuentes de C económicas para mantener la alta eficiencia (Antonio de Lorenzo et al., 2015). En otros crustáceos como *Penaeus monodon* producidos en BFT, se han presentado altas tasas de crecimiento y mejoras en la digestibilidad (Anand et al., 2014).

Por lo anterior, se ha encontrado que los sistemas de producción BFT son compatibles con técnicas productivas como la acuicultura multitrofica integrada (IMTA), en la que es posible producir peces, crustáceos, moluscos, plantas superiores y otros organismos con la maximización del aprovechamiento de los compuestos orgánicos e inorgánicos del sistema (Iber et al., 2025).

APORTES DE LOS SISTEMAS BFT AL MEJORAMIENTO DE LA RESPUESTA INMUNE Y A LA RESISTENCIA A ENFERMEDADES

Se ha encontrado que la producción en BFT mejoró la respuesta inmune y la integridad morfológica intestinal en *Oreochromis niloticus* (Mirzakhani et al., 2019). De manera similar, en *Procambarus clarkii* cultivada en BFT, se encontró el mejoramiento de la respuesta inmune y de la actividad antioxidante, junto con una mayor eficiencia en el uso del alimento (Li et al., 2018). Se ha obtenido respuesta igualmente positiva en sistemas asociados de camarón blanco y pepino de mar (Contreras-Sillero et al., 2020).

En cangrejos cultivados en ambientes BFT, se encontró el predominio de mecanismos de fagocitosis, encapsulación de agentes patógenos y cambios en la cantidad de hemolinfa, mejor crecimiento, función antihipóxica, resistencia al estrés oxidativo y mejora general del sistema inmunológico, al compararlos con aquellos producidos con técnicas convencionales (Mirzakhani et al., 2019). Lo anterior sugiere que los bioflocs podrían tener un efecto probiótico natural que inhibe el desarrollo de patógenos. En ese sentido, el biofloc comparte ciertas similitudes con los probióticos, ya que ambos contienen microbios vivos con po-

tencial inmunoestimulante que además compiten por nutrientes con potenciales patógenos (Dauda, 2020; Emerenciano *et al.*, 2013).

BIOCONTROL Y USO DE PROBIÓTICOS EN SISTEMAS BFT

La acuicultura en países en vías de desarrollo enfrenta pérdidas económicas de hasta el 50% atribuidas a las enfermedades ocasionadas por patógenos (Minaz *et al.*, 2024). La baja tasa de recambio hídrico en sistemas BFT reduce significativamente el ingreso de patógenos al sistema (Khanjani *et al.*, 2024). De acuerdo con Dauda (2020), la acuicultura demanda alternativas al uso de antibióticos para el control de patógenos y, de manera concordante, el esquema productivo BFT hace posible el establecimiento de comunidades microbiales, las cuales poseen interacciones complejas que promueven el biocontrol de patógenos y estimulan la respuesta inmune en los organismos de cultivo. Adicionalmente, la competencia por espacio y sustrato son mecanismos que favorecen el efecto probiótico en los sistemas BFT, a través de la reducción en las tasas de multiplicación de poblaciones patógenas (Khanjani *et al.*, 2024).

Como parte de los procesos de biocontrol en sistemas BFT se encuentran los mecanismos de comunicación bioquímica entre células (*quorum sensing*), los cuales regulan la expresión génica de las especies microbianas y determinan aspectos como la densidad celular, las tasas de agregación flocular, los mecanismos de protección de biopelículas y de microcolonias, entre otros (de Schryver *et al.*, 2008). Por otro lado, se ha encontrado que los flóculos microbianos en sistemas BFT contienen compuestos bioactivos que mejoran el estado nutricional e inmune de los organismos de cultivo, con efecto probiótico (Dauda, 2020).

El uso de probióticos como alternativa para el uso de antibióticos, provee protección a los peces contra patógenos e incrementa el rendimiento de las especies de cultivo (Defoirdt *et al.*, 2004). Las cepas de *Bacillus subtilis*, *Paracoccus sp* y

Bacillus pumillus añadidas al agua, contribuyeron a la degradación de residuos indeseables como el amoníaco y NO₂, a una mayor tasa de mineralización de materia orgánica (Lalloo *et al.*, 2007) y a la reducción del pH (Khanjani *et al.*, 2024).

En las especies cultivadas, el uso de probióticos a base de *Bacillus amyloliquefaciens* en sistemas BFT mejoró la respuesta inmune del camarón blanco *Litopenaeus vannamei*. También se encontró en juveniles *Clarias gariepinus* que la inclusión de probióticos generó mayores tasas de crecimiento con respecto a tratamientos sin inclusión de biofloc (Cienfuegos *et al.*, 2017). Hoseinifar *et al.* (2017) encontraron que el uso de prebióticos suplementarios (2% de la ración) tales como fructooligosacáridos, galactooligosacáridos o inulina, mejoró la respuesta inmune y la capacidad antioxidante, junto con la reducción de niveles de estrés producido por patógenos y la mejora de los indicadores de salud, bienestar animal y rendimiento productivo en *Cyprinus carpio*. Por lo anterior, en la actualidad es común el uso de cepas probióticas en sistemas de BFT (Cienfuegos *et al.*, 2017).

BIOSEGURIDAD EN SISTEMAS BFT

En los sistemas BFT proliferan gran cantidad de microorganismos tanto benéficos como patógenos, lo que representa un reto para la aplicación de estrategias de control de enfermedades (Iber *et al.*, 2025). La estructura de la comunidad de microorganismos en sistemas BFT es fundamental para el mantenimiento tanto de la salud de los organismos de cultivo como de la calidad del agua (Dong *et al.*, 2021). Adicional a los procesos de inhibición competitiva entre microorganismos en los sistemas BFT, que reducen la incidencia de enfermedades (Emerenciano *et al.*, 2013), también se han encontrado en el agua de cultivo compuestos bioactivos entre los que se incluyen clorofila, polifenoles, polisacáridos, fitoesterol, vitaminas y β -hidroxibutirato, que poseen propiedades antagonistas a patógenos (Yu *et al.*, 2023; Khanjani *et al.*, 2024).

Existen técnicas biotecnológicas (Hibridación *in situ* con fluorescencia *FISH*, reacción en cadena de polimerasa-PCR y electroforesis en gel con gradiente desnaturizante-DGGE, entre otras) útiles para evaluar la composición de las poblaciones de microorganismos en sistemas BFT, su cambio en el tiempo y su relación con el desempeño productivo del sistema (de Schryver *et al.*, 2008). Dichas técnicas pueden emplearse también para la aplicación de protocolos de bioseguridad en sistemas BFT.

Los brotes de enfermedades infecciosas en la acuicultura también han dado lugar a la generación de medidas prácticas de bioseguridad como el uso de estanques revestidos de materiales sintéticos, el establecimiento de barreras físicas contra especies ajenas a la producción, el manejo de líneas de control de aves y la reducción de las tasas de recambio hídrico, con la resultante reducción en la incidencia de patógenos incluso en sistemas BFT (Crab *et al.*, 2012; Moss *et al.*, 2012).

Por las ventajas alcanzadas en términos de bioseguridad frente a los sistemas acuícolas convencionales, los sistemas BFT se han popularizado, lo cual ha sido respaldado por los resultados de investigaciones que indican que los procesos de comunicación bacteriana (*quorum sensing*) poseen efecto protector de los organismos cultivados contra infecciones bacterianas (Khanjani *et al.*, 2024).

ASPECTOS ECONÓMICOS EN SISTEMAS BFT

La viabilidad económica en los sistemas BFT se basa en la reducción de los gastos de alimentación (considerado como uno de los rubros de mayor peso dentro de los costos de producción acuícola) (Iber *et al.*, 2025) y también en el menor gasto económico para la captación, uso, tratamiento y liberación del recurso hídrico (Ogello *et al.*, 2014); en

conjunto, estos dos factores técnicos representan el valor agregado de mayor importancia que la tecnología BFT trajo a la acuicultura (de Schryver *et al.*, 2008).

Por otro lado, la eficiencia en el manejo de la calidad del agua y la menor incidencia de enfermedades en sistemas BFT abrieron la oportunidad para incrementar la capacidad de carga en las unidades de producción, del volumen productivo y de la eficiencia en el uso del recurso tierra (Iber *et al.*, 2025; de Oliveira Alves *et al.*, 2017).

De Schryver *et al.* (2008) calcularon una reducción general cercana al 10% en los costos de producción de tilapia en sistemas BFT al compararlos con sistemas acuícolas convencionales, lo cual es consistente con los hallazgos de Wang *et al.* (2024) sobre beneficios económicos similares al comparar técnicas productivas intensivistas integradas como BFT, contra esquemas productivos convencionales. Sin embargo, a los sistemas BFT se les atribuyen elevados costos de establecimiento inicial y de uso de energía para aireación frente a sistemas tradicionales, lo cual genera cambios en la canasta de costos productivos (Khanjani *et al.*, 2024).

Finalmente, la calidad nutricional del alimento balanceado empleado en sistemas de producción de camarón en BFT ha mostrado ser un factor incidente sobre las tasas de ingreso y rentabilidad en cada ciclo productivo de la especie, por la vía del mejoramiento de su desempeño productivo. Esto afecta parámetros económicos como: el valor de los costos variables, la tasa interna de retorno (TIR) sobre los costos totales, el período de recuperación de la inversión (PRI) y el valor presente neto (VPN) (Braga *et al.*, 2016), demostrando que el uso de alimentos balanceados de alta digestibilidad, incrementó la rentabilidad en sistemas BFT por la mejora en las tasas de crecimiento y la reducción en los tiempos de cultivo conseguida.

PROS Y CONTRAS DE LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA BFT

Tras décadas de investigación y desarrollo en sistemas BFT, se han identificado múltiples ventajas a nivel ambiental, biológico, técnico y económico, en comparación con la acuicultura desarrollada en sistemas tradicionales de flujo continuo (Iber *et al.*, 2025):

Existe consenso en que el principal aporte de la tecnología BFT a la acuicultura corresponde a la baja tasa de generación de efluentes liberados al medio, reduciendo su impacto ambiental, lo que permite catalogarla como una actividad productiva sostenible (Liu *et al.*, 2019; de Oliveira Alves *et al.*, 2017; Iber *et al.*, 2025). Además, con su aplicación se mejoran tanto los niveles de productividad y eficiencia en el uso del espacio, como los parámetros de crecimiento, eficiencia en el uso de alimento y reducción de las tasas de mortalidad en poblaciones de peces (Ekasari *et al.*, 2015; Ekasari *et al.*, 2014; Long *et al.*, 2015) y crustáceos de cultivo (Mirzakhani *et al.*, 2019; Jatobá *et al.*, 2014; Poli *et al.*, 2015; Antonio de Lorenzo *et al.*, 2015; Xu y Pan, 2014; Anand *et al.*, 2014; Pérez-Fuentes *et al.*, 2013; Ray *et al.*, 2011; Krummenauer *et al.*, 2011; Emerenciano *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2013), alcanzando mejores tasas de inmunidad, actividad antioxidativa y tolerancia al estrés (Minaz *et al.*, 2024). Tales beneficios han sido reportados para la producción intensiva de camarón blanco en países como Egipto, Brasil, Indonesia e India (Iber *et al.*, 2025).

A nivel técnico, la BFT es una tecnología empleada en acuicultura que muestra mayor efectividad en la transformación de compuestos nitrogenados, en la reducción de sus niveles de toxicidad, y en el mejoramiento de la calidad del agua de cultivo (Minaz *et al.*, 2024). Por otro lado, estudios de los efectos económicos de la aplicación de la tecnología BFT sobre la producción de tilapia y camarón blanco indican que la reducción alcanzada en las tasas de conversión alimenticia, en los costos de

alimentación y el aumento en las tasas de crecimiento llevan al mejoramiento de la sostenibilidad y rentabilidad de las operaciones acuícolas (Iber *et al.*, 2025).

Los sistemas BFT enfrentan también desafíos a nivel técnico, biológico, económico y comercial (Iber *et al.*, 2025):

La necesidad de emplear aireación constante en sistemas BFT para mantener los flóculos en suspensión y para satisfacer la demanda de oxígeno de las comunidades microbianas representa un reto técnico que exige el uso de tecnologías eficientes de respaldo a la aireación, de monitoreo permanente de los parámetros de calidad de agua y de personal adecuadamente cualificado (Iber *et al.*, 2025; Halim, 2019; Minaz *et al.*, 2024), incrementando los costos de establecimiento y operación. En ese sentido y por causa de las altas densidades, se aumenta la posibilidad de ocurrencia de incidentes que pueden generar pérdidas económicas significativas (Crab *et al.*, 2012). De igual forma, el establecimiento y mantenimiento de ambientes BFT exige condiciones ambientales que favorezcan el desarrollo de las poblaciones microbianas, como la temperatura adecuada. Se ha encontrado que este factor limita el número de especies productivas y de regiones en donde se puede desarrollar con viabilidad la producción BFT (Minaz *et al.*, 2024). De igual forma, se ha evidenciado que los períodos para conseguir la estabilización en los procesos de transformación de compuestos nitrogenados pueden llegar a ser más prolongados en sistemas BFT al compararlos con sistemas convencionales de flujo continuo (Minaz *et al.*, 2024).

Por otro lado, las condiciones productivas intensivas a las que son sometidas las especies productivas en los sistemas BFT las pueden hacer más propensas al ataque de bacterias patógenas oportunistas (Iber *et al.*, 2025).

Finalmente, dependiendo del mercado se puede presentar menor aceptabilidad hacia los produc-

tos acuícolas BFT por parte del consumidor final (Minaz *et al.*, 2024), indicando que la idea del reciclaje de desechos en los sistemas acuícolas puede generar prevención por las condiciones intensivistas del cultivo (Ogello *et al.*, 2014) y sus posibles efectos negativos sobre la calidad del producto final (Green *et al.*, 2014). En ese sentido, es importante ampliar el conocimiento del efecto que tienen las condiciones productivas BFT sobre la calidad de la carne de organismos cultivados (Chan-Vivas *et al.*, 2019).

ALCANCES Y PERSPECTIVAS DE LOS SISTEMAS BFT

Cuando se entienden y aplican adecuadamente sus principios de operación, los sistemas BFT producen beneficios que van desde la reducción de la contaminación ambiental, el incremento de la productividad y de la resistencia a enfermedades en los organismos de cultivo, hasta el aumento de la rentabilidad percibida por los acuicultores (Dauda *et al.*, 2020). Para maximizar el aprovechamiento de sus beneficios, es necesaria la cualificación del personal, aspecto que se considera relevante para el desarrollo futuro de los sistemas BFT a nivel global (Minaz *et al.*, 2024) y para concretar sus aportes al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (Bossier y Ekasari, 2017).

Existen también retos para el desarrollo mundial de los sistemas BFT como el estudio sobre fuentes regionales de C y la optimización de dichas fuentes para mejorar su productividad, su eficiencia y la calidad del biofloc producido (Khanjani *et al.*, 2024).

De acuerdo con autores como Iber *et al.*, (2025), el futuro de los sistemas BFT implica innovaciones como la aplicación de la tecnología del Internet de las Cosas (IoT), la automatización de los procesos de alimentación y de monitoreo en tiempo real de la relación C:No de los niveles de oxígeno (Khanjani *et al.*, 2024). Considerando tanto el uso continuo de aireación para sustentar las necesidades de

oxígeno por parte de micro y macroorganismos en sistemas BFT, como la escasez de estudios sobre el uso eficiente de la aireación, se prevé la necesidad de realizar estudios sobre la optimización de la aireación para reducir los costos de operación en sistemas BFT (Minaz *et al.*, 2024). En ese sentido, también son necesarios nuevos estudios para evaluar la utilidad de los sistemas BFT en el tratamiento de aguas residuales por biorremediación utilizando algas y microalgas propias del sistema (Fimbres-Acedo *et al.*, 2020).

Con la implementación de los sistemas BFT se genera proteína bacteriana que permite reducir los costos de alimentación (Contreras-Sillero *et al.*, 2020; Shao *et al.*, 2017). Los flóculos llegan a poseer características nutricionales equiparables con las de materias primas convencionales como harina y aceite de pescado, reduciendo así la dependencia de la acuicultura hacia dichos *commodities* (Manzoor *et al.*, 2020).

Finalmente, para realizar la transición hacia la acuicultura sostenible es necesaria la creación de marcos regulatorios que estimulen la implementación de sistemas acuícolas sostenibles y de uso eficiente del agua (Como BFT), así como la emisión de políticas de incentivos fiscales a este tipo de modelos productivos. En ese sentido, las políticas de control ambiental y de certificación para sistemas acuícolas sostenibles pueden ayudar a mejorar la aceptabilidad y el reconocimiento del consumidor hacia productos obtenidos por tecnología BFT (Iber *et al.*, 2025).

CONCLUSIONES

Las actuales condiciones ambientales y demográficas a nivel global exigen el desarrollo de una acuicultura más productiva y sostenible. El surgimiento de la técnica BFT y su integración con otras técnicas como la acuaponía, la IMTA y el BioRAS han contribuido al cumplimiento de dichos propósitos. En ese sentido, las investigaciones en sistemas de producción acuícola BFT muestran sus

beneficios en la reducción de la huella ambiental y en el aumento de los niveles de productividad y eficiencia al compararlos con sistemas de producción convencional.

Teniendo en cuenta sus requerimientos ambientales y técnicos, la tecnología productiva BFT representa una oportunidad para el desarrollo de la acuicultura sostenible en regiones tropicales, en donde también puede contribuir al aporte de proteína de origen animal de alta calidad e inocuidad, así como a la consolidación de su vocación productiva acuícola.

El conocimiento profundo sobre los procesos bioquímicos que suceden en el ambiente acuático de los sistemas BFT, así como la comprensión y el manejo efectivo de las relaciones entre los microorganismos que conforman las redes tróficas, es fundamental para garantizar su sostenibilidad económica y ambiental. En ese sentido, las investigaciones actuales se orientan hacia el mayor conocimiento de las relaciones entre microorganismos que componen el biofloc, así como al abastecimiento y estudio de fuentes de C locales de alta disponibilidad.

Los sistemas de producción BFT enfrentan también grandes retos en aspectos técnicos como: la evaluación y la selección de especies compatibles con ambientes altamente eutrofizados; estudios sobre bienestar de los organismos producidos en ambientes BFT; el desarrollo de protocolos para fortalecer la bioseguridad en sistemas BFT; aspectos económicos como la optimización de los costos de establecimiento y operación (principalmente aquellos relacionados con la eficiencia energética para aireación); aspectos logísticos como el impacto de la cualificación del personal sobre los resultados del negocio y aspectos de mercado orientados a promover el conocimiento del consumidor sobre los beneficios de los sistemas BFT y aumentar así los niveles de aceptación de los productos con este origen.

En ese sentido, es necesario que los sistemas BFT consigan mayor reconocimiento y diferenciación, de tal forma que obtengan beneficios legales y económicos por su carácter sostenible, que les permita acceder a exenciones, reducción de impuestos y subsidios que les otorguen mayor competitividad frente a los sistemas de producción de flujo continuo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia por brindar los espacios para la creación de conocimiento y permitir el desarrollo de esta actividad al interior de las líneas de profundización en acuicultura del programa de Zootecnia.

REFERENCIAS

- Abakari G, Luo G, Kombat EO, Alhassan EH. 2020. Supplemental carbon sources applied in biofloc technology aquaculture systems: types, effects and future research. *Reviews in Aquaculture*. <https://doi.org/10.1111/raq.12520>
- Abdel-Fattah M. El-Sayed. 2020. Use of biofloc technology in shrimp aquaculture: a comprehensive review, with emphasis on the last decade. Oceanography Department, Faculty of Science, Alexandria University, Alexandria, Egypt. <https://doi.org/10.1111/raq.12494>
- Adineh H, Naderi M, Khademi-Hamidi M, Harsij M. Biofloc technology improves growth, innate immune responses, oxidative status, and resistance to acute stress in common carp (*Cyprinus carpio*) under high stocking density. *Fish and Shellfish Immunology*, 2019;95(September):440-448. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.10.057>

- Alkhamis YA, Sultana A, Arafat ST, Rouf MA, Rahman SM, Mathew RT, Ganesan N. 2023. The impact of biofloc technology on water quality in aquaculture: A systematic meta-analysis. *Aquaculture Nutrition*. <https://doi.org/10.1155/2023/9915874>
- Anand PS, Kohli MPS, Kumar S, Sundaray JK, Roy SD, Venkateshwarlu G, Pailan GH. Effect of dietary supplementation of biofloc on growth performance and digestive enzyme activities in *Penaeus monodon*. *Aquaculture*, 2014;418:108-115. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.09.051>
- Antonio de Lorenzo M, Schweitzer R. Santo CM do E, Candia EWS, Mouriño JLP, Legarda EC, Seiffert WQ, Vieira F do N. Intensive hatchery performance of the Pacific white shrimp in biofloc system. *Aquacultural Engineering*, 2015;67:53-58. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.05.007>
- Asaduzzaman M, Wahab MA, Verdegem MCJ, Huque S, Salam MA, Azim ME. C/N ratio control and substrate addition for periphyton development jointly enhance freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* production in ponds. *Aquaculture*, 2008;280(1-4):117-123. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.04.019>
- Avnimelech Y. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture*, 1999;176(3-4):227-235. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00085-X)
- Avnimelech Y. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. *Aquaculture*, 2007;264(1-4):140-147. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.11.025>
- Azim ME, Little DC, Bron JE. Microbial protein production in activated suspension tanks manipulating C:N ratio in feed and the implications for fish culture. *Bioresour Technol*, 2008;99(9):3590-3599. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.07.063>
- Bacchetta C, Rossi AS, Ale A, Cazenave J. Physiological effects of stocking density on the fish *Piaractus mesopotamicus* fed with red seaweed (*Pyropia columbina*) and β -carotene-supplemented diets. *Aquaculture Research*, 2020;51(5):1992-2003. <https://doi.org/10.1111/are.14551>
- Becerril-Cortés D, Monroy-Dosta M del C, Coelho-Emerenciano MG, Castro-Mejía G, Cienfuegos-Martínez K, de Lara-Andrade R. Nutritional importance for aquaculture and ecological function of microorganisms that make up Biofloc, a review. *Int. J. of Aquatic Science*, 2017;8(2): 69-77.
- Bossier P, Ekasari J. Biofloc technology application in aquaculture to support sustainable development goals. *Microbial biotechnology*, 2017;10(5):1012-1016. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12836>
- Braga A, Magalhães V, Hanson T, Morris TC, Samocha TM. The effects of feeding commercial feed formulated for semi-intensive systems on *Litopenaeus vannamei* production and its profitability in a hyper-intensive biofloc-dominated system. *Aquaculture Reports*, 2016;3:172-177. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2016.03.002>
- Burford MA, Thompson PJ, McIntosh RP, Bauman RH, Pearson DC. The contribution of flocculated material to shrimp (*Litopenaeus vannamei*) nutrition in a high-intensity, zero-exchange system. *Aquaculture*, 2004;232(1-4):525-537. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00541-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00541-6)
- Chan-Vivas E, Edén MG, Maldonado C, Escalante K, Gaxiola G, Cuzon G. Does Biofloc Improve the Energy Distribution and Final Muscle Quality of Shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1883)? *Journal of the World Aquaculture Society*, 2019;50(2):460-468. <https://doi.org/10.1111/jwas.12522>

- Chen X, Luo G, Meng H, Tan H. Effect of the particle size on the ammonia removal rate and the bacterial community composition of bioflocs. *Aquacultural Engineering*, 2019;86:102001. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.102001>
- Cienfuegos MK, Monroy D, Hamdan PA, Castro MJ, Becerril CD. Probiotics used in Biofloc system for fish and crustacean culture: A review. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 2017;5(5):120-125
- Collazos LF, Arias JA. Fundamentos de la tecnología biofloc (BFT). Una alternativa para la piscicultura en Colombia. *Una revisión. Orinoquia*, 2015;19(1):77. <https://doi.org/10.22579/20112629.341>
- Contreras-Sillero ME, Pacheco-Vega JM, Valdez-González FJ, De La Paz-Rodríguez G, Cadena-Roa MA, Bautista-Covarrubias JC, Godínez-Siordia DE. Polyculture of White shrimp (*Penaeus vannamei*) and sea cucumber (*Holothuria inornata*) in a biofloc system. *Aquaculture Research*, 2020;51(11):4410-4420. <https://doi.org/10.1111/are.14782>
- Crab R, Defoirdt T, Bossier P, Verstraete W. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, 2012;(356-357):351-356. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.046>
- Dauda AB. Biofloc technology: a review on the microbial interactions, operational parameters and implications to disease and health management of cultured aquatic animals. *Reviews in Aquaculture*, 2020;12(2):1193-1210. <https://doi.org/10.1111/raq.12379>
- Davidson J, Helwig N, Summerfelt ST. Fluidized sand biofilters used to remove ammonia, biochemical oxygen demand, total coliform bacteria, and suspended solids from an intensive aquaculture effluent. *Aquacultural engineering*, 2008;39(1):6-15. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.04.002>
- Defoirdt T, Boon N, Bossier P, Verstraete W. Disruption of bacterial quorum sensing: an unexplored strategy to fight infections in aquaculture. *Aquaculture*. 2004;240(1-4):69-88. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.06.031>
- De Oliveira-Alves GF, Fernandes AFA, de Alvarenga ÉR, Turra EM, de Sousa AB, de Alencar-Teixeira E. Effect of the transfer at different moments of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to the biofloc system in formation. *Aquaculture*, 2017;479:564-570. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.06.029>
- De Schryver P, Crab R, Defoirdt T, Boon N, Verstraete W. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. *Aquaculture*, 2008;277(3-4):125-137. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.02.019>
- De Souza DM, Suita SM, Romano LA, Wasielesky Jr W, Ballester ELC. Use of molasses as a carbon source during the nursery rearing of *Farfantepenaeus brasiliensis* (Latreille, 1817) in a Biofloc technology system. *Aquaculture Research*, 2014;45(2):270-277. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2012.03223.x>
- Dong S, Li Y, Jiang F, Hu Z, Zheng Y. Performance of *Platymonas* and microbial community analysis under different C/N ratio in biofloc technology aquaculture system. *Journal of Water Process Engineering*, 2021;43:102257. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102257>
- Ebeling JM, Timmons MB, Bisogni JJ. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture*, 2006;257(1-4):346-358. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.019>

- Ekasari J, Angela D, Waluyo SH, Bachtiar T, Surawidjaja EH, Bossier P, De Schryver P. The size of biofloc determines the nutritional composition and the nitrogen recovery by aquaculture animals. *Aquaculture*, 2014;(426-427):105-111. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.01.023>
- Ekasari J, Rivandi DR, Firdausi AP, Surawidjaja EH, Zairin M, Bossier P, De Schryver P. Biofloc technology positively affects Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) larvae performance. *Aquaculture*, 2015;441:72-77. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.02.019>
- Emerenciano M, Gaxiola G, Cuzon G. (2013). Biofloc technology (BFT): a review for aquaculture application and animal food industry. *InterOpen*. <https://doi:10.5772/53902>
- Emerenciano-Ballester ELC, Cavalli RO, Wasielesky W. Effect of biofloc technology (BFT) on the early postlarval stage of pink shrimp *Farfantepenaeus paulensis*: Growth performance, floc composition and salinity stress tolerance. *Aquaculture International*, 2011;19(5):891-901. <https://doi.org/10.1007/s10499-010-9408-6>
- Food and Agriculture Organization-FAO. (2020). El Estado de la pesca y la acuicultura mundial, SOFIA. In Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>
- Fimbres-Acedo YE, Servín-Villegas R, Garza-Torres R, Endo M, Fitzsimmons KM, Emerenciano, M. G. C. Magallón-Servín, P. López-Vela, M. y Magallón-Barajas, F. J. Hydroponic horticulture using residual waters from *Oreochromis niloticus* aquaculture with biofloc technology in photoautotrophic conditions with *Chlorella* microalgae. *Aquaculture Research*, 2020;51(10):4340-4360. <https://doi.org/10.1111/are.14779>
- Gallardo-Collí A, Pérez-Fuentes M, Pérez-Rostro CI, Hernández-Vergara MP. Compensatory growth of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*, L. subjected to cyclic periods of feed restriction and feeding in a biofloc system. *Aquaculture Research*, 2020;51(5):1813-1823. <https://doi.org/10.1111/are.14530>
- Green BW, Schrader KK, Perschbacher PW. Effect of stocking biomass on solids, phytoplankton communities, common off-flavors, and production parameters in a channel catfish biofloc technology production system. *Aquaculture Research*, 2014;45(9):1442-1458. <https://doi.org/10.1111/are.12096>
- Halim MA. Biofloc technology in aquaculture and its potentiality: A review. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 2019;7(5):260-266. E-ISSN: 2347-5129. P-ISSN: 2394-0506
- Hargreaves JA. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 2006;34:344-363. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.009>
- Himaja PHSRI. Review on Biofloc Meal As an Alternative Ingredient in Aquaculture Feeds. *Journal of Aquaculture in the Tropics*, 2016;31(3-4):199-220.
- Holstein TE. (2019). *Ecosystem Dynamics of a Microbial Biofloc Community Used to Culture Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*)*. The University of Arizona. <http://hdl.handle.net/10150/620702>
- Hoseinifar SH, Ahmadi A, Khalili M, Raeisi M, Van-Doan H, Caipang CM. The study of antioxidant enzymes and immune-related genes expression in common carp (*Cyprinus carpio*) fingerlings fed different prebiotics. *Aquaculture Research*, 2017;48(11):5447. <https://doi.org/10.1111/are.13359>

- Iber BT, Benjamin IC, Nor MNM, Abdullah SRS, Shafie M SB, Hidayah M, Kasan NA. Application of Biofloc technology in shrimp aquaculture: A review on current practices, challenges, and future perspectives. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2025;19:101675. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101675>
- Jatobá A, Da Silva BC, Da Silva JS, Vieira F do N, Mouriño JLP, Seiffert WQ, Toledo TM. Protein levels for *Litopenaeus vannamei* in semi-intensive and biofloc systems. *Aquaculture*, 2014;432:365-371. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.05.005>
- Jiang H, Zhang Z, Lin Z, Gong X, Guo H, Wang H. Modification of polyurethane sponge filler using medical stones and application in a moving bed biofilm reactor for ex situ remediation of polluted rivers. *Journal of Water Process Engineering*, 2021;42:102189. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102189>
- Khanjani MH, Sharifinia M, Emerenciano MGC. Biofloc technology (BFT) in aquaculture: What goes right, what goes wrong? A scientific-based snapshot. *Aquaculture Nutrition*, 2024;(1):7496572. <https://doi.org/10.1155/2024/7496572>
- Krummenauer D, Peixoto S, Cavalli RO, Poersch LH, Wasielesky W. Superintensive culture of white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in a biofloc technology system in Southern Brazil at different stocking densities. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2011;42(5):726-733. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2011.00507.x>
- Laloo R, Ramchuran S, Ramduth D, Görgens J, Gardiner N. Isolation and selection of *Bacillus* spp. as potential biological agents for enhancement of water quality in culture of ornamental fish. *Journal of Applied Microbiology*, 2007;103(5):1471-1479. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2007.03360.x>
- Li J, Liu G, Li C, Deng Y, Tadda MA, Lan L, Liu D. Effects of different solid carbon sources on water quality, biofloc quality and gut microbiota of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) larvae. *Aquaculture*, 2018;495:919-931. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.06.078>
- Liang D, Hu Y, Liang D, Chenga J, Chena Y. Bioaugmentation of Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) with *Achromobacter* JL9 for enhanced sulfamethoxazole (SMX) degradation in aquaculture wastewater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021;207:111258. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111258>
- Liu H, Li H, Wei H, Zhu X, Han D, Jin J, Xie S. Biofloc formation improves water quality and fish yield in a freshwater pond aquaculture system. *Aquaculture*, 2019;506:256-269. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.03.031>
- Liu W, Du X, Tan H, Xie J, Luo G, Sun D. Performance of a recirculating aquaculture system using biofloc biofilters with convertible water-treatment efficiencies. *Science of the Total Environment*, 2021;754:141918. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141918>
- Long L, Yang J, Li Y, Guan C, Wu F. Effect of biofloc technology on growth, digestive enzyme activity, hematology, and immune response of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 2015;448:135-141. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.05.017>
- Luo G, Gao Q, Wang C, Liu W, Sun D, Li L, Tan H. 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*, 2014;(422-423):1-7. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.023>

- Luo G, Zhang N, Tan H, Hou Z, Liu W. Efficiency of producing bioflocs with aquaculture waste by using poly- β -hydroxybutyric acid as a carbon source in suspended growth bioreactors. *Aquacultural Engineering*, 2017;76:34-40. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.001>
- Mandario MAE. Survival, growth and biomass of mud polychaete *Marphysa iloiloensis* (Annelida: Eunicidae) under different culture techniques. *Aquaculture Research*, 2020;51(7):3037-3049. <https://doi.org/10.1111/are.14649>
- Manzoor PS, Rawat KD, Tiwari VK, Poojary N, Asanaru-Majeedkuty BR. Dietary lipid influences gonadal maturation, digestive enzymes and serum biochemical indices of *Cyprinus carpio* reared in biofloc system. *Aquaculture Research*, 2020;51(8):3244-3254. <https://doi.org/10.1111/are.14659>
- Martínez-Córdova LR, Emerenciano M, Miranda-Baeza A, Martínez-Porchas M. Microbial-based systems for aquaculture of fish and shrimp: An update review. *Reviews in Aquaculture*, 2015;7(2): 131-148. <https://doi.org/10.1111/raq.12058>
- Martínez-Montaña E, Rodríguez-Montes de Oca GA, Román-Reyes JC, Pacheco-Marges R, Llanos A, Bañuelos-Vargas, Isaura. Diatomaceous earth application to improve shrimp aquaculture: growth performance and proximate composition of *Penaeus vannamei* juveniles reared in biofloc at two salinities. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 2020;48(2):197-206. <https://dx.doi.org/10.3856/vol48-issue2-fulltext-2386>
- Medina, J. 2018. Fundamentos de innovación tecnológica en acuicultura intensiva. En: D. Mojica, H. Landínes, M. y Rivas (Ed.). *Oficina de Generación del Conocimiento y la Información, Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca AUNAP* ©, 265 p.
- Minaz, M. Sevgili, H. & Aydın, İ. (2024). Biofloc technology in aquaculture: advantages and disadvantages from social and applicability perspectives—a review. *Annals of Animal Science*, 24(2), 307-319. <https://intapi.science.com/pdf/10.2478/aoas-2023-0043>
- Mirzakhani, N. Ebrahimi, E. Jalali, S. A. H. & Ekasari, J. (2019). Growth performance, intestinal morphology and nonspecific immunity response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry cultured in biofloc systems with different carbon sources and input C:N ratios. *Aquaculture*, 512, 734235. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734235>
- Moss, S. M. Moss, D. R. Arce, S. M. Lightner, D. V. & Lotz, J. M. (2012). The role of selective breeding and biosecurity in the prevention of disease in penaeid shrimp aquaculture. *Journal of Invertebrate Pathology*, 110(2), 247-250. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2012.01.013>
- Ødegaard H, Gisvold B, Strickland J. (2000). The influence of carrier size and shape in the moving bed biofilm process. *Water Science and Technology*, 41, 383-391. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0470>
- Ogello, E. O. Musa, S. M. Aura, C. M. & Abwao, J. O. (2014). An Appraisal of the Feasibility of Tilapia Production in Ponds Using Biofloc Technology: A review. *Int. J. Aquat. Sci.* 5, 21-39
- Park, J. Roy, L. A. Renukdas, N. & Luna, T. (2017). Evaluation of a Biofloc System for Intensive Culture of Fathead Minnows, *Pimephales promelas*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 48(4), 592-601. <https://doi.org/10.1111/jwas.12387>
- Pérez-Fuentes, J. A. Pérez-Rostro, C. I. & Hernández-Vergara, M. P. 2013. Pond-reared Malaysian prawn *Macrobrachium rosenbergii* with the biofloc system. *Aquaculture*, 400-401, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.02.028>

- Poli, M. A. Schweitzer, R. & de Oliveira Nuñez, A. P. (2015). The use of biofloc technology in a South American catfish (*Rhamdia quelen*) hatchery: Effect of suspended solids in the performance of larvae. *Aquacultural Engineering*, 66, 17-21. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.01.004>
- Poli, M. A. Legarda, E. C. de Lorenzo, M. A. Pinheiro, I. Martins, M. A. Seiffert, W. Q. & do Nascimento Vieira, F. (2019). Integrated multitrophic aquaculture applied to shrimp rearing in a biofloc system. *Aquaculture*, 511, 734274. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734274>
- Rajkumar, M. Pandey, P. K. Aravind, R. Vennila, A. Bharti, V. & Purushothaman, C. S. (2015). Effect of different biofloc system on water quality, biofloc composition and growth performance in *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). *Aquaculture Research*, 47(11), 3432-3444. <https://doi.org/10.1111/are.12792>
- Ray, A. J. Dillon, K. S. & Lotz, J. M. (2011). Water quality dynamics and shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production in intensive, mesohaline culture systems with two levels of biofloc management. *Aquacultural Engineering*, 45(3), 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.09.001>
- Ridha, M. T. Hossain, M. A. Azad, I. S. & Saburova, M. (2020). Effects of three carbohydrate sources on water quality, water consumption, bacterial count, growth and muscle quality of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in a biofloc system. *Aquaculture Research*, 51(10), 4225-4237. <https://doi.org/10.1111/are.14764>
- Schweitzer, R., Arantes, R., Costódio, P. F. S., do Espírito Santo, C. M., Arana, L. V., Seiffert, W. Q., & Andreatta, E. R. (2013). Effect of different biofloc levels on microbial activity, water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* in a tank system operated with no water exchange. *Aquacultural Engineering*, 56, 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.04.006>
- Schweitzer, R. Fonseca, G. Orteney, N. Menezes, F. C. T. Thompson, F. L. Thompson, C. C. & Gregoracci, G. B. (2020). The role of sedimentation in the structuring of microbial communities in biofloc-dominated aquaculture tanks. *Aquaculture*, 514, 734493. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734493>
- Shao, J. Liu, M. Wang, B. Jiang, K. Wang, M. & Wang, L. (2017). Evaluation of biofloc meal as an ingredient in diets for white shrimp *Litopenaeus vannamei* under practical conditions: Effect on growth performance, digestive enzymes and TOR signaling pathway. *Aquaculture*, 479, 516-521. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.06.034>
- Sherr, B., Sherr, E. (2000). Marine microbes: an overview. En: Kirchman D. (Ed) *Microbial Ecology of the Oceans*. (pp. 13-46). Wiley-Liss.
- Wang, R. Xu, Q. Chen, C. Li, X. Zhang, C. & Zhang, D. (2021). Microbial nitrogen removal in synthetic aquaculture wastewater by fixed-bed baffled reactors packed with different biofilm carrier materials. *Bioresource Technology*, 331, 125045. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125045>
- Wang, Y. Chen, Z. Chang, Z. Zhang, S. Meng, G. & Li, J. (2024). Comparison of economic and ecological benefits between factory water exchange model and biofloc model based on meta-analysis. *Aquaculture*, 741907. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741907>
- Wasieliesky, W. Atwood, H. Stokes, A. & Browdy, C. L. (2006). Effect of natural production in a zero exchange suspended microbial floc based super-intensive culture system for white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 258(1-4), 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.04.030>
- Xie, W. Pan, L. Sun, X. & Huang, J. (2012). Effects of bioflocs on water quality, and survival, growth and digestive enzyme activities of *Litopenaeus vannamei* (Boone) in zero -water exchange culture tanks. *Aquaculture research*, 1-10. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2012.03115.x>

- Xu, W. J. & Pan, L. Q. Evaluation of dietary protein level on selected parameters of immune and antioxidant systems, and growth performance of juvenile *Litopenaeus vannamei* reared in zero-water exchange biofloc-based culture tanks. *Aquaculture*, 2014;(426-427):181-188. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.02.003>
- Xu, W. J. Pan, L. Q. Sun, X. H. & Huang, J. 2013. Effects of bioflocs on water quality, and survival, growth and digestive enzyme activities of *Litopenaeus vannamei* (Boone) in zero-water exchange culture tanks. *Aquaculture Research*, 44(7), 1093-1102. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2012.03115.x>
- Xu, W. J. Morris, T. C. & Samocha, T. M. (2016). Effects of C/N ratio on biofloc development, water quality, and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles in a biofloc-based, high-density, zero-exchange, outdoor tank system. *Aquaculture*, 453, 169-175. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.11.021>
- Yu, Z., Li, L., Li, M., y Wu. L. F. (2020). Dietary supplementation of microbial floc heightens growth and improves digestive, immune, antioxidant enzymes activity and ammonia resistance in *Opsariichthys kaopingensis*. *Aquaculture Research*. 51(10), 4054-4064. doi.org/10.1111/are.14748
- Yu, Y. B., Choi, J. H., Lee, J. H., Jo, A. H., Lee, K. M. & Kim, J. H. (2023). Biofloc technology in fish aquaculture: A review. *Antioxidants*, 12(2), 398. <https://doi.org/10.3390/antiox12020398>
- Zhang, A., Shen, H., Zhang, X., Wang, T., Mei, F., Jayakumar, D. T., ... & Xu, Z. (2025). The role of microalgae in *Penaeus vannamei* aquaculture: Exploring the importance of biofloc technology. *Aquaculture*, 742397. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.742397>