

Acumulación de sólidos, un aspecto crítico en los sistemas acuícolas intensivos: alternativas para una gestión sostenible

Solid accumulation, a critical aspect regarding intensive aquaculture systems: alternatives for sustainable management

Acúmulo de sólidos, um aspecto crítico em sistemas de aquicultura intensiva: alternativas para o manejo sustentável

Recibido: 17 de noviembre de 2021

Aceptado: 13 de junio de 2022

Sara Cristina Chaverra-Garcés^{1,2}

Zoot, MSc,

 <https://orcid.org/0000-0002-7273-1203>

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cundinamarca, Cundinamarca, Colombia.
Email: schaverra@ucundinamarca.edu.co

² Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Católica de Valparaíso.



Este artículo se encuentra bajo
licencia: Creative Commons
Atribución-NoComercial-
SinDerivadas 4.0 Internacional

Orinoquia, Enero-Junio 2022; 26(1):53-64
ISSN electrónico: 2011-2629
ISSN impreso: 0121-3709
<https://doi.org/10.22579/20112629.731>

Resumen

La mantención de la calidad del agua en los sistemas intensivos de producción acuícola se ha convertido en un desafío a la hora de cumplir con criterios de sostenibilidad. Uno de los principales problemas que enfrenta la acuicultura actual se encuentra relacionado con la rápida acumulación de residuos sólidos y compuestos inorgánicos. A continuación se presenta una revisión actualizada sobre estrategias que están siendo implementadas para mitigar el impacto generado por la acumulación de desechos orgánicos e inorgánicos en sistemas cerrados intensivos tipo RAS y tecnología biofloc (BFT) con miras a fortalecer la economía circular en la industria acuícola. Dentro de las tecnologías ambientalmente adecuadas se destaca el papel de los microorganismos como agentes biorremediadores, especialmente la acción de bacterias amonio y nitrito oxidantes así como de bacterias fotosintéticas. Del mismo modo, la incorporación de bacilos y poliquetos ha demostrado tener éxito en el manejo de sedimentos. Por su parte, los sistemas multitroóficos que integran diversas especies acuáticas de gran valor nutricional y comercial como algas, moluscos, crustáceos y equinodermos también han obtenido resultados exitosos en la gestión sostenible de efluentes. En el caso de los efluentes de origen marino se ha propuesto la integración con plantas halófitas del género *Sarcocornia* cuyos usos han sido promisorios y tienen potencial en la industria agrícola y de biocombustibles. A pesar de los recientes avances en la implementación de estas tecnologías alternativas aún hace falta mayor investigación relacionada con la aplicación a mayor escala, mecanismos de acción de los biorremediadores, valorización de los procesos, evaluación del ciclo de vida, sostenibilidad y resiliencia en los sistemas acuícolas intensivos. Asimismo es preciso fortalecer el apoyo entre entidades del sector acuícola y ambiental para lograr un mayor impacto en la disminución de la contaminación y la gestión sostenible de los recursos naturales.

Palabras clave: Acuicultura, biofloc, *fósforo*, materia orgánica, nitrógeno, RAS

Abstract

Maintaining water quality in intensive aquaculture production systems has become a challenge when it comes to complying with sustainability criteria. One of the main problems currently facing aquaculture is related to the rapid accumulation of solid waste and inorganic compounds. This article thus provides an updated review of current strategies for mitigating the impact of accumulated organic and inorganic

Como Citar (Norma Vancouver):

Chaverra-Garcés SC. Acumulación de sólidos, un aspecto crítico en los sistemas acuícolas intensivos: alternativas para una gestión sostenible. Orinoquia, 2022;26(1):53-64 <https://doi.org/10.22579/20112629.731>

waste in closed intensive systems, such as the recirculating aquaculture system (RAS) and the use of Biofloc technology (BT), aimed at strengthening the aquaculture industry's circular economy. Microorganisms' role as bioremediation agent can be highlighted as an environmentally-appropriate technology, especially the action of ammonium and nitrite oxidising bacteria and photosynthetic bacteria. Incorporating bacilli and polychaetes has been shown to be a successful strategy regarding sediment management. Successful results regarding the sustainable management of effluents have also been obtained with multitrophic systems integrating various aquatic species having great nutritional and commercial value, such as algae, molluscs, crustaceans and echinoderms. Integrating halophytic plants from the *Sarcocornia* genus has been proposed regarding marine effluents as their use has proved promising and they have been seen to have potential concerning the agricultural and biofuel industries. However, there is still a need for further research related to using such alternative technologies on a larger scale, despite recent advances regarding their introduction, i.e. bioremediators' mechanisms of action, valorising processes, life-cycle evaluation and their sustainability and resilience in intensive aquaculture systems. Support between entities in the aquaculture and environmental sectors must also be strengthened to ensure a greater impact on reducing pollution and the sustainable management of natural resources.

Key words: aquiculture, biofloc, phosphorus, organic material, nitrogen, recirculating aquaculture system (RAS).

Resumo

A manutenção da qualidade da água em sistemas intensivos de produção aquícola tornou-se um desafio quando se trata de atender aos critérios de sustentabilidade. Um dos principais problemas enfrentados pela aquíicultura atual está relacionado ao rápido acúmulo de resíduos sólidos e compostos inorgânicos. Abaixo, uma revisão atualizada das estratégias que estão sendo implementadas para mitigar o impacto gerado pelo acúmulo de resíduos orgânicos e inorgânicos em sistemas fechados intensivos como RAS e tecnologia de bioflocos (BFT) com vistas ao fortalecimento da economia circular na indústria da aquíicultura. Dentre as tecnologias ambientalmente adequadas, destaca-se o papel dos microrganismos como agentes de biorremediação, principalmente a ação de bactérias oxidantes de amônio e nitrito, bem como bactérias fotossintéticas. Da mesma forma, a incorporação de bacilos e poliquetas tem se mostrado bem sucedida no manejo de sedimentos. Por sua vez, sistemas multitróficos que integram várias espécies aquáticas de grande valor nutricional e comercial, como algas, moluscos, crustáceos e equinodermos, também obtiveram resultados bem-sucedidos na gestão sustentável de efluentes. No caso de efluentes de origem marinha, foi proposta a integração com plantas halófitas do gênero *Sarcocornia*, cujos usos têm se mostrado promissores e têm potencial nas indústrias agrícola e de biocombustíveis. Apesar dos avanços recentes na implementação dessas tecnologias alternativas, ainda há necessidade de mais pesquisas relacionadas à aplicação em maior escala, mecanismos de ação de biorremediadores, valorização de processos, avaliação do ciclo de vida, sustentabilidade e resiliência em sistemas. aquíicultura intensiva. É também necessário reforçar o apoio entre as entidades dos setores da aquíicultura e do ambiente para alcançar um maior impacto na redução da poluição e na gestão sustentável dos recursos naturais.

Palavras-chave: Aquicultura, bioflocos, fósforo, matéria orgânica, nitrogênio, RAS

Introducción

La acuicultura convencional desarrollada en tierra presenta una serie de debilidades relacionadas con el uso ineficiente del agua, la acumulación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo que, mal gestionados, terminan contaminando diversas fuentes hídricas. El problema se magnifica cuando se pretende mejorar la productividad aumentando las densidades de siembra por área. Adicionalmente los sistemas intensivos son susceptibles a la presencia de enfermedades bacterianas cuyo manejo y control representa grandes inversiones en tratamientos con agentes antimicrobianos.

La implementación de sistemas cerrados, con cero intercambios de agua como RAS (Recirculating Aquaculture System) y los sistemas biofloc (BFT, Biofloc Technology) se proponen como una alternativa ambientalmente sostenible (Mansour *et al.*, 2017; Adineh *et al.*, 2019) para el cultivo de peces y camarones (Nguyen *et al.*, 2021) solventando los principales cuellos de botella de la acuicultura de estanques en tierra. Ambas tecnologías utilizan comunidades microbianas para minimizar

el exceso de nutrientes (para fines prácticos el término nutrientes en este texto hace referencia a la concentración de nitrógeno y fósforo) y evitar la proliferación de patógenos en el agua de cultivo.

Estos sistemas cerrados permiten manejar con mayor facilidad parámetros de calidad del agua en comparación con estanques en suelo (Nguyen *et al.*, 2021).

Por medio de los procesos de metabolización y absorción de los compuestos nitrogenados, las bacterias quimioautotróficas y heterotróficas, consumen el nitrógeno amoniacal excretado por los peces, lo transforman en compuestos menos tóxicos y/o lo absorben, de tal forma que se presenta una mejoría en las condiciones de calidad de agua y a su vez la biomasa microbiana aumenta. Sin embargo, en ambos sistemas de cultivo es preciso realizar una adecuada gestión de la materia orgánica, compuestos nitrogenados y fósforo ya que tienden a acumularse rápidamente convirtiéndose en un problema ambiental (Bao *et al.*, *et al.*, 2018; Jasmin *et al.*, 2020). Asimismo, aumentan la susceptibilidad a

enfermedades causadas por patógenos oportunistas lo cual genera mayores costos operativos.

Las aguas residuales que provienen de la actividad acuícola pueden ser salinas, salobres o agua dulce, por tanto, precisan ser tratadas con tecnologías específicas. Adicionalmente cada sistema de producción genera cargas de nutrientes y sólidos en cantidad y calidad variable dependiendo de la especie y la tecnología de cultivo adoptada (Castine *et al.*, *et al.*, 2013; Paniagua, 2020). El objetivo de este documento es brindar una revisión sobre el principal desafío que enfrentan los sistemas RAS y biofloc con relación a la acumulación de sólidos, así como las alternativas que se han propuesto recientemente para mitigar este inconveniente.

Sólidos totales

Los sólidos son partículas de tamaño variable generadas en el ambiente de cultivo y compuestas por heces, bacterias, microorganismos vivos y muertos y alimento no consumido, metabolitos de peces, desprendimiento de perifiton y bioflóculos (Santaella *et al.*, 2018, Bao *et al.*, 2018; Paniagua, 2020). En sistemas de recirculación generalmente las principales fuentes de sólidos son el alimento no consumido, las heces y el biofilm (Bao *et al.*, 2018). Se ha reportado que, en los sistemas acuícolas intensivos, del alimento que es suministrado diariamente el 25 al 30% es convertido en sólidos (Ebeling *et al.*, 2006). El alimento no consumido, el nitrógeno, fósforo y demás compuestos de la dieta que no son asimilados, se convierten en desechos y rápidamente son transferidos al medio de cultivo (Castine *et al.*, 2013; Jasmin *et al.*, 2020).

En acuicultura los sólidos generalmente se clasifican en Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Disueltos Totales (SDT) (Arantes *et al.*, 2016), Sólidos Volátiles Totales (SVT) (Castine *et al.*, 2013; Bao *et al.*, 2018). Otra forma de clasificarlos es como sólidos y semisólidos (Jasmin *et al.*, 2020). Aquellas partículas que se sedimentan y se quedan en el fondo de los estanques constituyen lo que comúnmente se denomina sedimento o lodo (Castine *et al.*, 2013). Este, es un tipo de residuo sólido rico en Nitrógeno, Fósforo, carbonos orgánicos, también contiene trazas de metales (Castine *et al.*, 2013). Estos compuestos en altas concentraciones y mal gestionados ocasionan eutrofización, disminución del oxígeno y toxicidad; afectando así la vida en los ecosistemas acuáticos (Santaella *et al.*, 2018 Bao *et al.*, 2028; Jasmin *et al.*, 2020; Paniagua, 2020).

En RAS la mayoría de las partículas son menores de 100 μm , entre más pequeña sea la partícula, más complejo será el manejo (Bao *et al.*, 2018) Las más grandes pueden ser removidas fácilmente (Ebeling *et al.*, 2012) empleando filtros mecánicos o tanque de decantación. Los métodos empleados para la remoción de sólidos se basan la Ley de Stokes o de separación gravitacional, la cual funciona basada en el principio de sedimentación y velocidades de sedimentación.

Partículas de mayor tamaño y de mayor densidad poseen mayor velocidad de sedimentación (Castine *et al.*, 2013; Bao *et al.*, 2018). Sin embargo, las características de los sólidos dependerán de factores como la especie, tamaño del pez, así como de la composición del alimento (Bao *et al.*, 2018)

Manejo de sólidos

Para el manejo de sólidos en los sistemas RAS, generalmente se emplea una unidad de sedimentación que puede ser un sedimentador o filtro mecánico. El objetivo de la filtración mecánica es separar, remover y retener tanto partículas en suspensión como sedimentables que provienen principalmente de las heces de los peces y el alimento no consumido. Nozzi *et al.* (2018) emplearon un filtro de tambor y Filtro de Flujo Radial (RFS) en sistemas acuapónicos donde se evaluó el efecto de diferentes administraciones de nutrientes (efluentes de peces, Fe, P, K, N y Ca) sobre la productividad y calidad del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*), menta (*Mentha piperita*) y setas. (*Rungia klossii*)

En algunos estudios se han empleado otros dispositivos que desempeñan la misma función. Suhl *et al.* (2018) evaluaron en un sistema acuapónico de doble recirculación un dispositivo de succión (filtro de succión) en reemplazo de la unidad de sedimentación. El objetivo de los investigadores fue evaluar la implementación de este dispositivo para la reducción de las pérdidas de nitrógeno en el sistema, por medio de la optimización del flujo de nutrientes entre la unidad de producción de peces y la de plantas; mejorando el funcionamiento de DRAPS (Double Recirculating Aquaponic System) y disminuyendo el impacto ambiental generado por la acuicultura convencional.

El dimensionamiento y tipo de filtro mecánico dependerá del tamaño de partícula, de la biomasa de peces que tenga el sistema, en acuaponía de acuerdo con el tipo de cama de crecimiento de las plantas. Por otra parte, en los sistemas biofloc a parte de emplear una

unidad de sedimentación, también es posible implementar sustratos artificiales o materiales fijadores para el biofilm con el objetivo de aumentar la superficie de fijación para las bacterias y realizar mayor control sobre los sólidos suspendidos (Lara-Rodríguez, 2017; Pinheiros *et al.*, 2017). Por su parte Green *et al.* (2019) emplearon un sedimentador de fondo cónico. En otro estudio, Arantes *et al.* (2016) observaron que la implementación de un sedimentador para controlar el exceso de sólidos en suspensión resulta igual de eficiente en la remoción de sólidos (57-65%) que los recambios para eliminar de manera continua una parte de los bioflóculos. De esta manera la remoción de material particulado se da de manera más lenta y sin cambios bruscos. Asimismo, se obtiene un mayor ahorro de agua y mejor desempeño productivo del camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*). Resultados similares obtuvieron Gaona *et al.* (2016) al evaluar la eficiencia de la remoción de sólidos aplicando un alto o bajo flujo de agua a través de un clarificador de flujo radial, encontrando una mayor velocidad de sedimentación y mejor retención de partículas cuando se empleó un bajo flujo de agua. Generalmente en sistemas biofloc y RAS, el fósforo al igual que el nitrógeno se encuentra disuelto en el agua de cultivo y es removido por medio de diferentes tipos de filtros, clarificadores o decantadores.

De acuerdo con Zemor *et al.* (2019) el uso de clarificadores permite controlar las concentraciones de SST en los sistemas productivos de gran escala, igualmente reduce la cantidad de agua empleada para las renovaciones, así como la generación de efluentes.

Otra alternativa que surge en los sistemas biofloc consiste en cosechar los bioflóculos que están en exceso y utilizarlos como ingrediente en dietas balanceadas para otros organismos de cultivo.

En este sentido, Jung *et al.* (2020) evaluaron tres tecnologías para coleccionar los flóculos provenientes del cultivo de juveniles de tilapia: sedimentación, centrifugación y filtración con membrana. Los mejores resultados de remoción de floc y menor uso de energía se obtuvieron empleando filtración por membrana.

Con el fin de evitar la descarga de efluentes (ricos en nutrientes, materia orgánica, sólidos suspendidos, microorganismos) estos son tratados empleando dispositivos de espesamiento de lodos, que luego pueden ser incorporados como insumo en sistemas agrícolas, para producción de compost para jardinerías (Van Rijn, 2013; Santaella *et al.*, 2018; Bao *et al.*, 2018; Pa-

niagua, 2020) así como de biogás que puede emplearse como fuente de energía alternativa (Castine *et al.*, 2013; Campanati *et al.*, 2021).

Además de las unidades de espesamiento (reactores) también se emplean lagunas aerobias y anaerobias y humedales artificiales para aumentar la eficiencia de degradación biológica de los lodos. Dicha eficiencia está relacionada con el tiempo retención y exposición a los microorganismos (aerobios y anaerobios) involucrados en la digestión de los compuestos orgánicos e inorgánicos (Van Rijn, 2013; Paniagua, 2020). Estas metodologías se aplican principalmente para el tratamiento de efluentes de RAS de agua dulce ya que los desechos de los RAS marinos desafortunadamente suelen ser descargados en el ambiente y en muchas ocasiones sin un tratamiento previo (Van Rijn, 2013; Melo Filho *et al.*, 2020).

Durante los últimos años han surgido algunos enfoques para evaluar el impacto ambiental de los sistemas de Recirculación y de los sistemas con tecnología biofloc, uno de los más empleados ha sido La Evaluación del Ciclo de Vida (LCA) por sus siglas en inglés, este enfoque aparte de muchos otros componentes contempla como indicadores del impacto ambiental las concentraciones de materia orgánica, nitrógeno y fósforo que se producen en el sistema (Van Rijn, 2013; Campanati *et al.*, 2021). A medida que se desea incrementar la producción acuícola intensiva, aumenta también la necesidad de implementar prácticas que propendan por ahorrar recursos y minimicen la producción de desechos o bien los recuperen integrándolos nuevamente a la cadena productiva (Campanati *et al.*, 2021).

Manejo de compuestos nitrogenados

Para el manejo y control de compuestos nitrogenados en RAS se emplean filtros biológicos (biofiltros) con diferentes tipos de sustratos para albergar las bacterias (Cerozi *et al.*, 2017). Mientras que en los sistemas biofloc el biofiltro se encuentra *in situ* haciendo parte de los bioflóculos en suspensión que además constituyen como una fuente permanente de alimento para los organismos cultivados (Ekasari *et al.*, 2014) El objetivo del biofiltro sea *ex situ* como en RAS o *in situ* como en los sistemas biofloc es favorecer la remoción de amonio que servirá como sustrato para aumentar la biomasa de bacterias heterotróficas; asimismo promover la oxidación del amonio a nitrito y posteriormente a nitrato por acción de las bacterias amonio y nitrito oxidantes principalmente *Nitrobacter* y *Nitrosomo-*

nas. En algunos casos se puede adicionar un inóculo comercial para acelerar el proceso de nitrificación y aumentar la biomasa bacteriana. En sistemas biofloc generalmente se emplea una fuente de carbono externo para promover el crecimiento de las bacterias heterotróficas las cuales han demostrado ser eficientes cuando el agua de cultivo presenta una relación de C:N entre 15-20:1. Se emplea comúnmente melaza. La adición de la fuente de carbono mejora la tasa de remoción de Nitrógeno Amoniacal Total (NAT) (Kuhn *et al.*, 2009), sin embargo, en algunos casos puede ocurrir un aumento considerable en la concentración de sólidos en suspensión, comprometiendo la disponibilidad de oxígeno disuelto y generando lesiones, obstrucción en branquias, lo cual puede inducir al apareamiento de enfermedades, así como poner en riesgo la estabilidad y funcionamiento del sistema de cultivo (Bao *et al.*, 2018; Souza *et al.*, 2019).

De manera resumida, el proceso de remoción de sólidos puede realizarse mediante tres fases o tratamientos (Castine *et al.*, 2013). En una primera fase se remueven las partículas de mayor tamaño por medio de gravedad y centrifugación empleando diferentes dispositivos. En una segunda fase o tratamiento secundario, las partículas de menor tamaño (menor de 30 μm) que no pudieron ser retiradas en la fase anterior son removidas empleando filtros para sólidos más finos (filtros de medios granulares, porosos) fraccionador de espuma, fraccionador de proteínas, Filtro de Tierra de Diatomeas-Diatomaceus Earth (DE). Y finalmente se puede emplear un tratamiento terciario con el objetivo de eliminar fracciones de Nitrógeno, Fósforo, coloides y otras partículas disueltas de menor tamaño (0,001 -10 μm) por medio de micro, ultra y nano filtración (Bao *et al.*, 2018).

Melo Filho *et al.* (2020) diseñaron un sistema de bajo costo para la remoción de amonio en un cultivo intensivo de camarón blanco (350 camarones/ m^3) en biofloc aplicando los procesos de nitrificación y desnitrificación. El sistema estuvo compuesto por un tanque de cultivo con una malla sintética en el interior para favorecer la fijación de bacterias, dos reactores, uno de nitrificación y otro de desnitrificación de lecho móvil empleando como sustrato biobolas. Adicionalmente acoplaron un reactor de U.V para el control de patógenos. Bajo este esquema se logró obtener una eficiencia de remoción de nitrógeno del 71,3 %.

El éxito de la producción en ambos sistemas de cultivo (RAS, biofloc) consistirá en remover el exceso de

desechos primero del agua de cultivo y luego transformarlos a un costo operativo razonable y con cero o mínimo impacto ambiental.

Estrategias alternativas para la gestión de los sólidos en RAS y biofloc

En sistemas de recirculación a gran escala es común emplear para la desinfección y reacondicionamiento final del agua métodos fisicoquímicos tales como ozonización, desinfección con U.V, remediación electroquímica conocida también como desinfección electrolítica u oxidación electroquímica; que permiten disminuir las concentraciones de Nitrógeno disuelto por medio de procesos de oxidación y generan un efecto antimicrobiano (Van Rijn *et al.*, 2013; Romano *et al.*, 2020; Campanati *et al.*, 2021). Otra alternativa consiste en la instalación de biorreactores de membrana de lodos activados (MBR por sus siglas en inglés) el cual posee gran capacidad de retención de sólidos incluyendo partículas finas y remoción de microorganismos (Davidson *et al.*, 2019).

Así como los residuos provenientes de la acuicultura de agua dulce, los efluentes de sistemas marinos deben tratarse, debido a que la inadecuada gestión es responsable en gran medida de la eutrofización en ecosistemas costeros, marinos y ribereños, y de la salinización de los suelos. De modo tal, que el diseño de estrategias eficientes para el tratamiento de efluentes marinos constituye también un desafío.

En ese sentido, los cultivos Multitróficos Integrados (IMTA) surgen como una estrategia de biomitigación que busca generar sistemas equilibrados por medio de la articulación entre diferentes organismos acuáticos cuyos requerimientos son complementarios ya que pertenecen a diferentes niveles tróficos (Ahmed *et al.*, 2017). De esta manera se aumenta la productividad del sistema por medio de la integración de peces con diferentes hábitos alimenticios, crustáceos y cultivos de plantas con interés comercial. Al mismo tiempo se logra obtener una reducción significativa de los desechos sin generación de efluentes (Campanati *et al.*, 2021; van Rijn, 2013).

Las partículas en suspensión, fitoplancton y zooplancton pueden ser aprovechados por organismos extractivos orgánicos como los crustáceos y moluscos mientras que compuestos inorgánicos como el nitrógeno y fósforo pueden ser aprovechados por especies extractivas inorgánicas como las plantas (Ahmed *et al.*,

2017; Campanati *et al.*, 2021). Li *et al.*, (2019) evaluaron un sistema IMTA en tierra, asociando el cultivo de Lubina europea (*Dicentrarchus labrax*) en RAS, con el cultivo de microalgas (especie extractiva) y juveniles de ostras (*Crassostrea gigas*) (consumidor primario) en estanques. En este sistema, el agua del cultivo de peces circuló a través de un filtro mecánico, posteriormente pasó por un tratamiento con rayos U.V y finalmente por un biofiltro. Una parte de esta agua retornó al tanque de los peces y la otra fue distribuida al cultivo de algas en raceways. A su vez, el flujo de salida de esta unidad se unió a un tanque de mezcla con aireación y se distribuyó como alimento para las ostras. Los autores evidenciaron una remoción de nitrógeno y fósforo superior al 96%. Por otra parte, a pesar de que el rendimiento productivo de las ostras no fue significativo, por medio de isótopos estables naturales lograron observar que las ostras consumieron las microalgas. Además, concluyeron que el sistema acoplado RAS-IMTA tuvo tasas de eliminación de nutrientes muy similares a los sistemas IMTA asociados con macroalgas.

En la misma línea, Brito *et al.* (2018) evaluaron la biorremediación de aguas residuales de Camarón blanco en sistema biofloc usando como biorremediadores organismos de importancia comercial para la pesca y acuicultura: almejas (*Anomalocardia brasiliana*), algas (*Gracilaria birdiae*) y peces (*Oreochromis niloticus*). La concentración de sólidos disminuyó hasta en un 74% cuando se usaron almejas. Tal reducción representa un cambio positivo en la calidad del agua y mayor posibilidad de reúso.

En otro estudio, Robinson *et al.*, (2018) emplearon pepinos de mar (*Holothuria scabra*) como modelo de bioturbación para el tratamiento de aguas residuales de acuicultura. Se evaluó la suplementación con almidón soluble como fuente carbono para llegar a una relación C:N 20:1 con el objetivo de favorecer la fijación de nitrógeno. Se obtuvo un resultado positivo ya que la fijación resultó ser mayor con respecto al tratamiento control sin adición de carbono (5:1)

La adición de una fuente de carbono externa puede estimular el crecimiento de bacterias heterotróficas que asimilan amonio, así como las rutas metabólicas de reducción disimilatoria de nitrato a amonio. Estos mismos autores en otro estudio (Robinson *et al.*, 2019) reportan los hallazgos obtenidos en la cría intensiva de juveniles de *Holothuria scabra* alimentados únicamente con efluentes provenientes del cultivo de abulón (*Haliotis midae*) en RAS terrestre. En este estudio

se evaluó la adición de glucosa, almidón y celulosa como fuente de carbono externa para aumentar la relación C:N en el efluente. Se observó que la tasa de crecimiento y la biomasa de juveniles de *Holothuria scabra* fue mayor cuando la proporción C:N se mantuvo en 20:1. Del mismo modo como se evidenció en el trabajo anterior, la suplementación con una fuente de carbono favorece la asimilación de amonio promoviendo a su vez el aumento de biomasa microbiana la cual puede integrarse nuevamente a la cadena trófica.

Por otra parte, Pinho *et al.* (2017) utilizaron el efluente generado a partir del cultivo de Tilapia nilótica (*O. niloticus*) en sistema biofloc para la producción de tres variedades de lechuga (*Latuca sativa*) en sistemas acuapónicos. Los autores indicaron que las lechugas presentaron mayor crecimiento y mayor productividad (kg/m^2) con biofloc en comparación con un sistema de aguas claras. Por lo tanto, el efluente de los sistemas biofloc puede ser usado como un fertilizante alternativo para el cultivo acuapónico de lechuga roja, mantequilla y crespita (crujiente).

En la misma línea, Legarda *et al.* (2021) evaluaron el efecto del cultivo integrado de Lisa (*Mugil liza*), camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) y Lechuga de mar (*Ulva fasciata*) en sistema biofloc sobre la calidad del agua, el rendimiento productivo, crecimiento de algas, recuperación de nitrógeno y fósforo y compuestos bioactivos de algas. Se compararon dos grupos, uno con alga, camarón y lisa y el grupo control sin alga. Ambos grupos en sistema biofloc.

El rendimiento final de todo el sistema, así como la recuperación de nitrógeno y fósforo, el contenido de clorofila a y carotenoides resultaron ser más altos en el sistema bio integrado en comparación con el grupo control (sin alga). La generación de lodos al final del experimento fue similar en ambos tratamientos, sin embargo, la relación entre la cantidad de lodo producida (kg) y la biomasa final cosechada (kg) resultó ser menor en el sistema con alga lo cual representa una ventaja desde el punto de vista ambiental.

Por su parte, Chu *et al.* (2021) evaluaron el efecto de la salinidad (10, 15 y 20 ppt) sobre el crecimiento del camarón blanco en sistema biofloc y de tres especies de plantas halófitas (*Atriplex hortensis*, *Salsola komarovii* y *Plantago coronopus*) en un sistema acuapónico. El agua proveniente del cultivo de camarón fue circulada primero través de un biofiltro y posteriormente se empleó como riego en el sistema acuapónico con halófitas, Los autores indicaron que la salinidad de 15

ppt fue la más adecuada para favorecer el rendimiento productivo tanto del camarón como de las plantas halófitas y que las especies cultivadas poseen potencial comercial para ser empleadas en sistemas biointegrados. En la misma línea, Poli *et al.* (2019) evaluaron un sistema multitrófico también con camarón blanco y tilapia nilótica en sistema biofloc acoplado a un sistema hidropónico con *Sarcocornia ambigua*. El agua del tanque de camarones se distribuyó al tanque de tilapias, posteriormente por gravedad fue transferida a la unidad de hidroponía y finalmente retornaba al cultivo de camarones. En este estudio, el sistema integrado con *Sarcocornia* exhibió una mayor remoción de nitrato, mayor remoción de SST y mayor rendimiento (Kg/m^3) en comparación con un co-cultivo convencional de camarones y tilapias. Resultados muy similares obtuvieron Pinheiros *et al.* (2017) al evaluar el cultivo integrado de camarón blanco en biofloc y *Sarcocornia ambigua* en un sistema acuapónico.

Recientemente, Beyer *et al.* (2021) evaluaron la eficiencia de *S. neei*, una nueva especie de halófito, en la remoción de nitrógeno de aguas residuales derivadas de un RAS marino. Los autores emplearon dos sistemas hidropónicos, uno con sustrato de arena y el otro con cama flotante. Se observó 100% de sobrevivencia de las plantas y mayor productividad en el sistema de camas flotantes. Por otra parte, la tasa de remoción de compuestos nitrogenados y fósforo fue significativa. La remoción de amonio y fosfato fue más alta en el sistema con arena ($0.68 \pm 0.41 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y $0.44 \pm 0.34 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ respectivamente) mientras que, la mayor absorción de nitrato ($0.54 \pm 0.91 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) se observó en el sistema de camas flotantes. Los autores señalan que *S. neei* tiene potencial para ser usada como biofiltro en sistemas integrados.

Las plantas halófitas del género *Sarcocornia* y *Salicornia* han resultado una alternativa promisorio para el tratamiento de efluentes marinos y salobres en los sistemas acuapónicos. Adicionalmente han demostrado una buena remoción de compuestos nitrogenados y un buen rendimiento en sistemas integrados con (Pinheiros *et al.*, 2017). Del mismo modo, poseen potencial industrial para la agricultura y la producción de biocombustibles (Peña *et al.*, 2021).

En la misma línea, recientemente ha llamado la atención el uso de microorganismo debido a su potencial para biorremediación tanto de aguas residuales como para el tratamiento de lodos (Robinson *et al.*, 2018; Jasmin *et al.*, 2020; Paniagua, 2020; Campanati *et al.*,

2021). Los principales desarrollos están orientados al uso de biofilm, esteras o tapetes microbianos y tecnología biofloc.

El mecanismo de acción se basa en el mismo principio, mejorar la calidad de agua por medio de la transformación de compuestos nitrogenados en proteína y biomasa microbiana (Martínez *et al.*, 2014; Paniagua, 2020).

Uso potencial de microorganismos como biorremediador

El mecanismo más práctico para tratar los compuestos nitrogenados tóxicos es por medio de procesos de nitrificación (Melo Filho *et al.*, 2020) Las bacterias que oxidan amonio (*Nitrosomonas*, *Nitrosovibrio*, *Nitrosococcus* y *Nitrospira*) y nitritos (*Nitrobacter*, *Nitrococcus* y *Nitrospira*) desempeñan un papel fundamental en la biorremediación (Melo Filho *et al.*, 2020; Jasmin *et al.*, 2020). Asimismo, las encargadas del proceso de desnitrificación (*Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rheinheimera*, *Pannonibacter*, *Rhizobium*, *Gordonia*, *Stenotrophomonas*, *Brevundimonas*, *Paracoccus*, *Rhodococcus*, *Pseudochrobactrum*, *Arthrobacter*, *Gemmobacter* y *Alcaligenes*) (Jasmin *et al.*, 2020) son fundamentales para convertir finalmente el nitrato a nitrógeno gaseoso.

Se ha evidenciado que la incorporación de *Bacillus* sp mejora tanto la calidad del agua de cultivo como la de los sedimentos por medio de la reducción de los niveles tóxicos de compuestos nitrogenados y fósforo. Asimismo, se ha observado con éxito la aplicación de bacterias fotosintéticas (*Cromatiaceae* y *Clorobiaceae*) capaces de degradar compuestos sulfurados. Por su parte, la biorremediación de lodos con poliquetos ha sido una estrategia que toma cada vez más fuerza dado su potencial en la reducción de la materia orgánica, el nitrógeno y carbono (Jasmin *et al.*, 2020; Campanati *et al.*, 2021).

Manan *et al.* (2016) encontraron que tanto la variedad de fitoplancton, zooplancton, nematodos y protozoos que conforman el bioflóculo en los sistemas biofloc actúan de manera simbiótica como estabilizadores naturales del medio de cultivo, ya que regulan la cantidad de nutrientes en el agua, y descomponen la materia orgánica. Los mismos autores evidenciaron que bacterias del género *Aeromonas* y *Pseudomonas* tienen la capacidad para reducir la materia orgánica del fondo del tanque del cultivo de Camarón blanco). De la tal

forma que, el sistema biofloc en sí, puede actuar como un mecanismo natural de biorremediación.

Por su parte, Syakti *et al.* (2016) consideran que es posible generar una valorización a partir de los lodos provenientes de la acuicultura por medio de la aplicación de la tecnología biofloc con fines de biorremediación. En este estudio, los investigadores emplearon lodos provenientes del cultivo de Bagre africano (*Clarias glaripepinus*) en sistema biofloc como uno de los tratamientos para la biorremediación. Observaron que los microorganismos formadores de flóculos fueron capaces de remover sedimentos contaminados con petróleo hasta en un 60% (v/v) cuando este fue suministrado al 5% (v/v). En este sentido, Paniagua (2020) indicó que los microorganismos tienen la capacidad de degradar y mineralizar completamente los compuestos contaminantes debido a que utilizan hidrocarburos del petróleo como fuente de carbono y energía. Sin embargo, es preciso seguir realizando más pruebas donde se evalúe la eficiencia de biorremediación.

La eficiencia de la biorremediación está influenciada por diversos factores como tales como el nivel o grado de contaminación y por variables de calidad como pH, temperatura, oxígeno, salinidad y alcalinidad por mencionar algunos (Jasmin *et al.*, 2020; Paniagua, 2020)

Uso de poliquetos como biorremediadores

Algunos microorganismos como el poliqueto *Nereis virens* han demostrado la capacidad aprovechar sustratos sólidos provenientes de RAS marinos, al tiempo que se convierten en biomasa que puede ser utilizada como fuente de alimento para peces y crustáceos (Bao *et al.*, 2018; Mandario, 2020; Mandario *et al.*, 2021). Asimismo, se ha observado que larvas del poliqueto *Marphysa iloiloensis* crecen y se alimentan de sedimentos salinos y salobres y de material en descomposición de estanques de peces (Mandario, 2020; Mandario *et al.*, 2021). Mandario, (2020) evaluó la sobrevivencia, crecimiento y producción de biomasa del cultivo de *Marphysa iloiloensis* empleando dos tipos de dieta: biofloc y (BF) y sobrantes de ingredientes secos empleados en la fabricación de alimento balanceado para acuicultura (FS) Este autor observó que los poliquetos alimentados exclusivamente con BF tuvieron mayor contenido de Proteína Cruda y menor contenido de lípidos (66%–70% proteína y 3.50%–4.50% grasa) en contraste con la dieta FS (61%–64% proteína y 12%–13% grasa). La mayor biomasa se obtuvo combinando las dos dietas. Asimismo, evidenció que altas concen-

traciones de fósforo y azufre no afectaron negativamente la sobrevivencia ni el rendimiento productivo de los poliquetos.

A su vez, Liu *et al.* (2020) combinaron el uso de un filtro de arena con poliquetos (*Perinereis helleri*) con el objetivo de favorecer la remoción de nutrientes del efluente del cultivo de Camarón trigre (*Penaeus monodon*). *Perinereis helleri* resultó ser una especie eficiente debido a que posee hábitos alimenticios omnívoros y se adapta muy bien a altas concentraciones de materia orgánica.

Los autores de este estudio indican que es aconsejable evacuar el contenido intestinal de los poliquetos antes de iniciar el proceso de biorremediación para evitar la transferencia de algunos virus, en este caso el Virus de la necrosis Hematopoyética Infecciosa (IHN).

De acuerdo con Yarnold *et al.* (2019) el uso de poliquetos para el tratamiento de aguas residuales derivadas de la acuicultura constituye una alternativa para fomentar la economía circular por medio de la integración del cultivo de peces, camarones, crustáceos, moluscos y la producción de una fuente valiosa de proteína que puede ser empleada como ingrediente en la dieta de animales de producción.

Por su parte, Bao *et al.* (2018) consideran que existe aún mucho por hacer con respecto a la reutilización de los sólidos en la acuicultura, especialmente hablando desde el enfoque del desarrollo sostenible.

Potencial de las algas como biorremediadores

Tanto micro como macroalgas desempeñan un rol importante en la remoción de compuestos inorgánicos derivados de la acuicultura marina. Las algas, exhiben altas tasas crecimiento y de asimilación de nutrientes. Es preciso seleccionar especies que se adapten a las condiciones ambientales variables y que posean valor industrial (Castine *et al.*, 2013; Paniagua, 2020). Las algas tienen gran capacidad para biorremediar los efluentes de la acuicultura por medio de la remoción de nutrientes adicionalmente producen compuestos de gran valor nutricional e industrial y pueden ser integradas en policultivos, así como en Cultivos Multi-tróficos (Castine *et al.*, 2013; Campanati *et al.*, 2021). Mawi *et al.* (2020) evaluaron el potencial de biorremediación de *Gracilaria edulis* y *Gracilaria changii* usando los efluentes de camarón blanco cultivado en un sistema de recirculación *outdoor*. Estos autores observaron que la tasa de remoción de amonio y nitrato de am-

bas especies de macroalgas fue de 72,5% y 71% para amonio y 58,8% y 56,8% para nitrato en contraste con el tratamiento control (sin macroalgas) que presentó una tasa de remoción de amonio del 2% posiblemente debido a la actividad microbiana y fitoplanctónica. Con respecto al control de fosfatos, la tasa de remoción fue de 45,9% y 43,5 % respectivamente. En este estudio se evidenció que *Gracilaria edulis* y *G. changii* son dos especies que presentan un buen crecimiento, adecuada biofiltración y favorecen la productividad del camarón (Mawi et al., 2020).

Por su parte, Wu et al. (2015) emplearon *G. chouae* para evaluar el flujo de nutrientes del cultivo integrado con *Sparus macrocephalus*. Se obtuvo una eficiencia de eliminación de nitrato (NO₃) del 37,76%, la remoción del nitrito (NO₂) fue 36,99%, amonio (NH₄⁺) 29,27% y fosfato (PO₄) 40,64%. Asimismo, se evidenció una disminución en la concentración de clorofila y densidad planctónica. Los autores informaron que esta alga roja constituye una especie para la biorremediación eficiente en sistemas IMTA.

En la misma línea, Pires et al. (2021) evaluaron dos medios de cultivo para el crecimiento del alga roja *Kappaphycus alvarezii*. Uno consistió en una solución de 50% von Stosch y agua de mar destilada y el otro fue una solución con 25% de biofloc (BFT) proveniente del cultivo intensivo de camarón y agua de mar destilada. Las algas fertilizadas con BFT presentaron una menor remoción de nitrato y fosfato (22,97% y 83,58%.) en contraste con las de la solución de von Stosch (58,39% y 100%) Sin embargo, se observó una mejor calidad de la carragenina. Asimismo, los autores reportan que el efluente de biofloc para el cultivo de *Kappaphycus alvarezii* puede ser utilizado como fertilizante en reemplazo de la solución de von Stosch. Igualmente, mencionan que la integración de las algas, los microorganismos autótrofos y heterótrofos constituyen un biofiltro eficiente en los sistemas IMTA que se combinan sistemas biofloc.

En otro estudio, de Oliveira et al. (2019) analizaron el crecimiento de *Chlorella vulgaris* utilizando aguas residuales del cultivo de alevinos de Tilapia nilótica a baja salinidad en sistemas biofloc. Se evaluaron tres proporciones del efluente como medio de cultivo: 0% (medio Provasoli), 50% y 100%. A pesar de que al final del experimento el crecimiento del alga resultó mayor en el tratamiento control (0% efluente), los primeros 4 días de cultivo se observó que la tasa de crecimiento y la densidad de células fue mayor en los tratamientos

que contenía efluente de biofloc. Adicionalmente se evidenció que hubo una remoción del amonio (NH₄) del 79,3%; Nitrito del 80%, Nitrato del 93,6% y 48,3% de Fosfato cuando se empleó como medio de cultivo 100% efluente. Los autores señalan que el uso de efluente de biofloc es favorable para el crecimiento del alga *Chlorella vulgaris* y representa un ahorro en el uso de reactivos; además, esta alga tiene potencial para emplearse en Acuicultura Multitrófica Integrada con alevinos de tilapia nilótica.

La capacidad de remoción de nutrientes por parte de las algas está influenciada por aspectos ambientales como luz, temperatura, flujo de agua, pH, etc; fisiológicos y por los requerimientos de nutrientes (Wu et al., 2015; Mawi et al., 2020).

A parte de los beneficios del uso de algas como organismos biorremediadores, estas constituyen una fuente nutriente de gran valor para dietas acuícolas y poseen gran potencial para ser usados como reemplazo de la harina y aceite de pescado. Tal como mencionan Yarnold et al. (2019) en su revisión.

Conclusiones

Durante los últimos años se ha evidenciado que existe un creciente interés por valorar de mejor manera los recursos, favorecer el reciclaje de nutrientes y subproductos y fomentar la economía circular con ánimos de aumentar la producción de alimentos acuáticos de manera sustentable (Campanati et al., 2021). No obstante, los trabajos sobre el tratamiento de efluentes provenientes de acuicultura marina son pocos en comparación con las investigaciones sobre el manejo de efluentes de acuicultura de aguas continentales.

La aplicación de la biorremediación aumenta cada vez más su popularidad debido a que se propone como una tecnología ambientalmente adecuada para minimizar los impactos generados por los efluentes que afectan los ecosistemas costeros, marinos y ribereños, lograr la sostenibilidad y la resiliencia (Paniagua, 2020).

Diversas técnicas para reusar los residuos provenientes de la acuicultura se han implementado con el objetivo de fomentar la economía circular, sin embargo, es preciso seguir avanzando en las investigaciones sobre el uso de microorganismos y microalgas con potencial para biorremediación y bioprospección. La construcción de humedales artificiales constituye una alternativa eficiente y ecológica para la gestión de cargas masivas de efluentes acuícolas, sin embargo,

las grandes áreas que se requieren para su establecimiento y funcionamiento exitoso siguen siendo un gran desafío.

Asimismo, la obtención de biogás a partir de la digestión anaerobia de los lodos constituye una alternativa que puede satisfacer parte de la energía necesaria para el funcionamiento de los RAS y sistemas biofloc.

De acuerdo con Martínez et al. (2014) el uso de microorganismos como biorremediadores y como fuente de proteína y representa una estrategia con gran potencial para avanzar hacia una acuicultura sostenible, sin embargo, es preciso adelantar investigaciones orientadas a la caracterización taxonómica, mecanismos de acción y requerimientos ambientales que permitan aprovechar al máximo los beneficios que estos ofrecen. Existe un gran desafío con respecto al conocimiento sobre el tratamiento de compuestos de mayor toxicidad, metales pesados, gases, etc; y sobre dinámicas entre microorganismos.

Con respecto al uso de algas, es necesario avanzar en investigaciones a mayor escala, enfocadas en la obtención de compuestos a partir de microalgas cultivadas con efluentes de acuicultura de manera más eficiente y que sea económicamente viable.

Las entidades gubernamentales encargadas de formular las políticas ambientales deberán diseñar directrices para involucrar diferentes actores del sector acuícola para contribuir con el uso sostenible de los recursos naturales y la reutilización de los residuos en la cadena productiva.

Referencias

- Adineh H, Naderi M, Hamidi MK, 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 & Shellfish Immunology*, 2019; 95(1):440-448 <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.10.057>
- Ahmed N, Bunting SW, Glaser M, Flaherty MS, Diana JS. Can greening of aquaculture sequester blue carbon?. *Ambio*, 2017;46(4):468-477 <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0849-7>
- Arantes R, Schweitzer R, Magnotti C, Lapa KR, Vinatea L. A comparison between water exchange and settling tank as a method for suspended solids management in intensive biofloc technology systems: effects on shrimp (*Litopenaeus vannamei*) performance, water quality and water use. *Aquaculture Research*, 2016; 48(4):1478-1490 <https://doi.org/10.1111/are.12984>
- Bao WJ, Zhu SM, Jin G, & Ye ZY. Generation, characterization, perniciousness, removal and reutilization of solids in aquaculture water: A review from the whole process perspective. *Reviews in Aquaculture*, 2019;11(4):1342-1366. <https://doi.org/10.1111/raq.12296>
- Beyer CP, Gómez S, Rodrigues de Lara G, Monsalve JP, Orellana J, Hurtado-Ferreira C. *Sarcocornia neei*: A novel halophyte species for bioremediation of marine aquaculture wastewater and production diversification in integrated systems. *Aquaculture*, 2021;541(1):736-971 <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736971>
- Brito LO, Cardoso-Junior L, Lavander HD, Abreu JL, Gálvez AO. Bioremediation of shrimp biofloc wastewater using clam, seaweed and fish. *Chemistry and Ecology*, 2018; 34(10):901-913 <https://doi.org/10.1080/02757540.2018.1520843>
- Campanati C, Willer D, Schubert J, Aldridge C. Sustainable Intensification of Aquaculture through Nutrient Recycling and Circular Economies: More Fish, Less Waste, Blue Growth. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2021;1-50 <https://doi.org/10.1080/23308249.2021.1897520>
- Castine S, McKinnon A, Paul N, Trott L. Wastewater treatment for land-based aquaculture: improvements and value-adding alternatives in model systems from Australia. *Aquaculture Environment Interactions*, 2013;4(3):285-300 <https://doi.org/10.3354/aei00088>
- Cerozi BS, Fitzsimmons K. Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agricultural Systems*, 2017;153(1):94-100 <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.020>
- Chu Yu-Ting, Brown P. Evaluation of Pacific Whiteleg Shrimp and Three Halophytic Plants in Marine Aquaponic Systems under Three Salinities. *Sustainability*, 2021;13(1). <https://doi.org/10.3390/su13010269>
- Davidson J, Summerfelt S, Schrader KK, Good C. Integrating activated sludge membrane biological reactors with freshwater RAS: Preliminary evaluation of water use, water quality, and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance. *Aquacultural Engineering*, 2019;87(1) <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.102022>
- Ebeling JM, Timmons MB. Recirculating aquaculture systems. *Aquaculture production systems*, 2012;245(1):246-281
- 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, Deasy A, 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
- Gaona CAP, Serra F, Furtado PS, Poersch LH, Wasielesky W. Biofloc management with different flow rates for solids removal in the *Litopenaeus vannamei* BFT culture system. *Aquaculture International*, 2016;24(5):1263-1275 <https://doi.org/10.1007/s10499-016-9983-2>

- Green BW, Rawles SD, Schrader K, Gaylord T, McEntire ME. Effects of dietary protein content on hybrid tilapia (*Oreochromis aureus* × *O. niloticus*) performance, common microbial off-flavor compounds, and water quality dynamics in an outdoor biofloc technology production system. *Aquaculture*, 2019;503(1):571-582 <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.01.034>
- Jasmin MY, Syukri, Kamarudin MS & Karim M. Potential of bioremediation in treating aquaculture sludge: Review article. *Aquaculture*, 2020;509: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734905>.
- Jung JY, Hur JW, Kim K, Han HS. Evaluation of floc-harvesting technologies in biofloc technology (BFT) system for aquaculture. *Bioresource Technology*, 2020;314(1) <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123719>
- Kuhn D, Boardman G, Lawrence A, Marsh L, Flick G. Microbial floc meal as a replacement ingredient for fish meal and soybean protein in shrimp feed. *Aquaculture*, 2009;296:51-57
- Lara G, Krummenauer D, Abreu PC, Poersch LH, Wasielesky W. The use of different aerators on *Litopenaeus vannamei* biofloc culture system: effects on water quality, shrimp growth and biofloc composition. *Aquaculture International*, 2017;25(1):147-162 <https://doi.org/10.1007/s10499-016-0019-8>
- Legarda EC, da Silva D, Miranda CS. Sea lettuce integrated with Pacific white shrimp and mullet cultivation in biofloc impact system performance and the sea lettuce nutritional composition. *Aquaculture*, 2021;534(1) <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736265>
- Li M, Callier MD, Blancheton JP, Galès A, Nahon S, Triplet S. Bioremediation of fishpond effluent and production of microalgae for an oyster farm in an innovative recirculating integrated multi-trophic aquaculture system. *Aquaculture*, 2019;504(1): 314-325 <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.02.013>
- Liu S, Rao M, Cowley JA, Morgan JA, Barnes AC, Palmer PJ. Polychaetes (*Perinereis helleri*) reared in sand beds filtering nutrients from shrimp (*Penaeus monodon*) culture ponds can transiently carry IHFN. *Aquaculture*, 2020;528(1) <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735560>
- Mandario MAE, Castor NJT, Balinas VT. Interaction effect of light intensity and photoperiod on egg hatchability, survival and growth of polychaete *Marphysa iloiloensis* from larva to juvenile. *Aquaculture*, 2021;531(1) <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735890>
- 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>
- Manan H, Moh JHZ, Kasan NA, Suratman S, Ikhwanuddin M. Identification of biofloc microscopic composition as the natural bioremediation in zero water exchange of Pacific White shrimp, *Penaeus vannamei*, culture in closed hatchery system. *Applied Water Science*, 2016;7(5):2437-2446 <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0421-4>
- Mansour AT, Esteban MÁ. Effects of carbon sources and plant protein levels in a biofloc system on growth performance, and the immune and antioxidant status of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Fish & shellfish immunology*, 2017;64(1):202-209 <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.03.025>
- Melo Filho E, Owatari M, Mourião J, Lapa K, Soares H. Application of nitrification and denitrification processes in a direct water reuse system for pacific white shrimp farmed in biofloc system. *Aquacultural engineering*, 2020;88(1) <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102043>
- Martínez-Córdova R, Emerenciano M, Miranda-Baeza A, Martínez-Porchas M. Microbial-based systems for aquaculture of fish and shrimp: an updated review. *Reviews in Aquaculture*, 2014;7(2):131-148 <https://doi.org/10.1111/raq.12058>
- Mawi S, Krishnan S, Din MFM, Arumugam N, Chelliapan S. Bioremediation potential of macroalgae *Gracilaria edulis* and *Gracilaria changii* co-cultured with shrimp wastewater in an outdoor water recirculation system. *Environmental Technology & Innovation*, 2020; 17(1) <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100571>
- Nguyen HYN, Trinh TL, Baruah K, Lundh T, Kiessling A. Growth and feed utilisation of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed different protein levels in a clear-water or biofloc-RAS system. *Aquaculture*, 2021;536(1) <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736404>
- Nozzi V, Graber A, Schmutz Z, Mathis A, Junge R. Nutrient management in aquaponics: comparison of three approaches for cultivating lettuce, mint and mushroom herb. *Agronomy*, 2018;8(3):27 <https://doi.org/10.3390/agronomy8030027>
- Oliveira CYB, e Abreu JL, de Oliveira CDL, Lima PC, Gálvez AO, de Macedo Dantas DM. Growth of *Chlorella vulgaris* using wastewater from Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) farming in a low-salinity biofloc system. *Acta Scientiarum Technology*, 2020; 42(1): <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v42i1.46232>
- Paniagua-Michel, J. Bioremediation of Marine Effluents and Environments. *Encyclopedia of Marine Biotechnology*, 2020;139(1):3119-3137 <https://doi.org/10.1002/9781119143802.ch139>
- Peña RJ, Hernández DM, Ghasemi M, Puente EO. Plantas tolerantes a la sal como un recurso valioso para la producción sostenible de alimentos en zonas costeras áridas y salinas. *Revista Acta Biológica Colombiana*, 2021;26(1):116-126
- Pinho SM, Molinari D, de Mello GL, Fitzsimmons KM, Coelho-Emerenciano MG. Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. *Ecological Engineering*, 2017;103(1):146-153 <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.009>
- Pinheiro I, Arantes R, do Espírito Santo CM. Production of the halophyte *Sarcocornia ambigua* and Pacific white shrimp in an aquaponic system with biofloc technology. *Ecological Engineering*, 2017;100(1):261-267 <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.12.024>
- Pires CM, Bazzo GC, Barreto PLM, do Espírito Santo CM, Ventura TFB, Pedra AGL, Hayashi L. Cultivation of the red seaweed *Kappaphycus alvarezii* using biofloc effluent. *Journal of Applied*

- Phycology*, 2021;33(2):1047-1058 <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02335-6>
- Poli MA, Legarda EC, de Lorenzo MA, Pinheiro I, Martins MA, Seiffert WQ, do Nascimento Vieira F. Integrated multitrophic aquaculture applied to shrimp rearing in a biofloc system. *Aquaculture*, 2019;511(1): <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734274>
- Robinson G, Caldwell G S, Jones CL, Stead SM. The effect of resource quality on the growth of *Holothuria scabra* during aquaculture waste bioremediation. *Aquaculture*, 2019; 499(1):101-108 <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.09.024>
- Robinson G, MacTavish T, Savage C. Carbon amendment stimulates benthic nitrogen cycling during the bioremediation of particulate aquaculture waste. *Biogeosciences*, 2018;15(6):1863-1878 <https://doi.org/10.5194/bg-15-1863-2018>
- Romano A, Urriaga AM, Ortiz I. Optimized energy consumption in electrochemical-based regeneration of RAS water. *Separation and Purification Technology*, 2020;240(1):<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116638>
- Santaella ST, Vale MD, Almeida CC, Cavalcante WD, Nunes AJ, Sousa OV, Leitão RC. Biofloc production in activated sludge system treating shrimp farming effluent. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 2018;23(1):1143-1152 <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018177677>
- Souza J, Cardozo A, Wasielesky JW, Abreu PC. Does the biofloc size matter to the nitrification process in Biofloc Technology (BFT) systems?. *Aquaculture*, 2019;500(1): 443-450 <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.10.051>
- Suhl J, Dannehl D, Baganz D, Schmidt U, Kloas W. An innovative suction filter device reduces nitrogen loss in double recirculating aquaponic systems. *Aquacultural Engineering*, 2018; 82(1):63-72 <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.06.008>
- Syakti AD, Arofah N, Purnomowati R, Salim A. Sludge Valorization from Biofloc-Based Aquaculture Systems for Bioremediation of Crude Oil-Contaminated Sediment. *Waste and Biomass Valorization*, 2016;8(3):561-572 <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9649-3>
- Van Rijn J. Waste treatment in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 2013;53(1):49-56 <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.010>
- Wu H, Huo Y, Han F, Liu Y, He P. Bioremediation using *Gracilaria chouae* co-cultured with *Sparus macrocephalus* to manage the nitrogen and phosphorous balance in an IMTA system in Xiangshan Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2015;91(1):272-279 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.11.032>
- Yarnold J, Karan H, Oey M, Hankamer B. Microalgal aquafeeds as part of a circular bioeconomy. *Trends in plant science*, 2019;24(10):959-970 <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.06.005>
- Zemor JC, Wasielesky W, Fóes GK, Poersch LH. The use of clarifiers to remove and control the total suspended solids in large-scale ponds for production of *Litopenaeus vannamei* in a biofloc system. *Aquacultural Engineering*, 2019;85(1):74-79 <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.03.001>