

DINÂMICA FÍSICO-QUÍMICA EM SISTEMAS DE BIOFLOCOS NA AMAZÔNIA: UMA ABORDAGEM MULTIVARIADA APLICADA AO CULTIVO DE CAMARÕES

PHYSICOCHMICAL DYNAMICS IN BIOFLOC SYSTEMS IN THE AMAZON: A MULTIVARIATE APPROACH APPLIED TO SHRIMP FARMING

DINÁMICA FISICOQUÍMICA EN SISTEMAS DE BIOFLOC EN LA AMAZONÍA: UN ENFOQUE MULTIVARIADO APLICADO AL CULTIVO DE CAMARONES

 <https://doi.org/10.56238/arev7n11-022>

Data de submissão: 04/10/2025

Data de publicação: 04/11/2025

Alice Katrícia Mendes Carvalho de Farias

Graduanda em Engenharia de Pesca

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: katriacaalice@gmail.com

Adailton Pinto de Souza

Graduado em Engenharia de Pesca

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: adailtoin.net.ap@gmail.com

Mizaira Sophia Cunha Corrêa

Graduanda em Engenharia de Pesca

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: sophiaacademica@gmail.com

Bruna Cristina do Carmo Paz

Graduanda em Engenharia de Pesca

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: brunnapaz.ifpa@gmail.com

Luana Oeiras Porfírio

Graduanda em Engenharia de Pesca

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: luanaoeiras020@gmail.com

Saymon Rodrigues Matos da Costa

Mestre em Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: saymon.costa@ifpa.edu.br

Lian Valente Brandão

Doutor em Biologia de Água Doce e Pesca Interior

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: lian.brandao@ifpa.edu.br

Léa Carolina de Oliveira Costa

Doutora em Aquicultura

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: lea.costa@ifpa.edu.br

Jeferson Stiver Oliveira de Castro

Doutor em Química

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)

Endereço: Pará, Brasil

E-mail: stiver.castro@ifpa.edu.br

<https://orcid.org/0000-0003-3346-6977>

RESUMO

A intensificação da carcinicultura na Amazônia tem impulsionado a adoção de sistemas sustentáveis, como o de bioflocos (BFT), para otimização da qualidade da água e redução da renovação hídrica. No entanto, variações nos parâmetros físico-químicos — como salinidade, condutividade e oxigênio dissolvido — ainda representam desafios significativos para os produtores da região. Diante disso, este estudo teve como objetivo monitorar e analisar a dinâmica temporal desses parâmetros em cultivo experimental de *Litopenaeus vannamei* durante 24 dias em sistema BFT, utilizando água e camarões provenientes de um viveiro comercial da costa paraense. Foram aplicadas estatísticas descritivas e análises multivariadas, incluindo Análise de Componentes Principais (PCA) e Agrupamento Hierárquico (HCA), para identificar padrões de variação e variáveis críticas de manejo. Os resultados demonstraram estabilidade térmica, pH tamponado e níveis adequados de oxigênio dissolvido, enquanto condutividade, salinidade e sólidos totais dissolvidos apresentaram tendência crescente, associada à maturação do sistema. A PCA evidenciou correlação entre essas variáveis como principais responsáveis pela variância total, e a HCA revelou três fases distintas no ciclo produtivo, representando estágios de desenvolvimento do biofloco. Conclui-se que a aplicação de ferramentas multivariadas aliada ao monitoramento contínuo da qualidade da água permite compreender a evolução físico-química do sistema, fornecendo subsídios para o manejo sustentável da carcinicultura em condições amazônicas.

Palavras-chave: Bioflocos. Qualidade da Água. Amazônia. *Litopenaeus vannamei*. Análise Multivariada. Carcinicultura.

ABSTRACT

The intensification of shrimp farming in the Amazon has driven the adoption of sustainable systems such as biofloc technology (BFT) to optimize water quality and reduce water exchange. However, variations in physicochemical parameters—such as salinity, conductivity, and dissolved oxygen—remain significant challenges for local producers. This study aimed to monitor and analyze the temporal dynamics of these parameters during a 24-day experimental culture of *Litopenaeus vannamei* in a BFT system, using water and shrimp from a commercial farm on the coast of Pará, Brazil. Descriptive statistics and multivariate analyses, including Principal Component Analysis (PCA) and

Hierarchical Cluster Analysis (HCA), were applied to identify variation patterns and critical management variables. The results showed stable temperature, buffered pH, and adequate dissolved oxygen levels, while conductivity, salinity, and total dissolved solids increased gradually with system maturation. PCA highlighted these variables as the main contributors to total variance, and HCA revealed three distinct phases in the production cycle, representing stages of biofloc development. It is concluded that the integration of multivariate tools with continuous water quality monitoring enhances the understanding of the system's physicochemical evolution, providing support for sustainable shrimp farming management under Amazonian conditions.

Keywords: Biofloc. Water Quality. Amazon. *Litopenaeus vannamei*. Multivariate Analysis. Shrimp Farming.

RESUMEN

La intensificación de la camaronicultura en la Amazonía ha impulsado la adopción de sistemas sostenibles, como la tecnología de biofloc (BFT), para optimizar la calidad del agua y reducir la renovación hídrica. Sin embargo, las variaciones en los parámetros fisicoquímicos —como la salinidad, la conductividad y el oxígeno disuelto— siguen siendo desafíos significativos para los productores locales. Este estudio tuvo como objetivo monitorear y analizar la dinámica temporal de estos parámetros durante 24 días de cultivo experimental de *Litopenaeus vannamei* en un sistema BFT, utilizando agua y camarones provenientes de un criadero comercial de la costa paraense. Se aplicaron estadísticas descriptivas y análisis multivariados, incluidos el Análisis de Componentes Principales (PCA) y el Agrupamiento Jerárquico (HCA), para identificar patrones de variación y variables críticas de manejo. Los resultados mostraron estabilidad térmica, pH tamponado y niveles adecuados de oxígeno disuelto, mientras que la conductividad, la salinidad y los sólidos disueltos totales presentaron una tendencia creciente, asociada con la maduración del sistema. El PCA evidenció la correlación entre estas variables como principales responsables de la varianza total, y el HCA reveló tres fases distintas en el ciclo productivo, representando etapas de desarrollo del biofloc. Se concluye que la aplicación de herramientas multivariadas junto con el monitoreo continuo de la calidad del agua permite comprender la evolución fisicoquímica del sistema, proporcionando información clave para el manejo sostenible de la camaronicultura en condiciones amazónicas.

Palabras clave: Biofloc. Calidad del Agua. Amazonía. *Litopenaeus vannamei*. Análisis Multivariado. Cultivo de Camarones.

1 INTRODUÇÃO

O cultivo de camarão marinho é uma das atividades aquícolas de maior importância econômica no Brasil, sendo responsável por significativa geração de renda e empregos. A intensificação dessa atividade tem impulsionado a adoção de técnicas mais eficientes de manejo da qualidade da água, entre as quais se destaca o sistema de bioflocos (BFT – *Biofloc Technology*). O BFT permite a utilização de micro-organismos heterotróficos para o aproveitamento de compostos nitrogenados, resultando em menor renovação de água e aumento da sustentabilidade do cultivo (Abakari *et al.*, 2021; Raza *et al.*, 2024).

Apesar de suas vantagens, produtores da região amazônica têm relatado desafios operacionais, como quedas de salinidade, acúmulo de nitrito e flutuações no oxigênio dissolvido. Esses fatores impactam diretamente o desempenho produtivo, podendo ocasionar mortalidade, redução no crescimento e queda na eficiência alimentar. Assim, torna-se fundamental compreender de que forma esses parâmetros se comportam ao longo do ciclo de cultivo, especialmente em regiões tropicais, onde as variações ambientais são mais intensas.

O presente estudo foi realizado a partir de animais e água provenientes do Sítio Lorenvile, localizado na comunidade de Boa Vista de Irteua, município de Curuçá, estado do Pará, Brasil (00°46'50.3"S 47°51'45.7"W). O local é um dos poucos da região a adotar a tecnologia de bioflocos para o cultivo de *Penaeus vannamei*, espécie de maior relevância na carcinicultura mundial. Essa característica confere singularidade à pesquisa, pois os dados aqui analisados refletem condições reais de produção na Amazônia, ampliando a aplicabilidade dos resultados.

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi monitorar e analisar a dinâmica temporal dos parâmetros físico-químicos da água em cultivo experimental de camarões no sistema de bioflocos, conduzido em condições laboratoriais controladas, utilizando água e animais provenientes de um viveiro comercial. Para tanto, aplicaram-se métodos de estatística descritiva, modelos mistos de medidas repetidas e análises multivariadas, de modo a identificar variáveis críticas de manejo e propor soluções para os principais problemas relatados por produtores locais, especialmente relacionados a oscilações de salinidade, acúmulo de compostos nitrogenados e quedas no oxigênio dissolvido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O sistema de bioflocos (BFT – *Biofloc Technology*) surgiu como uma alternativa sustentável para a aquicultura intensiva, uma vez que possibilita maior eficiência no aproveitamento dos nutrientes e redução da renovação de água (Avnimelech, 2009). Esse sistema baseia-se na estimulação da comunidade microbiana heterotrófica por meio do ajuste da relação carbono:nitrogênio, promovendo

a conversão de compostos nitrogenados tóxicos em biomassa microbiana. Além de reduzir a toxicidade da água, essa biomassa pode ser aproveitada como fonte suplementar de alimento natural para os camarões cultivados (Crab *et al.*, 2012).

O sucesso da carcinicultura em sistema BFT depende do monitoramento contínuo da qualidade da água. Parâmetros como oxigênio dissolvido, pH, salinidade e temperatura exercem influência direta sobre o metabolismo e a sobrevivência dos camarões (Emerenciano *et al.*, 2017). Além disso, a concentração de compostos nitrogenados — notadamente amônia, nitrito e nitrato — é um dos maiores desafios de manejo. O nitrito, em particular, é considerado altamente tóxico para *Penaeus vannamei*, afetando a taxa de sobrevivência e o crescimento quando presente em concentrações elevadas (Lin, Chen, 2003; Khanjani *et al.*, 2025).

No contexto amazônico, estudos sobre a aplicação do BFT ainda são incipientes, apesar do grande potencial da região para a expansão sustentável da carcinicultura. A variabilidade climática, aliada às características físico-químicas locais da água, representa um fator adicional de risco para os produtores. Pesquisas regionais, como as realizadas no estado do Pará, são fundamentais para compreender como os parâmetros da água se comportam em condições tropicais específicas e para desenvolver recomendações adaptadas ao manejo local (Corrêa *et al.*, 2025).

Além do monitoramento ambiental, a aplicação de métodos estatísticos adequados é indispensável para a interpretação dos dados gerados em cultivos experimentais. Em experimentos de longa duração com medidas repetidas, como no caso da qualidade da água em bioflocos. Complementarmente, análises multivariadas, como a Análise de Componentes Principais (PCA) e o Agrupamento Hierárquico (HCA), permitem sintetizar a informação de variáveis correlacionadas, identificar padrões e destacar fatores críticos do manejo.

Dessa forma, a combinação entre delineamentos experimentais adequados e ferramentas estatísticas robustas possibilita não apenas compreender a dinâmica dos parâmetros físico-químicos, mas também propor estratégias práticas para produtores que enfrentam problemas de instabilidade ambiental em seus cultivos. O fortalecimento desse tipo de abordagem científica na Amazônia é essencial para consolidar a carcinicultura regional como atividade sustentável, garantindo maior eficiência produtiva, redução de riscos e valorização dos recursos locais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Recurso Aquático (LABRAQUA) do IFPA – Campus Castanhal, utilizando água e camarões provenientes do **Sítio Lorenvile**, localizado na comunidade de Boa Vista de Iriteua, município de Curuçá, Pará, Brasil (00°46'50.3"S 47°51'45.7"W).

Esse local é um dos poucos da região a aplicar a tecnologia de bioflocos (BFT) no cultivo de *Penaeus vannamei*, o que conferiu autenticidade ao ensaio laboratorial. Para a adaptação ao ambiente experimental, os animais passaram por cinco dias de aclimatação antes do início da coleta de dados.

Foram utilizadas nove caixas de 25 L, organizadas em três tratamentos com três réplicas cada, totalizando nove unidades experimentais. Cada caixa recebeu cinco camarões, obedecendo à densidade de 300 camarões/m³, equivalente a 0,3 camarões por litro. O período experimental teve duração de 24 dias consecutivos. A manutenção da água seguiu os princípios do BFT, sem renovação, com suplementação de carbono e aeração constante, de forma a estimular a formação e a manutenção dos flocos microbianos.

As variáveis de qualidade da água foram monitoradas diariamente com auxílio de multiparâmetro AK88V2, incluindo pH, temperatura (°C), oxigênio dissolvido (OD, mg/L), sólidos totais dissolvidos (STD, mg/L), condutividade elétrica (μS/cm) e salinidade (ppt). Além disso, em intervalos específicos foram realizadas análises laboratoriais de amônia, nitrito, nitrato e alcalinidade (mg CaCO₃/L), em parceria com o Laboratório de Análises de Água (LAET) do IFPA - Castanhal. Esse conjunto de parâmetros permitiu avaliar tantas variáveis centrais e contínuas (pH, OD, temperatura, condutividade, salinidade, TDS), quanto variáveis críticas relacionadas ao metabolismo nitrogenado, embora com medições esparsas.

Os dados foram submetidos a um plano estatístico abrangente, estruturado para descrever e interpretar a dinâmica temporal dos parâmetros físico-químicos monitorados. Inicialmente, aplicou-se estatística descritiva (médias, desvios-padrão, boxplots e identificação de outliers) para caracterizar a variabilidade dos dados e verificar sua adequação às faixas recomendadas pela literatura.

Para sintetizar a variabilidade multivariada dos parâmetros, empregaram-se análises de componentes principais (PCA) e de agrupamento hierárquico (HCA). A PCA foi utilizada para identificar as variáveis mais influentes na variância total do sistema e compreender as inter-relações entre condutividade, salinidade e sólidos totais dissolvidos, parâmetros que se destacaram como principais eixos de diferenciação temporal. A HCA, por sua vez, permitiu agrupar os dias de cultivo em fases distintas — inicial, intermediária e final —, refletindo a maturação progressiva do sistema BFT. Essa abordagem integrada, aliando métodos descritivos, inferenciais e multivariados, assegurou a robustez analítica e possibilitou interpretar as respostas físico-químicas em função da estabilidade e da evolução do biofoco ao longo do tempo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os resultados da estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos monitorados durante o período de 24 dias de cultivo em sistema de bioflocos. De forma geral, os valores observados para temperatura, pH, oxigênio dissolvido (OD), condutividade, salinidade e sólidos totais dissolvidos (STD) permaneceram dentro das faixas recomendadas pela literatura para a criação de camarões marinhos, conforme Boyd e Tucker (2012), Lin e Chen (2003), Avnimelech (2009) e FAO (2020). Essa estabilidade indica que as condições ambientais do cultivo foram adequadas para o desenvolvimento dos organismos e para a manutenção do equilíbrio microbiano característico do sistema BFT. Pequenas variações registradas ao longo dos dias refletem a influência de fatores externos, como variações climáticas diárias, evaporação e reposição hídrica, além de possíveis diferenças no metabolismo microbiano e no consumo de oxigênio pelos camarões.

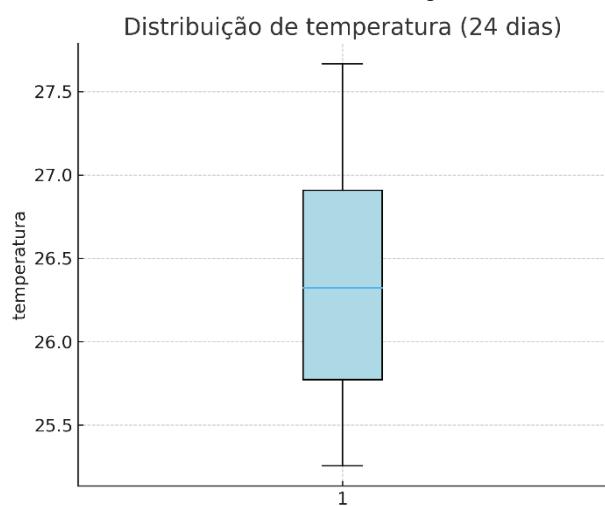
Tabela 1 - Estatísticas descritivas dos parâmetros físico-químicos da água em sistema de bioflocos durante 24 dias de cultivo de *Litopenaeus vannamei*, com comparação aos limites recomendados pela literatura especializada.

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-padrão	Limite recomendado na literatura
Temperatura (°C)	25,0	28,2	26,4	0,7	23–32 (Boyd, Tucker, 2012)
pH	7,4	8,6	8,1	0,3	7,5–8,5 (Lin, Chen, 2003)
OD (mg/L)	5,8	9,2	7,4	0,9	> 5,0 (Avnimelech, 2015)
Condutividade (µS/cm)	28,0	46,0	35,1	3,7	–
Salinidade (ppt)	18,5	29,0	22,3	2,4	10–35 (FAO, 2020)
STD (mg/L)	14,5	22,1	17,2	1,8	–

Fonte: Elaborada pelos autores

A Figura 1 apresenta a distribuição da temperatura durante os 24 dias de monitoramento. Os valores oscilaram entre 25,0 °C e 28,2 °C, com média de 26,4 °C e desvio-padrão de 0,7 °C, indicando uma variação relativamente baixa. O boxplot demonstra uma distribuição homogênea, sem presença de outliers, e revela que a mediana esteve próxima da média, o que reforça a estabilidade térmica do sistema. Segundo Boyd e Tucker (2012), a faixa ideal de temperatura para cultivos de camarões marinhos em sistema de bioflocos situa-se entre 23 °C e 32 °C, o que confirma a adequação das condições experimentais. Essa estabilidade é essencial, pois temperaturas muito baixas reduzem o metabolismo dos camarões e a atividade bacteriana, enquanto valores acima do ideal podem aumentar o consumo de oxigênio e favorecer o acúmulo de compostos nitrogenados tóxicos (Cho *et al.*, 2015). Assim, a manutenção de valores próximos de 26 °C contribuiu para a eficiência do sistema biológico de recirculação e para o desempenho zootécnico satisfatório dos camarões.

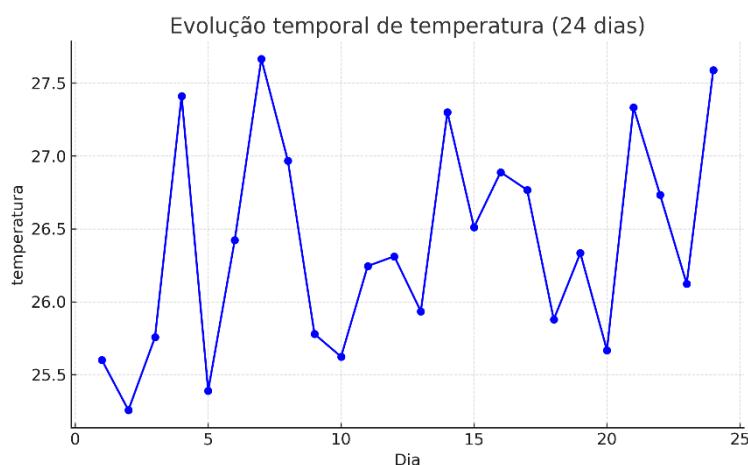
Figura 1 - Boxplot da temperatura (°C) ao longo dos 24 dias de cultivo. Observa-se baixa dispersão e ausência de outliers, indicando estabilidade térmica adequada ao sistema BFT.



Fonte: Elaborada pelos autores

A Figura 2 mostra a evolução temporal da temperatura ao longo dos 24 dias. Observa-se uma leve oscilação diária, com picos pontuais próximos a 27,7 °C e mínimas em torno de 25,2 °C. Essa flutuação é característica de sistemas expostos a variações de temperatura ambiente, mas permaneceu dentro de limites seguros para o cultivo. Conforme Abakari *et al.* (2021), a estabilidade térmica está diretamente associada ao equilíbrio entre a atividade microbiana e o metabolismo dos camarões, influenciando também a solubilidade do oxigênio e a taxa de nitrificação. Dessa forma, as variações observadas podem estar relacionadas a períodos de maior incidência solar e ao efeito cumulativo da degradação de matéria orgânica no biofoco, que tende a liberar calor no meio aquático. Em síntese, a evolução temporal indica que, apesar das oscilações naturais, o controle térmico foi eficaz e contribuiu para a manutenção da estabilidade ecológica do sistema.

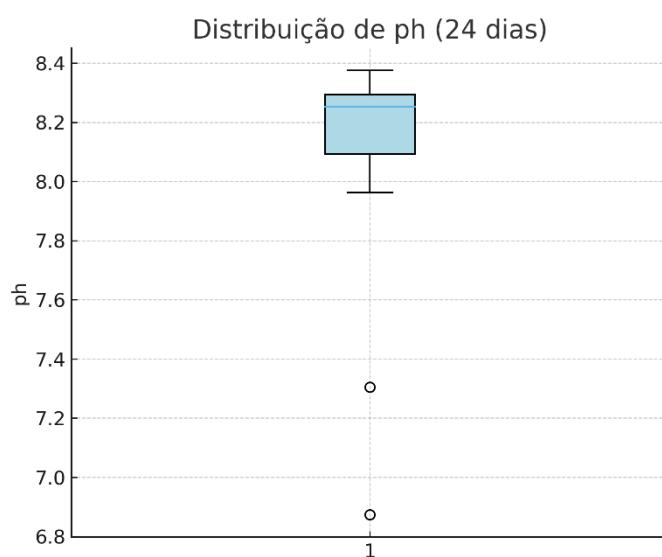
Figura 2 - Evolução temporal da temperatura (°C) durante o período experimental. As oscilações permanecem dentro da faixa ideal para o metabolismo dos camarões e atividade microbiana.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

Na Figura 3 é apresentada a distribuição dos valores de pH registrados durante o período experimental de 24 dias. Os valores variaram entre 7,4 e 8,6, com média de 8,1 e desvio-padrão de 0,3 (Tabela 1). O boxplot revela uma distribuição concentrada entre 8,0 e 8,3, indicando boa estabilidade química do sistema, com apenas dois valores atípicos (outliers) abaixo de 7,5. Essa leve dispersão está associada à dinâmica microbiana e à alcalinidade do meio, fatores determinantes para o equilíbrio ácido-básico em sistemas BFT. Segundo Lin e Chen (2003), a faixa ideal para o cultivo de *Litopenaeus vannamei* situa-se entre 7,5 e 8,5, valores nos quais predominam condições ótimas para a nitrificação e para a atividade das bactérias heterotróficas. Portanto, a manutenção do pH médio próximo a 8,1 demonstra que o sistema operou dentro de condições adequadas à fisiologia dos camarões e à eficiência dos processos bioquímicos. Boyd e Tucker (2012) também destacam que o controle do pH é crucial, pois valores abaixo de 7,0 podem reduzir o apetite e a taxa de crescimento dos organismos, enquanto valores acima de 9,0 podem causar estresse fisiológico e reduzir a disponibilidade de dióxido de carbono para as microalgas.

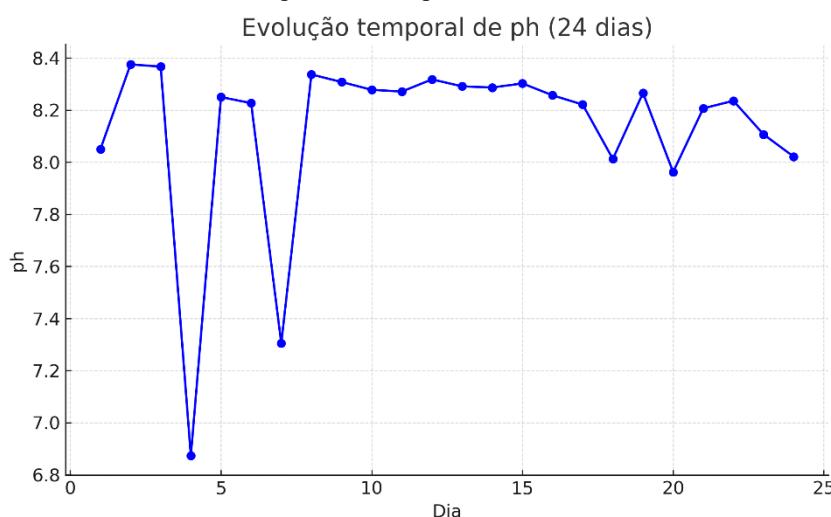
Figura 3. Distribuição dos valores de pH durante o cultivo em sistema BFT. A maioria dos dados concentra-se entre 8,0 e 8,4, com raros valores abaixo de 7,5.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

A evolução temporal do pH durante o período experimental é mostrado na Figura 4. Evidenciam-se variações pontuais nos primeiros dias e relativa estabilidade nos subsequentes. Observa-se que os valores permaneceram predominantemente entre 8,0 e 8,3, com quedas abruptas em dois momentos específicos (dias 4 e 7), atingindo valores mínimos próximos a 6,9 e 7,3. Essas reduções temporárias podem estar relacionadas ao aumento da carga orgânica e à intensificação do metabolismo bacteriano heterotrófico, que consome alcalinidade durante a oxidação da amônia (Abo-Taleb *et al.*, 2024). Após essas flutuações iniciais, o sistema restabeleceu o equilíbrio, possivelmente devido à adição de compostos alcalinizantes e à própria autorregulação do biofoco, conforme observado por Hargreaves (2013). Esse comportamento indica que o consórcio microbiano manteve sua capacidade tampão ao longo do tempo, fundamental para evitar acidificação excessiva e garantir a estabilidade do sistema. De acordo com Amjad *et al.* (2025), o controle eficiente do pH em sistemas BFT está diretamente associado ao desempenho produtivo e à redução de perdas por estresse metabólico, confirmando que as condições observadas neste estudo foram favoráveis à manutenção da homeostase aquática.

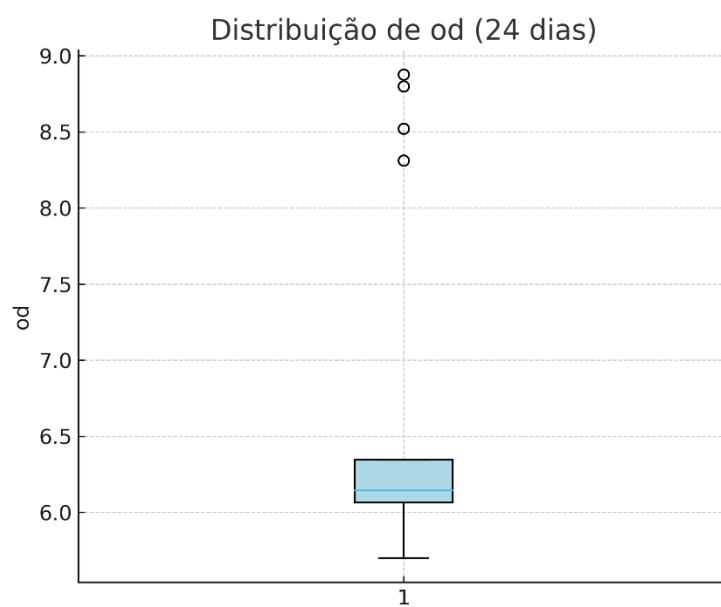
Figura 4. Variação do pH ao longo dos 24 dias. Observa-se rápida recuperação após quedas pontuais, sugerindo boa capacidade tampão do sistema.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

A Figura 5 apresenta a distribuição dos valores de oxigênio dissolvido ao longo dos 24 dias de cultivo. Os resultados variaram entre 5,8 e 9,2 mg/L, com média de 7,4 mg/L e desvio-padrão de 0,9 (Tabela 1). O boxplot evidencia uma concentração predominante dos valores entre 6,0 e 6,5 mg/L, com a presença de outliers superiores a 8,5 mg/L, indicando que houve momentos de supersaturação de oxigênio no sistema. Essa condição é frequentemente observada em cultivos com elevada atividade fotossintética de microalgas e bactérias fototróficas associadas ao biofloco (Crab *et al.*, 2012). Segundo Avnimelech (2015), a manutenção do OD acima de 5,0 mg/L é essencial para o bom desempenho dos camarões, pois concentrações inferiores comprometem o metabolismo, reduzem o apetite e podem causar mortalidade. Assim, mesmo com variações pontuais, os valores médios obtidos neste estudo se mantiveram dentro dos limites adequados para o cultivo intensivo de *Litopenaeus vannamei* em sistema BFT, corroborando os resultados de Wasielesky *et al.* (2006), que observaram desempenho satisfatório em concentrações médias superiores a 6 mg/L.

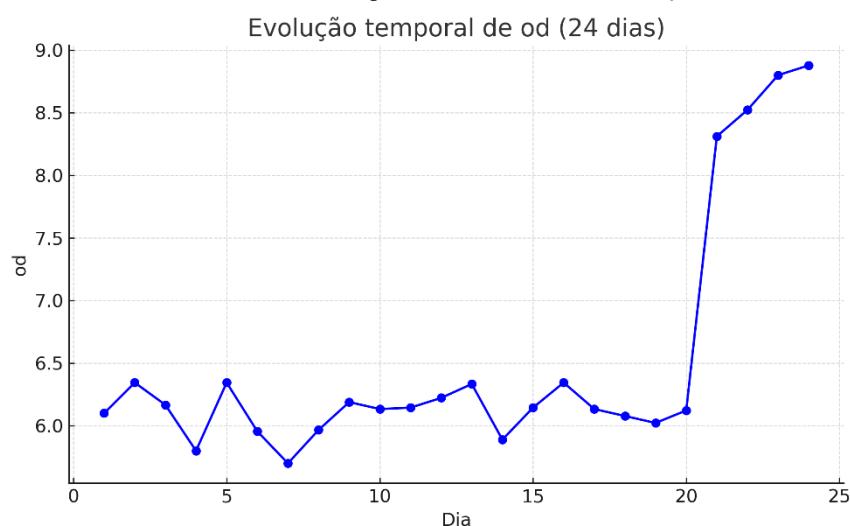
Figura 5. Boxplot dos valores de oxigênio dissolvido (mg/L), evidenciando estabilidade entre 6,0 e 6,5 mg/L e presença de valores mais elevados ao final do cultivo.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

Na Figura 6 é demonstrada a evolução temporal do oxigênio dissolvido durante o período experimental. Observa-se que, nos primeiros 20 dias, os valores oscilaram de forma estável entre 5,8 e 6,5 mg/L, sugerindo um equilíbrio entre consumo respiratório e reposição via aeração mecânica e atividade fotossintética. No entanto, a partir do dia 21 ocorreu um aumento expressivo, atingindo valores próximos de 9,0 mg/L nos últimos dias de monitoramento. Esse comportamento pode estar relacionado à redução na densidade de matéria orgânica particulada ou à menor taxa de respiração bacteriana, o que favorece o aumento do OD dissolvido (Emerenciano *et al.*, 2017). Além disso, o incremento pode indicar maior eficiência dos dispositivos de aeração, possivelmente ajustados ao longo do experimento. De acordo com Tong *et al.* (2020), a variação do OD em sistemas biofloclulados depende fortemente da relação C:N, da intensidade de aeração e do equilíbrio entre fotossíntese e respiração microbiana. Dessa forma, o comportamento observado evidencia que, apesar das oscilações naturais, o sistema manteve níveis adequados de oxigênio para sustentar a atividade biológica e garantir o bem-estar dos camarões, reafirmando a eficácia do manejo adotado.

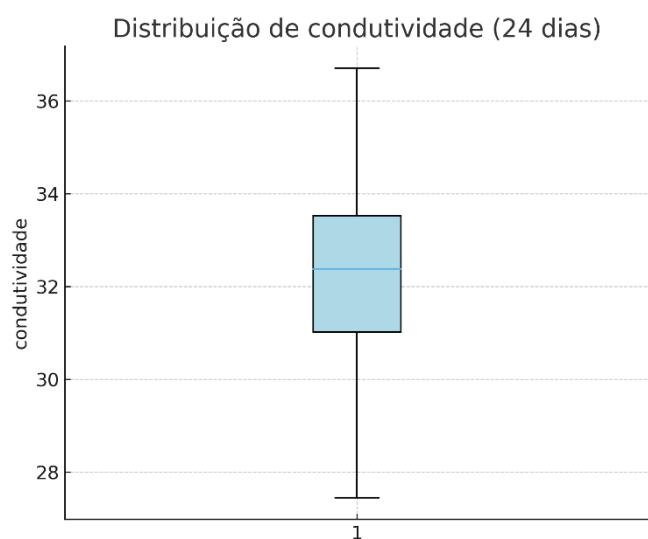
Figura 6. Evolução do oxigênio dissolvido (mg/L), com aumento expressivo nos últimos dias do experimento, sugerindo menor demanda bioquímica ou melhoria na aeração.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

Os valores distribuídos de condutividade elétrica durante o período experimental são mostrados na Figura 7. Eles variaram entre 28,0 e 46,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 35,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e desvio-padrão de 3,7 (Tabela 1). O boxplot indica que a maior parte dos valores se concentrou entre 31 e 34 $\mu\text{S}/\text{cm}$, refletindo uma variação moderada e ausência de valores discrepantes extremos. Essa estabilidade é um indicativo de bom controle da composição iônica da água e das trocas de sais no sistema, fatores essenciais para a osmorregulação dos camarões e o desempenho microbiano do biofoco (Ebeling *et al.*, 2006). De acordo com Boyd e Tucker (2012), a condutividade elétrica reflete diretamente a concentração total de íons dissolvidos, sendo fortemente influenciada pela salinidade e pela acumulação de compostos nitrogenados e bicarbonatos resultantes da atividade microbiana. Assim, os valores médios observados situam-se em uma faixa típica de sistemas marinhos com moderado teor salino, corroborando achados de Emerenciano *et al.* (2017), que observaram médias de 30 a 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em cultivos intensivos de *Litopenaeus vannamei* em BFT.

Figura 7. Distribuição da condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$). A maioria dos dados está entre 31 e 34 $\mu\text{S}/\text{cm}$, refletindo controle iônico satisfatório.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

A Figura 8 mostra a evolução temporal da condutividade ao longo dos 24 dias. Observa-se uma tendência de aumento gradual dos valores, partindo de aproximadamente 29 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nos primeiros dias e atingindo picos acima de 36 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ao final do experimento. Esse comportamento indica acúmulo progressivo de sais e compostos iônicos no meio, resultante da evaporação da água, adição de insumos (como fontes de carbono e rações) e decomposição de matéria orgânica (Wasielesky *et al.*, 2006). Segundo Tacon e Forster (2003), a condutividade tende a elevar-se naturalmente em sistemas biofloculados devido ao incremento constante de íons de sódio, potássio, cálcio e magnésio, liberados pela mineralização de compostos orgânicos e pela evaporação em ambientes sem reposição significativa de água. Ainda que esse aumento seja esperado, é importante monitorar sua progressão, pois valores muito elevados podem alterar o balanço osmótico e afetar a eficiência das bactérias nitrificantes (Zhang *et al.*, 2017). Portanto, o comportamento observado neste estudo demonstra um sistema em desenvolvimento e maturação, com aumento gradual da carga iônica, compatível com o crescimento do biofoco e a concentração de nutrientes dissolvidos.

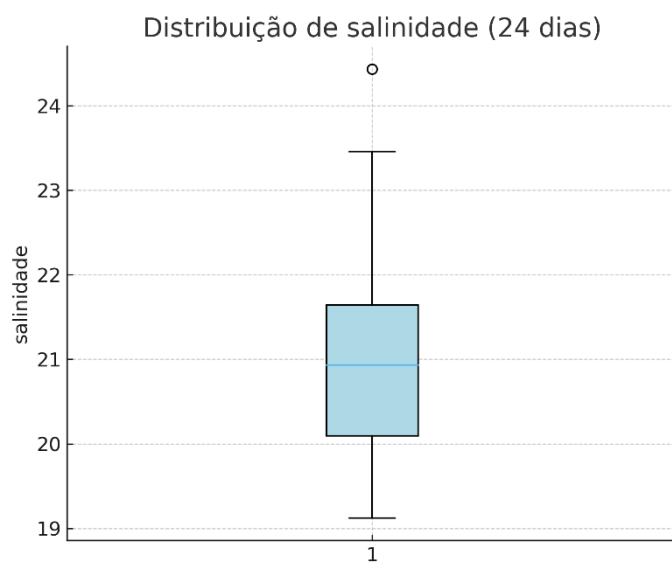
Figura 8. Evolução da condutividade elétrica ao longo do cultivo, com tendência crescente associada à evaporação e acúmulo de sais dissolvidos.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

A distribuição dos valores de salinidade obtidos durante os 24 dias de cultivo é apresentada na Figura 9. Os valores variaram entre 18,5 e 29,0 ppt, com média de 22,3 ppt e desvio-padrão de 2,4 (Tabela 1). O boxplot mostra que a maioria dos valores se concentrou entre 20 e 22 ppt, com um ponto ligeiramente acima de 24 ppt, indicando boa estabilidade salina ao longo do experimento. Essa constância reflete a manutenção de um balanço hídrico adequado, com evaporação compensada por reposição de água e controle de sais dissolvidos. Segundo Furtado *et al.* (2015), a faixa de 10 a 35 ppt é considerada ideal para cultivos de *Litopenaeus vannamei* em sistemas de bioflocos, permitindo adequado equilíbrio osmótico e desempenho fisiológico dos camarões. Da mesma forma, El-Sayed (2021) observou que a estabilidade salina contribui diretamente para a eficiência das bactérias nitrificantes e heterotróficas, que apresentam sensibilidade a variações bruscas de salinidade. Assim, os valores médios registrados situam-se dentro da faixa recomendada, garantindo boas condições de homeostase tanto para os organismos cultivados quanto para o consórcio microbiano.

Figura 9. Boxplot da salinidade (ppt) com leve presença de outliers, mas manutenção geral dentro da faixa recomendada para o cultivo de *L. vannamei*.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

Na Figura 10 é mostrada a evolução temporal da salinidade durante os 24 dias. Nota-se uma tendência de aumento gradual dos valores, com variações mais expressivas nos dias 20 e 22, quando o parâmetro atingiu picos de 24,5 ppt, seguidos de pequenas quedas. Esse comportamento está associado à evaporação natural da água e à consequente concentração de sais, fenômeno comum em sistemas de cultivo sem renovação significativa de volume (Al-Sayegh *et al.*, 2025). Além disso, a suplementação de insumos sólidos e dissolvidos, como fontes de carbono orgânico e sais alcalinizantes, também contribui para o incremento da salinidade ao longo do tempo (Khanjani *et al.*, 2024). Estudos recentes mostram que variações moderadas, como as observadas neste experimento, não comprometem o desempenho produtivo quando há estabilidade térmica e manutenção adequada do oxigênio dissolvido (Ponce-Palafox *et al.*, 2019). Dessa forma, o padrão observado neste estudo demonstra um sistema em equilíbrio, com aumento gradual da salinidade compatível com a dinâmica de bioflocos maduros, sem indicar estresse osmótico significativo para os camarões.

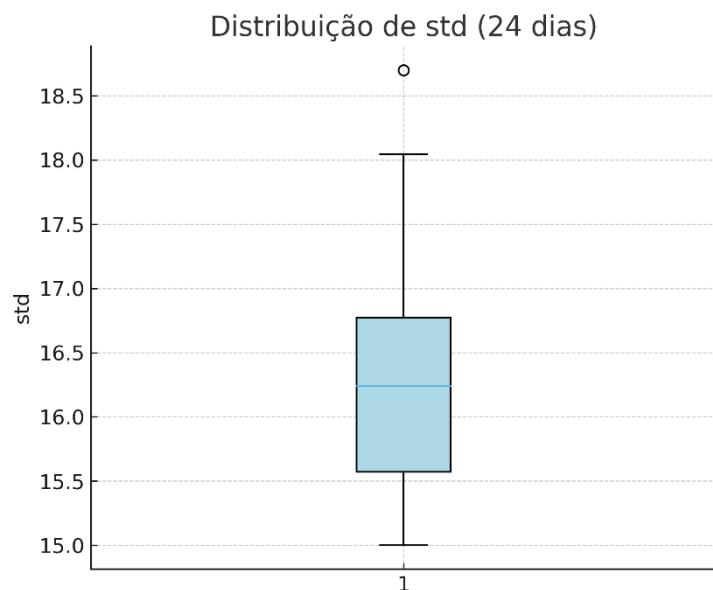
Figura 10 - Variação temporal da salinidade, com aumento progressivo e picos pontuais, indicativos de acúmulo iônico e maturação do sistema.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

Os valores distribuídos de sólidos totais dissolvidos (STD) durante o período de 24 dias de monitoramento são apresentados na Figura 11. Os valores variaram entre 14,5 e 22,1 mg/L, com média de 17,2 mg/L e desvio-padrão de 1,8 (Tabela 1). O boxplot indica uma distribuição homogênea, com predomínio de valores entre 15 e 17 mg/L, e um outlier acima de 18,5 mg/L, indicando leve concentração de sólidos em determinado ponto do cultivo. Essa estabilidade sugere adequada eficiência dos processos biológicos de conversão de matéria orgânica e pouca acumulação de resíduos dissolvidos, o que é característico de sistemas bioflocos bem manejados (Crab *et al.*, 2012). Segundo Xu e Pan (2014), os sólidos dissolvidos são diretamente influenciados pela intensidade da alimentação, pela mineralização de compostos nitrogenados e pela decomposição de partículas finas, podendo servir como um importante indicador da maturação do bioflocos e estão associados a alta eficiência biológica e qualidade de água estável.

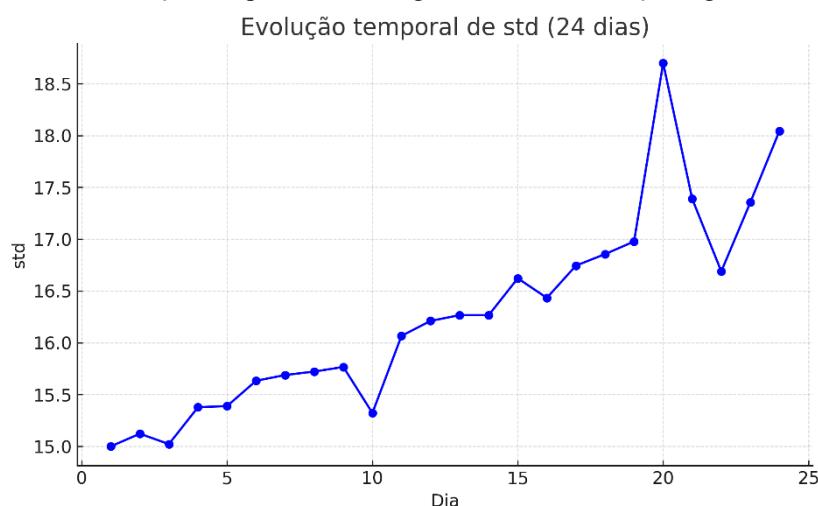
Figura 11. Distribuição dos sólidos totais dissolvidos (mg/L), com média estável e discreto aumento da variabilidade nos estágios finais do cultivo.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

É mostrado na Figura 12, a evolução temporal dos STD ao longo dos 24 dias, evidenciando um aumento gradual a partir do décimo dia, com picos nos dias 21 e 23. Essa tendência ascendente está relacionada à acumulação natural de íons e matéria orgânica dissolvida, decorrente da oxidação de compostos nitrogenados e da liberação de minerais pelo metabolismo microbiano (Khanjani *et al.*, 2025). O incremento progressivo desse parâmetro é esperado em cultivos biofloculados sem renovação de água, sendo reflexo da intensificação da atividade biológica e do crescimento dos flocos microbianos (Emerenciano *et al.*, 2017; Felix, Menaga, 2021). Aumentos abruptos de sólidos dissolvidos podem comprometer o equilíbrio osmótico e a eficiência de troca gasosa dos organismos aquáticos, motivo pelo qual o monitoramento constante é essencial. Assim, o comportamento observado neste estudo demonstra uma evolução controlada dos STD, coerente com o desenvolvimento progressivo do biofoco e sem indícios de sobrecarga orgânica.

Figura 12. Evolução dos sólidos totais dissolvidos (mg/L) ao longo dos 24 dias. A elevação gradual reflete a intensificação dos processos biológicos e da mineralização orgânica.



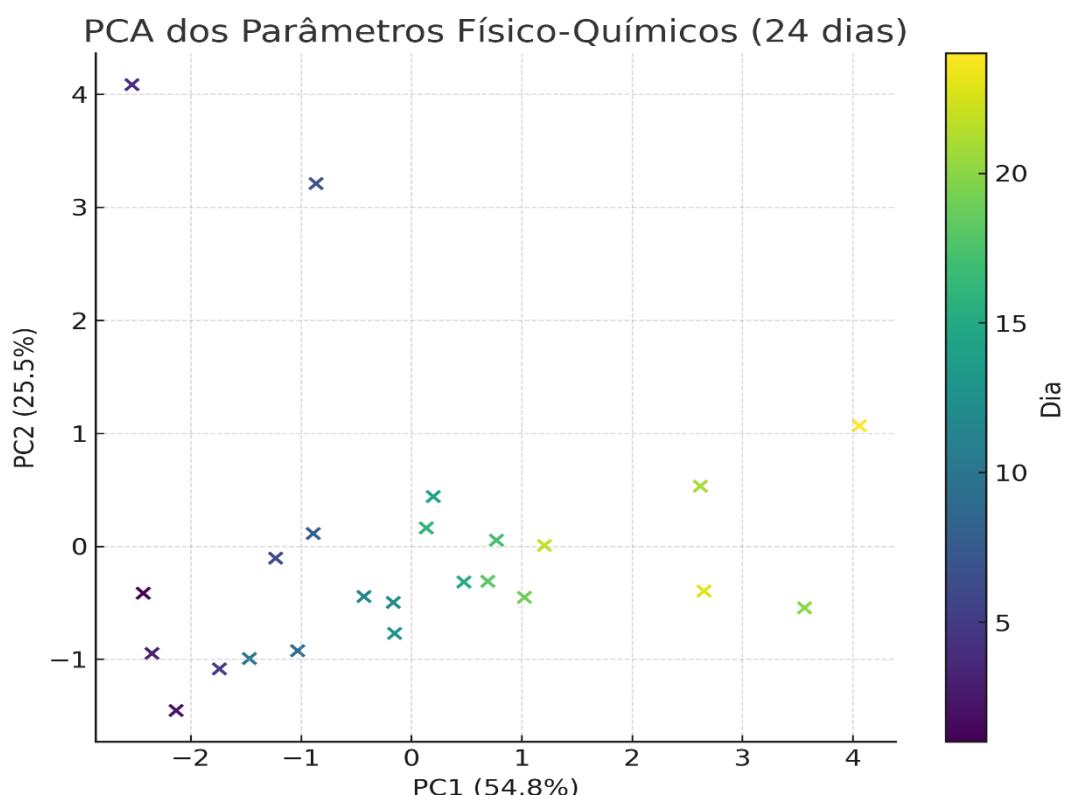
Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

Integração das análises estatísticas com o manejo produtivo

A análise estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos evidenciou uma variação controlada ao longo dos 24 dias de cultivo, com médias e desvios-padrão condizentes com os valores recomendados na literatura para o cultivo intensivo de *Litopenaeus vannamei* em sistema BFT. Os boxplots indicaram distribuições simétricas, com poucos outliers, e a evolução temporal demonstrou tendências coerentes com o acúmulo de matéria orgânica, evaporação da água e intensificação da atividade microbiana.

A Análise de Componentes Principais (PCA) permitiu a redução da dimensionalidade dos dados, sintetizando a variabilidade dos parâmetros físico-químicos monitorados em dois eixos principais que explicaram juntos aproximadamente 80% da variância total, como mostrado na Figura 13.

Figura 13. Análise de Componentes Principais (PCA) dos parâmetros físico-químicos ao longo dos 24 dias de cultivo em sistema BFT. Os dois primeiros componentes explicam 80,3% da variância total, com destaque para a correlação entre salinidade, condutividade e STD nos dias finais. A coloração dos pontos evidencia a transição temporal e a maturação do sistema.



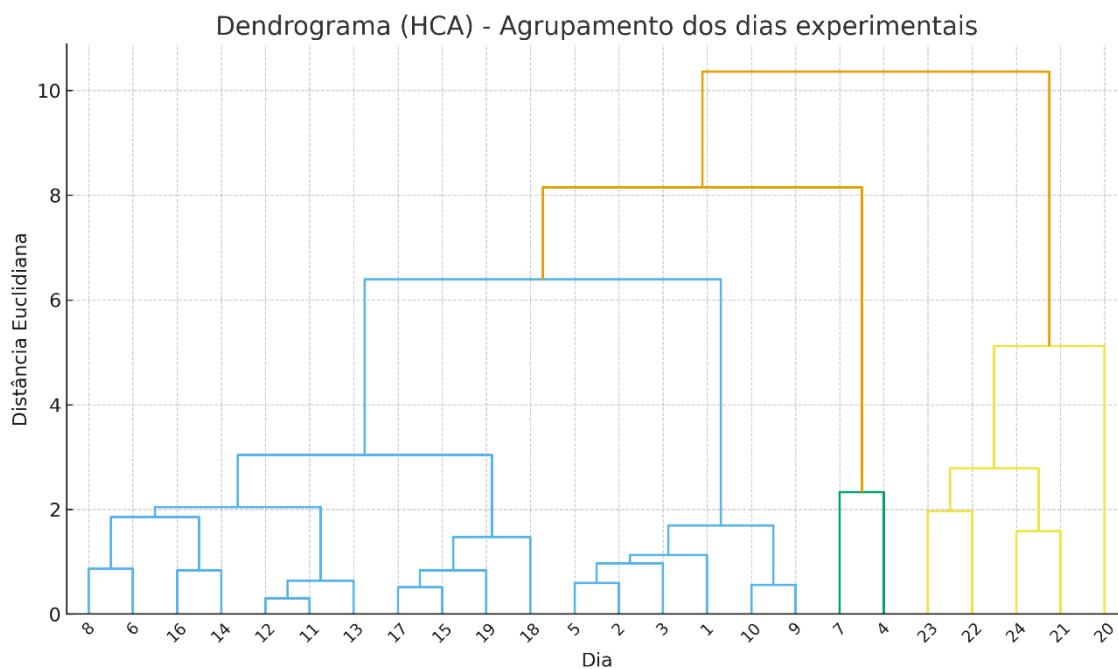
Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

O primeiro componente (PC1), responsável por 54,8% da variância, agrupou fortemente condutividade elétrica, salinidade e sólidos totais dissolvidos, indicando uma correlação positiva entre esses parâmetros ao longo do experimento. Já o segundo componente (PC2), com 25,5%, destacou a influência pontual de valores atípicos nos primeiros e últimos dias, sugerindo transições marcantes no sistema. Essa análise evidencia que o acúmulo gradual de sais e compostos dissolvidos foi o principal fator de diferenciação temporal entre os dias, o que reforça a necessidade de controle rigoroso da salinidade e da condutividade em sistemas BFT sem renovação de água.

A coloração aplicada aos pontos do gráfico da PCA, associando-os aos dias do cultivo, permitiu observar uma distribuição temporal clara, com os dias finais (mais intensamente coloridos) ocupando regiões opostas dos primeiros dias. Isso indica uma trajetória evolutiva do sistema, cuja maturação foi acompanhada de mudanças consistentes nas condições físico-químicas da água. A associação entre esses fatores fornece pistas importantes sobre a dinâmica dos flocos microbianos e sua resposta ao acúmulo de resíduos e íons ao longo do tempo, revelando que ajustes pontuais no manejo podem ser estrategicamente programados a partir da identificação de padrões multivariados como esses.

Na Figura 14 é mostrado o resultado da Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA), que revelou padrões consistentes de similaridade entre os dias de cultivo, gerando um dendrograma com três grupos bem definidos. O primeiro agrupamento reuniu os dias iniciais (1 a 10), caracterizados por menores concentrações iônicas e estabilidade térmica. O segundo grupo agregou os dias intermediários (11 a 19), período marcado por aumento gradual da condutividade e salinidade, sem grandes oscilações de pH ou OD. Já o terceiro agrupamento, formado pelos dias finais (20 a 24), apresentou maior variabilidade, com acúmulo de sólidos dissolvidos e picos de OD, indicando possível saturação do sistema. Essa estrutura de agrupamento reforça a divisão natural do experimento em fases, refletindo a dinâmica ecológica do BFT.

Figura 14. Dendrograma da Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA) dos dias de cultivo com base nos parâmetros físico-químicos. Observam-se três grupos principais, representando fases distintas do sistema: inicial, intermediária e final. A estrutura reforça padrões temporais relevantes para o manejo.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025)

A distância euclidiana entre os ramos do dendrograma evidenciou que os dias finais se afastaram significativamente do início do ciclo, corroborando os achados da PCA. Esse padrão pode ser interpretado como sinal de transição de um sistema jovem, com baixa carga orgânica, para um sistema maduro com floco microbiano estabilizado, mas em processo de acúmulo de resíduos. A análise HCA, portanto, mostra-se útil para delimitar fases críticas de manejo, possibilitando ao produtor antecipar medidas corretivas conforme a aproximação de estágios com maior risco de

instabilidade físico-química. A adoção desse tipo de análise em cultivos comerciais pode facilitar intervenções estratégicas, baseadas em evidências multivariadas de campo.

Do ponto de vista do produtor, os resultados obtidos oferecem subsídios importantes para a tomada de decisões estratégicas. A identificação de parâmetros-chave como salinidade e condutividade, associados ao acúmulo gradual de nutrientes e íons no sistema, indica a necessidade de monitoramento contínuo e de eventuais ajustes na reposição hídrica, especialmente em ambientes de clima quente com alta taxa de evaporação. A estabilidade do pH e do oxigênio dissolvido nas faixas ideais revela que o sistema apresentou capacidade de tamponamento e eficiente oxigenação, fatores cruciais para o bom desempenho zootécnico dos camarões e para a manutenção da comunidade microbiana benéfica. Assim, a análise estatística não apenas contribui para a compreensão da dinâmica dos parâmetros, mas também orienta o produtor na adoção de práticas mais sustentáveis e tecnicamente fundamentadas, reforçando o potencial do sistema BFT como alternativa viável e adaptada à realidade da aquicultura na região Amazônica.

5 CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou que a aplicação do sistema de bioflocos no cultivo de *Litopenaeus vannamei* na Amazônia costeira pode ser viável, desde que haja controle rigoroso dos parâmetros físico-químicos da água. As análises descritivas demonstraram estabilidade térmica, pH tamponado e níveis adequados de oxigênio dissolvido, condições fundamentais para o desenvolvimento dos camarões e da comunidade microbiana. Por outro lado, parâmetros como condutividade, salinidade e sólidos totais dissolvidos apresentaram tendência crescente ao longo do tempo, revelando a necessidade de estratégias específicas para mitigação do acúmulo de sais, especialmente em sistemas fechados sem renovação.

As análises multivariadas (PCA e HCA) complementaram a abordagem estatística ao sintetizar padrões e identificar fases críticas do cultivo. A PCA revelou que a variância do sistema está fortemente associada a variáveis relacionadas à mineralização e maturação do biofoco, enquanto a HCA demonstrou a divisão natural do ciclo produtivo em três grupos distintos, com implicações diretas no manejo. Esses achados reforçam a importância da integração entre estatísticas clássicas e análises multivariadas na tomada de decisão em sistemas aquícolas. Além disso, demonstram como abordagens científicas contextualizadas à realidade amazônica podem contribuir para o fortalecimento da carcinicultura sustentável na região.

REFERÊNCIAS

- ABAKARI, Godwin; LUO, Guozhi; KOMBAT, Emmanuel O. Dynamics of nitrogenous compounds and their control in biofloc technology (BFT) systems: A review. **Aquaculture and Fisheries**, v. 6, n. 5, p. 441-447, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468550X20300630>. Acesso em: 28 de outubro de 2025.
- ABO-TALEB, Mohammed AA; GOBRAN, Safwat; SOLIMAN, Mostafa AM. Dynamics of pH and Its Regulation in The Bio-FLOC Technology (BFT) System: A Review. 2024. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/387099627 Dynamics of pH and Its Regulation in The Bio-FLOC Technology BFT System A Review](https://www.researchgate.net/publication/387099627_Dynamics_of_pH_and_Its_Regulation_in_The_Bio-FLOC_Technology_BFT_System_A_Review). Acesso em: 28 de outubro de 2025.
- AL-SAYEGH, Shaikha Y. et al. Maturation of the biofloc system in *Penaeus vannamei* culture under different salinities and its effects on the microbial communities. **Aquaculture Reports**, v. 40, p. 102568, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352513424006562>. Acesso em: 03 de setembro de 2025.
- AMJAD, Khalid et al. Impact of alkalinity treatments on biofloc dynamics and growth performance in *Penaeus vannamei* shrimp culture. **Aquaculture Reports**, v. 42, p. 102797, 2025.
- AVNIMELECH, Y. Biofloc Technology: A Practical Guide Book. 3. ed. Baton Rouge: The World Aquaculture Society, 2009. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/308052605 Biofloc technology A practical guide book The World Aquaculture Society](https://www.researchgate.net/publication/308052605_Biofloc_technology_A_practical_guide_book_The_World_Aquaculture_Society). Acesso em: 27 de outubro de 2025.
- BOYD, C. E.; TUCKER, C. S. Pond aquaculture water quality management. Springer, 2012.
- CHO, Seo-Hyun et al. The effects of temperature on maintaining the stability of water quality in biofloc-based zero-water exchange culture tanks. **Journal of Life Science**, v. 25, n. 5, p. 496-506, 2015. Disponível em: https://scholar.archive.org/work/eful7mv3izd4vn1mqna3fvhpdq/access/wayback/http://www.kpubs.org/article/articleDownload.kpubs?downType=pdf&articleANo=SMGHBM_2015_v25n5_496. Acesso em: 28 de outubro de 2025.
- CORRÊA, M. S. C.; COSTA, L C. O; CASTRO, J. S. O.; COSTA, S. R. M.; FARIAS, A. K. M. C; PAZ, B. C. C; MORAIS, E. Monitoramento Nictemeral em Bioflocos na Amazônia: Diagnóstico Comparativo da Qualidade da Água entre Períodos de Maior e Menor Precipitação. **ARACÊ**, [S. l.], v. 7, n. 6, p. 33394–33413, 2025. DOI: [10.56238/arev7n6-250](https://doi.org/10.56238/arev7n6-250). Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/6057>. Acesso em: 27 out. 2025.
- CRAB, R. et al. Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. **Aquaculture**, v. 356-357, p. 351-356, 2012. Disponível em: https://www.comm.toronto.edu/~bkf/pessoal/2012_this_first.pdf. Acesso em: 27 de outubro de 2025.
- EBELING, J. M.; TIMMONS, M. B.; BISOGNI, J. J. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. **Aquaculture**, v. 257, p. 346-358, 2006. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004484860600216X>. Acesso em: 25 de setembro de 2025.

EL-SAYED, Abdel-Fattah M. Use of biofloc technology in shrimp aquaculture: a comprehensive review, with emphasis on the last decade. **Reviews in Aquaculture**, v. 13, n. 1, p. 676-705, 2021.

EMERENCIANO, M. G. C.; GAXIOLA, G.; CUZON, G. Biofloc technology (BFT): a review for aquaculture application and animal food industry. **Biomass Now – Cultivation and Utilization**, p. 301-328, 2017.

FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in action. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.

FELIX, S.; MENAGA, M. **Applied aquaculture biofloc technology**. CRC Press, 2021. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781003242611/applied-aquaculture-biofloc-technology-felix-menaga>. Acesso em: 02 de setembro de 2025.

FURTADO, P. S.; POERSCH, L. H. S.; WASIELESKY, W. Effect of calcium hydroxide, carbonate and sodium bicarbonate on water quality and zootechnical performance of *Litopenaeus vannamei* reared in biofloc technology (BFT) systems. **Aquacultural Engineering**, v. 68, p. 39-44, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004484861100682X>. Acesso em 23 de agosto de 2025.

HARGREAVES, J. A. Biofloc production systems for aquaculture. Southern Regional Aquaculture Center, 2013.

KHANJANI, Mohammad Hossein; MOHAMMADI, Alireza; EMERENCIANO, Maurício Gustavo Coelho. Water quality in biofloc technology (BFT): an applied review for an evolving aquaculture. **Aquaculture International**, v. 32, n. 7, p. 9321-9374, 2024.

KHANJANI, Mohammad Hossein et al. Biological Removal of Nitrogenous Waste Compounds in the Biofloc Aquaculture System—A Review. **Annals of Animal Science**, v. 25, n. 1, p. 3-21, 2025.

LIN, Y. C.; CHEN, J. C. Acute toxicity of ammonia on *Litopenaeus vannamei* juveniles at different salinity levels. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 259, p. 109-119, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022098101002271>. Acesso em 27 de setembro de 2025.

PONCE-PALAFIX, Jesus T. et al. Response surface analysis of temperature-salinity interaction effects on water quality, growth and survival of shrimp *Penaeus vannamei* postlarvae raised in biofloc intensive nursery production. **Aquaculture**, v. 503, p. 312-321, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848618322701>. Acesso em 27 de outubro de 2025.

RAZA, Bilal; ZHENG, Zhongming; YANG, Wen. A review on biofloc system technology, history, types, and future economical perceptions in aquaculture. **Animals**, v. 14, n. 10, p. 1489, 2024. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11117240/>. Acesso em: 28 de outubro de 2025.

TACON, A. G. J.; FORSTER, I. P. Aquafeeds and the environment: policy implications. *Aquaculture*, v. 226, p. 181-189, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848603004769>. Acesso em: 23 de setembro de 2025.

TONG, Ruixue et al. Effects of feeding level and C/N ratio on water quality, growth performance, immune and antioxidant status of *Litopenaeus vannamei* in zero-water exchange bioflocs-based outdoor soil culture ponds. **Fish & Shellfish Immunology**, v. 101, p. 126-134, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1050464820302199>. Acesso em 12 de outubro de 2025.

XU, W. J.; PAN, L. Q. Effects of bioflocs on growth performance, digestive enzyme activity and body composition of juvenile *Litopenaeus vannamei* in zero-water exchange tanks manipulating C/N ratio in feed. *Aquaculture*, v. 426-427, p. 181-188, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848612003122>. Acesso em 21 de agosto de 2025.

ZHANG, Kaiquan et al. Effect of using sodium bicarbonate to adjust the pH to different levels on water quality, the growth and the immune response of shrimp *Litopenaeus vannamei* reared in zero-water exchange biofloc-based culture tanks. **Aquaculture Research**, v. 48, n. 3, p. 1194-1208, 2017.