

EFEITOS DA LIOFILIZAÇÃO NA ESTRUTURA DE FILÉS DE TILÁPIA-DO-NILO *OREOCHROMIS NILOTICUS*

 <https://doi.org/10.56238/arev7n1-018>

Data de submissão: 02/12/2024

Data de publicação: 02/01/2025

Pauliana Leão de Souza

Mestrado em Recursos Pesqueiros e Engenharia
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1985-7322>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/6911195798439428>
E-mail: paulianaleao@gmail.com

Leonardo Balcewicz Junior

Doutoramento em Extensão Inovadora e Desenvolvimento Rural Sustentável
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0418-7701>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/3496552546615582>
E-mail: lbjr1266@hotmail.com

Daniel da Silva Ladislau

Doutoramento em Recursos Pesqueiros e Engenharia
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0467-6353>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/8098824072487689>
E-mail: danielladislau@gmail.com

Adriano Teixeira de Oliveira

Doutoramento em Diversidade Biológica
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4988-9878>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/9164471794674935>
E-mail: adriano.oliveira@ifam.edu.br

Eduardo Luis Cupertino Ballester

Doutoramento em Oceanografia Biológica
Universidade Federal do Paraná
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5199-1754>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/7710902249475122>
E-mail: elcballester@ufpr.br

Altevir Signor

Doutoramento em Ciência Animal
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4659-6466>
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/4844380942902865>
E-mail: altevir.signor@gmail.com

RESUMO

Este estudo tem como objetivo investigar os efeitos da liofilização na estrutura de peixes *Oreochromis niloticus* tilápia liofilizados em diferentes tempos de processamento. Foram analisados a atividade de água (A_w), textura, núcleo e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados demonstram alterações na teoria da massa e estrutura de duas fibras ao longo de um longo período de tempo, com a formação de fissuras e descolamento de fibras musculares. Os efeitos do processo são maiores do que os arquivamos com menos teoria da massa (2,5 kg) liofilizados por 36 horas. O uso da liofilização para desidratação de peixes tilápia tem se mostrado eficaz, proporcionando a remoção da teoria da água de dois tecidos. Enquanto isso, seu uso causa alterações nas propriedades físico-químicas e estruturais do alimento. Por esse motivo, até mesmo a análise sensorial é necessária, visando entender melhor os efeitos do processo sobre as demais características e oleosidade do produto, como o sabor do filé.

Palavras-chave: Secagem. Desidratação. Peixe.

1 INTRODUÇÃO

A aquicultura e a pesca têm garantido segurança alimentar e nutricional para as populações de diversos países, especialmente aquelas com economias em desenvolvimento como o Brasil (Andrade et al., 2024; Oliveira et al., 2023; Rodrigues et al., 2024). Somente em 2022, a produção aquícola global atingiu um recorde de 185 milhões de toneladas, das quais 51% (94 milhões de toneladas) vieram da aquicultura. Esse crescimento foi impulsionado pelo aumento do consumo global de alimentos aquáticos (20,7 kg per capita em 2022) (FAO, 2024).

Em 2023, o Brasil atingiu a marca histórica de 655,3 toneladas na produção de peixes de viveiro, resultando em um valor de produção de 6,7 bilhões de reais, sendo a tilápia *Oreochromis niloticus* a principal espécie cultivada no país e o estado do Paraná o maior produtor da espécie em território nacional (PPM, 2023). A escolha da tilápia pelos produtores brasileiros está relacionada à sua rusticidade, genética, fácil reprodução e potencial de mercado, além de carne branca e sabor suave (Pedroza Filho et al., 2020; Góes-Favon et al., 2021). No mercado nacional, a tilápia é vendida principalmente como filés frescos ou congelados (Silva et al., 2022).

Atualmente, diferentes técnicas são utilizadas para conservar alimentos de origem aquática, desde métodos mais tradicionais, como a secagem (natural, por salga ou com ar quente), até aqueles com tecnologia de alto desempenho (micro-ondas, bomba de calor, secagem combinada e liofilização a vácuo) (Zeng et al., 2024). A liofilização é um processo de desidratação baseado na sublimação do gelo para remover líquidos de alimentos ou produtos (Harguindeguy e Fissore, 2020). O uso desse método vem crescendo dentro da indústria alimentícia, pois gera produtos de alta qualidade e com baixa perda de características alimentares, como sabor e aroma, sendo utilizado em diferentes tipos de alimentos (Zeng et al., 2024; Oyinloye e Yoon, 2020). Assim, está se tornando uma nova ferramenta tecnológica que as empresas utilizam na alimentação. Proporciona valor agregado ao produto, aumento da produção e redução de custos com equipamentos, energia, resíduos, transporte e armazenamento (Pisano et al., 2014).

Embora a liofilização cause pouca perda de características dos alimentos, dependendo das condições do processo, podem ocorrer interferências principalmente nas propriedades estruturais, como desnaturação e oxidação de proteínas, alterações na densidade, porosidade e retração, além de alterações na cor e textura dos alimentos (Nowak e Jakubczyk, 2020; Lee et al., 2024). Nesse caso, parâmetros de monitoramento como atividade de água (A_w), cor, textura e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) são essenciais para determinar a qualidade dos alimentos. A atividade de água (A_w) ajuda a prevenir e limitar o crescimento microbiano nos alimentos, sendo um parâmetro necessário para inibir o crescimento microbiano e, assim, garantir a estabilidade da prateleira dos alimentos com

base em seu teor de umidade (Barbosa-Cánovas et al., 2007; Santos et al., 2012; Lemos et al., 2015; Magro et al., 2016). A aparência (cor) e a textura estão entre os principais fatores da qualidade dos alimentos, influenciando a preferência do consumidor, e são avaliadas em diferentes operações de processamento de alimentos (Rustagi, 2020). A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) tem sido muito importante na indústria alimentícia, pois possibilita observar os danos causados à estrutura dos alimentos (Dalvi-Isfahana et al., 2019).

No Brasil, apenas alguns estudos ainda envolvem a liofilização de alimentos aquáticos. Alguns estudos buscam avaliar a composição físico-química de farinhas liofilizadas à base de resíduos de espécies nativas, como o pirarucu *Arapaima gigas*, visando agregar valor a novos produtos (Barbosa et al., 2021). Outros desenvolveram sopas de carne de rã liofilizadas destinadas principalmente a consumidores em dietas hipoalergênicas (Andrade et al., 2022). No entanto, as pesquisas sobre o processo de liofilização e seus efeitos na carne de peixe ainda estão em sua infância (Paula da Costa et al., 2023; Souza et al., 2024). Portanto, o objetivo do presente estudo foi investigar os efeitos do processo de liofilização na estrutura de filés de tilápia da indústria pesqueira.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CONGELAMENTO E LIOFILIZAÇÃO DE FILÉS DE TILÁPIA

Para o experimento, foram utilizados 50 kg de filés frescos de tilápia, que foram inicialmente congelados a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas em freezer (Dynamic 1.030 L). Um protótipo de liofilizador vertical (BR 10 2020 010874 3) foi usado para liofilizar os filés.

Após o congelamento, as amostras foram dispostas aleatoriamente nas prateleiras do liofilizador em tamanhos não padronizados até atingir o peso desejado. Foram estabelecidos quatro tempos e três processos com pesos diferentes para cada tempo para desidratação (Tabela 1).

Tabela 1: Tempo de liofilização para filés de tilápia do Nilo *Oreochromis niloticus* e os três processos com diferentes massas iniciais.

Tempo (horas)	Massa (kg)		
18	2,500	3,500	4,500
24	2,500	3,500	4,500
30	2,500	3,500	4,500
36	2,500	3,500	4,500

2.2 ATIVIDADE NA ÁGUA (A_w)

As análises de A_w foram realizadas usando um medidor de água para alimentos Aqualab 4 TE. Inicialmente, as amostras foram colocadas em recipientes de polietileno para posterior leitura no aparelho. O tempo de leitura variou entre 10 e 20 minutos, e a temperatura foi mantida em $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.3 TEXTURA

A textura dos filés foi determinada de acordo com a força de cisalhamento exercida para cortar a amostra usando um texturômetro TA HD Plus equipado com uma lâmina de corte triangular WarnerBratzler, com 3,0 mm de espessura e 70 mm de largura. As amostras foram cortadas em cubos de 2 cm³, sempre no sentido transversal das fibras musculares.

2.4 COR

Para determinar os padrões de cores, foram seguidas as diretrizes descritas pelo modelo CIEL*a*B* recomendado para testes colorimétricos de alimentos. Os resultados foram expressos em termos de luminosidade - L* (preto-branco), matiz - a* (vermelho-verde) e cromaticidade - b* (amarelo-azul) (1). As análises foram realizadas utilizando-se um colorímetro Konica Minolta Chroma Meter modelo CR400.

2.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

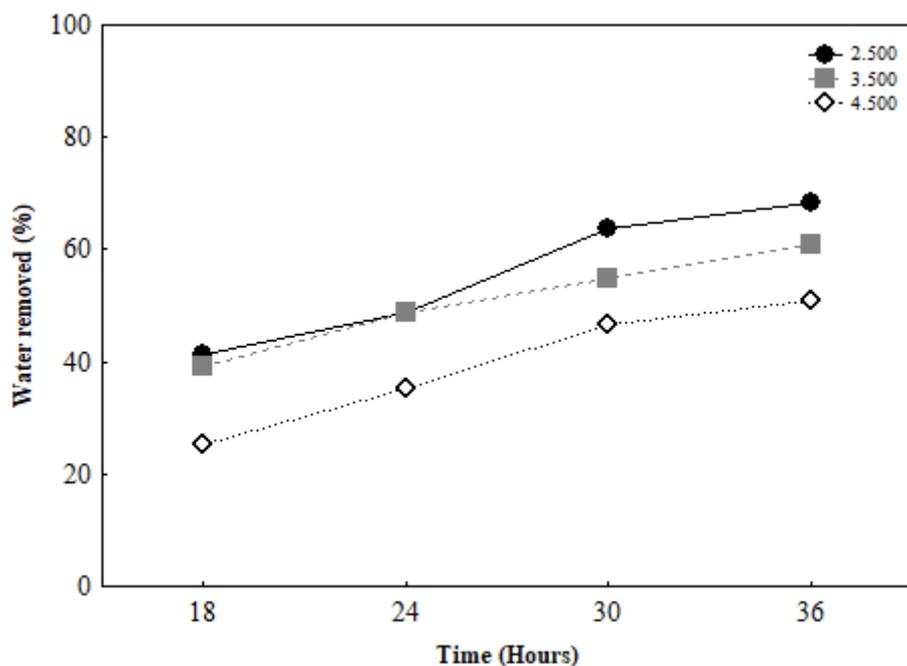
As observações das microestruturas dos filetes foram obtidas por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca TESCAN, modelo VEGA 3 com resolução de 3nm e capacidade de ampliação de até 300kX. Inicialmente, as amostras foram coletadas da região dorsal dos filés após liofilização em cubos de 2 cm e fixadas em FAA (formaldeído 50 ml (37%), ácido acético 50 ml e álcool etílico 900 ml (63%) por 24h. Após o período de 24 horas, as amostras foram transferidas para frascos com álcool 70%. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao ponto crítico da LEICA EM CPD300, onde o material foi desidratado em banho de dióxido de carbono (CO₂) e fixado em tocos, com o auxílio de fita de carbono dupla face e revestido com uma camada de 5nm de metalizador dourado Denton Vacuum Desk V Standard.

3 RESULTADOS

3.1 LIOFILIZAÇÃO, ATIVIDADE (AW), TEXTURA E COR DOS FILETES

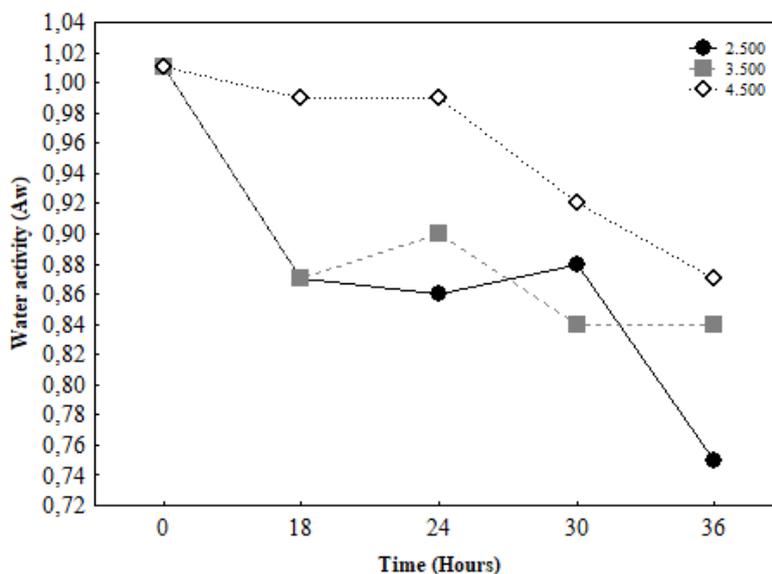
As porcentagens de perda de água aumentaram exponencialmente durante os tempos de processo para todos os pesos. No entanto, os filés com peso de 2.500 kg liofilizados por 30 e 36 horas foram os que apresentaram os maiores percentuais de perda de água durante o processo de liofilização (63,6 e 68,3%, respectivamente) (Figura 1). Enquanto isso, filés com pesos maiores (4.500 kg) submetidos ao mesmo tempo de processamento obtiveram menores percentuais de perda de água (Figura 1). Entre os diferentes pesos, os menores percentuais de perda de água registrados foram para filés de 4.500 kg com 18 e 24 horas de liofilização (25,3 e 35,4%, respectivamente) (Figura 1).

Figura 1. O teor de água do filé (H₂O) muda durante a liofilização em diferentes momentos para a tilápia do Nilo *Oreochromis niloticus*.



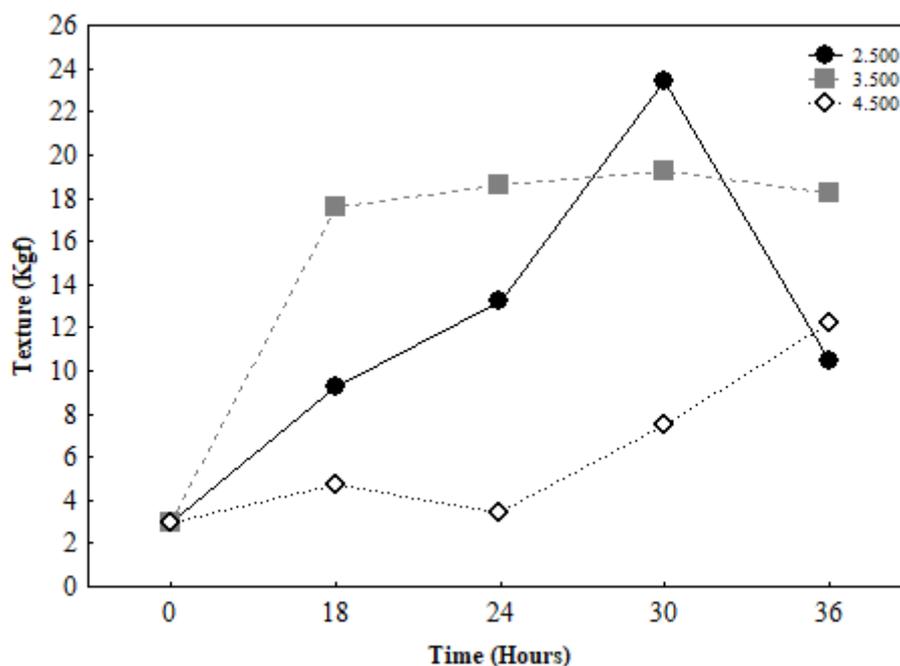
Os índices de atividade de água (A_w) dos filés reduziram ao longo do processo (Figura 2). De modo geral, os filés pesando 4.500 kg apresentaram os maiores índices de atividade de água (A_w) nos diferentes tempos de processo, principalmente às 18 e 24 horas do processo (0,99 cada) (Figura 2). O menor valor de atividade de água observado foi para filés de 2.500 kg liofilizados por 36 horas (0,75) (Figura 2).

Figura 2. Atividade de água (A_w) de filés durante liofilização em diferentes momentos para a tilápia do Nilo *Oreochromis niloticus*.



A textura foi inferior a 13 kgf para filés com peso de 4.500 kg nos diferentes tempos de processamento (Figura 3). Por outro lado, esses valores variaram entre 17,6 (18 horas) e 18,2 kgf (36 horas) em filés com peso de 3.500 kg (Figura 3). O maior valor desse parâmetro foi registrado para filés com peso de 2.500 kg processados por 30 horas (23,4 kgf) (Figura 3).

Figura 3. Textura dos filés durante a liofilização em diferentes momentos para a tilápia do Nilo *Oreochromis niloticus*.



As medições de cor demonstraram que os índices de luminosidade (L^*) aumentaram gradualmente durante a liofilização de filés com diferentes pesos, consistentemente acima do centro da balança (50) em diferentes tempos de processo. No entanto, os maiores índices (L^*) foram observados em filés liofilizados por 36 horas, principalmente em filés de peso de 3.500 kg, indicando uma coloração cinza claro. Um padrão é semelhante ao observado em filés com peso de 2.500 kg após 30 horas e filés com peso de 3.500 kg após 18 horas (Tabela 2). Em relação à tonalidade (a^*), foram observados valores positivos nos filés de 3.500 kg às 24 horas e 2.500 kg às 18 horas. Não foram encontrados valores negativos de b^* na coordenada cromática para filetes de ambos os tamanhos (Tabela 2).

Tabela 2: Cor dos filés de tilápia do Nilo *Oreochromis niloticus* liofilizados em momentos diferentes. A) Filetes de 2.500 kg, B) Filetes de 3.500 kg e C) Filetes de 4.500 kg. L^* = luminosidade (preto para branco), a^* = matiz: vermelho ($+a^*$) para verde ($-a^*$) e b^* = cromaticidade: amarelo ($+b$) para azul ($-b$).

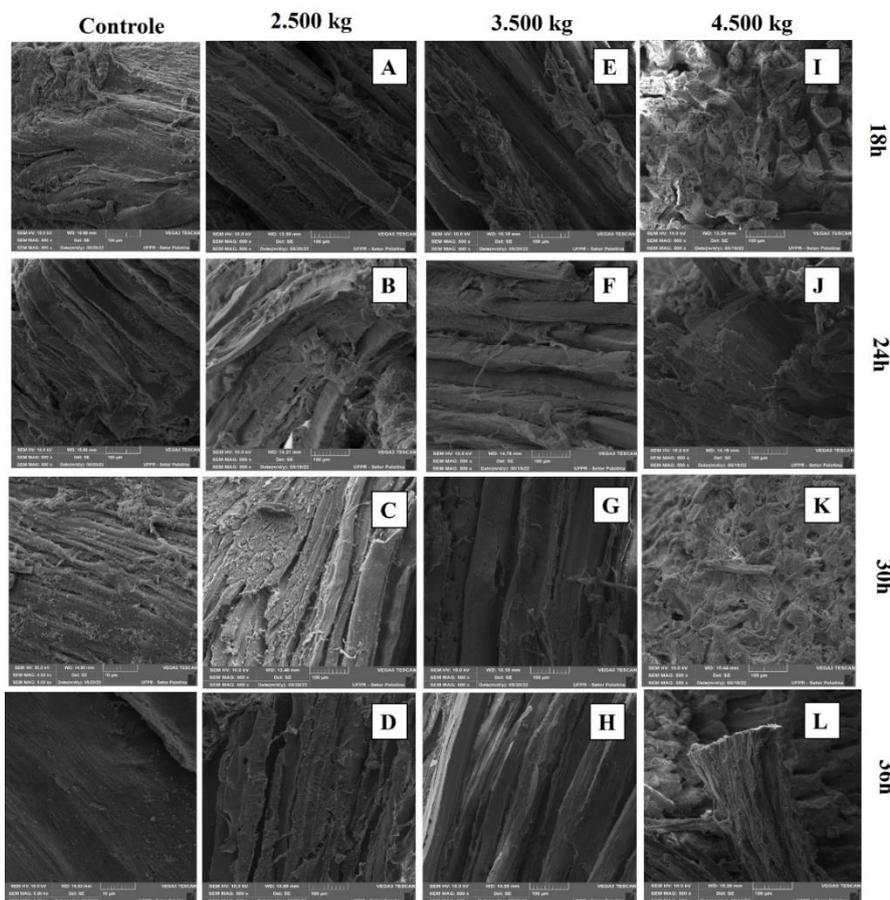
Cor dos filés de tilápia liofilizados

Tempo de liofilização (horas)													
		18h			24h			30h			36h		
Massa (kg)													
	ontrole	.500	.500	.500	.500	.500	.500	.500	.500	.500	.500	.500	.500
*	1.23	2.92	2.78	6.45	0.51	1.20	8.15	5.85	4.12	2.93	2.70	6.63	4.11
	2,80	9.11	6,92	11.05	8.40	4,75	4.86	3,43	6.36	4,03	4.28	4,52	7,75
m*	0.01	1.71	1.04	.04	1.85	.98	1.07	2.61	1.41	0.86	0.98	1.86	0.45
	1.21	1.06	0.89	4,45	0.45	2,39	0.97	0.47	1.20	1,80	1,92	0.84	1,80
*	.04	3.53	6.96	7.36	4.54	8.19	5.35	3.12	7.04	5.82	6.23	6.91	8.00
	1,01	3.07	2.00	2,79	1,86	1,44	1.40	1.30	1,46	1,38	1,68	1.21	1,98
*	.13	3.68	7.02	7.79	4.66	8.33	5.42	3.39	7.16	5.92	6.35	7.03	8.08
	0.88	3.05	1,92	3,22	1,86	1,60	1,39	1.21	1,43	1.42	1,64	1.17	1,97
*	0.75	7.66	3.84	8.39	7.30	7.38	4.19	01.43	4.93	3.38	3.89	6.38	1.66
	10.02	4,55	3,79	13,07	1,92	7,06	3,69	2,78	4.26	6.09	6,86	2,99	5,78

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Por meio de microscopia eletrônica de varredura, foram observadas algumas alterações na microestrutura muscular dos filés após o processo de liofilização (Figura 4). Nos processos que envolvem filés de 4.500 kg por 18 horas, as fibras musculares são completas e circundadas pelo perimísio, com poros entre as miofibrilas que permanecem circundados pelo endomísio (Figura 4I). Esses aspectos foram diferentes daqueles observados com filés de 2.500 e 3.500 kg liofilizados pelo mesmo tempo, que não apresentaram diferenças na microestrutura, e as fibras foram destacadas e emaranhadas com o perimísio, apresentando fissuras entre elas (Figura 4A e E). Por outro lado, as trincas foram menores nos filés de 4.500 kg processados por 24 horas, onde as fibras musculares foram mais densas do que as observadas nos filés da mesma massa processados por menor tempo (18 horas) (Figuras 4J e I). Características microestruturais semelhantes podem ser consideradas para os demais filés processados por 24 horas (2.500 e 3.500 kg), onde foram observadas fibras musculares completas, mas com a quebra do perimísio (Figuras 4B e F).

Figura 4. Microfotografia de filés de tilápia-do-nylo *Oreochromis niloticus* liofilizados em diferentes momentos: 18h (A: 2.500 kg; E: 3.500 kg; I: 4.500 kg); 24h (B: 2.500 kg F: 3.500 kg J: 4.500 kg); 30h (C: 2.500 kg; G: 3.500 kg; K: 4.500 kg); 36h (D: 2.500 kg; H: 3.500 kg; L: 4.500 kg) (ampliação: 500x).



Em filés de 4.500 kg liofilizados por 30 horas, observou-se a presença de vazios na microestrutura tecidual, bem como uma aparência comprimida e emaranhada, possivelmente devido à formação de cristais de gelo durante as etapas de desidratação (Figura 4K). Ao mesmo tempo, as fibras musculares nos filés de 2.500 e 3.500 kg também foram observadas deformadas, rompidas ou descoladas devido à desidratação (Figura 4C e G). Quando os filés de 4.500 kg foram submetidos a tempos de liofilização mais longos (36 h), as fibras musculares pareciam comprimidas e deformadas com o descascamento do perimísio (Figura 4L). O mesmo ocorreu com os filés de 2.500 e 3.500 kg (36 h), onde foram observadas fissuras e rupturas entre as fibras musculares comprimidas (Figura 4D e H).

4 DISCUSSÃO

Todos os filés apresentaram um aumento gradual na perda de água ao longo do processo. No entanto, os percentuais de desidratação foram maiores em filés com massas menores (2.500 kg) liofilizados por 30 e 36 horas. Diferentes fatores podem influenciar nos resultados da liofilização dos

alimentos, como temperatura de aquecimento, uso de pré-tratamentos, capacidade de carga dos equipamentos, grau de vácuo e congelamento, que podem interferir na qualidade do produto, seja na aparência, teor de umidade ou composição nutricional (Nowak e Jakubczyk, 2020).

O presente estudo mostra prováveis diferenças entre as taxas de desidratação do filé, que podem ter sido influenciadas pelas taxas de transferência de calor entre diferentes massas de filé. A espessura da amostra e a estrutura celular do material podem interferir nas taxas de sublimação, restringindo o coeficiente de transferência de massa e diminuindo as taxas de desidratação (Oyinloye e Yoon, 2020).

O tempo de processamento também é um fator que pode contribuir para alterações na qualidade do produto liofilizado. Por exemplo, Paula da Costa *et al.* (2023) observaram que o tempo de liofilização influenciou significativamente a qualidade (Aw, umidade e rendimento) da carne de raia *de Gymnura altavela*. Requer um tempo de secagem de 24 horas para atingir um teor de umidade de 3,7%, considerado ideal para inibir a proliferação de microrganismos.

Conhecer a atividade da água (Aw) é essencial para a preservação do peixe seco e de outros alimentos, pois regula a carga microbiana dos produtos (Nguyen et al., 2014; Tapia et al., 2020; Fitri et al., 2022). Alimentos com alto teor de água, como peixes, com valores de atividade de água (Aw) superiores a 0,90 tornam-se propensos à contaminação microbiológica (Abbas et al. 2009). Portanto, para peixes secos, espera-se que os valores de atividade de água (Aw) estejam entre 0,60 e 0,85 (Fitri et al., 2022). No presente estudo, apenas filés menores (2.500 kg) processados por 36 horas atingiram valores de Aw dentro da faixa recomendada para peixes secos (0,75). Embora haja pouca mudança no número de bactérias durante a liofilização devido à baixa temperatura de secagem, alguns esporos de patógenos podem sobreviver às etapas do processo se estiverem presentes na matéria-prima ou adquiridos por contaminação durante o processamento (Citrakar et al., 2019).

A textura, assim como a cor, está entre as propriedades físicas mais importantes dos alimentos, influenciando diretamente a preferência do consumidor (Baingana, 2024; Kamei et al., 2024). Durante o processo de secagem dos alimentos, ocorrem mudanças texturais significativas devido à redução do teor de água e umidade, resultando em contração muscular e aumento da rigidez e porosidade (Nowak e Jakubczyk, 2020; Agregán et al., 2024). Esses achados são consistentes com os resultados do nosso estudo, onde os filés que apresentaram maiores percentuais de perda de água também foram os que obtiveram maior dureza. Testes com diferentes métodos de secagem na corvina amarela *Larimichthys polyactis* também demonstraram propriedades texturais mais rígidas usando o método de liofilização do que os outros (Kim et al., 2020). Além do teor de água, a concentração de lipídios e proteínas no músculo, os métodos e parâmetros de secagem utilizados, o tipo de matéria-prima, a composição da

gordura, o pH, a genética e o potencial proteolítico são fatores que também podem contribuir para a ocorrência de alterações na textura dos alimentos desidratados (Nguyen et al., 2014).

Os resultados da textura demonstraram que o tecido do filé endureceu durante o processo de liofilização. Isso é semelhante ao descrito por Nie *et al.* (2022), que notaram um aumento na dureza e espessura das peles de tilápia liofilizadas a vácuo (60 e 150 minutos). Segundo os pesquisadores, esses efeitos foram atribuídos ao tempo de processamento, que afetou diretamente as propriedades da pele ao remover a água (ligada, retida e livre) durante a secagem. Em produtos liofilizados, a porosidade é um elemento essencial para prever a qualidade, uma vez que a distribuição e o tamanho dos poros influenciam especialmente a crocância (Nowak e Jakubczyk, 2020). Portanto, diferentes métodos surgiram para avaliar as mudanças texturais em filés de peixe afetados pela liofilização a vácuo. Por exemplo, os pesquisadores Ma *et al.* (2017) usaram modelos de imagem hiperespectrais (400 nm a 1000 nm) para prever simultaneamente mudanças texturais em *filés de carpa capim Ctenopharyngodon idella* submetidos a liofilização a vácuo, incluindo características como dureza, mastigabilidade e gomosidade.

A aparência dos filés mudou durante o processo, principalmente com o aumento da L* (luminosidade) e com o escurecimento das amostras. A descoloração do músculo do peixe pode ser afetada por diferentes fatores: secagem, armazenamento post-mortem, alterações microbianas e bioquímicas, salga e salmoura, embalagem em atmosfera modificada usando CO₂ e processamento térmico (Singh et al., 2022). Em comparação com outros métodos de desidratação, a liofilização provou ser eficiente na preservação das qualidades físicas e químicas dos alimentos aquáticos, especialmente sua cor. Um exemplo disso pode ser observado entre a liofilização e a secagem com ar quente no processamento do *camarão Penaeus vannamei*, onde se notou que o uso do primeiro método proporciona melhores condições para o controle das taxas de oxidação lipídica e preservação da cor do produto (Li et al., 2020). No estudo de Zhu *et al.* (2022), os autores empregaram diferentes métodos de secagem em filés de baiacu *Takifugu obscurus* e notaram uma baixa mudança de cor nos filés liofilizados a vácuo quando comparados aos outros métodos; além disso, o respectivo tratamento foi o único em que a oxidação de ácidos graxos e a reação de Maillard durante o processo estiveram ausentes, eventos atribuídos às baixas temperaturas que geralmente são empregadas neste tipo de secagem.

Observou-se a formação de espaços vazios nos músculos dos filés liofilizados, bem como a deformação das fibras musculares. De acordo com Lee *et al.* (2024), durante a liofilização de carnes e produtos aquáticos, pode ocorrer desnaturação e oxidação de proteínas, alterando assim os atributos sensoriais e nutricionais do alimento e afetando a qualidade do produto. Por esse motivo, os autores

recomendam um melhor planejamento na escolha do tipo de amostra e nas condições operacionais do processo de liofilização, visando a obtenção de produtos de alta qualidade. Além disso, outros fatores relevantes na secagem de carnes e peixes são as fibrilas (fibras finas do tecido conjuntivo) e o sarcolema (fina camada de tecido conjuntivo enrolada na fibra muscular), essenciais para a difusão da água durante o processo (Harguindeguy e Fissore, 2020).

Diferentemente de nossos achados, Paula da Costa *et al.* (2023) não notaram diferenças na estrutura da carne de raia *G. altavela* liofilizada (16-24 horas). Nesse caso, tais diferenças podem estar associadas ao tipo de matéria-prima e ao tempo de processamento utilizado no experimento, sendo este último menor do que o utilizado no presente estudo. Na liofilização de alimentos, o controle da taxa de congelamento também é essencial, pois a forma e a posição dos cristais de gelo afetam diretamente as propriedades e estruturas (Nowak e Jakubczyk, 2020; Tan *et al.*, 2021). Além das características morfológicas dos produtos, na liofilização, a forma e o tamanho do gelo também podem interferir nas taxas de sublimação (Petzold e Aguilera, 2009). Entre as principais alterações físicas causadas pelo congelamento na microestrutura dos tecidos alimentares estão a recristalização (ou maturação), a crioconcentração, a criodeformação e a queima de congelador (Dalvi-Isfahana *et al.*, 2019).

Na literatura, alguns estudos também demonstram os efeitos dos métodos de desidratação nas características estruturais dos filés de peixe, incluindo a liofilização. Por exemplo, na pesquisa conduzida por Luo *et al.* (2021), os pesquisadores observaram que a concentração de água livre nos músculos dos filés de tilápia aumentou com a ruptura das membranas celulares durante os diferentes estágios de secagem. Enquanto isso, Zhu *et al.* (2022) relataram que o uso da liofilização a vácuo preservou a miofibrila e manteve menor encolhimento em filés semi-secos de *baiacu de T. obscurus* em comparação com outros métodos de secagem.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que a liofilização é um método eficaz para desidratar filés de tilápia. No entanto, seu uso resultou em alterações nas características estruturais dos músculos do filete, como evidenciado pelas análises realizadas no estudo. Tais chances podem influenciar diretamente na qualidade final do produto, como aparência, textura ou sabor. Portanto, para melhor elucidar os efeitos do processo nas características dos filés de tilápia, seria importante incluir análises sensoriais em estudos futuros para observar se o processo também causa alterações no sabor do alimento.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código Financeiro 001. Os autores agradecem à CAPES pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro autor, à indústria pesqueira de Toledo pela doação das amostras, em especial à indústria Zero Grau por concordar em utilizar as instalações para a realização dos testes, bem como à Universidade Tecnológica Federal do Paraná -UTFPR, campus Medianeira, pelo auxílio na análise do experimento.

REFERÊNCIAS

- Andrade, J. C., Oliveira, A. T., Amazonas, M. G. F. M., et al. (2024). Fingerprinting based on spectral reflectance and chemometrics - An analytical approach aimed at combating the illegal trade of stingray meat in the Amazon. *Food Chemistry*, 436, 137637. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137637>
- Andrade, M. L. A., Filho, J. T. S., Rodrigues, E., et al. (2022). Development of freeze-dried products with frog meat for special diets: microbiological and sensory traits. *Revista Ciência Agronômica*, 53, e20207474. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220013>
- Abbas, K. A., Saleh, A. M., Mohamed, A., et al. (2009). The relationship between water activity and fish spoilage during cold storage: A review. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 7, 86–90.
- Agregán, R., Echegaray, N., Munekata, P. E. S., et al. (2024). Freeze-Drying of Meat and Seafood Products. In Waghmare, R. B., Kumar, M., & Panesar, P. S. (Eds.), *Freeze Drying of Food Products: Fundamentals, Processes and Applications* (pp. 105–120). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119982098.ch4>
- Barbosa-Cánovas, G. V., Fontana Jr., A. J., Schmidt, S. J., et al. (2007). *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*. Blackwell Publishing Asia. <https://doi.org/10.1002/9780470376454>
- Barbosa, M. C., Guida, L. M., Feitosa, A. C., et al. (2021). Avaliação da composição físico-química do concentrado proteico e farinhas liofilizadas obtidas a partir de resíduos do pirarucu (*Arapaima gigas*). *Scientia Plena*, 17, 081504. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2021.081504>
- Baingana, M. (2024). Food Texture Perception and Its Influence on Consumer Preferences. *International Journal of Food Science*, 5, 43–55. <https://doi.org/10.47941/jfs.1847>
- Citrakar, B., Zhang, M., & Adhikari, B. (2019). Dehydrated foods: Are they microbiologically safe? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59, 2734–2745. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1466265>
- Dalvi-Isfahana, M., Jha, P. K., Tavakoli, J., et al. (2019). Review on identification, underlying mechanisms and evaluation of freezing damage. *Journal of Food Engineering*, 255, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.011>
- FAO. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 - Blue Transformation in Action*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Fitri, N., Chan, S. X. Y., Lah, N. H. C., et al. (2022). A Comprehensive Review on the Processing of Dried Fish and the Associated Chemical and Nutritional Changes. *Foods*, 11, 29388. <https://doi.org/10.3390/foods11192938>
- Góes-Favon, S. P., Maricá, E. G. S., Shigematsu, E., et al. (2021). Transglutaminase microbiana (MTGase) na elaboração de fishburguer com aproveitamento de carne mecanicamente separada de tilápia (*Oreochromis niloticus*) – Revisão de literatura. *Brazilian Journal of Food Technology*, 4, 20–35. <https://doi.org/10.38152/bjtv4n1-002>

Harguindeguy, M., & Fissore, D. (2020). On the effects of freeze-drying processes on the nutritional properties of foodstuff: A review. *Drying Technology*, 38, 846–868. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1599905>

Kamei, M., Nishibe, M., Araki, R., et al. (2024). Effect of texture preference on food texture perception: Exploring the role of matching food texture and preference. *Appetite*, 192, 107078. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2023.107078>

Kim, B. S., Oh, B. J., Lee, J. H., et al. (2020). Effects of Various Drying Methods on Physicochemical Characteristics and Textural Features of Yellow Croaker (*Larimichthys Polyactis*). *Foods*, 15, 196. <https://doi.org/10.3390/foods9020196>

Li, D. Y., Zhou, D. Y., Yin, F. W., et al. (2020). Impact of different drying processes on the lipid deterioration and color characteristics of *Penaeus vannamei*. *Journal of the Science Food and Agriculture*, 100, 2544–2553. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10280>

Liu, Y., Zhang, Z. Y., & Hu, L. (2022). High efficient freeze-drying technology in food industry. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 62, 1–20. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1865261>

Lee, S., Han, S., Jo, K., et al. (2024). The impacts of freeze-drying-induced stresses on the quality of meat and aquatic products: Mechanisms and potential solutions to acquire high-quality products. *Food Chemistry*, 459, 140437. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140437>

Lemos, J. R. G., Oliveira, A. T., Santos, M. Q. C., et al. (2015). Influência do Transporte na Relação Peso-Comprimento e Fator de Condição de *Paracheirodon axelrodi* (Characidae). *Biota Amazônia*, 5, 22–26. <https://doi.org/10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v5n4p22-26>

Luo, J., Li, M., Zhang, Y., et al. (2021). The low-field NMR studies the change in cellular water in tilapia fillet tissue during different drying conditions. *Food Science & Nutrition*, 9, 2644–2657. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2221>

Magro, N. M., Oliveira, A. T., Davies, A., et al. (2016). First report and description of a *Cyrlia* sp. (Apicomplexa: Haemogregarinidae) from a freshwater Cururu Stingray *Potamotrygon* cf. *histris* (Elasmobranchii: Potamotrygonidae), from the Amazon Region, Brazil. *The Journal of Fish Disease*, 39, 907–911. <https://doi.org/10.1111/jfd.12425>

Ma, J., Qu, J. H., & Sun, D. W. (2017). Developing hyperspectral prediction model for investigating dehydrating and rehydrating mass changes of vacuum freeze-dried grass carp fillets. *Food and Bioproducts Processing*, 104, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.04.007>

Nowak, D., & Jakubczyk, E. (2020). The Freeze-Drying of Foods – The Characteristic of the Process Course and the Effect of Its Parameters on the Physical Properties of Food Materials. *Foods*, 9, 1488. <https://doi.org/10.3390/foods9101488>

Nguyen, M. V., Arason, S., & Eikevik, T. M. (2014). Drying of fish. In I. S. Boziaris (Ed.), *Seafood Processing: Technology, Quality and Safety* (pp. 161–175). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118346174.ch7>

Nie, Y., Chen, J., Xu, J., et al. (2022). Vacuum freeze-drying of tilapia skin affects the properties of skin and extracted gelatins. *Food Chemistry*, 374, 131784. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131784>

Oliveira, A. T., Rodrigues, P. A., Ramos Filho, A. M., et al. (2023). Levels of total mercury and health risk assessment of consuming freshwater stingrays (Chondrichthyes: Potamotrygoninae) of the Brazilian Amazon. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20, 6990. <https://doi.org/10.3390/ijerph20216990>

Oyinloye, T. M., & Yoon, W. B. (2020). Effect of freeze-drying on quality and grinding process of food produce: A review. *Processes*, 8, 354. <https://doi.org/10.3390/pr8030354>

PPM - Produção da Pecuária Municipal. (2023). Produção da Pecuária Brasileira 2023. IBGE: Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Estatísticas Agropecuárias da Pecuária Municipal, v.51. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm_2023_v51_br_informativo.pdf. Acesso em 12 de novembro de 2024.

Paula da Costa, J., Pinheiro de Souza, J. H., Neto, L. G. M., et al. (2023). Aplicação do processo de secagem por liofilização em raia (*Gymnura altavela*). *Revista Principia*, 60, 781–796. <https://doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6352>

Pedroza Filho, M. X., Ribeiro, V. S., Rocha, H. S., et al. (2020). Caracterização da cadeia produtiva da tilápia nos principais polos de produção do Brasil. Palmas: Tocantins, documento 49. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1125358/caracterizacao-da-cadeia-produtiva-da-tilapia-nos-principais-polos-de-producao-do-brasil>. Acesso em 19 de dezembro de 2024.

Pisano, R., Fissore, D., & Barresi, A. A. (2014). Intensification of freeze-drying for the pharmaceutical and food industries. In E. Tsotsas (Ed.), *Modern Drying Technology* (Vol. 5, pp. 131–160). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527631728.ch33>

Petzold, G., & Aguilera, J. M. (2009). Ice morphology: Fundamentals and technological applications in foods. *Food Biophysics*, 4, 378–396. <https://doi.org/10.1007/s11483-009-9136-5>

Rodrigues, P. A., Oliveira, A. T., Ramos-Filho, A. M., et al. (2024). Human health risks assessment of the fluctuations in mercury levels in seafood from different key regions of Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Science Pollution Research International*, 31, 30467–30483. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33267-0>

Rustagi, S. (2020). Food texture and its perception, acceptance, and evaluation. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 17, 651–658. <https://doi.org/10.13005/bbra/2869>

Santos, M. Q. C., Lemos, J. R. G., Pereira, C. N., et al. (2012). Length-weight relationships of four freshwater ornamental fish species from the Brazilian Negro River basin. *Journal of Applied Ichthyology*, 28, 148–149. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2011.01895.x>

Silva, I. M., Bergamini, S. V., Barros, H. P., et al. (2022). Mercado de filés de tilápia na cidade de São José do Rio Preto, Estado de São Paulo. *Informações Econômicas*, 52, eie172020. <https://doi.org/10.56468/1678-832Xeie1720.2022>

- Singh, A., Mittal, A., & Benjakul, S. (2022). Undesirable discoloration in edible fish muscle: Impact of indigenous pigments, chemical reactions, processing, and its prevention. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21, 580–603. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12866>
- Souza, P. L., Junior, L. B., Ladislau, D. S., et al. (2024). Effects of freeze-drying on the textural properties and water activity of Nile tilapia fillets (*Oreochromis niloticus*). *Revista Caderno Pedagógico*, 21, 1–21. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n10-047>
- Tapia, M. S., Alzamora, S. M., & Chirife, J. (2020). Effects of water activity (aw) on microbial stability as a hurdle in food preservation. In G. V. Barbosa-Cánovas, A. J. Fontana, Jr., S. J. S., & T. P. Labuza (Eds.), *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications* (pp. 239–271). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118765982.ch14>
- Tan, M., Mei, J., & Xie, J. (2021). The formation and control of ice crystal and its impact on the quality of frozen aquatic products: A review. *Crystals*, 11, 68. <https://doi.org/10.3390/cryst11010068>
- Zeng, J., Song, Y., Cong, P., et al. (2024). A systematic review of drying in aquatic products. *Reviews in Aquaculture*, 16, 47–65. <https://doi.org/10.1111/raq.12820>
- Zhu, Y., Chen, X., Pan, N., et al. (2022). The effects of five different drying methods on the quality of semi-dried *Takifugu obscurus* fillets. *LWT - Food Science and Technology*, 161, 113340. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113340>
22.113340