



## ÍNDICE EXPLORATÓRIO DE RIGOR MORTIS EM TILÁPIA-DO-NILO E BAGRE-AFRICANO

### EXPLORATORY RIGOR MORTIS INDEX IN NILE TILAPIA AND AFRICAN CATFISH

Marcelo Giordani Minozzo<sup>1\*</sup>, Gabriela Föeger Faustini das Neves<sup>1</sup>, Leandro Xaver Hofmeister<sup>1</sup>, Ana Karolinna Costa da Silva<sup>1</sup>, José Renato Nogueira Coutinho<sup>1</sup>, Miguel dos Santos Tigre<sup>1</sup>, Mariana Silva das Neves<sup>1</sup>, Thiago de Assis Souza<sup>1</sup>, Gustavo Ribeiro Silveira<sup>1</sup>, Ana Cecília Da Silva Feres De Souza<sup>1</sup>, Ramillys Valério Martins<sup>1</sup>, Eduardo Borges Lima<sup>1</sup>, Roberth Kennedy Garcia Benevides<sup>1</sup>, Kayllani Rodrigues Carneiro de Souza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES), Campus Piúma,  
Coordenadoria de Engenharia de Pesca.

\*e-mail: [marcelogm@ifes.edu.br](mailto:marcelogm@ifes.edu.br)

Citação: MINOZZO, M. G.; DAS NEVES, G. F. F.; HOFMEISTER, L. X.; DA SILVA, A. K. C.; COUTINHO, J. R. N.; TIGRE, M. S.; DAS NEVES, M. S.; SOUZA, T. A.; SILVEIRA, G. R.; DE SOUZA, A. C. S. F.; MARTINS, R. V.; LIMA, E. B.; BENEVIDES, R. K. G.; DE SOUZA, K. R. C. (2026). Índice exploratório de rigor mortis em tilápia-do-nilo e bagre-africano. *Revista Brasileira de Engenharia de Pesca*, 17(1), 646-662.

<https://doi.org/10.18817/repesca.v17i1.4688>

Recebido: 09 September 2026

Revisado: 13 September 2026

Aceito: 11 October 2026

Publicado: 13 October 2026



Copyright: © 2026 by the authors.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Resumo

Este estudo descreve, parcialmente, um protocolo padronizado de monitoramento do índice de rigor mortis (IRM) e o aplica de forma exploratória em duas sessões experimentais de espécie única, uma com tilápia-do-nilo ( $n = 4$ ) e outra com bagre-africano ( $n = 5$ ); como espécie, lote, dia e sessão não foram replicados de forma independente, o contraste entre sessões aqui relatado não isola um efeito de espécie. Após secção da medula espinhal, os peixes permaneceram à temperatura ambiente, sem refrigeração, e a distância caudal foi medida a cada 20 min durante 520 min analíticos. A área sob a curva (ASC) foi o desfecho primário e as comparações entre sessões foram exploratórias. A ASC foi de  $386,98 \pm 67,76 \% \cdot h$  na sessão com tilápia e  $106,20 \pm 89,07 \% \cdot h$  na sessão com bagre (diferença  $280,78 \% \cdot h$ ; IC95%: 184,52–363,91;  $p = 0,0159$ ). O padrão observado foi compatível com a hipótese exploratória de maior resposta integrada de rigor na sessão com tilápia e maior heterogeneidade individual na sessão com bagre. Como espécie, lote, dia e sessão não foram replicados independentemente, o contraste não representa efeito isolado de espécie.

**Palavras-chaves:** *Oreochromis niloticus*; *Clarias gariepinus*; Queda caudal; Abate; Bem-estar animal; Qualidade do pescado.

### Abstract

This study partially describes a standardized protocol for monitoring the rigor index (RI) and applies it exploratorily to

two single-species experimental sessions, one with Nile tilapia ( $n = 4$ ) and another with African catfish ( $n = 5$ ); because species, batch, day and session were not independently replicated, the between-session contrast reported here does not isolate a species effect. After spinal cord section, fish were kept at room temperature without refrigeration, and caudal distance was measured every 20 min for 520 analytical min. Area under the curve (AUC) was the primary outcome, and between-session comparisons were exploratory. AUC was  $386.98 \pm 67.76 \% \cdot h$  in the tilapia session and  $106.20 \pm 89.07 \% \cdot h$  in the catfish session (difference  $280.78 \% \cdot h$ ; 95% CI: 184.52–363.91;  $p = 0.0159$ ). The observed pattern was consistent with the exploratory hypothesis of a greater integrated rigor response in the tilapia session and greater individual heterogeneity in the catfish session. Because species, batch, day and session were not independently replicated, the contrast does not represent an isolated species effect.

**Keywords:** *Oreochromis niloticus*; *Clarias gariepinus*; Tail drop; Slaughter; Animal welfare; Fish quality.



## Introdução

A tilápia-do-nilo, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758), e o bagre-africano, *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822), ocupam posições relevantes na aquicultura e apresentam crescente interesse tecnológico para cadeias de processamento de pescado. A produção aquícola mundial de tilápias atingiu aproximadamente 5,3 milhões de toneladas em 2022, enquanto os bagres cultivados constituem outro grupo de elevada participação na produção global; em 2023, os bagres de respiração aérea, categoria que inclui espécies do gênero *Clarias*, responderam por parcela expressiva desse volume (FAO, 2024; Cai et al., 2025). Para a indústria, entretanto, o valor dessas espécies não depende apenas do volume produzido. O manejo imediatamente anterior ao abate, o método utilizado para reduzir a sensibilidade e provocar a morte, a temperatura e o intervalo até a filetagem interferem na conversão do músculo em alimento e, consequentemente, no rendimento e na qualidade tecnológica do produto.

Após a morte, a interrupção do suprimento de oxigênio desloca o metabolismo muscular para vias anaeróbias, promove consumo das reservas energéticas e reduz a disponibilidade de ATP. À medida que o ATP se torna insuficiente para dissociar as pontes entre actina e miosina, instala-se o rigor mortis, acompanhado por alterações de rigidez, encurtamento muscular, retenção de água e propriedades de textura (Watabe et al., 1989; Daskalova, 2019). A posição do pescado na curva de rigor tem consequência prática: a filetagem durante contração intensa pode aumentar o encurtamento e reduzir o rendimento, enquanto a operação em condição pré-rigor pode preservar melhor a geometria e o rendimento do filé (Le et al., 2020). Essa cinética, porém, não constitui uma característica fixa da espécie. Temperatura, reservas energéticas, estresse de captura, atividade muscular pré-morte e método de abate interagem para determinar a duração do período pré-rigor e a intensidade da contração (Poli et al., 2005; Roth et al., 2006).

A literatura com tilápia-do-nilo evidencia a magnitude dessa variabilidade. Yasmin et al. (2001) relataram instalação completa do rigor em aproximadamente 2 a 3 h em peixes conservados em gelo, enquanto Montoya-Camacho et al. (2020) observaram progressão muito mais prolongada, alcançando 100% somente após cerca de 24 h a 5 °C. Diferenças associadas ao método de insensibilização e abate também foram demonstradas por Oliveira Filho et al. (2015), e estudos recentes mostram que esforço respiratório e muscular pré-abate e diferentes procedimentos de abate alteram respostas post mortem e atributos de qualidade (Prestes dos Santos et al., 2024; Yang et al., 2024). Castillo-Yáñez et al. (2014) observaram, em tilápias armazenadas em gelo, ATP muscular inicial muito baixo, próximo de 0,08  $\mu\text{mol/g}$ , atribuindo esse estado ao esforço anterior à morte. Esses resultados indicam que a posição inicial do músculo na trajetória post mortem pode ser determinada antes mesmo do início formal do monitoramento do rigor.

Para bagres do gênero *Clarias*, a base comparável é mais limitada. A elevada tolerância fisiológica e a atividade muscular observada durante determinados procedimentos de insensibilização tornam o manejo pré-abate particularmente



relevante em *C. gariepinus* (Lambooy et al., 2006). Em *C. anguillaris*, Adoga et al. (2010) observaram índice de rigor de aproximadamente 78% em 5 h após golpe craniano, com resolução apenas em período posterior, enquanto Hematyar et al. (2022) demonstraram que características post mortem de *C. gariepinus* respondem ao estado fisiológico e às condições de manejo. Apesar desses avanços, permanecem escassos os dados sobre a trajetória do índice de rigor de *C. gariepinus* após secção da medula espinhal descrita com frequência de amostragem suficientemente detalhada para reprodução e comparação com outras espécies.

Além das diferenças biológicas, a própria mensuração pode contribuir para a heterogeneidade entre estudos. O método de queda caudal proposto por Cutting e modificado por Bito et al. (1983) fornece uma medida simples e repetível da progressão do rigor, mas o valor observado depende do momento definido como referência, da frequência de leitura e da condição térmica. Almeida et al. (2005), por exemplo, registraram índice de rigor de 80,1% apenas 20 min após a morte em tambaqui conservado em gelo, embora parte relevante do ATP inicial ainda permanecesse disponível, mostrando que rigidez aparente e depleção energética não são necessariamente equivalentes entre condições experimentais. Presenza et al. (2021) também demonstraram, em beijupirá, que protocolo de anestesia/hipotermia e condição de acompanhamento influenciam a trajetória observada. Assim, a comparação de tempos absolutos provenientes de estudos com métodos de abate, regimes térmicos e intervalos de leitura diferentes é limitada.

A lacuna científica que motivou este estudo é, portanto, metodológica e comparativa: não identificamos, entre os estudos consultados, uma avaliação de tilápia-do-nilo e bagre-africano utilizando o mesmo procedimento de abate por secção medular, a mesma métrica de índice de rigor e a mesma frequência de monitoramento, com o peixe tratado como unidade experimental. A questão exploratória foi: sob um protocolo padronizado de mensuração, as duas sessões apresentariam trajetórias de rigor distintas e compatíveis com os padrões descritos separadamente na literatura? O objetivo principal foi descrever, com detalhe suficiente para reprodução, um protocolo de monitoramento do índice de rigor mortis e apresentar sua aplicação exploratória em duas sessões experimentais, uma com *O. niloticus* e outra com *C. gariepinus*. Como objetivo analítico secundário, buscou-se caracterizar a trajetória integrada do rigor e a heterogeneidade individual em cada sessão. Com base na literatura disponível, estabeleceu-se a hipótese exploratória de que a sessão com tilápia apresentaria maior resposta integrada de rigor, expressa principalmente pela área sob a curva, enquanto a sessão com bagre apresentaria maior heterogeneidade entre indivíduos. Como cada espécie foi avaliada em uma única sessão, essa hipótese se refere ao padrão observado nas sessões e não a um efeito causal isolado da espécie; lote, dia, temperatura e outros componentes de sessão permaneceram confundidos com a espécie.



## **Material e Métodos**

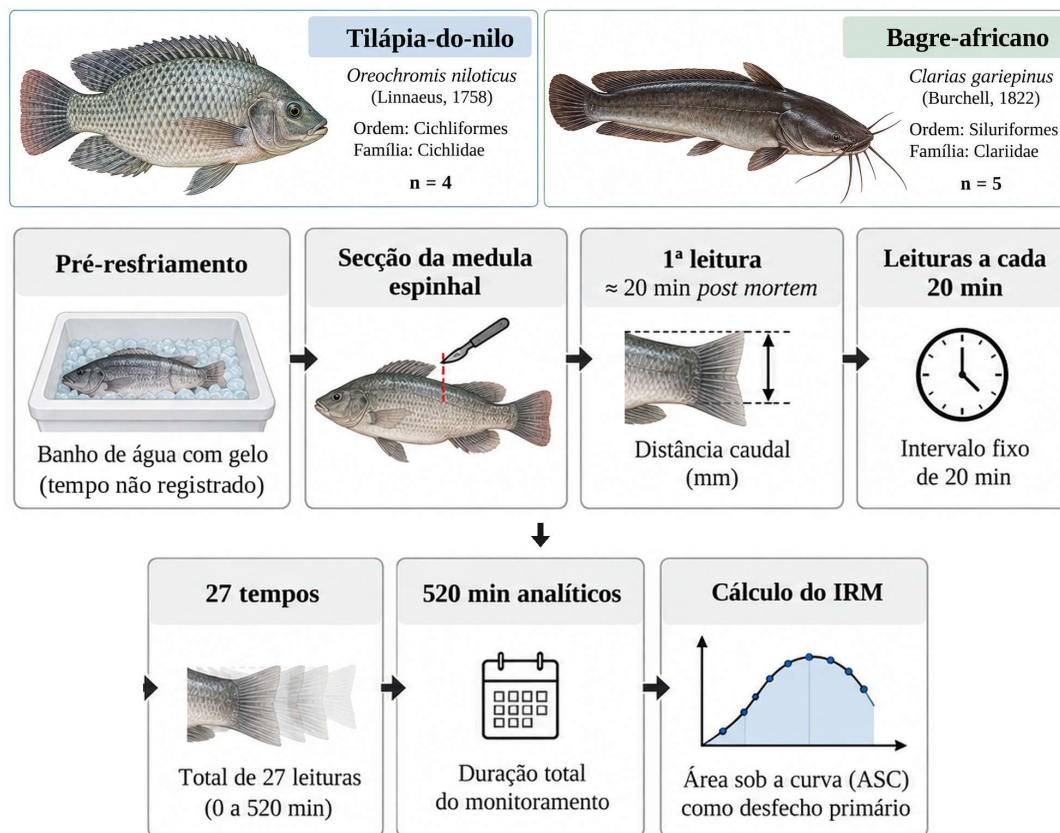
### ***Aprovação ética***

O estudo foi aprovado pela Comissão de Ética no Uso de Animais do Instituto Federal do Espírito Santo, protocolo nº 23185.001.407/2024-14, em 21 de outubro de 2024. Os procedimentos de manejo e abate foram conduzidos sob esse protocolo e em conformidade com a Lei nº 11.794/2008 e com as Resoluções Normativas CONCEA nº 30/2016 e nº 37/2018.

### ***Animais e delineamento experimental***

Os experimentos foram realizados em abril de 2026 no Laboratório de Processamento do Pescado do IFES, Campus Piúma. Foram inicialmente incluídos cinco bagres-africanos e cinco tilápias-do-nilo. Uma tilápia foi excluída na primeira leitura porque o corte de abate comprometeu o apoio do corpo sobre a bancada e inviabilizou a mensuração da curvatura caudal; a exclusão ocorreu antes das análises. A amostra final foi composta por cinco bagres e quatro tilápias. As tilápias válidas apresentaram massa de  $118,53 \pm 22,97$  g e comprimento total de  $19,00 \pm 1,41$  cm. Massa e comprimento dos bagres não foram registrados, constituindo limitação do delineamento. Cada peixe foi considerado uma unidade experimental e as leituras sucessivas, medidas repetidas dentro da mesma unidade. As espécies estudadas, com a respectiva classificação taxonômica, e a sequência de procedimentos aplicada em cada sessão estão resumidas na Figura 1, e os parâmetros experimentais e as condições de monitoramento, na Tabela 1.





**Figura 1.** Espécies estudadas, com classificação taxonômica e número de unidades experimentais, e sequência de procedimentos aplicada em cada sessão. As ilustrações representam *Oreochromis niloticus* e *Clarias gariepinus* e não correspondem a fotografias dos exemplares utilizados; a curva do último quadro é esquemática, e as trajetórias observadas constam da Figura 3. O pré-resfriamento não constitui método validado de insensibilização e seu tempo não foi cronometrado. Cada espécie foi avaliada em uma única sessão, de modo que espécie, lote, dia e sessão permanecem confundidos. Ilustrações produzidas com auxílio de inteligência artificial generativa (ChatGPT, OpenAI); ver Declarações. IRM = índice de rigor mortis; ASC = área sob a curva.

### Manejo, abate e monitoramento post mortem

Os peixes foram capturados individualmente com puçá de malha macia e conduzidos ao ponto de abate com menos de 20 s de exposição ao ar. Antes da contenção, passaram por pré-resfriamento em banho de água com gelo, utilizado exclusivamente para reduzir a atividade motora durante o manuseio; a temperatura nominal do banho era próxima de 0 °C, mas não foi registrada individualmente por peixe nem monitorada de forma contínua ao longo do procedimento. Essa etapa não foi considerada método validado de insensibilização. A responsividade foi avaliada por perda de equilíbrio, ausência de movimentos voluntários, redução ou ausência de movimentos operculares e ausência de resposta motora evidente a estímulos externos, sem avaliação eletrofisiológica. O tempo individual de imersão e a temperatura efetiva do banho não foram registrados; portanto, esses sinais não podem ser convertidos em limiar de inconsciência. Estudos em *C. gariepinus* e *O. niloticus* mostram que a resposta ao resfriamento pode ser aversiva, tardia ou reversível, razão pela qual protocolos futuros devem registrar a exposição individual

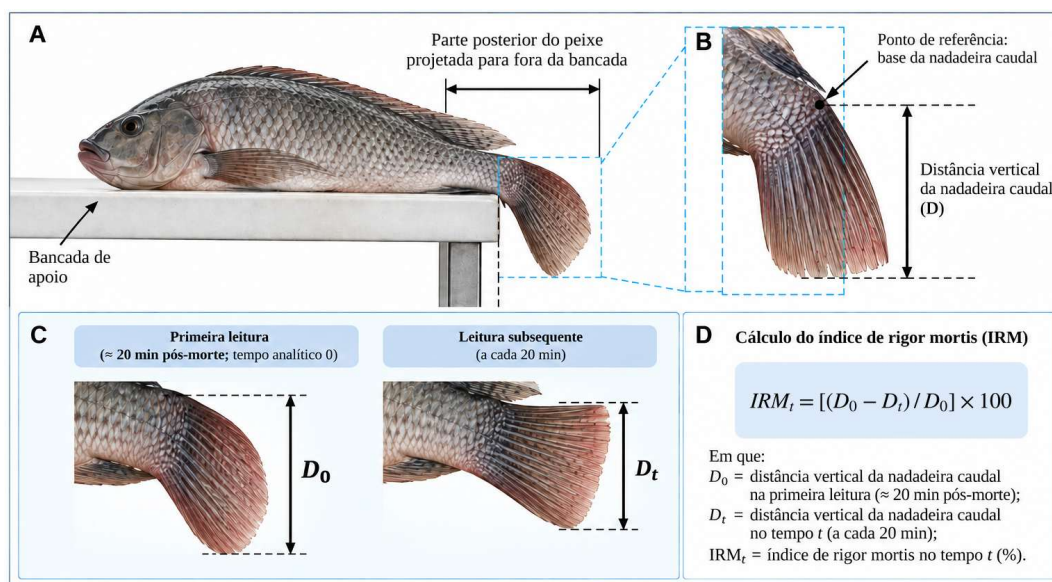
e preferir métodos de insensibilização validados (Brijs et al., 2021; Sundell et al., 2024).

Após a avaliação comportamental, os animais foram imediatamente abatidos por corte transversal único, com faca, imediatamente posterior ao crânio e ao nível da primeira vértebra, seccionando a medula espinhal, a musculatura epaxial e grandes vasos, com sangria associada. A primeira leitura foi realizada aproximadamente 20 min após a morte e definida como tempo analítico 0. As avaliações subsequentes ocorreram a cada 20 min durante 520 min analíticos, totalizando 27 tempos; assim, a última leitura correspondeu a aproximadamente 540 min post mortem. Entre as avaliações, os peixes permaneceram sobre bancada, ao ar, sem refrigeração. A temperatura ambiente variou de 20,70 a 24,66 °C na sessão com bagre (média 21,62 °C) e de 19,50 a 22,80 °C na sessão com tilápia (média 20,65 °C).

### Determinação do índice de rigor

O índice de rigor mortis (IRM) foi determinado pelo método da queda caudal de Cutting modificado por Bito et al. (1983). Em cada leitura, o peixe era colocado em decúbito lateral sobre bancada horizontal, com a porção anterior apoiada até o ponto médio do comprimento total e a porção posterior projetada além da borda. A distância vertical entre a bancada e a base da nadadeira caudal foi medida com paquímetro (Figura 2). O IRM foi calculado pela Equação 1, em que  $D_0$  corresponde à distância obtida na primeira leitura e  $D_t$  à distância no tempo  $t$ . Como  $D_0$  foi registrado aproximadamente 20 min após a morte, ele não representa necessariamente a flacidez máxima inicial; por isso, os valores absolutos devem ser interpretados dentro do protocolo empregado. Valores negativos eventuais foram mantidos, sem truncamento, conforme regra definida antes da análise (Almeida et al., 2005; Presenza et al., 2021).

$$IRM (\%) = [(D_0 - D_t) / D_0] \times 100 \quad (1)$$



**Figura 2.** Método da queda caudal. (A) Exemplar em decúbito lateral, com a porção anterior apoiada até o ponto médio do comprimento total e a posterior projetada além da borda da bancada. (B) Ponto de referência da mensuração, na base da nadadeira caudal, e distância vertical (D), medida com paquímetro. (C) Primeira leitura, com músculo flácido e distância máxima ( $D_0$ ), e leitura subsequente, com rigor instalado e menor distância ( $D_t$ ). (D) Cálculo do índice de rigor mortis, correspondente à Equação 1. Esquema ilustrativo, fora de escala. Ilustrações produzidas com auxílio de inteligência artificial generativa (ChatGPT, OpenAI); ver Declarações.

**Tabela 1.** Parâmetros experimentais e condições de monitoramento observadas nas duas sessões. IRM = índice de rigor mortis; ASC = área sob a curva. Valores de massa e comprimento expressos como média ± desvio-padrão.

| Parâmetro                                   | Sessão com<br>bagre-africano            | Sessão com<br>tilápia-do-nilo           |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Unidades experimentais válidas (n)          | 5                                       | 4                                       |
| Massa corporal (g)                          | não registrada                          | 118,53 ± 22,97                          |
| Comprimento total (cm)                      | não registrado                          | 19,00 ± 1,41                            |
| Método de abate                             | secção da<br>medula espinhal            | secção da medula<br>espinhal            |
| Intervalo morte – primeira leitura (min)    | ≈ 20                                    | ≈ 20                                    |
| Intervalo entre leituras (min)              | 20                                      | 20                                      |
| Número de leituras por peixe                | 27                                      | 27                                      |
| Período monitorado (min analíticos)         | 0–520                                   | 0–520                                   |
| Período equivalente (min post mortem)       | ≈ 20–540                                | ≈ 20–540                                |
| Temperatura ambiente, média (°C)            | 21,62                                   | 20,65                                   |
| Temperatura ambiente, amplitude (°C)        | 20,70–24,66                             | 19,50–22,80                             |
| Condição de armazenamento                   | ao ar, sem<br>refrigeração              | ao ar, sem<br>refrigeração              |
| Observações válidas de distância caudal (n) | 135                                     | 108                                     |
| Variável resposta                           | IRM pela queda<br>caudal (Equação<br>1) | IRM pela queda<br>caudal (Equação<br>1) |
| Desfecho primário                           | ASC do IRM                              | ASC do IRM                              |

### Análise estatística

Para atender ao objetivo de caracterizar a trajetória de rigor, foram calculados para cada peixe a área sob a curva de IRM (ASC) pelo método trapezoidal, o IRM ao final do monitoramento e o maior IRM observado durante o período. A ASC foi definida a priori como desfecho primário por integrar a resposta ao longo de todo o intervalo observado. O IRM final e o maior IRM observado foram tratados como desfechos secundários. A heterogeneidade individual, componente secundário da hipótese exploratória, foi avaliada descritivamente pela dispersão das trajetórias individuais e pelos desvios-padrão dos principais indicadores, sem teste inferencial específico devido ao reduzido número de unidades. A proporção de peixes que atingiu IRM ≥ 50% foi utilizada apenas como descrição complementar. Como parte das curvas ainda estava em ascensão ao final, realizou-se análise de sensibilidade da ASC limitada aos primeiros 360 min analíticos.

As trajetórias médias e os desfechos contínuos foram comparados por permutação exata no nível do peixe, considerando as 126 alocações possíveis de



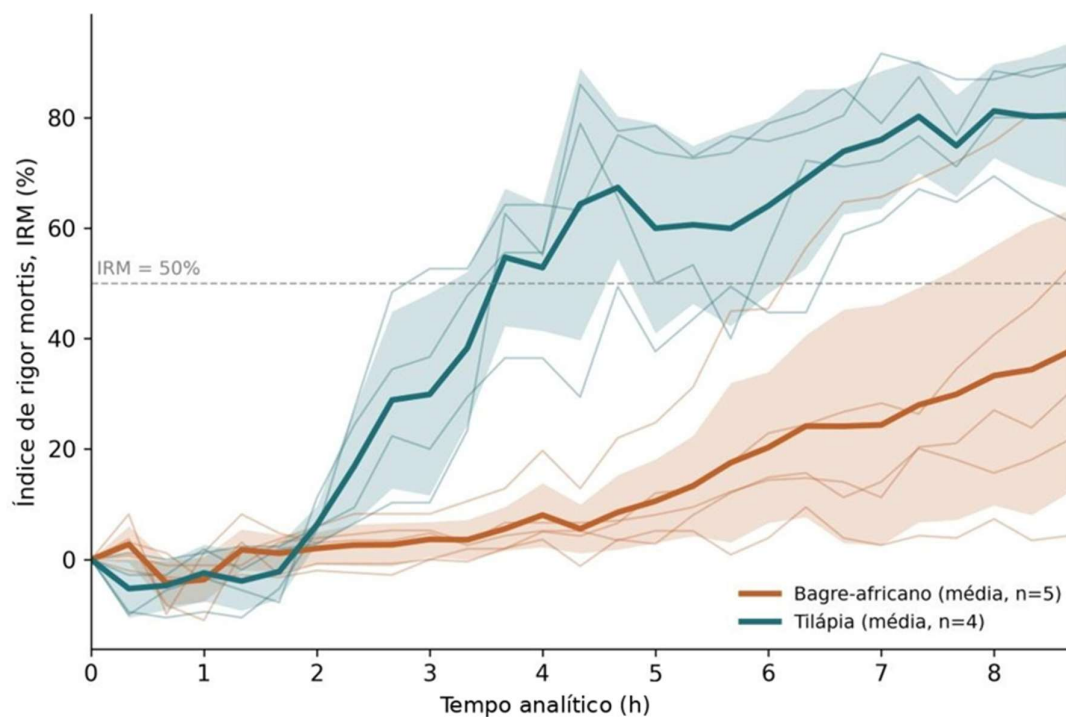
cinco e quatro unidades. Para a trajetória global, utilizou-se a integral da diferença quadrática entre as curvas médias como estatística de teste. Intervalos de confiança de 95% foram obtidos por *bootstrap percentil* no nível do peixe, com 20.000 reamostragens e semente 20240101. Adotou-se  $\alpha = 0,05$ , com ênfase no tamanho do contraste e em sua incerteza. Os testes quantificam a separação observada entre as duas sessões dentro desta amostra e não devem ser interpretados como teste causal de efeito da espécie, pois espécie, lote, dia e sessão não foram replicados independentemente. As análises foram realizadas em Python 3.12.3.

## Resultados e Discussão

O protocolo produziu séries completas para todas as unidades incluídas: foram obtidas 135 observações válidas de distância caudal na sessão com bagre e 108 na sessão com tilápia. Das 243 estimativas de IRM, 34 (14,0%) foram negativas, todas concentradas nas primeiras 4,3 h e com mínimo de -11,01%; esses valores foram mantidos conforme o plano analítico. As trajetórias começaram próximas de zero e se separaram progressivamente. A sessão com tilápia apresentou aumento do IRM concentrado entre aproximadamente 2 e 4 h, enquanto a sessão com bagre apresentou progressão mais gradual e maior dispersão entre indivíduos (Figura 3); esse padrão visual é descritivo e não corresponde a um indicador formal de velocidade, mas é compatível, nesta amostra, com a maior resposta integrada de rigor (ASC) prevista na hipótese exploratória da Introdução.

Cabe registrar, antes da leitura dos indicadores abaixo, que Do foi definido como a primeira distância mensurada, conforme o princípio do método de Bito et al. (1983). No presente estudo, essa primeira mensuração ocorreu aproximadamente 20 min após a morte e, portanto, não corresponde necessariamente à flacidez máxima inicial do músculo. Os valores de IRM e a Tabela 1 devem ser interpretados como variação relativa a partir desse ponto de referência, e não a partir do instante exato do óbito.





**Figura 3.** Trajetórias individuais e médias do índice de rigor mortis (IRM) nas duas sessões. O tempo analítico 0 corresponde à primeira leitura, aproximadamente 20 min após a morte; 520 min analíticos correspondem a ~540 min post mortem. Linhas finas = indivíduos; linhas espessas = médias; linha tracejada = 50% de IRM.

Ao final dos 520 min analíticos, o IRM foi de  $80,37 \pm 13,41\%$  na sessão com tilápia e  $37,65 \pm 29,11\%$  na sessão com bagre. O maior IRM observado foi de  $82,90 \pm 10,06\%$  e  $38,96 \pm 28,19\%$ , respectivamente. Em cinco das nove unidades, três bagres e duas tilápias, o maior valor ocorreu na última leitura, indicando censura à direita e impedindo estimar o verdadeiro momento do pico. Quatro das quatro tilápias e dois dos cinco bagres atingiram IRM  $\geq 50\%$  durante o acompanhamento. A maior dispersão visual das trajetórias e o maior desvio-padrão do IRM final na sessão com bagre (29,11% versus 13,41%) sustentaram apenas descritivamente a expectativa secundária de maior heterogeneidade individual (Tabela 2) (Adoga et al., 2010; Hematyar et al., 2022).

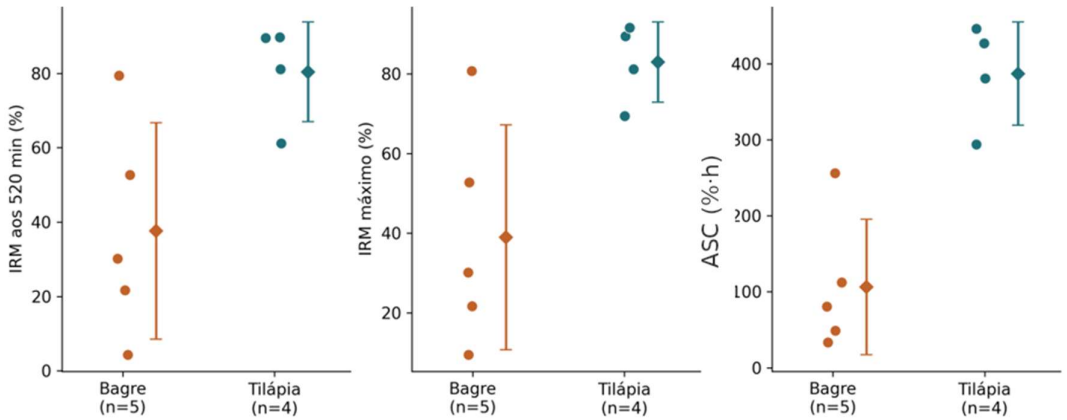
**Tabela 2.** Indicadores descritivos do índice de rigor nas duas sessões experimentais. Valores expressos como média  $\pm$  desvio-padrão, salvo indicação em contrário. ASC = área sob a curva; IRM = índice de rigor mortis.

| Indicador                                                  | Sessão com bagre-africano | Sessão com tilápia |
|------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Unidades válidas, n                                        | 5                         | 4                  |
| IRM ao final (520 min analíticos; ~540 min post mortem), % | $37,65 \pm 29,11$         | $80,37 \pm 13,41$  |
| Maior IRM observado, %                                     | $38,96 \pm 28,19$         | $82,90 \pm 10,06$  |
| ASC, %·h                                                   | $106,20 \pm 89,07$        | $386,98 \pm 67,76$ |
| Maior IRM ocorreu no último tempo, n/total                 | 3/5                       | 2/4                |
| Atingiram IRM $\geq 50\%$ , n/total                        | 2/5                       | 4/4                |

A ASC, desfecho primário, foi de  $386,98 \pm 67,76$  %·h na sessão com tilápia e de  $106,20 \pm 89,07$  %·h na sessão com bagre. O contraste entre as sessões foi de  $280,78$  %·h (IC95%: 184,52–363,91; p exato = 0,0159). A trajetória global também apresentou separação no espaço amostral da permutação (p = 0,0159). Para o IRM final e o maior IRM observado, os contrastes foram de 42,72 e 43,94 pontos percentuais, respectivamente; a distribuição individual desses indicadores é apresentada na Figura 4. A análise de sensibilidade limitada a 360 min manteve a direção do resultado, com diferença de ASC de 154,00 %·h (IC95%: 113,79–189,25; p = 0,0079) (Tabela 3). Esses valores descrevem diferenças entre as sessões e não um efeito independente da espécie (Hurlbert, 1984).

**Tabela 3.** Contrastes exploratórios entre a sessão com tilápia-do-nilo e a sessão com bagre-africano. Testes de permutação exata no nível do peixe e intervalos de confiança de 95% por bootstrap percentil com 20.000 reamostragens. Os valores de p quantificam a separação entre as duas sessões nesta amostra e não isolam um efeito de espécie. ASC = área sob a curva; IRM = índice de rigor mortis; p.p. = pontos percentuais.

| Desfecho                  | Sessão tilápia –<br>sessão bagre | IC95% bootstrap | p exato |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------|---------|
| Trajectoria global        | Estatística = 13.281,65          | Não se aplica   | 0,0159  |
| ASC, %·h                  | 280,78                           | 184,52 a 363,91 | 0,0159  |
| IRM ao final, p.p.        | 42,72                            | 16,13 a 67,28   | 0,0317  |
| Maior IRM observado, p.p. | 43,94                            | 19,34 a 66,17   | 0,0317  |
| ASC até 360 min, %·h      | 154,00                           | 113,79 a 189,25 | 0,0079  |



**Figura 4.** Distribuição individual dos principais indicadores de rigor nas duas sessões experimentais. Os pontos representam as unidades experimentais e os losangos representam média  $\pm$  desvio-padrão. A designação 'IRM máximo' corresponde ao maior IRM observado durante o período monitorado; para cinco das nove unidades, esse valor ocorreu na última leitura.

Os resultados atendem aos dois componentes do objetivo: o protocolo permitiu acompanhar de forma padronizada a evolução do IRM em cada peixe, e sua aplicação gerou trajetórias suficientemente distintas para explorar a questão proposta. Dentro das sessões observadas, a hipótese exploratória recebeu suporte: a sessão com tilápia apresentou maior ASC, enquanto a sessão com bagre apresentou maior dispersão entre indivíduos. Esse suporte deve, contudo, permanecer no nível descritivo-exploratório. Como cada espécie foi avaliada em

uma única sessão, espécie, lote, dia, temperatura ambiente e aspectos não mensurados do manejo variaram conjuntamente. Assim, a permutação exata quantifica a forte separação entre os grupos observados, mas não transforma as sessões em réplicas independentes nem estabelece causalidade interespecífica (Hurlbert, 1984).

A maior resposta integrada de rigor (maior ASC) observada na sessão com tilápia é coerente com parte da literatura para *O. niloticus*, que descreve instalação relativamente rápida do rigor em determinadas condições, mas a grande amplitude entre estudos impede tratar esse padrão como constante da espécie. Yasmin et al. (2001) observaram instalação rápida do rigor sob gelo, enquanto Montoya-Camacho et al. (2020) relataram progressão muito mais prolongada em armazenamento refrigerado. Oliveira Filho et al. (2015), Prestes dos Santos et al. (2024) e Yang et al. (2024) mostraram que insensibilização, esforço pré-abate e método de abate modificam respostas post mortem e qualidade. A observação de Castillo-Yáñez et al. (2014) de baixas reservas iniciais de ATP após esforço de captura oferece um mecanismo plausível para diferenças de velocidade, mas esse mecanismo não foi testado aqui, pois não foram medidos ATP, glicogênio ou nucleotídeos. Portanto, o maior valor integrado de rigor da sessão com tilápia deve ser interpretado como característica desta combinação de lote, manejo, temperatura e protocolo, e não como parâmetro universal da espécie (Huss, 1995; Poli et al., 2005; Roth et al., 2006).

Na sessão com bagre, a característica mais evidente foi a heterogeneidade individual, componente previsto na hipótese exploratória. Apenas dois dos cinco animais superaram 50% de IRM durante o período, enquanto um indivíduo alcançou valores próximos de 80%, e o desvio-padrão do IRM final foi mais de duas vezes o observado na sessão com tilápia. Resultados prévios em *Clarias* indicam que condição fisiológica, manejo e temperatura podem modificar respostas post mortem (Adoga et al., 2010; Hematyar et al., 2022). Lambooi et al. (2006) também demonstraram particularidades fisiológicas e comportamentais de *C. gariepinus* durante procedimentos de insensibilização. Como três dos cinco bagres apresentaram o maior IRM na última leitura, o acompanhamento não foi longo o suficiente para caracterizar o platô ou a resolução do rigor em todos os indivíduos; por isso, a aparente maior heterogeneidade deve ser confirmada com amostra maior e monitoramento mais prolongado.

O manejo anterior ao abate constitui outra fonte importante de incerteza. A redução da atividade motora por pré-resfriamento não equivale à demonstração de inconsciência (Lambooi et al., 2006; Brijs et al., 2021; Sundell et al., 2024). Brijs et al. (2021) observaram respostas aversivas antes da perda de sensibilidade em *C. gariepinus*, e Sundell et al. (2024) demonstraram que a perda de sensibilidade de *O. niloticus* sob resfriamento pode ser tardia e reversível. Como o tempo individual de imersão e a temperatura do banho não foram registrados neste estudo, não é possível determinar se a exposição ao frio foi equivalente entre sessões ou quanto ela contribuiu para a cinética observada. Essa limitação justifica o uso de um método



de insensibilização validado e o registro individual da exposição em estudos confirmatórios.

O regime térmico pós-abate também limita a extrapolação. Os peixes foram mantidos sem refrigeração, em temperaturas ambientais médias de 21,62 °C e 20,65 °C nas sessões com bagre e tilápia, respectivamente. A temperatura influencia o metabolismo muscular e a progressão do rigor (Watabe et al., 1989), de modo que os valores absolutos obtidos aqui não devem ser aplicados diretamente a linhas industriais que utilizam gelo ou refrigeração imediata. Além disso, nenhum marcador bioquímico de estado energético, como ATP ou nucleotídeos, foi medido; portanto, explicações mecanísticas permanecem hipóteses, e não resultados do presente estudo (Castillo-Yáñez et al., 2014).

Do ponto de vista metodológico, o uso do peixe como unidade experimental, da ASC como desfecho primário e da dispersão individual como descrição da heterogeneidade manteve a análise alinhada aos objetivos e evitou a pseudorreplacação das 27 leituras temporais. A principal limitação, porém, permanece a ausência de replicação independente de lotes e sessões. Somam-se a isso o pequeno número de peixes, a ausência de massa e comprimento dos bagres, o tempo analítico iniciado aproximadamente 20 min após a morte e o término do acompanhamento antes do pico real em parte das unidades (a ausência de massa e comprimento dos bagres é especialmente limitante neste ponto). Essas limitações delimitam também a resposta à lacuna científica: o presente estudo padroniza o procedimento e gera uma hipótese comparativa, mas não a confirma como efeito interespecífico. O estudo confirmatório deverá incluir lotes independentes, tilápias e bagres distribuídos de forma intercalada nas mesmas sessões, amostra maior, registro individual da temperatura muscular e do manejo pré-abate, monitoramento até a resolução do rigor e, quando possível, marcador bioquímico do estado energético. Esse delineamento permitirá testar diretamente se a maior resposta integrada observada na sessão com tilápia e a maior heterogeneidade observada na sessão com bagre se reproduzem de maneira consistente entre lotes.

A caracterização morfométrica das unidades experimentais merece destaque entre essas limitações. O porte corporal e a condição física do peixe estão entre os fatores que, ao lado da temperatura, do manejo e do método de abate, modulam o início e a duração do rigor mortis (Huss, 1995), e a massa muscular condiciona a própria mecânica da medida: no método da queda caudal, a flexão da porção posterior depende da relação entre o peso do segmento projetado e a rigidez do músculo que o sustenta, de modo que exemplares de massas distintas podem gerar valores de  $D_0$  diferentes para graus equivalentes de enrijecimento. As tilápias avaliadas apresentaram  $118,53 \pm 22,97$  g e  $19,00 \pm 1,41$  cm, faixa estreita de porte; para os bagres, massa e comprimento não foram registrados, o que impede verificar se as duas sessões foram comparáveis quanto a esse aspecto e, portanto, impede separar um eventual efeito de porte do efeito atribuído à sessão. Trata-se de limitação adicional à ausência de replicação independente, e não de uma explicação alternativa que os dados permitam avaliar. O estudo confirmatório



deverá registrar, para cada exemplar, massa, comprimento total, comprimento padrão, altura máxima do corpo e fator de condição de Fulton, e incluir o porte como covariável ou como critério de estratificação dos lotes, o que permitiria testar diretamente se a resposta integrada de rigor varia com a faixa de peso dentro de cada espécie.

### **Conclusões**

A aplicação descritiva preliminar de um protocolo padronizado de monitoramento do índice de rigor mortis produziu séries completas para todas as unidades incluídas e permitiu caracterizar a resposta integrada e a variabilidade individual durante 520 min analíticos. Nas condições avaliadas, os resultados foram compatíveis com a hipótese exploratória: a sessão com tilápia apresentou maior ASC, enquanto a sessão com bagre apresentou maior heterogeneidade individual. Esses achados respondem à questão exploratória no âmbito das sessões estudadas, mas não demonstram um efeito interespecífico isolado, porque espécie, lote, dia e sessão não foram replicados independentemente. Assim, a principal contribuição do estudo é oferecer um protocolo padronizado e uma hipótese comparativa testável. Sua confirmação exigirá lotes independentes, espécies intercaladas nas mesmas sessões, controle térmico, registro padronizado do manejo pré-abate, caracterização morfométrica dos exemplares e monitoramento até a resolução do rigor, condições necessárias para validar intervalos entre abate e processamento aplicáveis a cada sistema produtivo e às exigências do mercado consumidor.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Campus Piúma, pelo apoio institucional ao desenvolvimento deste estudo.

### **Contribuição dos autores (CRediT Taxonomy)**

**Marcelo Giordani Minozzo:** Conceituação; Metodologia; Análise formal; Curadoria de dados; Administração do projeto; Supervisão; Visualização; Redação – rascunho original; Redação – revisão e edição. **Gabriela Föeger Faustini das Neves:** Investigação; Curadoria de dados; Metodologia; Validação; Redação – revisão e edição. **Leandro Xaver Hofmeister:** Investigação; Curadoria de dados; Validação; Visualização; Redação – revisão e edição. **Ana Karolinnna Costa da Silva:** Investigação; Curadoria de dados; Metodologia; Redação – revisão e edição. **José Renato Nogueira Coutinho:** Investigação; Curadoria de dados; Validação; Redação – revisão e edição. **Miguel dos Santos Tigre:** Investigação; Curadoria de dados; Recursos; Redação – revisão e edição. **Mariana Silva das Neves:** Investigação; Curadoria de dados; Validação; Visualização; Redação – revisão e edição. **Thiago de Assis Souza:** Investigação; Metodologia; Curadoria de dados; Redação – revisão e edição. **Gustavo Ribeiro Silveira:** Investigação; Curadoria de dados; Validação; Redação – revisão e edição. **Ana Cecília Da Silva Feres De Souza:** Investigação; Curadoria de dados; Visualização; Redação – revisão e edição. **Ramillys Valério Martins:** Investigação; Curadoria de dados; Validação; Redação – revisão e edição.



**Eduardo Borges Lima:** Investigação; Metodologia; Curadoria de dados; Redação – revisão e edição. **Roberth Kennedy Garcia Benevides:** Investigação; Curadoria de dados; Validação; Redação – revisão e edição. **Kayllani Rodrigues Carneiro de Souza:** Investigação; Curadoria de dados; Visualização; Redação – revisão e edição.

### Declarações

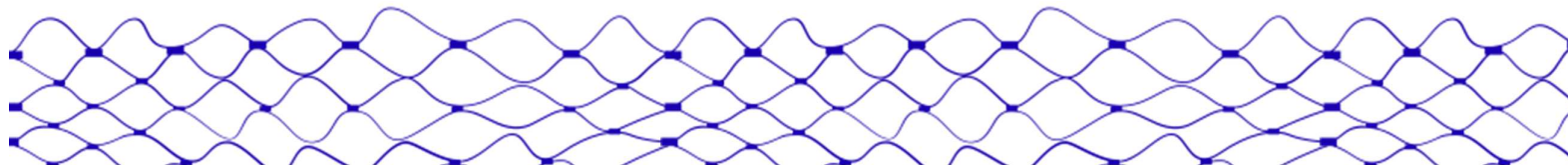
**Conflito de interesses:** os autores declaram não possuir interesses financeiros concorrentes ou relações pessoais conhecidas que pudessem influenciar o trabalho.

**Financiamento:** esta pesquisa não recebeu auxílio específico de agências de fomento dos setores público, comercial ou sem fins lucrativos.

**Uso de inteligência artificial generativa:** na preparação deste manuscrito, os autores utilizaram a ferramenta de inteligência artificial generativa ChatGPT (OpenAI) para produzir as ilustrações que compõem as Figuras 1 e 2. Todo o material gerado foi revisado e editado pelos autores, que verificaram sua correspondência com os métodos descritos e assumem integral responsabilidade pela exatidão, pela originalidade e pela integridade do conteúdo publicado.

### Referências Bibliográficas

- ADOGA, I. J., JOSEPH, E., & SAMUEL, E. F. (2010). Studies on the post-mortem changes in African catfish (*Clarias anguillaris*) during ice-storage. *New York Science Journal*, 3(6), 96–101.
- ALMEIDA, N. M., BATISTA, G. M., KODAIRA, M., VAL, L. A., & LESSI, E. (2005). Determinação do índice de rigor-mortis e sua relação com a degradação dos nucleotídeos em tambaqui (*Colossoma macropomum*), de piscicultura e conservados em gelo. *Ciência Rural*, 35(3), 698–704. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000300034>
- BITO, M., YAMADA, K., MIKUMO, Y., & AMANO, K. (1983). Studies on rigor mortis of fish: I. Difference in the mode of rigor mortis among some varieties of fish by modified Cutting's method. *Bulletin of the Tokai Regional Fisheries Research Laboratory*, 109, 89–96.
- BRIJS, J., SUNDELL, E., HJELMSTEDT, P., BERG, C., SENČIĆ, I., SANDBLOM, E., AXELSSON, M., LINES, J., BOUWSEMA, J., ELLIS, M., SAXER, A., & GRÄNS, A. (2021). Humane slaughter of African sharptooth catfish (*Clarias gariepinus*): Effects of various stunning methods on brain function. *Aquaculture*, 531, 735887. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735887>
- CAI, J., LI, X., & ZHOU, X. (2025). Top 10 species groups in global aquaculture 2023. *World Aquaculture Performance Indicators (WAPI)*, Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd5734en>
- CASTILLO-YÁÑEZ, F. J., JIMÉNEZ-RUIZ, E. I., CANIZALES-RODRÍGUEZ, D. F., MÁRQUEZ-RÍOS, E., MONTOYA-CAMACHO, N., RUIZ-CRUZ, S., & OCAÑO-HIGUERA, V. M. (2014). Postmortem biochemical changes and evaluation of the freshness in the muscle of tilapia (*Oreochromis niloticus*) during the storage in ice. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 9(6), 435–445. <https://doi.org/10.3923/jfas.2014.435.445>
- DASKALOVA, A. (2019). Farmed fish welfare: Stress, post-mortem muscle metabolism, and stress-related meat quality changes. *International Aquatic Research*, 11, 113–124. <https://doi.org/10.1007/s40071-019-0230-0>



- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue transformation in action. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- HEMATYAR, N., IMENTAL, A., KŘIŠŤAN, J., WAGHMARE, S. G., & POLICAR, T. (2022). Considering two aspects of fish welfare on African catfish (*Clarias gariepinus*) fillet throughout postmortem condition: Efficiency and mechanisms. *Foods*, 11(24), 4090. <https://doi.org/10.3390/foods11244090>
- HURLBERT, S. H. (1984). Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological Monographs*, 54(2), 187–211. <https://doi.org/10.2307/1942661>
- HUSS, H. H. (1995). Quality and quality changes in fresh fish (FAO Fisheries Technical Paper No. 348). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- LAMBOOIJ, E., KLOOSTERBOER, R. J., GERRITZEN, M. A., & VAN DE VIS, J. W. (2006). Assessment of electrical stunning in fresh water of African catfish (*Clarias gariepinus*) and chilling in ice water for loss of consciousness and sensibility. *Aquaculture*, 254, 388–395. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.10.027>
- LE, T. T., NGUYEN, H. T., & PHAM, M. A. (2020). Rigor mortis development and effects of filleting conditions on the quality of Tra catfish (*Pangasius hypophthalmus*) fillets. *Journal of Food Science and Technology*, 57(4), 1320–1330. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04166-x>
- MONTOYA-CAMACHO, N., MÁRQUEZ-RÍOS, E., CASTILLO-YÁÑEZ, F. J., RUÍZ-CRUZ, S., CÁRDENAS-LÓPEZ, J. L., ARVIZU-FLORES, A. A., TORRES-ARREOLA, W., & OCAÑO-HIGUERA, V. M. (2020). Efecto de la temperatura de almacenamiento sobre el rigor mortis del músculo de tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Biotecnia*, 22(2), 88–93. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i2.1249>
- OLIVEIRA FILHO, P. R. C., OLIVEIRA, C. A. F., SOBRAL, P. J. A., BALIEIRO, J. C. C., NATORI, M. M., & VIEGAS, E. M. M. (2015). How stunning methods affect the quality of Nile tilapia meat. *CyTA - Journal of Food*, 13(1), 56–62. <https://doi.org/10.1080/19476337.2014.911211>
- POLI, B. M., PARISI, G., SCAPPINI, F., & ZAMPACAVALLLO, G. (2005). Fish welfare and quality as affected by pre-slaughter and slaughter management. *Aquaculture International*, 13, 29–49. <https://doi.org/10.1007/s10499-004-9035-1>
- PRESENZA, L. S., SANTOS, A. S., SILVA, A. C. F., BERNABÉ, C. V., FERREIRA, J. V. F., DAYRELL, L. C., GARCIA, R. C. P., LAVANDER, H. D., & MINOZZO, M. G. (2021). Rigor index of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*): Study with anesthesia (eugenol) and hypothermia. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 8(4), 123–127. <https://doi.org/10.22161/ijaers.84.14>
- PRESTES DOS SANTOS, S., DA SILVA, M. I., GODOY, A. C., DE ALMEIDA BANHARA, D. G., GOES, M. D., SOUZA DOS REIS GOES, E., & HONORATO, C. A. (2024). Respiratory and muscular effort during pre-slaughter stress affect Nile tilapia fillet quality. *PLOS ONE*, 19(7), e0306880. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306880>
- ROTH, B., SLINDE, E., & ARILDSSEN, J. (2006). Pre or post mortem muscle activity in Atlantic salmon (*Salmo salar*): The effect on rigor mortis and the physical properties of flesh. *Aquaculture*, 257, 504–510. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.10.021>
- SUNDELL, E., BRIJS, J., & GRÄNS, A. (2024). The quest for a humane protocol for stunning and killing Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 593, 741317. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741317>



- WATABE, S., USHIO, H., IWAMOTO, M., YAMANAKA, H., & HASHIMOTO, K. (1989). Temperature-dependency of rigor-mortis of fish muscle: Myofibrillar  $Mg^{2+}$ -ATPase activity and  $Ca^{2+}$  uptake by sarcoplasmic reticulum. *Journal of Food Science*, 54(5), 1107–1110. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1989.tb05933.x>
- YANG, X., MEI, J., & XIE, J. (2024). Effects of different slaughtering methods on the biochemical characteristics and quality changes of tilapia (*Oreochromis niloticus*) during cold storage. *Food Chemistry*: X, 24, 101951. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101951>
- YASMIN, L., KAMAL, M., AHMED, S. A. K., AZIMUDDIN, K. M., KHAN, M. N. A., & ISLAM, M. N. (2001). Studies on the post-mortem changes in genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) during ice storage. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 4(9), 1144–1148.

