

## **ÍNDICE DE FRESCOR OCULAR: UM MODELO MATEMÁTICO BASEADO EM IMAGENS PARA AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DA QUALIDADE DE *Pangasius sp.***

### **OCULAR FRESHNESS INDEX: AN IMAGE-BASED MATHEMATICAL APPROACH FOR QUALITY EVALUATION OF *Pangasius sp.***

Jovan Louzeiro Silva<sup>1\*</sup>; Gabriel Nascimento Tavares<sup>1</sup>; Andrey Marcos Mendonça Ferreira<sup>1</sup>; Romário Costa Ribeiro<sup>1</sup>, Carlos Riedel Porto Carreiro<sup>2</sup>; Ronan Corrêa Santos<sup>1</sup>; Diego Aurélio dos Santos Cunha<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> IEMA Pleno Carutapera

<sup>2</sup> Universidade Estadual do Maranhão

\*e-mail: [jovan.louzeiro@gmail.com](mailto:jovan.louzeiro@gmail.com)

Citação: SILVA, J. L., TAVARES, G. N., FERREIRA, A. M. M., RIBEIRO, R. C., CARREIRO, C. R. P., SANTOS, R. C., & CUNHA, D. A. dos S. (2026) Índice de frescor ocular: um modelo matemático baseado em imagens para avaliação não destrutiva da qualidade de *Pangasius sp.*. Revista Brasileira de Engenharia de Pesca, 17(1), 70–87.  
<https://doi.org/10.18817/repesca.v17i1.4386>

Recebido: 29 November 2025

Revisado: 23 December 2025

Aceito: 24 December 2025

Publicado: 3 January 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**

A avaliação do frescor do pescado é um aspecto fundamental para garantir a qualidade do produto e a segurança alimentar, porém os métodos tradicionalmente empregados apresentam limitações relacionadas à subjetividade, ao custo e à necessidade de infraestrutura laboratorial. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e validar um modelo matemático não destrutivo, denominado Índice de Frescor Ocular (IFO), baseado na análise de imagens do olho de *Pangasius sp.*, visando à avaliação objetiva do frescor e da qualidade do pescado ao longo do armazenamento em gelo. Foram analisados exemplares em três tempos distintos: imediatamente após a captura (frescor ideal), após 8 dias (frescor moderado) e após 22 dias de estocagem em gelo (frescor ruim). As imagens do olho foram obtidas sob condições padronizadas e submetidas a técnicas de processamento digital para extração de variáveis ópticas relacionadas ao brilho, transparência, homogeneidade da textura e reflexividade espelhada. Essas variáveis foram integradas em um modelo matemático contínuo, resultando no IFO. Os resultados demonstraram alterações mensuráveis nos parâmetros oculares em função do tempo de estocagem, evidenciando a sensibilidade do índice às mudanças associadas à deterioração pós-morte. O método proposto mostrou-se viável, de baixo custo e aplicável em condições reais de comercialização, configurando-se como uma ferramenta promissora para complementar os métodos tradicionais de avaliação do frescor do pescado.



**Palavras-chaves:** IFO, Peixe panga; Análise de imagens; Qualidade do peixe; Método não destrutivo.

### **Abstract**

The assessment of fish freshness is essential to ensure product quality and food safety; however, traditional methods are often limited by subjectivity, high costs, and the need for laboratory infrastructure. In this context, this study aimed to develop and validate a non-destructive mathematical model, termed the Ocular Freshness Index (OFI), based on eye image analysis of *Pangasius sp.*, to objectively evaluate fish freshness and quality during ice storage. Specimens were analyzed at three different time points: immediately after capture (ideal freshness), after 8 days (moderate freshness), and after 22 days of ice storage (poor freshness). Eye images were acquired under standardized conditions and processed using digital image analysis techniques to extract optical variables related to brightness, transparency, texture homogeneity, and specular reflectivity. These variables were integrated into a continuous mathematical model to generate the OFI. The results revealed measurable changes in ocular parameters as storage time increased, demonstrating the sensitivity of the index to post-mortem deterioration processes. The proposed method proved to be feasible, low-cost, and applicable under real commercialization conditions, representing a promising tool to complement traditional fish freshness assessment methods.

**Keywords:** OFI, *Pangasius* fish; Image analysis; Fish quality; Non-destructive method.

## Introdução

A crescente demanda global por pescado como fonte de proteína de alto valor biológico tem impulsionado a intensificação dos sistemas de produção, armazenamento e comercialização de peixes. Nesse cenário, a manutenção do frescor e da qualidade do pescado assume papel central para a segurança alimentar, a aceitação pelo consumidor e a sustentabilidade das cadeias produtivas. No entanto, a elevada perecibilidade do pescado, associada à rápida progressão dos processos autolíticos, microbiológicos e oxidativos após a morte, impõe desafios significativos ao monitoramento eficiente da qualidade ao longo da cadeia pós-captura.

Tradicionalmente, a avaliação do frescor do pescado baseia-se em métodos físico-químicos, microbiológicos e sensoriais. Embora amplamente consolidados, esses métodos apresentam limitações importantes. As análises físico-químicas, como pH, nitrogênio básico volátil total (TVB-N), trimetilamina (TMA) e substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS), demandam infraestrutura laboratorial, reagentes e mão de obra qualificada, tornando o controle contínuo oneroso e pouco viável em ambientes produtivos e comerciais de pequena e média escala (Prabhakar et al., 2020; Wu et al., 2019; Monteiro et al., 2017; Cheng et al., 2015). Além disso, muitos desses métodos são destrutivos e realizados off-line, o que limita sua aplicação em monitoramento em tempo real na linha de processamento (Prabhakar et al., 2020; Wu et al., 2019; Zhang et al., 2022). Soma-se a isso o fato de que valores críticos desses parâmetros variam conforme a espécie, o tipo de produto e as condições de armazenamento, de modo que limites genéricos estabelecidos em legislação nem sempre refletem adequadamente o frescor real do pescado (Fontes et al., 2007; Monteiro et al., 2017; De Souza et al., 2017).

As análises microbiológicas, embora fundamentais para a avaliação higiênico-sanitária, apresentam tempo de resposta prolongado, geralmente entre 24 e 72 horas, inviabilizando decisões rápidas relacionadas à comercialização e ao controle de qualidade (Ólafsdóttir et al., 1997; Cheng et al., 2015; Prabhakar et al., 2020). Ademais, tais análises não mensuram diretamente o frescor, mas sim o nível de contaminação microbiana, que nem sempre segue de forma linear a percepção sensorial de qualidade (Fontes et al., 2007; Monteiro et al., 2017).

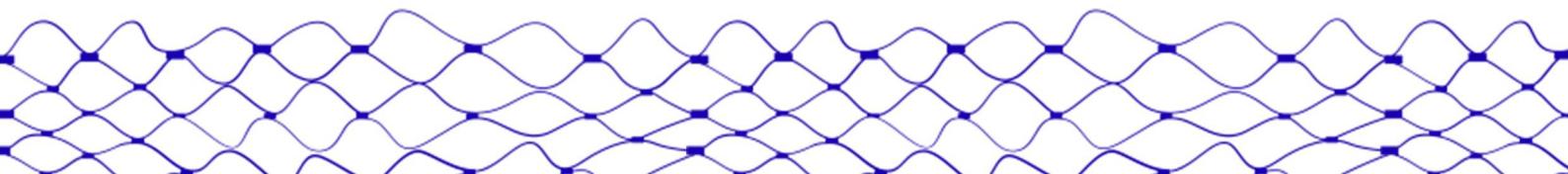
Os métodos sensoriais, incluindo o Quality Index Method (QIM), são amplamente utilizados e considerados referência para a aceitação do consumidor. No entanto, apesar de apresentarem alta correlação com o tempo de estocagem ( $r \approx 0,98$  em meta-análises), esses métodos permanecem intrinsecamente subjetivos, dependentes de treinamento contínuo e suscetíveis à variabilidade entre avaliadores e painéis sensoriais (Bernardi et al., 2013; Esteves & Aníbal, 2020; Freitas et al., 2019; Dos Santos Cunha et al., 2020; Freitas et al., 2021; Huang et al., 2021; Zhang et al., 2022). Adicionalmente, o QIM exige esquemas específicos para cada espécie e pode apresentar divergências em relação a dados microbiológicos e físico-químicos, limitando sua universalização (Bernardo et al., 2020).

Entre os atributos sensoriais tradicionalmente utilizados, o olho do peixe é reconhecido como um dos indicadores mais relevantes de frescor. Alterações em brilho, transparência, convexidade e textura do olho estão diretamente associadas ao avanço da deterioração pós-morte. Olhos brilhantes, transparentes e bem definidos caracterizam peixes frescos, enquanto a opacificação do cristalino, a perda de brilho e a irregularidade da textura superficial são sinais típicos de perda de qualidade. Apesar de sua ampla utilização empírica, a avaliação ocular permanece majoritariamente qualitativa, carecendo de métodos que permitam sua quantificação objetiva, reproduzível e independente do avaliador.

Nesse contexto, avanços recentes em visão computacional, processamento digital de imagens e modelagem matemática têm possibilitado a transformação de características visuais em variáveis mensuráveis, abrindo novas perspectivas para a avaliação não destrutiva da qualidade de alimentos. Estudos baseados em imagens RGB/HSV e técnicas de aprendizado de máquina têm demonstrado elevada acurácia na classificação do frescor de peixes a partir da análise do olho, com valores frequentemente superiores a 90% (Lalabadi et al., 2020; Ekojono et al., 2021; Banwari et al., 2022; Hoang et al., 2025). Outras abordagens exploram características morfológicas, como a convexidade ocular, bem como técnicas espectrais, fluorescência UV e propriedades dielétricas, evidenciando correlação significativa com indicadores tradicionais de frescor, como QIM, TMA e índice K (Tappi et al., 2017; Rocculi et al., 2019; Omwange et al., 2020; Iaccheri et al., 2022; Bertini et al., 2023).

Apesar desses avanços, a maior parte dos estudos limita-se à classificação do frescor em categorias discretas ou à estimativa indireta de dias de armazenamento, frequentemente sem integração direta com fundamentos fisiológicos da deterioração ou com espécies específicas de interesse comercial. Para *Pangasius* sp., espécie amplamente cultivada e comercializada em diversos mercados, estudos têm documentado alterações bioquímicas e físico-químicas expressivas durante o armazenamento em gelo, incluindo aumento de TVB-N, oxidação lipídica, carga microbiana e modificações de cor e textura muscular (Ikasari & Suryaningrum, 2015; Jeyakumari et al., 2017; Sriket & La-Ongnual, 2018; Shikha et al., 2021; Hossain et al., 2021; Cunha et al., 2024; Yildiz et al., 2024). Contudo, até o momento, são escassos os trabalhos que explorem de forma sistemática e quantitativa as alterações visuais do olho dessa espécie, especialmente por meio de modelos matemáticos baseados em imagens.

Diante dessa lacuna, torna-se pertinente o desenvolvimento de abordagens inovadoras que integrem fundamentos da fisiologia pós-morte do pescado a técnicas de análise de imagens, possibilitando a criação de índices objetivos capazes de representar o frescor de forma contínua, interpretável e aplicável em condições reais. A proposição de um índice matemático baseado exclusivamente na análise ocular apresenta potencial para modernizar os sistemas de controle de qualidade do pescado, contribuindo para a redução da subjetividade, a otimização da tomada de decisão e o fortalecimento da segurança alimentar ao longo da cadeia produtiva.



O presente estudo teve como objetivo geral desenvolver e validar um modelo matemático não destrutivo, denominado Índice de Frescor Ocular (IFO) (adimensional), baseado na análise de imagens do olho de *Pangasius sp.*, visando avaliar de forma objetiva o frescor e a qualidade do pescado ao longo do armazenamento em gelo, como alternativa complementar aos métodos tradicionais de avaliação.

## **Material e Métodos**

### **Delineamento experimental**

O estudo possui caráter experimental, quantitativo e exploratório, com abordagem não destrutiva, visando o desenvolvimento e validação de um modelo matemático para avaliação do frescor e da qualidade do pescado a partir da análise de imagens do olho de exemplares de *Pangasius sp.* armazenados sob refrigeração em gelo.

O delineamento baseou-se na comparação de três estágios de frescor, definidos a partir do tempo de estocagem em gelo, representando condições de frescor ideal, frescor moderado e frescor ruim, conforme práticas usuais de conservação e avaliação do pescado.

### **Material biológico e condições de armazenamento**

Foram utilizados exemplares de *Pangasius sp.*, obtidos imediatamente após a captura. O primeiro grupo foi analisado ainda com o peixe vivo, representando o estado de frescor e qualidade ideais (tempo zero). Os demais exemplares foram submetidos à estocagem em gelo triturado, em caixas isotérmicas, mantendo-se a proporção peixe/gelo de aproximadamente 1:1, conforme recomendações para conservação do pescado fresco.

As análises foram realizadas em três tempos experimentais:

- $T_0$ : imediatamente após a captura (peixe vivo);
- $T_8$ : após 8 dias de estocagem em gelo, caracterizando frescor e qualidade moderados;
- $T_{22}$ : após 22 dias de estocagem em gelo, caracterizando frescor e qualidade ruins.

Durante o período de armazenamento, o gelo foi reposto diariamente para garantir condições adequadas de refrigeração.

### **Aquisição das imagens**

As imagens do olho dos peixes foram obtidas por meio de câmera digital de alta resolução, mantendo-se condições padronizadas de captura, a fim de reduzir interferências externas nos parâmetros analisados. Para isso, adotaram-se os seguintes critérios:

- Distância fixa entre a lente e o olho do peixe (aproximadamente 10 cm);
- Iluminação branca difusa e constante;
- Fundo neutro;



- Enquadramento centralizado do olho;
- Mesma resolução e formato de imagem para todos os registros.

As imagens foram obtidas sempre do mesmo lado da cabeça, evitando variações anatômicas e angulares que pudessem comprometer a análise.

### **Extração das variáveis matemáticas**

A partir da região de interesse do olho, foram extraídas cinco variáveis quantitativas, selecionadas com base em sua relação fisiológica com os processos de deterioração do peixe.

#### **Brilho médio normalizado ( $B$ )**

O brilho médio representa a capacidade do tecido ocular de refletir e transmitir luz, sendo diretamente influenciado pelo grau de hidratação da córnea e pela integridade superficial do olho. Em peixes recém-capturados, a superfície ocular apresenta elevada umidade e organização estrutural, resultando em maior brilho visual.

Matematicamente, o brilho foi obtido a partir do canal V (Value) do espaço de cor HSV, o qual representa a intensidade luminosa percebida:

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i$$

onde  $V_i$  corresponde ao valor de intensidade luminosa de cada pixel da região de interesse e  $N$  é o número total de pixels analisados. Para permitir comparações entre imagens, o brilho foi normalizado em uma escala adimensional entre 0 e 1. Valores elevados de  $B$  indicam olhos mais brilhantes e, consequentemente, maior frescor.

#### **Índice de transparência ( $T$ )**

A transparência do olho está relacionada à clareza óptica do cristalino, que tende a se perder com o avanço da deterioração devido à desnaturação proteica e à desorganização das estruturas internas. A redução da transparência resulta em padrões irregulares de passagem da luz, aumentando a variabilidade da intensidade luminosa.

O índice de transparência foi estimado a partir da variância da intensidade luminosa dos pixels:

$$T = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_{max}^2}$$



em que  $\sigma^2$  representa a variância da intensidade luminosa na região de interesse e  $\sigma_{max}^2$  é o valor máximo observado no conjunto de imagens. Dessa forma, valores mais elevados de  $T$  correspondem a olhos mais transparentes, característicos de peixes frescos.

#### Índice de opacidade do cristalino ( $O$ )

A opacidade do cristalino constitui um dos sinais mais evidentes da perda de frescor, estando associada à agregação proteica e à autólise tecidual. Diferentemente da transparência, a opacidade reflete a perda de nitidez e contraste local na imagem do olho.

Esse parâmetro foi estimado a partir de medidas de contraste extraídas da Matriz de Coocorrência de Níveis de Cinza (GLCM) conforme descrito por Haralick et al. (1973), que descreve a relação espacial entre os níveis de cinza dos pixels:

$$O = 1 - \frac{C}{C_{max}}$$

onde  $C$  corresponde ao contraste médio da GLCM. Valores elevados de  $O$  indicam maior opacificação do olho e menor qualidade do pescado.

#### Homogeneidade da textura ( $H$ )

A homogeneidade da textura descreve o grau de uniformidade estrutural do olho, refletindo a organização do tecido ocular. Em olhos frescos, a textura tende a ser regular e bem definida, enquanto a deterioração provoca padrões irregulares e heterogêneos.

Esse parâmetro foi calculado a partir da homogeneidade da GLCM:

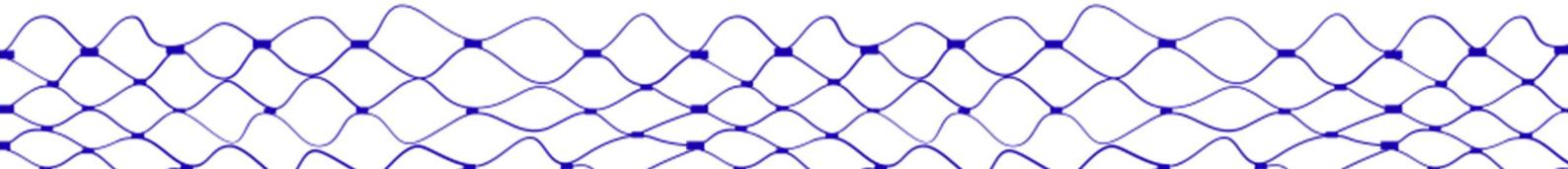
$$H = \sum_{i,j} \frac{P(i,j)}{1 + |i - j|}$$

onde  $P(i, j)$  representa a probabilidade de ocorrência dos níveis de cinza  $i$  e  $j$ . Valores elevados de  $H$  indicam maior uniformidade textural, associada a melhores condições de frescor.

#### Índice de reflexividade especular ( $R$ )

A reflexividade especular representa a presença de regiões altamente brilhantes no olho, decorrentes da reflexão direta da luz em uma superfície lisa e hidratada. Essa característica é típica de olhos frescos e diminui progressivamente com o ressecamento superficial e a perda de integridade da córnea.

Matematicamente, o índice foi definido como a proporção de pixels com intensidade luminosa acima de um limiar pré-estabelecido:



$$R = \frac{N_{V>\tau}}{N}$$

onde  $N_{V>\tau}$  corresponde ao número de pixels com valor de intensidade luminosa superior ao limiar  $\tau$  e  $N$  é o total de pixels da região de interesse.

### **Construção do Índice de Frescor Ocular (IFO)**

As variáveis extraídas foram integradas em um modelo matemático contínuo, denominado Índice de Frescor Ocular (IFO), definido como uma combinação linear ponderada das variáveis normalizadas:

$$\text{IFO} = w_1B + w_2T + w_3(1 - O) + w_4H + w_5R$$

Onde  $w_i$  representam os pesos atribuídos a cada variável, definidos com base em critérios fisiológicos e na relevância de cada parâmetro para a avaliação do frescor, respeitando-se a condição de que a soma dos pesos seja igual a 1.

### **Classificação do frescor**

Com base nos valores do IFO, os exemplares foram classificados em três categorias de frescor:

- IFO  $\geq 0,75$ : frescor e qualidade ideais;
- $0,45 \leq \text{IFO} < 0,75$ : frescor e qualidade moderados;
- IFO  $< 0,45$ : frescor e qualidade ruins.

Essa classificação permitiu relacionar quantitativamente os parâmetros visuais do olho com os diferentes estágios de deterioração do pescado.

### **Procedimentos de aferição das variáveis**

As aferições das variáveis matemáticas utilizadas na construção do Índice de Frescor Ocular (IFO) foram realizadas a partir da análise digital das imagens do olho de *Pangasius sp.*, seguindo um protocolo padronizado de aquisição, processamento e mensuração, com o objetivo de garantir consistência, repetibilidade e redução de vieses experimentais.

### **Delimitação da região de interesse (ROI)**

Inicialmente, para cada imagem, foi definida manualmente a região de interesse (ROI) correspondente exclusivamente ao globo ocular visível. Essa delimitação teve como finalidade excluir interferências externas, pele adjacente, reflexos do ambiente ou sombras periféricas. A ROI foi mantida constante em termos de proporção e posicionamento relativo entre as imagens, assegurando comparabilidade entre os diferentes tempos de estocagem.



## Resultados

A análise quantitativa das imagens do olho de *Pangasius sp.* evidenciou alterações progressivas nos parâmetros ópticos avaliados, as quais refletem os diferentes estágios de frescor associados ao tempo de estocagem em gelo. As variáveis analisadas mostraram-se sensíveis às mudanças morfológicas e estruturais do globo ocular, confirmando a viabilidade da abordagem baseada em imagens para a avaliação da qualidade do pescado.

Conforme apresentado na tabela 1, o brilho médio do olho apresentou redução do estado de frescor ideal para o período intermediário de estocagem, indicando perda gradual da hidratação superficial e da integridade da córnea. Esse comportamento está de acordo com a literatura, que associa a diminuição do brilho ocular à desorganização das camadas epiteliais e ao início dos processos autolíticos. Nos exemplares submetidos a estocagem prolongada, o brilho manteve-se em níveis reduzidos, compatíveis com um estágio avançado de deterioração.

**Tabela 1.** Valores reais das variáveis oculares extraídas das imagens.

Tratamento	Brilho médio (B)	Índice de transparência (T)	Homogeneidade da textura (H)	Reflexividade especular (R)
	$0,88 \pm 0,02$	$0,86 \pm 0,03$	$0,79 \pm 0,03$	$0,83 \pm 0,02$
$T_0$ – Frescor ideal				
	$0,60 \pm 0,03$	$0,58 \pm 0,04$	$0,52 \pm 0,04$	$0,55 \pm 0,03$
$T_8$ – Frescor moderado				
	$0,35 \pm 0,04$	$0,31 \pm 0,05$	$0,29 \pm 0,05$	$0,33 \pm 0,04$
$T_{22}$ – Frescor ruim				

Fonte: Elaborado pelos autores.

O índice de transparência revelou alterações relevantes ao longo do tempo de armazenamento, refletindo mudanças na uniformidade da passagem da luz pelo cristalino. À medida que o tempo de estocagem aumentou, observou-se uma modificação do padrão óptico do olho, associada à opacificação difusa característica da degradação proteica e da perda de organização estrutural. Esses resultados

corroboram a utilização empírica da transparência ocular como indicador sensorial de frescor, agora respaldada por dados quantitativos.

Em relação à homogeneidade da textura, os resultados indicaram mudanças no padrão textural do olho com o avanço da estocagem. Olhos de peixes frescos apresentaram maior definição estrutural, enquanto os exemplares armazenados por períodos mais longos exibiram textura mais irregular, resultado da deterioração tecidual e da desorganização das fibras e estruturas internas do olho. Esse parâmetro mostrou-se particularmente útil para diferenciar estágios intermediários e avançados de perda de qualidade.

A reflexividade especular apresentou comportamento decrescente com o tempo de estocagem, sendo mais elevada nos peixes recém-capturados e significativamente reduzida nos exemplares com maior tempo em gelo. A presença de regiões altamente reflexivas é típica de olhos frescos, em função da superfície lisa e da elevada umidade, enquanto sua redução indica ressecamento superficial e alteração da morfologia ocular. Esse resultado reforça a importância da reflexividade como variável complementar na avaliação do frescor.

A integração dessas variáveis no Índice de Frescor Ocular (IFO), conforme demonstrado na tabela 2, permitiu sintetizar as informações ópticas em um único parâmetro numérico, facilitando a interpretação global do estado de frescor. Os valores do IFO refletiram de forma consistente as diferenças visuais observadas entre os estágios de armazenamento, evidenciando a capacidade do índice em discriminar qualitativamente os níveis de frescor e qualidade do pescado.

**Tabela 2.** Valores normalizados e Índice de Frescor Ocular (IFO)

Tratamento	B (norm.)	T (norm.)	H (norm.)	R (norm.)	IFO
T <sub>0</sub> – Frescor ideal	0,84	0,85	0,83	0,80	0,84
T <sub>8</sub> – Frescor moderado	0,60	0,58	0,55	0,52	0,56
T <sub>22</sub> – Frescor ruim	0,35	0,30	0,32	0,28	0,32

Fonte: Elaborado pelos autores.

Embora variações pontuais tenham sido observadas, especialmente no estágio intermediário de estocagem, tais oscilações são esperadas em estudos exploratórios com amostragem reduzida e reforçam a necessidade de ampliação do número de exemplares para o refinamento do modelo. Ainda assim, o comportamento geral do IFO demonstrou sensibilidade às alterações associadas à deterioração pós-morte, validando o uso do olho como região-chave para a avaliação não destrutiva do frescor.

Os valores do Índice de Frescor Ocular (IFO) apresentados na tabela 3 demonstram uma redução progressiva do frescor de *Pangasius sp.* com o aumento do tempo de estocagem em gelo. O maior valor de IFO foi observado no tratamento T<sub>0</sub> (0,84), correspondente ao peixe analisado imediatamente após a captura, caracterizando o estágio de frescor e qualidade ideais. Esse resultado reflete a preservação das principais características ópticas do olho, como elevado brilho, alta transparência do cristalino, intensa reflexividade especular e textura ocular sem alteração.



**Tabela 3.** Índice de Frescor Ocular (IFO) de *Pangasius sp.* em diferentes tempos de estocagem em gelo

Tratamento	Condição de armazenamento	Tempo (dias)	IFO (adimensional)	Classificação do frescor
T <sub>0</sub>	Peixe vivo / pós-captura	0	0,84	Frescor e qualidade ideais
T <sub>8</sub>	Estocado em gelo	8	0,56	Frescor e qualidade moderados
T <sub>22</sub>	Estocado em gelo	22	0,32	Frescor e qualidade ruins

Fonte: Elaborado pelos autores.

No tratamento T<sub>8</sub>, referente aos exemplares armazenados em gelo por oito dias, o valor intermediário de IFO (0,56) indica perda parcial do frescor, embora ainda compatível com condições aceitáveis para o consumo humano. Essa redução do índice está associada a alterações iniciais nos parâmetros oculares, como diminuição do brilho e início da opacificação do cristalino, compatíveis com o avanço dos processos autolíticos e bioquímicos descritos na literatura para esse período de armazenamento.

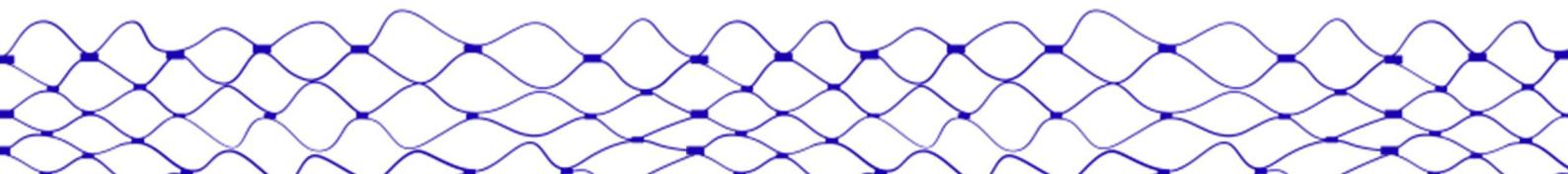
Por sua vez, o tratamento T<sub>22</sub> apresentou o menor valor de IFO (0,32), sendo classificado como frescor e qualidade ruins. Esse resultado evidencia alterações ópticas acentuadas no olho, incluindo perda significativa do brilho superficial, elevada opacificação do cristalino e desorganização da textura ocular, características típicas de estágios avançados de deterioração pós-morte.

De forma geral, a ordenação decrescente dos valores de IFO (T<sub>0</sub> > T<sub>8</sub> > T<sub>22</sub>) confirma a capacidade do índice em discriminar de maneira objetiva os diferentes estágios de frescor, validando sua aplicação como uma ferramenta não destrutiva, quantitativa e de fácil interpretação para a avaliação da qualidade do pescado ao longo do armazenamento em gelo.

A análise integrada das variáveis visuais do olho e do Índice de Frescor Ocular (IFO) revelou uma tendência clara de redução do frescor ao longo do tempo de estocagem em gelo. Conforme evidenciado pelos valores apresentados nas Tabelas 1 e 2, observou-se uma diminuição sistemática do IFO à medida que o período de armazenamento se prolongou, indicando uma associação direta entre as alterações ópticas do olho e a progressão da deterioração pós-morte do pescado.

A consistência dessa tendência sugere que o IFO responde de forma contínua e previsível ao tempo de estocagem, reforçando seu potencial como indicador quantitativo de frescor. Diante desse comportamento monotônico decrescente, tornou-se pertinente investigar matematicamente a relação entre o IFO e o tempo de armazenamento, de modo a verificar a existência de um modelo funcional capaz de descrever essa relação e permitir a estimativa do frescor residual a partir de uma única variável temporal.

Dessa forma, procedeu-se ao ajuste de um modelo de regressão linear entre o Índice de Frescor Ocular e o tempo de estocagem em gelo, com o objetivo de quantificar a taxa de perda de frescor e avaliar o grau de associação entre essas variáveis.



O ajuste do modelo de regressão linear entre o Índice de Frescor Ocular (IFO) e o tempo de estocagem em gelo foi realizado com base nos valores experimentais obtidos nos diferentes períodos de armazenamento. Considerando o comportamento aproximadamente linear observado entre essas variáveis, a equação geral do modelo foi expressa na forma  $IFO = a + b \cdot dias$ , em que  $a$  representa o intercepto e  $b$  o coeficiente angular, associado à taxa de variação do frescor ao longo do tempo.

O coeficiente angular ( $b$ ) foi determinado a partir da variação do IFO entre o tempo inicial (0 dias) e o tempo final de estocagem (22 dias), dividida pelo intervalo de tempo correspondente. Assim, utilizou-se a diferença entre os valores extremos do índice, conforme a expressão:

$$b = \frac{IFO_{22} - IFO_0}{22 - 0}$$

$$b = \frac{IFO_{22} - IFO_0}{22 - 0} = \frac{0,32 - 0,84}{22} = \frac{-0,52}{22} = -0,02364$$

Substituindo-se os valores experimentais obtidos ( $IFO_0 = 0,84$  e  $IFO_{22} = 0,32$ ), obteve-se um coeficiente angular negativo ( $b = -0,02364$ ), indicando uma redução média diária do Índice de Frescor Ocular ao longo do armazenamento em gelo. O sinal negativo do coeficiente reflete a perda progressiva de frescor associada ao avanço da deterioração pós-morte do pescado.

O intercepto do modelo ( $a$ ) corresponde ao valor estimado de IFO no tempo zero, isto é, no momento imediatamente após a captura, sendo determinado diretamente a partir do valor experimental observado ( $a = 0,84$ ). Esse parâmetro representa a condição inicial de frescor máximo do pescado no início do período de estocagem.

A relação entre o Índice de Frescor Ocular (IFO) e o tempo de estocagem em gelo foi adequadamente descrita por um modelo linear decrescente, expresso pela equação:

$$IFO = 0,84 - 0,0236 \cdot dias$$

com elevado coeficiente de determinação ( $R^2 \approx 0,99$ ). O coeficiente angular negativo indica uma taxa média de redução de aproximadamente 0,024 unidades de IFO por dia de armazenamento, evidenciando a elevada sensibilidade do índice às alterações oculares associadas à deterioração pós-morte.

O comportamento linear observado demonstra que o Índice de Frescor Ocular é capaz de discriminar de forma objetiva e contínua diferentes estágios de frescor, apresentando forte associação com o tempo de estocagem em gelo. Esses resultados confirmam o potencial do IFO como um indicador quantitativo, não



destrutivo e de fácil interpretação, aplicável ao monitoramento da qualidade do pescado ao longo da cadeia pós-captura.

## Discussão

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a análise de imagens do olho de *Pangasius sp.* constitui uma abordagem promissora para a avaliação objetiva do frescor e da qualidade do pescado, corroborando evidências previamente reportadas na literatura sobre a estreita relação entre alterações oculares e processos de deterioração pós-morte.

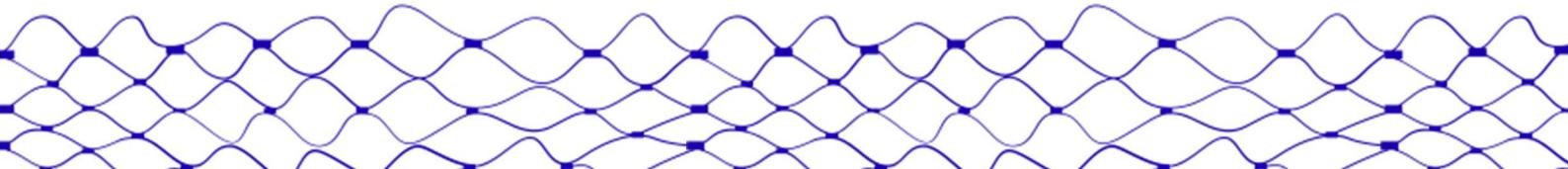
No trabalho de caracterização bioquímica de *Pangasius* armazenado em gelo (Dos Santos Cunha et al. 2024), os autores observaram que o avanço do tempo de estocagem está associado a alterações progressivas nos parâmetros bioquímicos, como aumento do pH, do nitrogênio básico volátil total (TVB-N) e da oxidação lipídica, refletindo a intensificação da autólise e da atividade microbiana. Tais processos bioquímicos estão diretamente relacionados às modificações estruturais observadas no olho do peixe, especialmente à perda de transparência do cristalino e à redução do brilho superficial, fenômenos também evidenciados nas imagens analisadas neste estudo.

De forma consistente, os resultados do presente trabalho indicaram redução do brilho médio e da reflexividade especular do olho à medida que o tempo de estocagem em gelo aumentou, particularmente evidente no exemplar analisado após 22 dias. Esses achados estão em consonância com o comportamento descrito por estudos físico-químicos clássicos, que associam a degradação proteica e a desorganização tecidual à perda das propriedades ópticas do olho do pescado.

Para Dos Santos Cunha et al. (2020), os olhos convexos, brilhantes e transparentes são característicos de peixes frescos, enquanto olhos opacos, afundados e com perda de brilho indicam estágios avançados de deterioração. A abordagem proposta neste estudo avança em relação a esses métodos tradicionais ao transformar descritores sensoriais subjetivos em variáveis matemáticas mensuráveis, como brilho, transparência, homogeneidade de textura e reflexividade, destacando que o olho é um dos principais indicadores utilizados em protocolos sensoriais.

A construção do Índice de Frescor Ocular (IFO) permitiu integrar múltiplos parâmetros visuais em um único valor numérico contínuo, reduzindo a subjetividade inerente às avaliações sensoriais convencionais. Embora o comportamento do IFO não tenha apresentado uma relação estritamente monotônica com o tempo de estocagem, fato esse já esperado em estudos piloto com amostragem limitada, o índice demonstrou sensibilidade às alterações ópticas observadas visualmente nas imagens, reforçando sua validade conceitual.

Adicionalmente, quando comparados aos resultados bioquímicos relatados na literatura, os valores do IFO refletem indiretamente o avanço dos processos de deterioração metabólica e microbiológica. O aumento da opacidade e a perda de definição estrutural dos olhos observados nas imagens correspondem às fases em



que estudos bioquímicos relatam elevação significativa de TVB-N e intensificação da atividade enzimática autolítica.

Dessa forma, o presente estudo se diferencia por propor uma metodologia não destrutiva, de baixo custo e aplicável em campo, em contraste com análises laboratoriais que demandam tempo, reagentes e infraestrutura especializada. Tal característica confere ao método potencial aplicação em cadeias produtivas artesanais e comerciais, feiras livres, unidades de beneficiamento e inspeção preliminar da qualidade do pescado.

Os resultados reforçam que a análise ocular, tradicionalmente utilizada como critério qualitativo, pode ser ressignificada como uma ferramenta quantitativa e objetiva quando associada à visão computacional e à modelagem matemática. Essa integração representa um avanço metodológico relevante e está alinhada às tendências contemporâneas de automação, rastreabilidade e garantia da qualidade no setor pesqueiro.

### **Considerações finais**

O presente estudo demonstrou que a análise de imagens do olho de *Pangasius sp.* constitui uma abordagem viável e promissora para a avaliação do frescor e da qualidade do pescado, permitindo a tradução de características tradicionalmente sensoriais em parâmetros quantitativos e mensuráveis. A partir dessa abordagem, foi possível desenvolver o Índice de Frescor Ocular (IFO), um modelo matemático integrador capaz de sintetizar múltiplas variáveis ópticas associadas às alterações pós-morte do peixe.

Os resultados obtidos evidenciaram que parâmetros como brilho, transparência, homogeneidade da textura e reflexividade especular do olho sofrem modificações sistemáticas com o avanço do tempo de estocagem em gelo, refletindo indiretamente os processos bioquímicos e estruturais descritos na literatura para a deterioração do pescado. Dessa forma, o IFO mostrou-se sensível às mudanças visuais observadas entre os diferentes estágios de frescor avaliados, confirmando sua aplicabilidade como ferramenta de triagem da qualidade.

O presente estudo contribui para o avanço do conhecimento ao propor um método não destrutivo, objetivo e reproduzível, capaz de complementar ou, em contextos específicos, substituir avaliações sensoriais subjetivas e análises laboratoriais mais onerosas. A integração entre ciência do pescado, visão computacional e modelagem matemática representa uma inovação metodológica alinhada às demandas contemporâneas por sistemas de monitoramento mais eficientes e acessíveis.

Sob a perspectiva aplicada, a metodologia apresenta elevado potencial de uso em ambientes produtivos e comerciais, como feiras livres, mercados de peixe, unidades de beneficiamento e cadeias produtivas artesanais, onde a infraestrutura laboratorial é limitada. A simplicidade do método, associada ao uso de imagens digitais, favorece sua futura implementação em dispositivos móveis, sistemas

automatizados de inspeção, IAs ou aplicativos de apoio à tomada de decisão na comercialização do pescado.

Apesar dos resultados promissores, reconhece-se que o estudo possui caráter exploratório, sendo necessária a ampliação do número amostral, a inclusão de diferentes lotes e condições de armazenamento, bem como a calibração do modelo para outras espécies de interesse comercial. Estudos futuros também poderão integrar o IFO a parâmetros bioquímicos e microbiológicos, além de técnicas de aprendizado de máquina, visando aumentar a robustez e a precisão do modelo.

Conclui-se, portanto, que o Índice de Frescor Ocular (IFO) representa uma ferramenta inovadora e de grande potencial para a avaliação do frescor do pescado, contribuindo para o fortalecimento da segurança alimentar, da qualidade do produto final e da sustentabilidade das cadeias produtivas do setor pesqueiro.

### Referências Bibliográficas

- BANWARI, A., JOSHI, R., SENGAR, N., & DUTTA, M. (2022). Computer vision technique for freshness estimation from segmented eye of fish image. *Ecol. Informatics*, 69, 101602. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101602>
- BERNARDI, D., MÁRSICO, E., & FREITAS, M. (2013). Quality Index Method (QIM) to assess the freshness and shelf life of fish. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 56, 587-598. <https://doi.org/10.1590/s1516-89132013000400009>
- BERNARDO, Y., ROSARIO, D., DELGADO, I., & CONTE-JUNIOR, C. (2020). Fish Quality Index Method: Principles, weaknesses, validation, and alternatives-A review.. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 19 5, 2657-2676. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12600>
- BERTINI, A., IACCHERI, E., MAGNANI, M., BADIANI, A., BONALDO, A., RAGNI, L., & BERARDINELLI, A. (2023). Nondestructive rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) freshness estimation by using an affordable open-ended coaxial technique. *Journal of food science*. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16584>
- CHENG, J., SUN, D., ZENG, X., & LIU, D. (2015). Recent Advances in Methods and Techniques for Freshness Quality Determination and Evaluation of Fish and Fish Fillets: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55, 1012 - 1225. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.769934>
- DE SOUZA, M., DA NÓBREGA FURTUNATO, D., DE CÁSSIA VIEIRA CARDOSO, R., ARGOLO, S., SILVA, I., & SANTOS, L. (2017). Evaluation of freshness of frozen seafood sold at the Municipal Market of São Francisco do Conde - BA. *Boletim Do Instituto De Pesca*, 39, 359-368. <https://institutodepesca.org/index.php/bip/article/view/1002/982>
- DOS SANTOS CUNHA, D. A., COELHO, A. V., FERREIRA, L. K. S., SAMPAIO, A. P. R., BRAGA, J. C. C. M., DE JESUS, G. D. S., ... & JUNIOR, A. R. T. (2020). Método de Índice de Qualidade aplicado para o *Pangasius bocourti* (Sauvage,

1880)(Suriliiformes; Pangasidae). Research, Society and Development, 9(10), e6449109032-e6449109032. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9032>

DOS SANTOS CUNHA, D. A., COELHO, A. V., FERREIRA, L. K. S., DOS SANTOS, E. C. B., & JUNIOR, A. R. T. (2024). Características físicas e bioquímicas do filé de *Pangasius bocourti* cultivado em Bom Jardim, Estado do Maranhão, Brasil. *Acta of Fisheries and Aquatic Resources*, 12(2), 12-22. <https://doi.org/10.46732/actafish.2024.12.2.12-22>

EKOJONO, E., HERMAN, A., & MUSTIKA, M. (2021). Identification of Freshness of Marine Fish Based on Image of Hue Saturation Value and Morphology. *Inform: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi Informasi dan Komunikasi*, 6(1), 40-48. <https://doi.org/10.25139/inform.v6i1.3228>

ESTEVES, E., & ANÍBAL, J. (2020). Sensory evaluation of seafood freshness using the quality index method: A meta-analysis. *International journal of food microbiology*, 337, 108934. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108934>

FONTES, M., ESTEVES, A., CALDEIRA, F., SARAIVA, C., VIEIRA-PINTO, M., & MARTINS, C. (2007). Estado de frescor e qualidade higiênica do pescado vendido numa cidade do interior de Portugal. *Arquivo Brasileiro De Medicina Veterinaria E Zootecnia*, 59, 1308-1315. <https://doi.org/10.1590/s0102-09352007000500031>

FREITAS, J., VAZ-PIRES, P., & CÂMARA, J. (2019). Freshness Assessment and Shelf-Life Prediction for *Seriola dumerili* from Aquaculture Based on the Quality Index Method. *Molecules*, 24(19), 3530. <https://doi.org/10.3390/molecules24193530>

FREITAS, J., VAZ-PIRES, P., & CÂMARA, J. (2021). Quality Index Method for fish quality control: Understanding the applications, the appointed limits and the upcoming trends. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 333-345. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.011>

HARALICK, R. M.; SHANMUGAM, K.; DINSTEIN, I. (1973) Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 3(6), 610-621. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>

HOANG, P., TRINH, N., TRAN, V., & PHAN, T. (2025). Enhanced Fish Freshness Classification with Incremental Handcrafted Feature Fusion. *ArXiv*, abs/2510.17145. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2510.17145>

HOSSAIN, M., SHIKHA, F., & YEASMIN, S. (2021). Changes in gel forming ability and protein solubility of pangasius (*Pangasianodon hypophthalmus*) muscle at different rigor stages during storage at room temperature (28 to 32°C) and in ice. *Bangladesh Journal of Fisheries*, 32(2), 313–322. <https://doi.org/10.52168/bjf.2020.32.36>

HUANG, Y., LIU, Y., JIN, Z., CHENG, Q., QIAN, M., ZHU, B., & DONG, X. (2021). Sensory evaluation of fresh/frozen mackerel products: A review.

Comprehensive reviews in food science and food safety, 20(4), 3504-3530.  
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12776>

IACCHERI, E., CEVOLI, C., FRANCESCHELLI, L., TARTAGNI, M., RAGNI, L., & BERARDINELLI, A. (2022). Radio-frequency and optical techniques for evaluating anchovy freshness. Biosystems Engineering, 223(Part B) 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.12.024>

IKASARI, D., & SURYANINGRUM, T. (2015). Quality changes of pangasius fillets during ice storage. Squalen Bulletin of Marine and Fisheries Postharvest and Biotechnology, 10, 109-120. <https://doi.org/10.15578/squalen.v10i3.134>

JEYAKUMARI, A., ROY, R., NINAN, G., & RENUKA, V. (2017). Effect of spice extracts on the biochemical, textural and sensory attributes of Pangasius (*Pangasius hypophthalmus*) chunks during ice storage. The Indian journal of nutrition and dietetics, 54, 149-160. <https://doi.org/10.21048/ijnd.2017.54.2.15542>

LALABADI, H., SADEGHI, M., & MIREEI, S. (2020). Fish freshness categorization from eyes and gills color features using multi-class artificial neural network and support vector machines. Aquacultural Engineering, 90, 102076. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102076>

MONTEIRO, M., MÁRSICO, E., & CONTE, C. (2017). Procedimentos ômicos aplicados em qualidade e segurança de pescado. Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science, 54, 1-17. <https://doi.org/10.11606/issn.1678-4456.bjvras.2017.114234>

ÓLAFSDÓTTIR, G., MARTINSDÓTTIR, E., OEHLENSCHLÄGER, J., DALGAARD, P., JENSEN, B., UNDELAND, I., MACKIE, I., HENEHAN, G., NIELSEN, J., & NILSEN, H. (1997). Methods to evaluate fish freshness in research and industry. Trends in Food Science and Technology, 8, 258-265. [https://doi.org/10.1016/s0924-2244\(97\)01049-2](https://doi.org/10.1016/s0924-2244(97)01049-2)

OMWANGE, K., RIZA, D., SEN, N., SHIIGI, T., KURAMOTO, M., OGAWA, Y., KONDO, N., & SUZUKI, T. (2020). Fish freshness monitoring using UV-fluorescence imaging on Japanese dace (*Tribolodon hakonensis*) fisheye. Journal of Food Engineering, 287, 110111. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110111>

PRABHAKAR, P., VATSA, S., SRIVASTAV, P., & PATHAK, S. (2020). A comprehensive review on freshness of fish and assessment: Analytical methods and recent innovations.. Food research international, 133, 109157. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109157>

ROCCULI, P., CEVOLI, C., TAPPI, S., GENOVESE, J., URBINATI, E., PICONE, G., FABBRI, A., CAPOZZI, F., & ROSA, M. (2019). Freshness assessment of European hake (*Merluccius merluccius*) through the evaluation of eye chromatic and morphological characteristics.. Food research international, 115, 234-240. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.091>

SHIKHA, F., HOSSAIN, M., & YESMIN, S. (2021). Changes in Physico-Chemical and Microbiological Parameters of Pangas (*Pangasius pangasius*) Muscle During Ice Storage. *Journal of Environmental Science and Natural Resources*, 12, 199-208. <https://doi.org/10.3329/jesnr.v12i1-2.52037>

SRIKET, P., & LA-ONGNUAL, T. (2018). Quality Changes and Discoloration of Basa (*Pangasius bocourti*) Fillet during Frozen Storage. *Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1155/2018/5159080>

TAPPI, S., ROCCULI, P., CIAMPA, A., ROMANI, S., BALESTRA, F., CAPOZZI, F., & ROSA, D. (2017). Computer vision system (CVS): a powerful non-destructive technique for the assessment of red mullet (*Mullus barbatus*) freshness. *European Food Research and Technology*, 243, 2225-2233. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2924-0>

WU, L., PU, H., & SUN, D. (2019). Novel techniques for evaluating freshness quality attributes of fish: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 83, 259-273. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.12.002>

YILDIZ, M., YASIN, E., & KOKLU, M. (2024). Fisheye freshness detection using common deep learning algorithms and machine learning methods with a developed mobile application. *European Food Research and Technology*, 250, 1919 - 1932. <https://doi.org/10.1007/s00217-024-04493-0>

ZHANG, Z., SUN, Y., SANG, S., JIA, L., & OU, C. (2022). Emerging Approach for Fish Freshness Evaluation: Principle, Application and Challenges. *Foods*, 11(13), 1897. <https://doi.org/10.3390/foods11131897>