



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA DE RECURSOS
NATURAIS

ALINE ALMEIDA DA SILVA

EFEITO DOS REVESTIMENTOS À BASE DE CARRAGENANA EXTRAÍDA DE
***Hypnea pseudomusciformis* NA VIDA ÚTIL DE FILÉS DE SALMÃO (*Salmo salar*)**
REFRIGERADO.

FORTALEZA

2025

ALINE ALMEIDA DA SILVA

EFEITO DOS REVESTIMENTOS À BASE DE CARRAGENANA EXTRAÍDA DE *Hypnea pseudomusciformis* NA VIDA ÚTIL DE FILÉS DE SALMÃO (*Salmo salar*)
REFRIGERADO.

Tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia de Recursos Naturais, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Biotecnologia de Recursos Naturais. Área de concentração: Biotecnologia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Bartolomeu Warlene Silva de Souza.

FORTALEZA

2025

ALINE ALMEIDA DA SILVA

EFEITO DOS REVESTIMENTOS À BASE DE CARRAGENANA EXTRAÍDA DE *Hypnea pseudomusciformis* NA VIDA ÚTIL DE FILÉS DE SALMÃO (*Salmo salar*)
REFRIGERADO.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia de Recursos Naturais, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Biotecnologia de Recursos Naturais. Área de concentração: Biotecnologia de Alimentos.

Aprovado em: 18/12/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bartolomeu Warlene Silva de Souza (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. André Luís Coelho da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Cláudia Brandão Vieira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Karolina Costa de Sousa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Sara Monaliza Sousa Nogueira
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

À Deus.

Aos meus pais, Carmen Maria (*in memoriam*)

e Elias Luciano (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À Deus, Senhor de todas as coisas, por ter me dado saúde, sabedoria, força e uma chance de recomeçar. E por ter colocado pessoas especiais ao meu lado, sem as quais eu não teria conseguido a realização deste trabalho.

Ao meu amado marido, Wagner Santos, por estar sempre presente, acreditando, me encorajando. Por sua infinita paciência e dedicação em me ajudar sempre e de todas as formas possíveis.

Aos meus queridos irmãos, Nilton Luciano, Felipe Luciano e Danilo Luciano, por terem acreditado na minha capacidade e me encorajado.

Às minhas lindas sobrinhas Bianca Viana e Ivna Rodrigues, pelos momentos de alegria e pelas brincadeiras.

À Universidade Federal do Ceará, principalmente ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia de Recursos Naturais pela disponibilização da equipe de professores que o compõem, do espaço dos laboratórios e do suporte necessário para realização deste projeto.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Em especial, gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Prof.º Dr. Bartolomeu Warlene Silva de Sousa por sua orientação impecável, paciência infinita e enorme generosidade. Agradeço também à sua compreensão e apoio inabalável quando precisei me afastar para tratamento de câncer: sua empatia e flexibilidade foram fundamentais para que eu pudesse cuidar da minha saúde sem comprometer o progresso acadêmico.

Obrigada por acreditar no meu potencial e por inspirar em mim o rigor científico e a paixão pela pesquisa.

Aos professores: pela contribuição na finalização desta pesquisa.

Aos servidores do Departamento de Engenharia de Pesca, em especial, Cláudia e Cíntia por toda a colaboração e amizade, obrigada.

Às pessoas que contribuíram diretamente neste projeto, por toda ajuda e colaboração na elaboração das formulações e análises.

A todos os amigos que a Universidade Federal do Ceará me presenteou, em especial, Kamilla Freitas pela amizade, parceria, ajuda e companheirismo sempre encontrados.

A todos os familiares e amigos que de forma direta ou indireta contribuíram para que este projeto fosse finalizado, meus mais sinceros agradecimentos.

“Não há comparação entre o que se perde por
fracassar e o que se perde por não tentar”.

(Francis Bacon).

RESUMO

A preservação do pescado refrigerado é um desafio econômico e sanitário devido à elevada susceptibilidade ao crescimento microbiano e às reações químicas que degradam qualidade sensorial e nutricional. Revestimentos comestíveis baseados em polissacarídeos marinhos têm sido propostos como barreiras físicas e sistemas de liberação de agentes conservantes, entre eles, a carragenana extraída de algas vermelhas destaca-se por sua disponibilidade, biocompatibilidade e boas propriedades formadoras de filme. Este estudo avaliou o efeito de revestimentos comestíveis à base de carragenana, extraída da macroalga *Hypnea pseudomusciformis*, sobre a vida útil e qualidade de filés de salmão (*Salmo salar*) armazenados a 0 °C por 18 dias. A carragenana foi obtida por extração aquosa (etapas a 25 °C e 80 °C), precipitação em etanol, diálise e liofilização, e as soluções poliméricas foram preparadas nas concentrações de 1,0; 1,5 e 2,0% (m/v) com e sem Tween 80. Ensaio de molhabilidade (coeficiente de espalhamento W_s) preliminares orientaram a escolha da formulação aplicada. A solução de 1,0% (m/v) sem surfactante apresentou o melhor compromisso entre viscosidade, espalhamento e repetibilidade e foi selecionada para aplicação em filés. Foram realizadas análises de FTIR e tensões superficiais. Durante o armazenamento foram monitorados pH, N-BVT, N-TMA, TBARS, contagem total de aeróbios (TPC) e valor de K por HPLC. O revestimento retardou a cinética de degradação de nucleotídeos, reduzindo o incremento do índice K em ~25% e mantendo os filés na faixa de frescor moderado ($K < 40\%$) por 15 dias, contra 12 dias no controle. Paralelamente, a TPC nos filés revestidos permaneceu abaixo de 7,0 \log_{10} UFC/g até o 15º dia, enquanto o controle ultrapassou esse limite no 12º dia, indicando extensão de 3 dias na vida útil microbiológica. A espectroscopia FTIR confirmou alta pureza e reprodutibilidade da carragenana extraída. Esses resultados sustentam o potencial da carragenana de *H. pseudomusciformis* como barreira física promissora para conservação de pescado refrigerado.

Palavras-chave: conservação de pescado; qualidade físico-química; índice de K.

ABSTRACT

The preservation of refrigerated fish is an economic and sanitary challenge due to its high susceptibility to microbial growth and chemical reactions that impair sensory and nutritional quality. Edible coatings based on marine polysaccharides have been proposed as physical barriers and delivery systems for preservative agents. Among them, carrageenan extracted from red algae stands out for its availability, biocompatibility, and good film-forming properties. This study evaluated the effect of carrageenan-based edible coatings, extracted from the macroalga *Hypnea pseudomusciformis*, on the shelf life and quality of salmon fillets (*Salmo salar*) stored at 0 °C for 18 days. The carrageenan was obtained by aqueous extraction (steps at 25 °C and 80 °C), ethanol precipitation, dialysis, and lyophilization, and the polymer solutions were prepared at concentrations of 1.0, 1.5, and 2.0% (w/v), with and without Tween 80. Preliminary wettability assays (spreading coefficient W_s) guided the selection of the applied formulation. The 1.0% (w/v) solution without surfactant showed the best balance between viscosity, spreading ability, and repeatability, and was selected for application to the fillets. FTIR analyses and surface tension measurements were performed. During storage, pH, TVB-N, TMA-N, TBARS, total aerobic count (TPC), and K-value by HPLC were monitored. The coating delayed nucleotide degradation kinetics, reducing the increase in K-value by ~25% and keeping the fillets within the moderate freshness range ($K < 40\%$) for 15 days, compared to 12 days in the control. In parallel, TPC in coated fillets remained below 7.0 log₁₀ CFU/g until day 15, while the control exceeded this limit on day 12, indicating a 3-day extension in microbiological shelf life. FTIR spectroscopy confirmed the high purity and reproducibility of the extracted carrageenan. These results support the potential of *H. pseudomusciformis* carrageenan as a promising physical barrier for the preservation of refrigerated fish.

Keywords: fish preservation; physicochemical quality; K-value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo de extração da carragenana da alga vermelha <i>Hypnea pseudomusciformis</i>	51
--	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Efeito do revestimento de carragenana no Índice de K (%) em filés de <i>Salmo salar</i> ao longo do armazenamento refrigerado a 0 °C durante 18 dias.....	62
Gráfico 2	– Espectroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) para a Carragenana extraída da <i>H. pseudomusciformis</i> na faixa de 4000 a 500 cm ⁻¹	64
Gráfico 3	– Influência do revestimento à base de carragenana sobre os valores de pH em filés de <i>Salmo salar</i> sob armazenamento refrigerado a 0 °C durante 18 dias.....	68
Gráfico 4	– Evolução do teor de Nitrogênio das Bases Voláteis Totais (N-BVT, mg/100 g) em filés de <i>Salmo salar</i> armazenados a 0 °C durante 18 dias: comparação entre amostra controle e amostra revestida com carragenana.....	70
Gráfico 5	– Evolução dos teores de Nitrogênio de Trimetilamina (N-TMA, mg/100 g) em filés de <i>Salmo salar</i> armazenados a 0 °C durante 18 dias: comparação entre amostra controle e amostra revestida com carragenana.....	73
Gráfico 6	– Evolução dos teores de Substâncias Reativas ao Ácido Tibarbitúrico (TBARS, mg MDA eq./kg) em filés de <i>Salmo salar</i> durante armazenamento a 0 °C. Comparação entre amostra controle e amostra revestida com carragenana.....	75
Gráfico 7	– Impacto do revestimento à base de carragenana sobre a contagem total de bactérias aeróbias em filés de <i>Salmo salar</i> armazenados a 0 °C durante 18 dias.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Comparação dos principais diferenciais entre as três macroalgas.....	32
Tabela 2	– Coeficiente de espalhamento (Ws) obtido para as soluções de carragenana testadas em filés de salmão.....	61
Tabela 3	– Atribuição dos picos FTIR do revestimento e seus impactos nas propriedades do filme.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADP	Adenosina difosfato
AMP	Adenosina monofosfato
APHA	American Public Health Association
ATP	Adenosina trifosfato
DHA	Ácido docosahexaenoico
EPA	Ácido eicosapentaenoico
FAO	Food and Agriculture Organization
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
HPLC	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
Hx	Hipoxantina
Ino	Inosina
KOH	Hidróxido de Potássio
NaOH	Hidróxido de Sódio
N-BVT	Nitrogênio das Bases Voláteis Totais
N-TMA	Nitrogênio da Trimetilamina
TBARS	Substâncias Reativas ao Ácido Tiobarbitúrico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivos específicos	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1	Características nutricionais e tecnológicas do salmão (<i>Salmo salar</i>)	21
3.2	Mecanismos de deterioração de pescado	22
3.3	Indicadores de frescor em pescado	24
3.4	Revestimentos comestíveis: definição, composição e função	25
3.5	Alga marinha vermelha <i>Hypnea pseudomusciformis</i>	27
3.5.1	<i>Caracterização botânica, distribuição e cultivo</i>	27
3.5.2	<i>Composição química - carragenanas, compostos fenólicos, pigmentos</i>	28
3.5.3	<i>Potencial na obtenção de biomateriais para revestimentos comestíveis</i>	30
3.5.4	<i>Cultivo de <i>Hypnea pseudomusciformis</i> em Flecheiras, Ceará: Sustentabilidade e Produtividade</i>	31
3.6	Diferenciais entre <i>Hypnea pseudomusciformis</i>, <i>Kappaphycus alvarezii</i> e <i>Eucheuma denticulatum</i>	32
3.7	Carragenana	34
3.7.1	<i>Origem em algas vermelhas do gênero <i>Hypnea</i></i>	34
3.7.2	<i>Métodos de extração de carragenana</i>	35
3.7.3	<i>Estrutura, propriedades e aplicações</i>	36
3.7.4	<i>Matriz para revestimentos comestíveis em pescado</i>	39
3.8	Análises espectroscópicas aplicadas a alimentos	40
3.8.1	<i>Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i>	41
3.8.1.1	<i>Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) na avaliação de pescado e de filmes</i>	42
3.8.1.2	<i>Aplicação da Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) na caracterização de degradação lipídica e interação revestimento– músculo do pescado</i>	43
3.9	Parâmetros físico-químicos na conservação de pescado	44
3.9.1	<i>Potencial hidrogeniônico (pH)</i>	44

3.9.2	<i>Nitrogênio das Bases Voláteis Totais (N-BVT): composto associado à desaminação bacteriana</i>	45
3.9.3	<i>Substâncias Reativas ao Ácido Tiobarbitúrico (TBARS): medidor da oxidação lipídica em pescado</i>	46
3.9.4	<i>Determinação da tensão superficial crítica de acordo com Zisman</i>	47
3.10	Desafios e perspectivas futuras na aplicação de revestimentos comestíveis para conservação de pescado	48
4	MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1	Material biológico	50
4.2	Processo de extração da carragenana a partir de alga <i>Hypnea pseudomusciformis</i>	50
4.3	Preparo das soluções dos revestimentos comestíveis	51
4.4	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos revestimentos	52
4.5	Determinação da Tensão Superficial Crítica	52
4.6	Análise da Molhabilidade	53
4.7	Critério de escolha para aplicação dos revestimentos em salmão	54
4.8	Aplicação do revestimento nos filés de salmão	54
4.9	Análises físico-químicas para a vida de prateleira dos filés de salmão	55
4.9.1	<i>Determinação do pH</i>	55
4.9.2	<i>Determinação do Nitrogênio das Bases Voláteis Totais (N-BVT) e Nitrogênio da Trimetilamina (N-TMA)</i>	55
4.9.3	<i>Determinação de Substâncias Reativas ao Ácido Tiobarbitúrico (TBARS)</i>	56
4.9.4	<i>Determinação do Valor de K</i>	57
4.10	Análises microbiológicas	57
4.10.1	<i>Preparo das Amostras</i>	58
4.10.2	<i>Preparo das Placas e Incubação</i>	58
4.10.3	<i>Determinação do Número de Unidades Formadoras de Colônias (UFC)</i>	58
4.11	Análises estatísticas	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1	Molhabilidade	60
5.2	Valor de K	62

5.3	Análise de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos revestimentos	64
5.4	Tensão Superficial Crítica.....	65
5.5	Determinação do pH.....	67
5.6	Nitrogênio das Bases Voláteis Totais (N-BVT).....	69
5.7	Nitrogênio de Trimetilamina (N-TMA).....	71
5.8	Substâncias Reativas ao Ácido Tiobarbitúrico (TBARS).....	74
5.9	Análise microbiana.....	76
6	CONCLUSÃO.....	80
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

A aquicultura é o setor de produção de proteína animal que mais cresce globalmente, superando a produção de carne bovina e pesca extrativa em volume para consumo humano desde o ano de 2016 (BOYD *et al.*, 2022; VERDEGEM *et al.*, 2023). Além de seu notável desempenho em termos de produtividade, destaca-se por ser uma das formas mais eficientes e sustentáveis de obtenção de proteína animal, apresentando impactos ambientais reduzidos em comparação a outras cadeias produtivas (BOYD *et al.*, 2020; NIE; HALLERMAN, 2021). O crescimento da aquicultura é impulsionado por sistemas produtivos diversificados, intensificação tecnológica e melhor manejo alimentar (BOYD *et al.*, 2022; VERDEGEM *et al.*, 2023).

Nesse cenário, o pescado surge como uma importante alternativa alimentar para um futuro mais equilibrado em termos ecológicos (SETO; FIORELLA, 2017; KOEHN *et al.*, 2022; BERNHARDT; O'CONNOR, 2021). O aumento da renda disponível, a expansão das áreas urbanas, o aprimoramento das técnicas de pós-colheita e a transição dos padrões alimentares projetam um acréscimo de aproximadamente 12% no consumo de pescado, elevando-o a cerca de 21,3 kg per capita até 2032 (FAO, 2024).

Os pescados exercem um papel essencial na alimentação humana, principalmente pelo seu alto valor nutricional (FARAG *et al.*, 2023). São fontes ricas em proteínas de alto valor biológico (AHMED *et al.*, 2022; PRAKASH *et al.*, 2023), ácidos graxos poli-insaturados, com destaque para os ômega-3 e ômega-6, além de fornecerem diversos micronutrientes como selênio, vitamina B12, vitamina D3, fósforo e minerais fundamentais para o funcionamento do organismo (TILAMI; SAMPELS, 2018; BALAMI, *et al.*, 2019; PRAKASH *et al.*, 2023). O consumo regular de pescado está associado à prevenção de doenças cardiovasculares (PANAGIOTAKOS; KOUVARI, 2021; MOHAN, *et al.*, 2021) à manutenção da saúde neurológica (SASAKI *et al.*, 2024; KIM; JE, 2022) e à melhoria da função imunológica (MENDIVIL, 2021; HENRY *et al.*, 2024).

Entre os peixes mais valorizados nutricionalmente, o salmão (*Salmo salar*) ocupa posição de destaque. Ele é reconhecido por ser uma das melhores fontes dietéticas de EPA (ácido eicosapentaenoico) e DHA (ácido docosahexaenoico) (REKSTEN *et al.*, 2021; MAI *et al.*, 2024), dois ácidos graxos ômega-3 de cadeia longa que exercem papéis fundamentais na regulação da função cardíaca e na manutenção da saúde neurológica (MOLVERSAMYR, *et al.*, 2022; KOLANOWSKI, 2021). Além disso, o salmão contribui significativamente para os

níveis de vitamina D₃ no organismo, promovendo a saúde óssea e imunológica (SOTO-DÁVILA, 2020; LOZANO-MUÑOZ *et al.*, 2020). Por seu perfil nutricional, também fornece proteínas de alta digestibilidade (ASENSIO-GRAU *et al.*, 2021), além de selênio (SELE *et al.*, 2018) e vitamina B₁₂ (REKSTEN *et al.*, 2021), integrando uma dieta saudável e funcional.

No entanto, a elevada perecibilidade do salmão representa um desafio para a indústria de alimentos (JÄÄSKELÄINEN *et al.*, 2019; ASCHE *et al.*, 2021). Sua rápida deterioração, provocada por fatores como atividade microbiana (JACOBSEN *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2023), oxidação lipídica (YIN *et al.*, 2024; DIAS *et al.*, 2019) e degradação enzimática (VALENCIA *et al.*, 2021), comprometem não apenas sua qualidade sensorial (WANG *et al.*, 2017) e nutricional (LU *et al.*, 2024; QI *et al.*, 2022), mas também sua segurança e vida útil. A presença de bactérias específicas (LEMOS *et al.*, 2023; LI *et al.*, 2023) e a liberação de compostos voláteis tornam-se indicativos da perda de frescor, exigindo estratégias eficazes de conservação (XUAN *et al.*, 2022; KRITIKOS *et al.*, 2020).

Entre as abordagens mais utilizadas destacam-se o congelamento, a liofilização, o armazenamento hiperbárico, tratamentos com luz e a aplicação de revestimentos antimicrobianos (OVELAND *et al.*, 2024; FIDALGO *et al.*, 2021; HUANG *et al.*, 2021; ZENG *et al.*, 2023; CHEN *et al.*, 2024; CAI *et al.*, 2022; CUI *et al.*, 2022a).

No âmbito das diversas tecnologias disponíveis, os revestimentos comestíveis têm se destacado como uma estratégia prática e promissora. Esses filmes formam uma barreira física capaz de retardar processos de oxidação lipídica e crescimento microbiano, além de poderem ser enriquecidos com compostos funcionais, incluindo agentes antimicrobianos naturais e antioxidantes (HUA *et al.*, 2022; GONZÁLEZ-GRAGERA *et al.*, 2024). Materiais como quitosana, colágeno e óleos essenciais já demonstraram bons resultados na conservação de pescado (MERLO *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2024; SOARES *et al.*, 2017; SOUZA *et al.*, 2010; CUI *et al.*, 2022; XIONG *et al.*, 2021; HE *et al.*, 2020). Especificamente, o uso da carragenana como agente formador de filme apresenta vantagens significativas no prolongamento da vida útil de produtos perecíveis como o salmão (ZHANG *et al.*, 2024; KARIMZADEH *et al.*, 2024; FALCÓ *et al.*, 2019).

A carragenana, um polissacarídeo obtido de algas vermelhas (por exemplo *Hypnea pseudomusciformis*, *Kappaphycus alvarezii* e *Eucheuma denticulatum*), tem sido amplamente estudada por suas propriedades tecnológicas e funcionais (RUPERT *et al.*, 2022; ANGGRAINI e LO, 2023). É capaz de formar filmes com boa aderência, elasticidade e resistência, além de

ser biodegradável e comestível (THAKUR *et al.*, 2016; DMITRENKO *et al.*, 2023; BARIZÃO *et al.*, 2020; MARTINY *et al.*, 2020; FARHAN; HANI, 2017). Esses revestimentos funcionam como barreiras eficazes contra oxigênio, umidade e contaminações externas, contribuindo para a preservação das características sensoriais e nutricionais do alimento (TAVASSOLI-KAFRANI *et al.*, 2016; NIKRAVAN *et al.*, 2024; HE; WANG, 2022; LI *et al.*, 2024). Estudos recentes têm mostrado que a carragenana, especialmente quando associada a compostos bioativos, oligosacarídeos ou indicadores visuais, apresenta potencial para inibir o crescimento microbiano e retardar a oxidação de pescados armazenados sob refrigeração e sob congelamento (ZHANG *et al.*, 2018; VOLPE *et al.*, 2019; SHAVISI, 2024; ZHANG *et al.*, 2020; GUO *et al.*, 2025).

Hypnea pseudomusciformis, *Kappaphycus alvarezii* e *Eucheuma denticulatum* são macroalgas vermelhas de interesse comercial, mas apresentam diferenças marcantes em fisiologia, cultivo, diversidade genética e potencial de uso. *Hypnea pseudomusciformis* reúne atributos ecológicos e produtivos que a tornam adequada para expansão da maricultura: elevada plasticidade fisiológica e diversidade genética entre ecótipos, desempenho superior em condições tropicais e possibilidade de cultivo com substratos simples e de baixo custo, o que facilita adoção por pequenos produtores e comunidades (NAUER *et al.*, 2020; PEREIRA *et al.*, 2020b).

Embora *Kappaphycus alvarezii* e *Eucheuma denticulatum* dominem o mercado de carragenana, sua produção em larga escala é vulnerável a doenças, epifitismo e variações ambientais, comprometendo a estabilidade produtiva. Por oferecer diversificação de produtos (metabólitos bioativos além da carragenana) e menor exigência de infraestrutura, *H. pseudomusciformis* representa uma alternativa estratégica para reduzir riscos e agregar valor regional (NARVARTE *et al.*, 2025; GACURA *et al.*, 2025; PEREIRA *et al.*, 2020b; BARILLÉ *et al.*, 2025; TAHILUDDIN; DAMSIK, 2023; NDAWALA *et al.*, 2022).

Técnicas analíticas como o FTIR (Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier) têm sido utilizadas para caracterizar tanto revestimentos quanto a matriz alimentar, bem como detectar alterações estruturais associadas à degradação do pescado (HAGHIGHI; YAZDANPANA, 2020; GOVARI *et al.*, 2021; ZENG *et al.*, 2019; EZATI; RHIM, 2020). Da mesma forma, o valor de K, indicador baseado na degradação do ATP em compostos como inosina e hipoxantina, vem sendo adotado como marcador objetivo e confiável do frescor de peixes, inclusive do salmão (AGYEKUM *et al.*, 2020; KUNJULAKSHMI *et al.*, 2020; OMWANGE *et al.*, 2021; JIA *et al.*, 2021). A integração desses parâmetros físico-

químicos, microbiológicos e sensoriais permite uma avaliação mais precisa da eficácia dos revestimentos na conservação dos alimentos.

Diante desse cenário, o presente estudo propõe-se a investigar o efeito de revestimentos comestíveis à base de carragenana sobre a vida útil de filés de salmão durante o armazenamento refrigerado. Foram analisados aspectos microbiológicos e físico-químicos ao longo do tempo, com o intuito de validar o uso da carragenana como uma estratégia eficaz, segura e ambientalmente responsável de conservação. Esta pesquisa visa contribuir com o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para a indústria alimentícia, promovendo a segurança alimentar, a redução do desperdício e o consumo de produtos que apresentam maior qualidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar os parâmetros físico-químicos e microbiológicos de revestimentos comestíveis à base de carragenana, extraída da macroalga marinha vermelha *Hypnea pseudomusciformis*, sobre a vida útil e a qualidade de filés de *Salmo salar* armazenados sob refrigeração a 0 °C por 18 dias.

2.2 Objetivos específicos

- Extrair e caracterizar a carragenana obtida da alga *Hypnea pseudomusciformis*, determinando suas propriedades físico-químicas e estruturais;
- Desenvolver e otimizar formulações de revestimentos comestíveis à base de carragenana para aplicação em filés de salmão;
- Avaliar a influência dos revestimentos comestíveis na qualidade físico-químicas dos filés de *Salmo salar*, considerando parâmetros como pH, N-BVT (Nitrogênio das Bases Voláteis Totais), N-TMA (Nitrogênio de Trimetilamina), TBARS (Substâncias Reativas ao Ácido Tiobarbitúrico);
- Investigar a estabilidade microbiológica dos filés de *Salmo salar* ao longo do tempo de armazenamento, por meio da contagem total de aeróbios;
- Analisar o efeito dos revestimentos na degradação de nucleotídeos (valor de K), como indicador de frescor do pescado;
- Comparar os resultados com a amostra controle (sem revestimento) para determinar a eficácia da carragenana na extensão da vida útil de filés de *Salmo salar* refrigerado.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Características nutricionais e tecnológicas do salmão (*Salmo salar*)

O salmão do Atlântico (*Salmo salar*) figura entre os produtos aquáticos de maior valor agregado (PEDRÓS-GARRIDO *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2024) e está entre as espécies mais produzidas em aquicultura no mundo (MINICH *et al.*, 2020). A produção global de salmão do Atlântico em 2025 deverá atingir aproximadamente 2,93 milhões de toneladas, impulsionada por um crescimento de 3% na produção de aquicultura. A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) prevê um crescimento moderado geral na oferta global de salmão para o ano (FAO, 2025).

A composição de gorduras e proteínas no salmão do Atlântico (*Salmo salar*) apresenta padrões gerais bem definidos. Em termos de lipídios, os filés costumam apresentar entre 11 e 16% de gordura em peso úmido, com variações que dependem da proveniência e do regime alimentar (SPRAGUE *et al.*, 2020). Desses lipídios, de 5,6% a 16,6% correspondem a ácidos graxos ômega-3 de cadeia longa, especialmente EPA (ácido eicosapentaenoico) e DHA (ácido docosahexaenoico), cujos níveis são fortemente influenciados pelo tipo de óleo incluído na dieta, seja de origem marinha ou vegetal (MOLVERSMYR *et al.*, 2022; WEI *et al.*, 2022; SPRAGUE *et al.*, 2020).

Quanto ao perfil proteico, o teor de proteínas nos filés geralmente varia entre 17,5% e 20% do peso úmido (SPRAGUE *et al.*, 2020). O salmão apresenta um perfil completo de aminoácidos essenciais entre eles arginina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptofano e valina que possuem elevada digestibilidade, o que favorece sua rápida absorção pelo organismo (TIBBETTS; PATELAKIS, 2022; TIBBETTS *et al.*, 2024; JENSEN *et al.*, 2020). Além disso, suas proteínas geram peptídeos bioativos que podem ser recuperados a partir de resíduos do processamento. Esses peptídeos têm grande potencial para serem incorporados em alimentos funcionais e formulações nutracêuticas, adicionando valor nutricional e promovendo benefícios à saúde (HAQ *et al.*, 2024).

O salmão se deteriora facilmente devido a diversos fatores, as variações de temperatura, sobretudo os ciclos de congelamento e descongelamento, intensificam a oxidação lipídica. Esse fenômeno modifica o perfil de compostos voláteis e a coloração do tecido, além de promover a formação de aldeídos que conferem odores indesejáveis (YIN *et al.*, 2024). Como consequência, as propriedades organolépticas do peixe como cor, aroma e sabor, são significativamente prejudicadas, comprometendo sua aceitação sensorial junto aos

consumidores (AL-SAGHIR *et al.*, 2004; YIN *et al.*, 2024). Além disso, a oxidação lipídica acarreta a degradação de ácidos graxos essenciais, gera substâncias voláteis indesejáveis (em especial aldeídos), altera a textura e reduz, de modo geral, a atratividade do produto final (TIRONI *et al.*, 2007; YIN *et al.*, 2024; MERLO *et al.*, 2019; XU *et al.*, 2015).

Recursos como o emprego de atmosferas controladas, técnicas de super-resfriamento e armazenamento sob alta pressão têm se mostrado eficazes para estender a vida útil do salmão, ao mesmo tempo em que atenuam processos oxidativos e preservam suas propriedades físico-químicas em níveis superiores aos métodos convencionais (ABEL *et al.*, 2019; FIDALGO *et al.*, 2021; FIDALGO *et al.*, 2020; CHAN *et al.*, 2024). De uma forma complementar, a aplicação de filmes e revestimentos com atividade antimicrobiana por exemplo, sistemas fotodinâmicos de inativação de microrganismos, inibe significativamente o crescimento bacteriano e contribui para a manutenção da integridade das proteínas e do perfil de aminoácidos essenciais (CHEN, L. *et al.*, 2024). Por fim, abordagens emergentes, como a utilização de campos magnéticos oscilantes e pulsos elétricos durante o super-resfriamento, minimizam a formação de cristais de gelo, garantindo a conservação da estrutura tecidual e da estabilidade microbiológica do produto (LEE *et al.*, 2024; TAVARES *et al.*, 2021).

3.2 Mecanismos de deterioração de pescado

A deterioração do pescado após a captura é um processo rápido e multifatorial, envolvendo principalmente a ação de microrganismos, reações físico-químicas e alterações relacionadas a temperatura, pH e umidade (GARCÍA *et al.*, 2022; ADANDÉ *et al.*, 2020).

Durante o armazenamento e no processamento de pescados, observa-se uma mudança significativa na microbiota, com destaque para os gêneros *Pseudomonas* e *Shewanella*, reconhecidos como principais agentes de deterioração e potenciais patógenos em peixes. *Pseudomonas* tende a dominar em todas as fases de refrigeração de pescados, sejam exemplares inteiros, eviscerados ou em filés (SYROPOULOU *et al.*, 2021; MØRETRØ *et al.*, 2016; ZHUANG *et al.*, 2022b; SYROPOULOU *et al.*, 2022). Já *Shewanella* apresenta crescimento mais acentuado ao final da vida útil do produto, frequentemente coexistindo com *Pseudomonas* em condições de armazenamento subótimas ou em ambientes industriais com menor rigor higiênico (SYROPOULOU *et al.*, 2021; MØRETRØ *et al.*, 2016; ZHUANG *et al.*, 2022b; SYROPOULOU *et al.*, 2022).

As espécies de *Pseudomonas* degradam proteínas contráteis do músculo (obscurina, nebulina e titina), provocando desorganização fibrilar e perda de água, o que resulta em textura

amolecida. *Shewanella*, por sua vez, age preferencialmente sobre o colágeno e outras proteínas estruturais, intensificando a separação das fibras e acentuando o amolecimento da carne (LI *et al.*, 2020; NAVARRETE *et al.*, 2009; REDA *et al.*, 2024; ZHUANG *et al.*, 2022b). Ambas colaboram para a formação de compostos voláteis (álcoois, aldeídos, tiófenos), a biogênese de aminas como a putrescina e alterações de cor, gerando odores desagradáveis e comprometendo a qualidade sensorial (LI *et al.*, 2020; ZHUANG *et al.*, 2022b).

Ainda no armazenamento de pescados, especialmente em condições de refrigeração ou congelamento, as reações de lipólise ocorrem de forma significativa. No tecido muscular *post-mortem*, enzimas lipolíticas, em particular as lipases, hidrolisam triacilglicerídeos e fosfolipídios, liberando ácidos graxos livres e glicerol, processo que permanece ativo durante o armazenamento refrigerado ou congelado (CHEN *et al.*, 2022; SUÁREZ-MEDINA *et al.*, 2024). O acúmulo desses ácidos graxos livres é um dos principais indicadores de lipólise, por exemplo, em salmão mantido a 4 °C observou-se aumento significativo desses compostos ao longo de 10 dias (ZHANG *et al.*, 2021; CHEN *et al.*, 2022).

Enzimas como a lipoxigenase permanecem ativas em baixas temperaturas e aceleram a oxidação de ácidos graxos poli-insaturados, sobretudo ácido eicosapentaenoico (EPA) e ácido docosahexaenoico (DHA). Essa oxidação lipídica gera compostos voláteis, como aldeídos e álcoois, que são responsáveis pelo odor desagradável típico de pescado deteriorado (LI *et al.*, 2020; MOZZON *et al.*, 2024; ZHANG *et al.*, 2021). Embora o armazenamento em baixas temperaturas diminua a velocidade tanto da lipólise quanto da oxidação lipídica, essas reações não são completamente inibidas (ZHANG *et al.*, 2021; SUÁREZ-MEDINA *et al.*, 2024).

Adicionalmente, variáveis ambientais, em especial temperatura, pH e umidade, exercem influência decisiva sobre os processos de deterioração do pescado. A temperatura se destaca como o principal fator ambiental que influencia os processos fisiológicos e a qualidade do pescado. O aumento térmico reduz a capacidade de retenção de água, altera cor, textura e pH, e acelera a deterioração, ainda que o armazenamento em baixas temperaturas possa retardar o desenvolvimento microbiano (ALAK *et al.*, 2024; CHEN, B. *et al.*, 2024).

O pH do pescado tende a elevar-se ao longo da deterioração, em decorrência da produção de compostos voláteis por microrganismos. Esse aumento é diretamente associado à perda de frescor e pode ser acompanhado por indicadores de pH em embalagens inteligentes. Embalagens equipadas com filmes sensíveis a variações de pH mudam de coloração conforme o pescado se degrada, permitindo o monitoramento visual da qualidade em tempo real (CHEN *et al.*, 2020; SHI *et al.*, 2021; KIM *et al.*, 2023; MOHSENI-SHAHRI *et al.*, 2023).

A umidade ambiente favorece a proliferação microbiana e a síntese de toxinas, especialmente sob condições de armazenamento inadequadas. Ambientes quentes e úmidos intensificam a contaminação por fungos e a formação de micotoxinas, comprometendo tanto a qualidade do pescado quanto de rações para peixes (ALAK *et al.*, 2024; PIETSCH *et al.*, 2020). Ademais, o aumento da temperatura e o avanço da deterioração diminuem a capacidade de retenção de água do tecido, afetando textura e aceitação sensorial (ALAK *et al.*, 2024; CHEN, B. *et al.*, 2024)

O controle dessas reações citadas é fundamental para manter a qualidade e a segurança do pescado durante o armazenamento.

3.3 Indicadores de frescor em pescado

O índice K é largamente empregado para mensurar a frescura do pescado, pois reflete a degradação de compostos nitrogenados derivados do ATP, como ATP (adenosina trifosfato), ADP (adenosina difosfato), AMP (adenosina monofosfato), IMP (inosina monofosfato), além de inosina (Ino) e hipoxantina (Hx). Quanto maior o valor de K, menor é a frescura do pescado, pois isso indica maior degradação dos nucleotídeos para inosina e hipoxantina. O cálculo do valor de K consiste na razão entre os produtos finais da degradação (Ino + Hx) e o conjunto total de compostos (ATP, ADP, AMP, IMP, Ino e Hx), expressa em porcentagem. Valores baixos de K indicam alta frescura, com maior proporção de ATP, ADP, AMP e IMP, enquanto valores elevados refletem maior degradação, com predominância de Ino e Hx (MU *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2024; ROY *et al.*, 2023; HUANG *et al.*, 2020).

Peixes selvagens ou aqueles alimentados com dietas ricas em farinha de peixe apresentam valores de K mais baixos, o que indica maior frescura e maior teor de IMP. Em contraste, dietas com baixo teor de proteína ou condições de estresse aumentam a degradação, elevando o valor de K (MU *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2024).

Além disso, as bactérias responsáveis pela deterioração aceleram a conversão de inosina para hipoxantina, elevando o valor de K, embora sua ação sobre a degradação de IMP seja limitada em comparação com as enzimas endógenas (LI *et al.*, 2021).

Peixes frescos geralmente apresentam valores de K em torno de 28–30%, enquanto produtos que passaram por secagem ou foram armazenados por longos períodos podem apresentar valores superiores a 85–90%, indicando maior degradação e menor frescura (ROY *et al.*, 2023; HUANG *et al.*, 2020).

Para quantificar os nucleotídeos, costuma-se recorrer a técnicas tradicionais como

a cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). No entanto, abordagens mais recentes, como a espectroscopia de ressonância magnética nuclear (RMN) de prótons (H-NMR), oferecem a vantagem de avaliar o índice K e outros marcadores de frescura simultaneamente, de forma rápida e sem a necessidade de reagentes perigosos (CIAMPA *et al.*, 2022; BAROKAH *et al.*, 2023; CIAMPA; PICONE, 2023).

Técnicas inovadoras, como sensores eletrônicos (*E-nose*, *E-tongue*), colorimetria e imageamento por fluorescência UV, têm demonstrado grande precisão na previsão do índice K, permitindo uma avaliação não destrutiva e facilitando o monitoramento em tempo real durante o armazenamento (LI *et al.*, 2022; OMWANGE *et al.*, 2020; FAN *et al.*, 2021; OMWANGE *et al.*, 2021).

Embora o valor de K seja uma ferramenta útil para avaliar a frescura do pescado, como foi visto, ele pode apresentar variações de acordo com a espécie e as condições de armazenamento, sendo recomendado seu uso associado a outros indicadores para aumentar a precisão das análises (MALLOUCHOS *et al.*, 2020; TSIRONI *et al.*, 2020). Podem ser utilizadas avaliações sensoriais e análises de compostos voláteis, proporcionando uma visão mais abrangente da qualidade do pescado (MALLOUCHOS *et al.*, 2020; FREITAS *et al.*, 2021; BERNARDO *et al.*, 2020).

3.4 Revestimentos comestíveis: definição, composição e função

Os revestimentos comestíveis são microcamadas formadas por polissacarídeos, proteínas, lipídios, compostos bioativos e materiais compósitos, utilizados isoladamente ou em combinação, e aplicados diretamente à superfície dos alimentos por imersão ou pulverização (BAGHI *et al.*, 2022; CHENG *et al.*, 2021). Os revestimentos comestíveis surgem como alternativa ecológica aos plásticos tradicionais, pois empregam polímeros naturais que acompanham o alimento sem necessidade de remoção (PUSCASELU *et al.*, 2021; HAMED *et al.*, 2021; PEREZ-VAZQUEZ *et al.*, 2023). Entre os principais grupos de biopolímeros empregados estão os polissacarídeos, as proteínas e os lipídeos.

O grupo dos polissacarídeos abrange moléculas como pectina, amido, alginato, carragenana, goma xantana, celulose, quitosana e diversas gomas vegetais (goma arábica, guar, *tragacanto*, *gellan*, *mesquite*, *psyllium*, goma de sementes de manjeriço). Destacam-se pela capacidade de formar películas resistentes, agir como barreira a gases e vapor de água, e pela completa biodegradabilidade (MOHAMED *et al.*, 2020; NEHRA *et al.*, 2022; KOCIRA *et al.*, 2021; PILLAI *et al.*, 2024; KUMAR *et al.*, 2021; SALEHI, 2020; KARNWAL *et al.*, 2025).

Outro grupo, das proteínas, têm-se as obtidas de fontes animais e vegetais, como gelatina, caseína, proteínas do soro do leite, soja e trigo, que fornecem elevado desempenho mecânico e de barreira, além de serem totalmente seguras para consumo e biodegradáveis (MOHAMED *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2021; GUPTA, R. *et al.*, 2022; GUPTA, V. *et al.*, 2022; KARNWAL *et al.*, 2025). Dentre os lipídeos utilizados como revestimentos temos ceras, ácidos graxos e óleos vegetais, cuja principal função é reforçar a resistência à umidade; frequentemente são combinados a polissacarídeos ou proteínas para formar sistemas compostos (MOEINI *et al.*, 2022; MOHAMED *et al.*, 2020; KARNWAL *et al.*, 2025; KUMAR *et al.*, 2021).

Os revestimentos comestíveis são amplamente empregados em frutas e vegetais com o propósito de reduzir a perda de água, regular a troca gasosa, retardar o amadurecimento e a deterioração, além de conferir proteção contra microrganismos (PHAM *et al.*, 2023; KARNWAL *et al.*, 2025; SALEHI, 2020; MITELUȚ *et al.*, 2021; MARINGGAL *et al.*, 2020). Ao permitir a incorporação de antioxidantes, agentes antimicrobianos e nutrientes essenciais, esses filmes promovem não apenas a conservação, mas também a melhoria das propriedades sensoriais e nutricionais dos alimentos (KUMAR *et al.*, 2021; RIBEIRO *et al.*, 2020; PHAM *et al.*, 2023; SALEHI, 2020; MITELUȚ *et al.*, 2021).

Quando aplicados em carnes, pescados e laticínios, formam uma barreira física capaz de atenuar a oxidação lipídica, minimizar a perda de umidade e inibir o crescimento microbiano, preservando a textura e o sabor originais (RIBEIRO *et al.*, 2020; KARNWAL *et al.*, 2025; YAASHIKAA *et al.*, 2023); paralelamente, atuam como veículos de compostos bioativos, transportando agentes antimicrobianos e antioxidantes que elevam a segurança alimentar e prolongam a vida útil desses produtos (RIBEIRO *et al.*, 2020; KARNWAL *et al.*, 2025).

No setor de panificação, a utilização de revestimentos comestíveis em pães, bolos e produtos similares evita o ressecamento, mantendo o frescor e as qualidades sensoriais desejadas (RIBEIRO *et al.*, 2020; KARNWAL *et al.*, 2025), enquanto em alimentos fritos contribuem para a redução da absorção de óleo durante o processo de cocção, resultando em itens mais saudáveis e atrativos ao consumidor (RIBEIRO *et al.*, 2020).

A seleção dos materiais e dos procedimentos de aplicação de revestimentos comestíveis deve considerar tanto o tipo de alimento quanto o efeito protetor desejado, assegurando soluções sustentáveis que preservem a qualidade do produto final. No método de imersão (*dipping*), o alimento é completamente submerso na solução polimérica, o que favorece uma cobertura uniforme e boa aderência ao substrato (RIBEIRO *et al.*, 2020; PRIYA *et al.*,

2023; SUHAG *et al.*, 2020; MITELUȚ *et al.*, 2021). A pulverização (*spraying*), por sua vez, distribui o revestimento em forma de névoa sobre a superfície, oferecendo controle preciso da espessura do filme e adequando-se a alimentos com superfícies irregulares (RIBEIRO *et al.*, 2020; PRIYA *et al.*, 2023; SUHAG *et al.*, 2020; MITELUȚ *et al.*, 2021). Para itens de menor porte ou de geometria complexa, como confeitos e grãos, utilizam-se processos de *panning* e leite fluidizado, nos quais o movimento contínuo das partículas assegura a deposição homogênea do revestimento em todas as faces (SUHAG *et al.*, 2020). Por fim, os filmes pré-formados são produzidos separadamente e depois aplicados diretamente sobre ou entre camadas de alimentos, trazendo maior flexibilidade na formulação e padronização do filme, além de facilitar o escalonamento industrial (SUHAG *et al.*, 2020; RIBEIRO *et al.*, 2020).

A aplicação de revestimentos comestíveis em escala industrial ainda esbarra em barreiras econômicas e técnicas, uma vez que a produção em larga escala demanda investimentos significativos para garantir a estabilidade e a padronização das propriedades do filme, mantendo ao mesmo tempo a viabilidade financeira do processo (JURIĆ *et al.*, 2024; BREMENKAMP; GALLAGHER, 2025; GASPAR; BRAGA, 2023; WIBOWO *et al.*, 2023; MAKAM *et al.*, 2024). Além disso, o avanço dessa tecnologia depende fortemente do atendimento às normas regulatórias vigentes e da confiança do consumidor, que nem sempre está familiarizado com a utilização de materiais poliméricos comestíveis nos alimentos, o que impõe esforços adicionais em rotulagem clara e campanhas de comunicação para superação de resistências (JURIĆ *et al.*, 2024; BREMENKAMP; GALLAGHER, 2025; ROUT; PRADHAN, 2024; KARNWAL *et al.*, 2025). No entanto, as perspectivas futuras são promissoras, pois pesquisas voltadas ao aprimoramento dos métodos de extração de biopolímeros, ao desenvolvimento de formulações híbridas e à combinação de técnicas, como a incorporação de nanomateriais ou sensores inteligentes, podem não só reduzir custos e melhorar o desempenho dos revestimentos, mas também expandir seu campo de aplicação para além dos setores alimentício e de embalagem (JURIĆ *et al.*, 2024; MARTINS *et al.*, 2024; MAKAM *et al.*, 2024; WIBOWO *et al.*, 2023).

3.5 Alga marinha vermelha *Hypnea pseudomusciformis*

3.5.1 Caracterização botânica, distribuição e cultivo

Hypnea pseudomusciformis é uma alga vermelha (Rhodophyta) de reconhecida relevância ecológica e econômica, nativa da costa atlântica tropical da América do Sul, com

ampla predominância no litoral brasileiro. Nos últimos anos, a espécie tem recebido crescente atenção devido ao seu potencial para maricultura e múltiplas aplicações biotecnológicas. Apresenta elevada plasticidade morfológica, reunindo variantes que anteriormente eram classificadas como espécies distintas, como *H. musciformis* e *H. nigrescens*, mas que, com base em análises moleculares e estudos de compatibilidade reprodutiva, passaram a ser reconhecidas como uma única espécie, caracterizada por expressiva variabilidade fenotípica e fisiológica (NAUER *et al.*, 2021). Seus talos são ramificados, podendo apresentar hábito epífito, com variações de forma e coloração que refletem adaptação a diferentes ambientes costeiros (NAUER *et al.*, 2020; NAUER *et al.*, 2021).

A espécie ocorre amplamente ao longo da costa brasileira, distribuindo-se desde regiões tropicais até áreas de transição e temperadas, sendo registrada tanto em bancos naturais quanto em ambientes de salinas (NAUER *et al.*, 2022; DE MELO SOARES *et al.*, 2023; NAUER *et al.*, 2020). Essa ampla distribuição geográfica é atribuída à existência de ecótipos ajustados a distintas condições ambientais, especialmente variações de temperatura e luminosidade (NAUER *et al.*, 2020; NAUER *et al.*, 2021; NAUER *et al.*, 2022; DE MELO SOARES *et al.*, 2023).

O cultivo de *H. pseudomusciformis* foi recentemente desenvolvido e patenteado no Brasil, empregando sistemas do tipo *long-line* com substratos de polipropileno, o que permite produção em pequena e média escala (PEREIRA *et al.*, 2020a; PEREIRA *et al.*, 2020b; PEREIRA *et al.*, 2020c; ALVES *et al.*, 2025). O ciclo produtivo dura aproximadamente 45 dias, alcançando produtividade de até 0,1 kg de massa seca por metro linear e crescimento de mudas de 25 g para cerca de 319 g no período (PEREIRA *et al.*, 2020b; PEREIRA *et al.*, 2020c; ALVES *et al.*, 2025). Esse sistema de cultivo é considerado ambientalmente sustentável, socialmente inclusivo e economicamente viável, especialmente para o fornecimento de biomassa destinada ao consumo humano e à produção de extratos (PEREIRA *et al.*, 2020a; PEREIRA *et al.*, 2020c; ALVES *et al.*, 2025).

3.5.2 Composição química - carragenanas, compostos fenólicos, pigmentos

Hypnea pseudomusciformis é uma macroalga vermelha cuja composição bioquímica diversificada a torna promissora para aplicações funcionais e biotecnológicas, destacando-se pela presença de carragenanas, fenóis e pigmentos fotossintéticos. Esta espécie é uma fonte importante de carragenanas, com predominância de frações do tipo kappa, polissacarídeos sulfatados amplamente utilizados como agentes espessantes, gelificantes e

emulsificantes nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética (PEREIRA *et al.*, 2020a; NOVOA *et al.*, 2025). As carragenanas extraídas de *H. pseudomusciformis* apresentam características físico-químicas que as tornam competitivas frente a outros hidrocolóides industriais, exibindo também atividades biológicas reportadas, incluindo propriedades antioxidantes, antibacterianas, antifúngicas e anti-inflamatórias (PEREIRA *et al.*, 2020a; NOVOA *et al.*, 2025). A caracterização elementar dessas frações revela concentrações elevadas de cátions e sais marinhos (potássio, cloro, sódio, magnésio e cálcio) e ausência de metais pesados em níveis detectáveis, o que reforça sua segurança para uso industrial (IQBAL *et al.*, 2022).

A alga contém teores significativos de compostos fenólicos, os quais contribuem para sua elevada capacidade antioxidante (NAUER *et al.*, 2021; MOULAZADEH *et al.*, 2022). Em comparação com algumas algas verdes, o conteúdo fenólico total em *H. pseudomusciformis* tende a ser superior, e estudos indicam correlação entre esses compostos e efeitos citotóxicos contra células tumorais (MOULAZADEH *et al.*, 2022), sugerindo potencial para aplicações farmacêuticas. Além disso, a produção de fenólicos parece ser sensível a condições ambientais adversas, por exemplo, aumentos na atividade antioxidante foram observados sob estresses como a acidificação oceânica (NAUER *et al.*, 2021) que sugerem um papel adaptativo desses metabólitos na proteção celular.

Os pigmentos presentes incluem clorofila a, carotenoides (β -caroteno, licopeno) e ficobiliproteínas, essenciais para a fotossíntese e com propriedades antioxidantes (NAUER *et al.*, 2020; NAUER *et al.*, 2021; HONEY *et al.*, 2024). A concentração e o perfil desses pigmentos variam conforme o ecótipo e as condições ambientais, podendo ser, em alguns casos, inferiores aos observados em outras algas, mas ainda relevantes para aplicações funcionais (HONEY *et al.*, 2024).

A diversidade química de *H. pseudomusciformis* inclui, ainda, vitaminas, taninos, saponinas, terpenoides, alcaloides, esteróis e uma variedade de minerais, fatores que ampliam significativamente o potencial de uso dessa alga em diferentes áreas industriais (SABER *et al.*, 2024; HOSSAIN *et al.*, 2021; HMANI *et al.*, 2021). Esses compostos conferem à alga uma gama de propriedades terapêuticas, como atividades anti-inflamatórias, antimicrobianas, gastroprotetoras, anticoagulantes e imunomoduladoras, ampliando seu potencial para diversas aplicações biotecnológicas e farmacológicas (SABER *et al.*, 2024; ELHADY *et al.*, 2022; RIZWAN *et al.*, 2024). Estudos também apontam a ausência de metais pesados tóxicos em amostras analisadas, assegurando seu uso seguro para consumo humano (ARULKUMAR *et al.*, 2020; MOHIUDDIN *et al.*, 2023; HOQ *et al.*, 2021).

Em conjunto, o perfil químico de *Hypnea pseudomusciformis*, marcado por carragenanas de qualidade, elevado conteúdo fenólico funcional e pigmentos fotossintéticos, sustenta seu interesse para investigação e desenvolvimento em biotecnologia, farmacologia e indústria de alimentos, justificando estudos adicionais sobre otimização de extração, caracterização estrutural e avaliação de segurança e eficácia.

3.5.3 Potencial na obtenção de biomateriais para revestimentos comestíveis

Hypnea pseudomusciformis destaca-se como uma fonte promissora de biomateriais para revestimentos comestíveis, oferecendo uma alternativa sustentável às embalagens sintéticas ao proteger alimentos frescos, prolongar sua vida útil e adicionar funcionalidades (MA *et al.*, 2024; SAPNA *et al.*, 2024).

Os filmes comestíveis produzidos a partir de *H. musciformis* (incluindo *H. pseudomusciformis*) baseiam-se principalmente em carragenanas, polissacarídeos capazes de formar filmes flexíveis e transparentes, ideais para aplicações alimentícias (MA *et al.*, 2024; SAPNA *et al.*, 2024). Esses biomateriais são biodegradáveis, de origem renovável e seguros para consumo humano, contribuindo significativamente para a redução do impacto ambiental associado às embalagens convencionais (MA *et al.*, 2024; SAPNA *et al.*, 2024; SHARMA *et al.*, 2024). Quando aplicados como revestimento, os filmes de carragenana atuam como barreira eficaz contra umidade, gases e microrganismos, diminuindo a perda de água, inibindo a oxidação lipídica e retardando a deterioração, sem comprometer a qualidade sensorial e nutricional dos alimentos (MA *et al.*, 2024; SAPNA *et al.*, 2024; SHARMA *et al.*, 2024).

A incorporação de compostos fenólicos e flavonoides extraídos de *H. musciformis* confere aos revestimentos propriedades antioxidantes e antimicrobianas, demonstrando eficácia na preservação de frutos do mar, como camarão, e de hortaliças frescas por períodos prolongados (ARULKUMAR *et al.*, 2020). Revestimentos à base de biomateriais de algas têm se mostrado capazes de reduzir significativamente as perdas pós-colheita de frutas, legumes e frutos do mar, estendendo a vida útil dos produtos durante armazenamento e transporte (MA *et al.*, 2024; SAPNA *et al.*, 2024; SHARMA *et al.*, 2024; ARULKUMAR *et al.*, 2020).

A incorporação de aditivos funcionais, como óleos essenciais, probióticos e nanopartículas, potencializa ainda mais as propriedades mecânicas, de barreira e bioativas dos revestimentos, ampliando suas aplicações e benefícios tecnológicos (MA *et al.*, 2024; SAPNA *et al.*, 2024; SILVA *et al.*, 2023).

Dessa forma, os revestimentos comestíveis derivados de *Hypnea*

pseudomusciformis reúnem características de sustentabilidade, segurança alimentar e funcionalidade, posicionando-se como solução inovadora e ecológica às embalagens tradicionais.

3.5.4 Cultivo de *Hypnea pseudomusciformis* em Flecheiras, Ceará: Sustentabilidade e Produtividade

O cultivo de *Hypnea pseudomusciformis* em Flecheiras (CE) constitui uma alternativa produtiva e de baixo impacto, integrando técnicas recentemente desenvolvidas com articulação comunitária e benefícios ambientais, sociais e econômicos bem documentados (PEREIRA *et al.*, 2020c; ALVES *et al.*, 2025). A tecnologia empregada foi validada localmente e tem apresentado desempenho promissor para a realidade regional, o que a qualifica como uma estratégia de maricultura adaptada a pequenos e médios produtores (PEREIRA *et al.*, 2020b; PEREIRA *et al.*, 2020a).

As operações em Flecheiras utilizam *long-lines* de 30 m e substratos de polipropileno para a fixação das mudas, as quais são originadas de bancos naturais locais. Observou-se crescimento rápido: mudas iniciais de aproximadamente 25 g atingem cerca de 319 g ao final de um ciclo de 45 dias, indicando elevada produtividade por ciclo sob as condições adotadas (PEREIRA *et al.*, 2020c; ALVES *et al.*, 2025). O sistema baseia-se em uma tecnologia patenteada que combina facilidade de manejo e custos operacionais reduzidos, sendo adequada para gestão por associações comunitárias e estruturas de produção de escala familiar e cooperativa (PEREIRA *et al.*, 2020b; PEREIRA *et al.*, 2020a).

Do ponto de vista da sustentabilidade, o cultivo apresenta eficiência no uso de energia e de nutrientes essenciais (nitrogênio e fósforo), contribui para sequestro de carbono e não implica em fontes significativas de poluição, favorecendo um perfil de baixo risco para a biodiversidade local por empregar uma espécie nativa (PEREIRA *et al.*, 2020b; PEREIRA *et al.*, 2020a). No plano socioeconômico, a retenção de valor na comunidade é elevada, com 51% do investimento permanecendo no município, associada a distribuição mais equitativa da renda e intensa demanda por mão de obra local, promovendo inclusão e geração de emprego (PEREIRA *et al.*, 2020c). As análises econômicas indicam alta atratividade financeira, com taxa interna de retorno de 119% e recuperação do investimento aproximado de 1,2 anos, evidenciando rápido retorno do capital investido (PEREIRA *et al.*, 2020c; PEREIRA *et al.*, 2020a).

Quanto ao aproveitamento comercial, os resultados econômicos e técnicos apontam

maior viabilidade para comercialização direta de produto fresco destinado ao consumo humano e para a extração de glicólicos destinados à cosmética. Por outro lado, a produção destinada exclusivamente à obtenção de carragenana mostra-se menos competitiva em pequena escala, devido a fatores de mercado e escala de processamento (PEREIRA *et al.*, 2020a). Esses achados sugerem que a difusão do modelo em Flecheiras deve priorizar cadeias de valor que valorizem produtos de alto valor agregado e formas de processamento compatíveis com a escala local (PEREIRA *et al.*, 2020a; PEREIRA *et al.*, 2020c; ALVES *et al.*, 2025).

3.6 Diferenciais entre *Hypnea pseudomusciformis*, *Kappaphycus alvarezii* e *Eucheuma denticulatum*

Hypnea pseudomusciformis, *Kappaphycus alvarezii* e *Eucheuma denticulatum* são macroalgas vermelhas de interesse comercial, porém diferem substancialmente em aspectos fisiológicos, produtivos, composicionais e nas aplicações industriais. Suas principais diferenças podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação dos principais diferenciais entre as três macroalgas.

Característica	<i>H.</i> <i>pseudomusciformis</i>	<i>K. alvarezii</i>	<i>E.</i> <i>denticulatum</i>	Citações
Tipo de carragenana	Carragenana diversificada	Kappa-carragenana	Iota-carragenana	Nauer <i>et al.</i> (2020); Zamanileha <i>et al.</i> (2025)
Plasticidade fisiológica	Alta	Moderada	Moderada	Nauer <i>et al.</i> (2020); Narvarte <i>et al.</i> (2025)
Cultivo	Em desenvolvimento	Amplo, consolidado	Amplo, consolidado	Pereira <i>et al.</i> (2020b); Barillé <i>et al.</i> (2025); Zamanileha <i>et al.</i> (2025)
Potencial nutricional	Moderado	Moderado	Alto (minerais, aminoácidos essenciais)	Zamanileha <i>et al.</i> (2025)

Fonte: Autora (2025).

Hypnea pseudomusciformis apresenta elevada plasticidade fisiológica, manifestando-se em distintos ecótipos adaptados a gradientes térmicos tropicais e subtropicais. Populações oriundas de regiões tropicais exibem taxas de crescimento mais elevadas quando

comparadas a populações de climas temperados (NAUER *et al.*, 2020; PEREIRA *et al.*, 2020b).

Em contrapartida, *K. alvarezii* e *E. denticulatum* (e outras eucheumatoides) têm o metabolismo de nutrientes amplamente caracterizado: demonstram absorção significativa de nitrogênio tanto no período diurno quanto noturno e capacidade de armazenamento interno de nutrientes. O desenvolvimento vegetativo dessas espécies é fortemente modulado por variáveis ambientais, especialmente temperatura, salinidade e disponibilidade de nutrientes, o que resulta em variações sazonais nas taxas de crescimento (NARVARTE *et al.*, 2025; BARILLÉ *et al.*, 2025; ZAMANILEHA *et al.*, 2025).

Hypnea pseudomusciformis contém carragenana entre seus principais polímeros, mas sua exploração em maricultura comercial ainda é menos consolidada do que a de outras espécies, além disso, há potencial para extração de compostos bioativos com aplicação farmacológica e tecnológica (NAUER *et al.*, 2020; PEREIRA *et al.*, 2020b). *Kappaphycus alvarezii* e *Eucheuma denticulatum* constituem as principais fontes comerciais de carragenanas (predominantemente kappa e iota, respectivamente) e são amplamente empregadas nas indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica devido às suas propriedades gelificantes e estabilizantes. *E. denticulatum* tem sido destacada por seu conteúdo relativamente elevado de minerais, carboidratos e aminoácidos essenciais, conferindo-lhe interesse também do ponto de vista nutricional (ZAMANILEHA *et al.*, 2025).

O cultivo de *H. pseudomusciformis* pode ser conduzido em sistemas de baixa complexidade, porém enfrenta entraves práticos ligados ao seu hábito epifítico e à competição por substrato. Desenvolvimentos recentes em tecnologias de suporte e substratos têm ampliado a viabilidade de sua produção em pequena e média escala (PEREIRA *et al.*, 2020b). Por outro lado, *K. alvarezii* e *E. denticulatum* são cultivadas em larga escala em regiões como o Sudeste Asiático e partes da África, adotando sistemas de produção consolidados que suportam uma produção global substancial (BARILLÉ *et al.*, 2025; ZAMANILEHA *et al.*, 2025).

A *Hypnea pseudomusciformis* apresenta elevada plasticidade ecológica que favorece seu estabelecimento em diferentes ambientes tropicais do Atlântico Sul. Populações dessa espécie demonstram boa adaptação a condições locais e podem ser cultivadas com sucesso utilizando substratos simples e de baixo custo, o que torna seu cultivo particularmente adequado para sistemas de produção em pequena escala e iniciativas comunitárias de maricultura (PEREIRA *et al.*, 2020b).

Além do aproveitamento como fonte de carragenana, o gênero *Hypnea* contém diversos metabólitos secundários com atividade biológica, conferindo à espécie potencial para a geração de produtos de alto valor agregado, como compostos farmacológicos, nutracêuticos

e outros bioativos. Essa diversidade metabólica amplia as possibilidades de uso econômico da espécie e pode favorecer estratégias de diversificação produtiva em cadeias locais de valor (PEREIRA *et al.*, 2020b).

Avanços tecnológicos recentes, especialmente no desenvolvimento de substratos artificiais e suportes específicos, têm contribuído para superar limitações associadas ao hábito epifítico de *H. pseudomusciformis*. Tais inovações permitem aumentar a eficiência produtiva e a viabilidade técnico-econômica do cultivo em distintas escalas, reduzindo barreiras operacionais e ampliando o potencial de adoção por produtores familiares e por empreendimentos de médio porte (PEREIRA *et al.*, 2020b).

Em contraposição, *Kappaphycus alvarezii* e *Eucheuma denticulatum* destacam-se como as principais fontes comerciais de carragenana, respondendo por parcela majoritária da produção mundial devido à elevada produtividade e à homogeneidade do produto obtido em cultivos comerciais. No entanto, essas espécies apresentam vulnerabilidades importantes, incluindo susceptibilidade a doenças como o fenômeno “ice-ice”, ataques de epífitas e sensibilidade a variações ambientais (temperatura, salinidade e qualidade da água), que podem comprometer tanto a produtividade quanto a qualidade do biomaterial extraído (RUPERT *et al.*, 2022; MENDES *et al.*, 2024; NURANI *et al.*, 2024; KUMAR *et al.*, 2020).

A incorporação de *H. pseudomusciformis* em estratégias produtivas locais pode representar uma alternativa complementar às culturas dominantes, contribuindo para a diversificação econômica e a redução da dependência das eucheumatoides comerciais. Contudo, sua adoção em larga escala requer avaliações detalhadas de viabilidade técnica, econômica e ambiental, bem como monitoramento contínuo para garantir sustentabilidade e mitigação de impactos sobre os ecossistemas marinhos (PEREIRA *et al.*, 2020b; RUPERT *et al.*, 2022; MENDES *et al.*, 2024; NURANI *et al.*, 2024).

3.7 Carragenana

3.7.1 Origem em algas vermelhas do gênero *Hypnea*

A carragenana é amplamente extraída de macroalgas vermelhas do gênero *Hypnea*, especialmente de *Hypnea musciformis*, sendo altamente valorizada por sua aplicação nas indústrias alimentícia, farmacêutica e biotecnológica (IQBAL *et al.*, 2022; RAJAMANI e KHORA, 2024; JELIANI *et al.*, 2021; YOKOYA *et al.*, 2020; SABER *et al.*, 2024; PALANI *et al.*, 2022; VÁZQUEZ-DELFIN *et al.*, 2023). Sua extração pode ser realizada por processos

aquosos ou alcalinos, impactando o rendimento e o tipo de carragenana obtida, que pode variar de 20% a 34% do peso seco (JELIANI *et al.*, 2021; VÁZQUEZ-DELFIN *et al.*, 2023). As espécies do gênero *Hypnea* são reconhecidas principalmente pela produção de κ -carragenana, embora também possam conter proporções de ι -carragenana (YOKOYA *et al.*, 2020; VÁZQUEZ-DELFIN *et al.*, 2023).

A κ -carragenana obtida de *Hypnea musciformis* apresenta propriedades gelificantes, antioxidantes, antimicrobianas e é promissora para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis (RAJAMANI; KHORA, 2024; SABER *et al.*, 2024; PALANI *et al.*, 2022). Análises físico-químicas indicam altos teores de elementos essenciais como carbono, oxigênio, potássio e magnésio, e ausência de metais tóxicos, assegurando a segurança de seu uso em alimentos e fármacos (IQBAL *et al.*, 2022). Além da segurança, essa carragenana também possui propriedades bioativas importantes, como ação antioxidante, anticoagulante e potencial terapêutico (SABER *et al.*, 2024; PALANI *et al.*, 2022; KHOTIMCHENKO *et al.*, 2020). *Hypnea musciformis* destaca-se entre as espécies mais estudadas e cultivadas para a extração de carragenana, sendo uma matéria-prima estratégica para os setores alimentício, farmacêutico e de biotecnologia (YOKOYA *et al.*, 2020; VÁZQUEZ-DELFIN *et al.*, 2023). Sua aplicação como espessante, gelificante, estabilizante e agente bioativo reforça seu valor em cosméticos, alimentos, medicamentos e materiais biodegradáveis (RAJAMANI e KHORA, 2024; YOKOYA *et al.*, 2020; SABER *et al.*, 2024; PALANI *et al.*, 2022; UDAYAKUMAR *et al.*, 2024).

3.7.2 Métodos de extração de carragenana

A extração de carragenana de algas vermelhas pode ser realizada por métodos convencionais ou por abordagens avançadas, cujas diferenças se refletem na eficiência do rendimento, no impacto ambiental e nas propriedades do produto obtido (MENDES *et al.*, 2024; LIU, Y. *et al.*, 2022).

Nos métodos convencionais, destaca-se a extração alcalina tradicional, em que a biomassa é tratada com soluções de NaOH ou KOH sob aquecimento prolongado, seguida de filtração, precipitação alcoólica e secagem. Embora amplamente empregada, essa rota demanda grande volume de água e gera resíduos significativos (MENDES *et al.*, 2024; LIU, Y. *et al.*, 2022; JIANG *et al.*, 2022). Outra técnica clássica é a extração em água quente, que utiliza exclusivamente água aquecida, em pH neutro ou levemente ajustado, para solubilizar a carragenana. Nesse caso, o rendimento e as características finais dependem diretamente da

temperatura e do tempo de extração (BAHARI *et al.*, 2022).

Para reduzir o consumo de álcalis e minimizar resíduos, métodos mais sustentáveis vêm sendo adotados. A extração com hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) substitui o hidróxido de sódio (NaOH), resultando em menor uso de reagentes e água, ao mesmo tempo em que eleva o rendimento e melhora a resistência de gel e a estabilidade térmica (LIU, Y. *et al.*, 2022; JIANG *et al.*, 2022). A extração assistida por ultrassom (UAE) emprega ondas acústicas para acelerar a liberação do polímero, encurtando o tempo de processamento e aumentando tanto o rendimento quanto a viscosidade do extrato (MENDES *et al.*, 2024; HANS *et al.*, 2023). De modo similar, a extração assistida por micro-ondas promove aquecimento rápido e uniforme da biomassa, favorecendo a eficiência do processo com menor demanda de solventes e tempo reduzido (ÁLVAREZ-VIÑAS *et al.*, 2023; RUDKE *et al.*, 2022). Técnicas que utilizam solventes sob condições pressurizadas ou subcríticas aplicam água ou solventes alternativos em alta pressão e temperatura, incrementando a eficiência de extração e podendo aprimorar as propriedades funcionais da carragenana (RUDKE *et al.*, 2024; RUDKE *et al.*, 2022; FLÓREZ-FERNÁNDEZ *et al.*, 2022). Por fim, o uso de moinhos de esfera (*bead mill*) oferece uma via mecânica de extração em meio aquoso, com elevado rendimento em tempo reduzido e menor custo operacional (FIRDAYANTI *et al.*, 2023).

Dessa forma, a evolução dos métodos de extração de carragenana, do processo alcalino tradicional às técnicas de ultrassom, micro-ondas, solventes pressurizados e uso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, viabiliza ganhos em eficiência, redução de impacto ambiental e otimização da qualidade final do biopolímero.

3.7.3 Estrutura, propriedades e aplicações

A carragenana caracteriza-se como um polissacarídeo sulfatado de cadeia linear, formado por repetidas unidades de galactose que apresentam variações no grau e no padrão de sulfatação (RUPERT *et al.*, 2022; JIANG *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2023; MIRZAEI *et al.*, 2022; HILLIOU, 2021; HALE *et al.*, 2024). Entre suas formas, destacam-se três tipos principais, kappa (κ), iota (ι) e lambda (λ), cujas diferentes quantidades e posições dos grupos sulfato conferem particularidades na gelificação e na solubilidade (RUPERT *et al.*, 2022; JIANG *et al.*, 2021; HILLIOU, 2021; HALE *et al.*, 2024; FUCHS *et al.*, 2024). As principais fontes comerciais desse biopolímero são as algas dos gêneros *Euclima* e *Kappaphycus*, sendo a kappa-carragenana a mais explorada industrialmente (RUPERT *et al.*, 2022).

A kappa-carragenana, predominante em *Kappaphycus alvarezii* e *Euclima*

cottonii, forma géis firmes e quebradiços na presença de potássio e possui um grupo sulfato por unidade repetitiva (RUPERT *et al.*, 2022; RAHMAWATI *et al.*, 2023; RADOOR *et al.*, 2023; BHATTACHARYYA *et al.*, 2023). Já a iota-carragenana, típica de *Eucheuma denticulatum* e *Eucheuma spinosum*, gera géis mais elásticos e macios quando interage com cálcio, contendo dois grupos sulfato por unidade (RUPERT *et al.*, 2022; RAHMAWATI *et al.*, 2023; RADOOR *et al.*, 2023; BHATTACHARYYA *et al.*, 2023). Por sua vez, a lambda-carragenana, encontrada em espécies como *Chondrus crispus*, não apresenta capacidade de formação de gel, mas é eficaz em conferir viscosidade às soluções, devido aos três grupos sulfato por unidade repetitiva (RUPERT *et al.*, 2022; KIRAN-YILDIRIM *et al.*, 2021; FRÖBA *et al.*, 2021; RADOOR *et al.*, 2023).

A diversidade estrutural dessas moléculas, influenciada pelas diferentes quantidades e arranjos dos grupos sulfato, é determinante para suas aplicações industriais e para o comportamento físico-químico de cada tipo de carragenana (KIRAN-YILDIRIM *et al.*, 2021; KRAVCHENKO *et al.*, 2020; KRAVCHENKO *et al.*, 2022; RADOOR *et al.*, 2023; KRAVCHENKO *et al.*, 2023). Vale destacar que algumas algas podem produzir carragenanas híbridas, compostas por diferentes proporções dos tipos kappa, iota e outros intermediários, ampliando ainda mais as possibilidades de uso em sistemas alimentícios e biotecnológicos (KRAVCHENKO *et al.*, 2020; KRAVCHENKO *et al.*, 2022; KRAVCHENKO *et al.*, 2023).

A carragenana, especialmente em suas variantes kappa e iota, forma géis com texturas que variam de delicadas a muito firmes, dependendo da concentração do polímero, do tipo específico de carragenana e da presença de íons como potássio e cálcio (HUGHES *et al.*, 2023; CHANG *et al.*, 2025; MIRZAEI *et al.*, 2022; HILLIOU *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2024; CAO *et al.*, 2023; LEE *et al.*, 2022). Nessa mesma linha, os íons de potássio promovem géis rígidos em sistemas de kappa-carragenana, enquanto os de cálcio conferem maior elasticidade às estruturas de iota-carragenana, sendo a proporção e a concentração desses sais determinantes para a resistência, a elasticidade e o grau de sinérese dos géis (ZHANG *et al.*, 2024; CAO *et al.*, 2023; HUGHES *et al.*, 2023). O mecanismo de gelificação envolve a transição das cadeias moleculares para hélices, seguidas pela agregação dessas hélices em uma rede tridimensional, o que resulta em propriedades elásticas e viscoelásticas características (CHANG *et al.*, 2025; HILLIOU *et al.*, 2021). Em consequência, esses géis encontram aplicação não só na texturização e estabilização de alimentos, mas também em impressão 3D de biomateriais, na liberação controlada de fármacos e em engenharia de tecidos (CHANG *et al.*, 2025; HILLIOU *et al.*, 2021; MIRZAEI *et al.*, 2022).

Além de gelificar, a carragenana destaca-se por sua capacidade filmogênica,

formando filmes finos, transparentes e flexíveis, tanto isoladamente quanto em combinação com outros biopolímeros (ZHOU *et al.*, 2021; RODRÍGUEZ-CANTO *et al.*, 2020; WEI *et al.*, 2024). A resistência mecânica, a elasticidade, a barreira à umidade e até a proteção contra radiação UV podem ser ampliadas por modificações químicas, como a introdução de anidrido maleico, ou pela adição de polímeros complementares (ZHOU *et al.*, 2021; RODRÍGUEZ-CANTO *et al.*, 2020; WEI *et al.*, 2024). A miscibilidade com polissacarídeos como galactomananas ou com proteínas como a gelatina permite ajustar a solubilidade, a permeabilidade e as propriedades mecânicas dos filmes, adequando-os para aplicações em embalagens com liberação controlada de compostos bioativos (RODRÍGUEZ-CANTO *et al.*, 2020; WEI *et al.*, 2024).

Dessa forma, filmes de carragenana são amplamente utilizados em embalagens comestíveis, revestimentos ativos para alimentos e sistemas de liberação controlada (ZHOU *et al.*, 2021; RODRÍGUEZ-CANTO *et al.*, 2020; WEI *et al.*, 2024). Por fim, as diferenças no número e na disposição dos grupos sulfato em cada tipo de carragenana determinam as propriedades físico-químicas e a funcionalidade tanto dos géis quanto dos filmes, moldando seu desempenho nas diversas aplicações industriais (HUGHES *et al.*, 2023; HILLIOU *et al.*, 2021; RODRÍGUEZ-CANTO *et al.*, 2020).

Na prática, embalagens comestíveis à base de carragenana são empregadas para envolver produtos frescos, acondicionar itens instantâneos como café solúvel e monitorar em tempo real a qualidade e a vida útil dos produtos (CHENG *et al.*, 2022; WU *et al.*, 2022; MATHEW *et al.*, 2024; AVILA *et al.*, 2022; SIMONA *et al.*, 2021). A carragenana tem se destacado como agente espessante e gelificante em laticínios, carnes processadas, sobremesas, bebidas e alimentos de origem vegetal, melhorando textura, estabilidade e retenção de água (WANG *et al.*, 2024; UDO *et al.*, 2023). Quando aplicados como filmes, esses revestimentos criam uma barreira física que limita a penetração de umidade, oxigênio e luz, retardando a oxidação lipídica e o crescimento microbiano, o que resulta em maior conservação dos alimentos (CHENG *et al.*, 2022; RAMADAS *et al.*, 2024; JAYAKODY *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2024; UDO *et al.*, 2023; MATHEW *et al.*, 2024). A incorporação de compostos bioativos, como antioxidantes e antimicrobianos naturais, potencializa ainda mais o efeito conservante, inibindo patógenos e prolongando a integridade sensorial e nutricional dos produtos (RAMADAS *et al.*, 2024; MATHEW *et al.*, 2024; AVILA *et al.*, 2022; SIMONA *et al.*, 2021).

3.7.4 Matriz para revestimentos comestíveis em pescado

A carragenana tem se destacado como matriz para revestimentos comestíveis em pescado, visto que diversos estudos apontam sua eficácia em prolongar a vida útil do produto ao retardar processos de deterioração microbiológica e química (SIREGAR *et al.*, 2021; KHASANAH *et al.*, 2024; ISWAHYUNI *et al.*, 2023; KHOJAH, 2020; KARIMZADEH *et al.*, 2024; SUPRIWANTI *et al.*, 2023). Em filés de truta, a associação da carragenana com óleo essencial e o uso de embalagens com absorvedor de oxigênio estenderam o período de conservação de quatro para até vinte dias sob refrigeração (KARIMZADEH *et al.*, 2024). De maneira semelhante, anchovas revestidas com carragenana enriquecida por fumaça líquida mantiveram-se em condições ideais por até vinte e um dias à temperatura ambiente, apresentando menor oxidação lipídica e melhor qualidade sensorial (KHASANAH *et al.*, 2024). *Fishballs* recobertos por uma formulação de carragenana com óleo de coco hidrolisado demonstraram redução significativa no crescimento microbiano e maior aceitação sensorial por até três dias em temperatura ambiente, superando as amostras não revestidas (SIREGAR *et al.*, 2021).

Esses efeitos conservantes são atribuídos à formação de uma barreira física capaz de reduzir a entrada de oxigênio e minimizar a perda de umidade, o que dificulta o desenvolvimento de microrganismos e retarda as reações de oxidação (KHASANAH *et al.*, 2024; KHOJAH, 2020; KARIMZADEH *et al.*, 2024; SUPRIWANTI *et al.*, 2023). Quando enriquecido com compostos antioxidantes e agentes antimicrobianos naturais, o revestimento de carragenana aumenta ainda mais sua eficácia protetora (SIREGAR *et al.*, 2021; KHASANAH *et al.*, 2024; KHOJAH, 2020; KARIMZADEH *et al.*, 2024). Além disso, essa tecnologia preserva características sensoriais cruciais, como textura, cor e odor, e controla parâmetros de deterioração, incluindo flutuações de pH, acúmulo de bases voláteis e contagem bacteriana, garantindo a manutenção da qualidade do pescado durante o armazenamento (SIREGAR *et al.*, 2021; KHASANAH *et al.*, 2024; ISWAHYUNI *et al.*, 2023; KHOJAH, 2020; KARIMZADEH *et al.*, 2024; SUPRIWANTI *et al.*, 2023).

A carragenana, em combinação com pectina e enriquecida com antocianinas e magnolol, foi empregada na confecção de um filme bi-camada inteligente capaz de monitorar e preservar a frescura de postas de salmão por meio de mudanças de coloração relacionadas ao pH do produto. Esse revestimento exibiu elevada impermeabilidade, ação antibacteriana contra *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* e, ao mesmo tempo, conseguiu estender a vida útil do salmão em aproximadamente dois dias, mantendo propriedades mecânicas e de barreira ao

vapor de água satisfatórias (ZHANG M. *et al.*, 2024).

Em outro estudo, agora com tilápia, foram testadas diversas formas químicas de carragenana, sulfatada, carboximetilada, acetilada e fosforilada, em hambúrgueres de pescado, sendo a carragenana fosforilada (P-KC) a mais eficaz na inibição da formação de aminas heterocíclicas, compostos potencialmente genotóxicos gerados durante o cozimento. A adição de 1% de P-KC, isoladamente ou em combinação com naringenina, reduziu significativamente a presença dessas aminas sem alterar cor ou textura do produto, ressaltando seu valor como aditivo funcional para aumento da segurança alimentar em produtos de pescado processado (XUE *et al.*, 2023).

3.8 Análises espectroscópicas aplicadas a alimentos

As análises espectroscópicas consistem em métodos analíticos que exploram a interação da radiação eletromagnética com a matéria, permitindo a identificação, caracterização e quantificação de substâncias químicas com alta precisão e sem destruir a amostra (SASIKALA *et al.*, 2021; KHARBACH *et al.*, 2023). Têm se consolidado como ferramentas modernas e rápidas para a avaliação da qualidade, autenticidade e segurança de alimentos, oferecendo uma alternativa mais eficiente às técnicas tradicionais, que frequentemente são destrutivas, demoradas e onerosas (KHARBACH *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2021; BEĆ *et al.*, 2022; LOUDIYI *et al.*, 2020; ZHANG, W *et al.*, 2021; FAKAYODE *et al.*, 2020).

Dentre os métodos mais empregados estão a espectroscopia Raman, o infravermelho próximo (NIR), o infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), o ultravioleta-visível (UV-Vis) e a fluorescência, os quais permitem identificar e quantificar componentes químicos, detectar contaminantes, acompanhar alterações durante o processamento e o armazenamento, bem como avaliar propriedades sensoriais e funcionais dos produtos (KHARBACH *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2021; BEĆ *et al.*, 2022; LOUDIYI *et al.*, 2020; ZHANG, W *et al.*, 2021; FAKAYODE *et al.*, 2020).

As técnicas de espectroscopia Raman e sua versão avançada, o espalhamento Raman de superfície (SERS), permitem a identificação rápida e altamente sensível de contaminantes biológicos, químicos e físicos em alimentos sem comprometer a integridade das amostras (PETERSEN *et al.*, 2021; CHAUDHARY *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2021; HASSOUN *et al.*, 2020). Já os métodos de infravermelho, incluindo o Fourier Transform Near-Infrared (FT-NIR), são amplamente empregados para determinar a composição química, detectar micotoxinas e avaliar qualidade, oferecendo análises ágeis, ecologicamente amigáveis

e adequadas à triagem de grandes volumes (KHARBACH *et al.*, 2023; FREITAG *et al.*, 2022). Paralelamente, as abordagens baseadas em espectroscopia no ultravioleta-visível, em fluorescência e em ressonância magnética nuclear (NMR) demonstram excelente capacidade para quantificar compostos bioativos, vitaminas e fenólicos, além de autenticar ingredientes e rastrear adulterações (KHARBACH *et al.*, 2023; GUO *et al.*, 2022; HASSAN *et al.*, 2025).

Essas ferramentas espectroscópicas têm papel fundamental na garantia de autenticidade e segurança dos alimentos, sendo capazes de revelar fraudes em carnes, pescados, laticínios e demais produtos de origem animal de modo mais eficiente do que os métodos convencionais, que costumam ser destrutivos e demorados (CHAUDHARY *et al.*, 2022; HASSOUN *et al.*, 2020). Além disso, elas possibilitam o monitoramento de contaminantes como microplásticos e micotoxinas, bem como a avaliação do frescor e de atributos sensoriais, especialmente quando combinadas com técnicas quimiométricas e inteligência artificial para interpretação de dados complexos, viabilizando análises de larga escala e em tempo real (PETERSEN *et al.*, 2021; KHARBACH *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2021; GUO *et al.*, 2022; FREITAG *et al.*, 2022; HASSAN *et al.*, 2025).

3.8.1 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) baseia-se na medição da absorção de radiação infravermelha por uma amostra, gerando um espectro único que funciona como uma espécie de impressão digital das vibrações moleculares de grupos funcionais, como O–H, C–H, C=O e N–H, possibilitando sua identificação precisa (NANDIYANTO *et al.*, 2023; SIDDIQUE, 2024; ABIDI, 2021). A análise dos picos de absorção permite caracterizar compostos orgânicos, polímeros, plantas medicinais e alimentos, facilitando a detecção de componentes bioativos e a diferenciação de estruturas químicas (NANDIYANTO *et al.*, 2023; SIDDIQUE, 2024; DEV; MUKADAM, 2025). Em estudos com plantas medicinais, por exemplo, foi possível observar sinais de grupos hidroxila, carbonila, ligações C–H alifáticas e anéis aromáticos, além de bandas marcantes na faixa de 600–1500 cm^{-1} , auxiliando na discriminação de substâncias (DEV; MUKADAM, 2025).

Além de identificar grupos funcionais, o FTIR revela interações químicas e mudanças conformacionais, já que variações nos padrões de absorção refletem alterações nas ligações e na estrutura molecular (SIDDIQUE, 2024; ABIDI, 2021). Essa capacidade de monitorar reações químicas é aplicada em processos como a decomposição térmica de polímeros, a formação de géis e transformações estruturais em alimentos, nos quais é possível

detectar o surgimento ou desaparecimento de grupos funcionais ao longo do tempo (NANDIYANTO *et al.*, 2023). Recentemente, modelos de aprendizado de máquina e redes neurais profundas vêm sendo incorporados para automatizar a interpretação dos espectros FTIR, elevando a precisão das análises e reduzindo drasticamente o tempo necessário para processar os dados (ENDERS *et al.*, 2021; DOAN *et al.*, 2024; FINE *et al.*, 2020).

3.8.1.1 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) na avaliação de pescado e de filmes

A Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) tem sido amplamente empregada na avaliação da qualidade de produtos derivados da pesca, permitindo tanto o monitoramento da integridade da matriz do pescado quanto a caracterização química de filmes aplicados em alimentos. A técnica permite identificar alterações químicas e estruturais na matriz do pescado durante o armazenamento, sendo capaz de correlacionar os espectros obtidos com parâmetros de frescor, como a presença de microrganismos e compostos voláteis. Estudos demonstram que modelos baseados em FTIR alcançam alta precisão na estimativa da qualidade microbiológica de filés de peixe, representando uma alternativa eficiente, rápida e não destrutiva às análises microbiológicas tradicionais (GOVARI *et al.*, 2021). As mudanças observadas nos espectros refletem processos de degradação de proteínas, lipídios e outros constituintes, possibilitando uma avaliação precisa da integridade e da frescura do pescado ao longo do tempo (GOVARI *et al.*, 2021).

O FTIR também é uma ferramenta essencial para verificar a presença de compostos ativos, como antocianinas, curcumina ou extratos vegetais, em filmes inteligentes, além de permitir a identificação de interações químicas entre os componentes da matriz, como ligações de hidrogênio, covalentes e interações eletrostáticas (TAVAKOLI *et al.*, 2022; ZHENG *et al.*, 2024; KAMER *et al.*, 2022; SHI *et al.*, 2022; HO *et al.*, 2024; RASHID *et al.*, 2024; LI, X *et al.*, 2021; AMAREGOUDA *et al.*, 2022). Alterações nos picos espectrais associados a grupos funcionais permitem confirmar a incorporação de aditivos e detectar modificações estruturais que ocorrem durante o uso ou armazenamento dos filmes (ZHENG *et al.*, 2024; KAMER *et al.*, 2022; SHI *et al.*, 2022; HO *et al.*, 2024; RASHID *et al.*, 2024; LI, X *et al.*, 2021; AMAREGOUDA *et al.*, 2022). Além disso, a técnica é aplicada para acompanhar a estabilidade química dos materiais, avaliando sua resposta frente a variações de pH ou à exposição a compostos voláteis liberados por peixes em deterioração, o que a torna particularmente útil no desenvolvimento de embalagens inteligentes (TAVAKOLI *et al.*, 2022; ZHENG *et al.*, 2024;

KAMER *et al.*, 2022; SHI *et al.*, 2022; HO *et al.*, 2024; RASHID *et al.*, 2024; LI, X *et al.*, 2021; AMAREGOUDA *et al.*, 2022).

3.8.1.2 Aplicação da Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) na caracterização de degradação lipídica e interação revestimento–músculo do pescado

A Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) também pode ser utilizada para identificar e caracterizar as interações químicas entre os revestimentos aplicados e as proteínas musculares do pescado. A análise dos espectros FTIR permite detectar mudanças nos grupos funcionais das proteínas musculares, indicando interações covalentes e não covalentes promovidas por agentes de revestimento, como polifenóis oxidados e nanopartículas (ZHAO *et al.*, 2022). Essas interações podem resultar em modificações estruturais, como a transição de estruturas α -hélice para formas de enrolamentos aleatórios, aumento da hidrofobicidade superficial e agregação intermolecular das proteínas, o que contribui para uma matriz mais compacta do filme, melhorando suas propriedades mecânicas e funcionais (ZHAO *et al.*, 2022; WACHIRATTANAPONGMETEE *et al.*, 2023).

O FTIR também permite a diferenciação dos tipos de proteínas presentes no músculo do pescado e em seus subprodutos, identificando estruturas secundárias como α -hélice e β -lamela, além de bandas associadas a lipídios (WACHIRATTANAPONGMETEE *et al.*, 2023). Esses dados são cruciais para entender como diferentes métodos de extração e aplicação de revestimentos influenciam a estrutura e a funcionalidade das proteínas musculares. As interações detectadas por FTIR entre os revestimentos antioxidantes e as proteínas do músculo do pescado desempenham um papel importante na melhoria das propriedades antioxidantes dos filmes. Tais interações aumentam a capacidade de eliminação de radicais livres, a estabilidade térmica, bem como a barreira contra o vapor d'água e oxigênio (ZHAO *et al.*, 2022). Esses resultados demonstram a eficácia dos revestimentos na preservação da qualidade do pescado e na extensão de sua vida útil.

A análise por FTIR é essencial para elucidar as interações bioquímicas entre revestimentos e o músculo do pescado, possibilitando a otimização das formulações de filmes ativos e proporcionando um melhor entendimento das mudanças estruturais e funcionais decorrentes dessas interações (ZHAO *et al.*, 2022; WACHIRATTANAPONGMETEE *et al.*, 2023).

3.9 Parâmetros físico-químicos na conservação de pescado

A deterioração do pescado ocorre de forma acelerada logo após o abate, sendo impulsionada por processos bioquímicos e microbiológicos complexos. Entre os principais fatores envolvidos estão a atividade enzimática endógena, responsável pela degradação de proteínas e lipídios; a oxidação lipídica, que compromete o sabor, aroma e valor nutricional; e o crescimento microbiano, que favorece a contaminação por patógenos e parasitas, elevando os riscos à saúde do consumidor (NIE *et al.*, 2022; RATHOD *et al.*, 2021). A instabilidade provocada por esses mecanismos compromete significativamente a segurança alimentar, exigindo estratégias de conservação eficazes para reduzir os riscos de doenças transmitidas por alimentos (NIE *et al.*, 2022; RATHOD *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a manutenção da integridade e do frescor da carne de peixe ao longo da cadeia produtiva é fundamental não apenas para preservar suas qualidades nutricionais e sensoriais, mas também para assegurar o fornecimento de um alimento seguro, funcional e com elevado valor biológico (NIE *et al.*, 2022; RATHOD *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2023). O controle rigoroso dos parâmetros físico-químicos torna-se, portanto, essencial para garantir a qualidade e a conservação do pescado.

3.9.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

O potencial hidrogeniônico (pH) constitui um dos principais parâmetros físico-químicos empregados na avaliação da deterioração microbiana em produtos pesqueiros. A elevação do pH reflete diretamente a proliferação de microrganismos e a formação de compostos voláteis nitrogenados, indicando o início da perda de qualidade e frescor do peixe. Ao longo do armazenamento, enzimas microbianas degradam proteínas e aminoácidos do pescado, liberando amônia, aminas e outros compostos básicos, o que promove o aumento do pH do produto (LEIWAKABESSY *et al.*, 2024; HUANG *et al.*, 2021; ZHUANG *et al.*, 2022a; MOHAMMADALINEJHAD *et al.*, 2020; ZHUANG *et al.*, 2022b). O incremento no pH acompanha a multiplicação da carga microbiana, relacionando-se ao acréscimo de nitrogênio volátil total (TVB-N) e trimetilamina, ambos marcadores consagrados de deterioração (LEIWAKABESSY *et al.*, 2024; HUANG *et al.*, 2021; ZHUANG *et al.*, 2022a; MOHAMMADALINEJHAD *et al.*, 2020; GOPIKA *et al.*, 2023). Estudos indicam que, conforme o pescado perde frescor, o pH pode evoluir de valores característicos de 6,1–6,6 (fresco) para acima de 7,0 em amostras deterioradas (LEIWAKABESSY *et al.*, 2024; HUANG *et al.*, 2021).

Filmes inteligentes e sensores colorimétricos sensíveis ao pH, elaborados com corantes naturais ou pontos quânticos, exibem alterações cromáticas em resposta ao aumento do pH, permitindo inspeção visual do frescor do pescado (KHAN *et al.*, 2024; YAN *et al.*, 2021; ZHUANG *et al.*, 2022a; GOPIKA *et al.*, 2023 MOHAMMADALINEJHAD *et al.*, 2020). Essas tecnologias apresentam mudanças de cor distintas (por exemplo, de azul para verde ou amarelo) à medida que o pH se eleva, refletindo o crescimento microbiano e a elevação de TVB-N (KHAN *et al.*, 2024; YAN *et al.*, 2021; ZHUANG *et al.*, 2022a; GOPIKA *et al.*, 2023 MOHAMMADALINEJHAD *et al.*, 2020). Indicadores de pH incorporados à embalagem representam ferramentas práticas para o monitoramento contínuo da qualidade do pescado ao longo de toda a cadeia de distribuição (KHAN *et al.*, 2024; LIU *et al.*, 2022; GOPIKA *et al.*, 2023 MOHAMMADALINEJHAD *et al.*, 2020).

3.9.2 Nitrogênio das Bases Voláteis Totais (N-BVT): composto associado à desaminação bacteriana

O N-BVT (Nitrogênio das Bases Voláteis Totais) configura-se como um dos principais parâmetros físico-químicos para monitoramento da qualidade e frescor em pescado. Esse índice está diretamente vinculado à desaminação bacteriana e constitui um marcador confiável da deterioração microbiana durante o armazenamento do peixe. O N-BVT origina-se principalmente pela ação de bactérias deterioradoras, que degradam aminoácidos e proteínas do pescado, liberando compostos voláteis básicos como amônia, trimetilamina (TMA) e dimetilamina (YANG *et al.*, 2023; YI; XIE, 2022; BEKHIT *et al.*, 2021).

A desaminação bacteriana consiste na remoção de grupos amina dos aminoácidos por enzimas microbianas, resultando na formação dos compostos voláteis que compõem o TVB-N (YI; XIE, 2022; BEKHIT *et al.*, 2021). Espécies como *Pseudomonas* spp. e *Shewanella putrefaciens* são frequentemente apontadas como principais responsáveis pela elevação do TVB-N em peixes armazenados, devido à sua elevada capacidade de desaminar aminoácidos (YANG *et al.*, 2023; PAN *et al.*, 2021; YI; XIE, 2022).

O aumento dos valores de N-BVT apresenta correlação direta com o crescimento bacteriano e a deterioração sensorial do pescado, manifestada por odor desagradável e alterações na textura (YANG *et al.*, 2023; KIM *et al.*, 2023; PAN *et al.*, 2021; KRITIKOS *et al.*, 2020; YI e XIE, 2022; PRABHAKAR *et al.*, 2021). O N-BVT é amplamente adotado como índice de frescor e critério de limite para consumo seguro, sendo monitorado sob diferentes condições de armazenamento e processamento (KIM *et al.*, 2023; KRITIKOS *et al.*, 2020;

BEKHIT *et al.*, 2021; PRABHAKAR *et al.*, 2021).

O armazenamento sob condições refrigeradas, em torno de 4 °C, representa uma das estratégias mais eficazes para retardar a formação de N-BVT, contribuindo significativamente para a preservação da qualidade do pescado ao longo do tempo. Nesta temperatura há inibição parcial do crescimento de microrganismos deterioradores, reduzindo, conseqüentemente, a taxa de produção de compostos voláteis nitrogenados como o N-BVT (FARSANIPOOR *et al.*, 2020; KIZILKAYA; KAYA, 2023). Contudo, em amostras não submetidas a tratamentos adicionais, os níveis de N-BVT podem ultrapassar o limite de 25 mg/100 g após aproximadamente 15 dias de refrigeração, indicando o início da deterioração microbiológica (KIZILKAYA; KAYA, 2023).

A aplicação de revestimentos bioativos contendo quitosana, nanopartículas ou óleos essenciais, quando associada à refrigeração, potencializa a contenção da deterioração, mantendo os níveis de N-BVT abaixo de 20 mg/100 g mesmo após 18 dias de armazenamento (FARSANIPOOR *et al.*, 2020; KIZILKAYA; KAYA, 2023).

Sistemas modernos, como sensores colorimétricos e hidrogéis inteligentes, permitem o monitoramento rápido e não destrutivo do N-BVT, aprimorando o controle de qualidade ao longo da cadeia produtiva (KIM *et al.*, 2023; ZHANG, Y. *et al.*, 2021).

3.9.3 Substâncias Reativas ao Ácido Tiobarbitúrico (TBARS): medidor da oxidação lipídica em pescado

O teste de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) é amplamente utilizado como indicador da oxidação lipídica em pescado. Este método quantifica produtos secundários gerados pela degradação oxidativa dos lipídios, especialmente o malondialdeído, sendo fundamental para avaliar a estabilidade e a qualidade de peixes e seus derivados ao longo do armazenamento. O ensaio de TBARS baseia-se na quantificação de compostos como o malondialdeído, oriundo da oxidação de ácidos graxos poli-insaturados presentes em matrizes lipídicas como o pescado (LI *et al.*, 2020; KUNYABOON *et al.*, 2021; SAJIB *et al.*, 2022; LE *et al.*, 2020; SAJIB *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2021). Valores elevados de TBARS refletem um maior grau de oxidação lipídica, condição associada à perda de atributos sensoriais desejáveis, desenvolvimento de sabores e odores rancificados e redução do valor nutricional do produto (KUNYABOON *et al.*, 2021; SAJIB *et al.*, 2022; WU *et al.*, 2021; KUBIRIZA *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2020).

A formação de produtos oxidativos pode ser intensificada por diversos fatores,

incluindo exposição ao oxigênio, irradiação, tempo prolongado de armazenamento, métodos de secagem, e a presença de catalisadores oxidativos como a hemoglobina (LI *et al.*, 2020; KUNYABOON *et al.*, 2021; SAJIB *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2020; CUI *et al.*, 2022b). A aplicação de antioxidantes naturais, como extratos de alecrim ou compostos fenólicos, assim como o uso de embalagens com propriedades de barreira, tem demonstrado reduzir significativamente os níveis de TBARS em pescados durante o processamento e conservação (SAJIB *et al.*, 2022; LE *et al.*, 2020; SAJIB *et al.*, 2021; MALGA *et al.*, 2022). Adicionalmente, técnicas de processamento como lavagens sucessivas, variações nas condições de secagem e adição de conservantes também influenciam a estabilidade oxidativa do pescado, impactando diretamente os valores de TBARS (KUNYABOON *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2021; KUBIRIZA *et al.*, 2021; CUI *et al.*, 2022).

O método de TBARS é amplamente empregado para o controle de qualidade de pescado em diferentes formas, fresco, processado, enlatado ou em subprodutos, sendo referência na avaliação do rancor oxidativo (KUNYABOON *et al.*, 2021; SAJIB *et al.*, 2022; WU *et al.*, 2021; KUBIRIZA *et al.*, 2021; MALGA *et al.*, 2022). Entretanto, apesar de sua sensibilidade e praticidade, o ensaio pode sofrer interferência de outros aldeídos e compostos presentes na matriz alimentar, exigindo cautela na análise de resultados, sobretudo em produtos com alto teor proteico ou em sistemas contendo filmes à base de gelatina (LE *et al.*, 2020).

3.9.4 Determinação da tensão superficial crítica de acordo com Zisman

A determinação da tensão superficial crítica por meio do método de Zisman (1964) constitui uma abordagem clássica e amplamente empregada na caracterização das propriedades de molhabilidade de superfícies sólidas. Essa técnica é fundamental para compreender o comportamento de líquidos em contato com materiais, especialmente no que se refere à adesão ou repelência de fluidos. O método baseia-se na medição do ângulo de contato de uma série de líquidos com diferentes tensões superficiais aplicados sobre a superfície de interesse. A partir desses dados, constrói-se um gráfico relacionando o cosseno do ângulo de contato com a tensão superficial dos líquidos utilizados, o chamado *Zisman plot* (MCHALE *et al.*, 2022; MYRONYUK, 2023; SUTER *et al.*, 2020; MYRONYUK *et al.*, 2021).

A tensão superficial crítica (γ_c) é determinada por extrapolação da curva até o ponto em que o ângulo de contato se aproxima de zero, indicando molhamento completo da superfície sólida (MCHALE *et al.*, 2022; MYRONYUK, 2023; SUTER *et al.*, 2020; MYRONYUK *et al.*, 2021). Ela representa o limiar a partir do qual um líquido deixa de apresentar molhamento

completo sobre a superfície. Superfícies com valores de γ_c mais baixos tendem a ser mais hidrofóbicas e menos suscetíveis à adesão de líquidos (MYRONYUK, 2023; SUTER *et al.*, 2020; MYRONYUK *et al.*, 2021). Essa metodologia é amplamente utilizada para avaliar o efeito de modificações superficiais, como tratamentos químicos, funcionalizações ou texturizações, possibilitando a análise da eficiência de processos destinados a aumentar a repelência à água ou a promover adesão seletiva de revestimentos (MYRONYUK, 2023; SUTER *et al.*, 2020; MYRONYUK *et al.*, 2021). Embora tradicionalmente aplicada em materiais como metais, polímeros e cerâmicas, a abordagem pode ser adaptada a superfícies biológicas ou alimentícias, desde que seja possível mensurar com precisão os ângulos de contato com líquidos apropriados (MCHALE *et al.*, 2022; MYRONYUK, 2023; SUTER *et al.*, 2020).

A precisão da determinação da tensão superficial crítica depende diretamente da escolha criteriosa dos líquidos de teste e da uniformidade da superfície analisada. Superfícies excessivamente rugosas, porosas ou quimicamente heterogêneas podem dificultar a obtenção de resultados precisos, especialmente no que diz respeito à definição do ponto de transição de molhamento (MYRONYUK, 2023; MYRONYUK *et al.*, 2021).

3.10 Desafios e perspectivas futuras na aplicação de revestimentos comestíveis para conservação de pescado

A aplicação de revestimentos comestíveis para conservação de pescado tem demonstrado avanços significativos, mas ainda enfrenta desafios técnicos, econômicos e regulatórios. O desenvolvimento contínuo dessas tecnologias é crucial para garantir maior vida útil, qualidade e sustentabilidade na cadeia produtiva do pescado. Um dos principais desafios está em assegurar que os revestimentos mantenham suas propriedades de barreira, antioxidantes e antimicrobianas durante todo o processo de armazenamento. Isso é especialmente complexo devido à alta perecibilidade do pescado e às variações nas condições de armazenamento, que podem afetar a eficácia desses revestimentos (ERANDA *et al.*, 2024a; KUREK *et al.*, 2024; UMARAW *et al.*, 2020).

Os revestimentos não devem alterar as características sensoriais do pescado, como sabor, aroma, textura ou aparência, pois isso pode comprometer a aceitação do consumidor. Encontrar soluções que assegurem uma conservação eficiente sem comprometer a qualidade sensorial do produto final é um desafio contínuo (ERANDA *et al.*, 2024b; KUREK *et al.*, 2024; MEZHOUDI *et al.*, 2022).

Embora a produção de revestimentos comestíveis tenha potencial, a produção em larga escala, especialmente para aqueles enriquecidos com compostos bioativos ou nanotecnologia, pode ser limitada por custos elevados e pela complexidade do processo de fabricação (UMARAW *et al.*, 2020; HASHEMI *et al.*, 2023; KOIRALA *et al.*, 2023). A viabilidade econômica precisa ser aprimorada para que esses produtos sejam acessíveis para a indústria. A introdução de novos materiais, especialmente os que envolvem nanomateriais e extratos vegetais, requer avaliações rigorosas de segurança alimentar. A aprovação regulatória é um passo fundamental, sendo necessário garantir que esses materiais sejam seguros para consumo e não apresentem riscos à saúde pública (HASHEMI *et al.*, 2023; KOIRALA *et al.*, 2023).

Uma tendência crescente é o desenvolvimento de revestimentos com propriedades antioxidantes, antimicrobianas e até indicadores de frescor, como a mudança de cor, que podem facilitar o monitoramento da qualidade do pescado. Essas inovações podem proporcionar melhor conservação e permitir que os consumidores ou a indústria acompanhem a frescura do produto de forma prática e visual (ERANDA *et al.*, 2024a; KUREK *et al.*, 2024; KOIRALA *et al.*, 2023). A incorporação de nanoemulsões e nanolipossomas nos revestimentos comestíveis promete aumentar a eficácia dos compostos bioativos, melhorar a estabilidade dos produtos e possibilitar a liberação controlada de agentes conservantes, proporcionando um controle mais preciso sobre a preservação do pescado (HASHEMI *et al.*, 2023; KOIRALA *et al.*, 2023).

O uso de biopolímeros provenientes de fontes renováveis e resíduos agroindustriais está alinhado com os objetivos de desenvolvimento sustentável. Isso não só contribui para a redução do impacto ambiental das embalagens convencionais, como também oferece uma alternativa ecológica e de baixo custo (UMARAW *et al.*, 2020; ERANDA *et al.*, 2024a).

As pesquisas futuras devem se concentrar na otimização das formulações de revestimentos para diferentes espécies de pescado e condições de armazenamento específicas. Além disso, é necessário buscar soluções economicamente viáveis, que atendam às necessidades da indústria e sejam acessíveis para produtores de diferentes escalas (UMARAW *et al.*, 2020; ERANDA *et al.*, 2024a; KUREK *et al.*, 2024).

4 MATERIAL E MÉTODOS

As atividades experimentais descritas neste estudo foram conduzidas no Laboratório de Tecnologia do Pescado (LATEPE), vinculado ao Departamento de Engenharia de Pesca do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, no Campus do Pici, em Fortaleza (CE) e no Laboratório de Tecnologia de Biomassa (LTB) da Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMPRAPA).

4.1 Material biológico

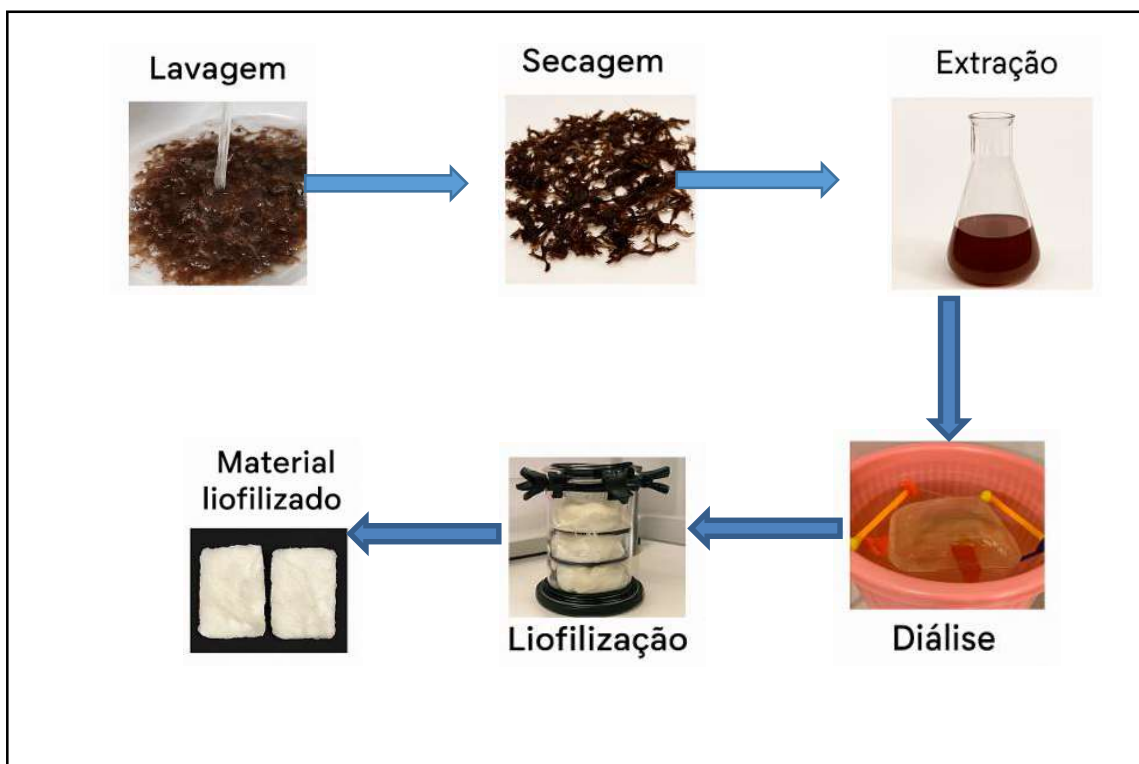
A coleta da macroalga marinha *Hypnea pseudomusciformis* foi realizada em uma estação de cultivo marinho instalada na praia de Flecheiras, no município de Trairi, litoral leste do Ceará. O material está cadastrado no SISGEN (Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e Conhecimento Tradicional Associado) sob o protocolo A16FF22. As amostras foram coletadas, acondicionadas em sacos plásticos, armazenadas com gelo em caixas térmicas e transportadas ao Laboratório de Tecnologia do Pescado (LATEPE). No laboratório as algas passaram por um processo de lavagem com água destilada para retirada de materiais indesejados que se apresentavam incrustados como sais e areia, e logo após foram colocadas para secagem à luz do sol. Depois de seco o material foi cortado para facilitar o processo de extração e armazenado sob congelamento.

4.2 Processo de extração da carragenana a partir de alga *Hypnea pseudomusciformis*

A extração da carragenana se deu de acordo com a metodologia proposta por Rodrigues *et al.* (2011) e foi realizada em dois métodos, um a frio e o outro em aquecimento (Figura 1). As algas foram retiradas do freezer, descongeladas, secas em estufa e moídas em um moinho de facas (Tecnal – Wiley TE-650/1). Após moagem o pó obtido foi submetido à extração em temperatura ambiente com o auxílio de água destilada utilizada na proporção de 1:67 (m/v), por cerca de 24 horas. Decorrido o tempo a alga foi filtrada. Posteriormente realizou-se a extração a 80°C por 04 horas, para a precipitação do polissacarídeo foi utilizado etanol a 96% na proporção de 1:3 (v/v), havendo assim a formação de géis. O etanol utilizado

no processo foi retirado por diálise em membranas de celulose (Sigma-Aldrich, 76 mm) em água destilada, havendo a troca a cada 3 horas por cerca de 06 a 08 vezes. Finalizada a diálise o material foi liofilizado em liofilizador (Líotop, Serie; 39413, Brasil) a uma pressão entre 400 a 300 μ Hg em uma temperatura -50°C por cerca de 75 horas, sendo pesado posteriormente e determinado o seu rendimento.

Figura 1 - Fluxograma do processo de extração da carragenana da macroalga vermelha *Hypnea pseudomusciformis*.



Fonte: Autora (2025).

4.3 Preparo das soluções dos revestimentos comestíveis

Para o preparo dos revestimentos comestíveis utilizou-se como base a metodologia proposta por Souza *et al.* (2010) com algumas adaptações. Foram utilizadas três concentrações diferentes de carragenana (1,0%, 1,5% e 2,0% (m/v)) dissolvidas em água destilada (v/v) para o preparo das soluções estoque. Tais soluções foram colocadas em agitação mecânica por uma hora a uma temperatura de 40°C . Cada solução estoque foi então dividida e houve adição do

surfactante Tween 80 em diferentes concentrações - 0,0%, 0,1% e 0,2% (m/v), seguido de agitação por um tempo decorrido de 30 minutos.

4.4 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos revestimentos

As amostras dos revestimentos, avaliadas separadamente, foram submetidas à análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) de acordo com o proposto por Vandanjon *et al.* (2023), utilizando o modo de reflectância total atenuada (ATR). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Química de Produtos Naturais da Embrapa Agroindústria Tropical, com o auxílio de um espectrofotômetro da marca Varian, modelo FT-IR, operando na faixa de 4000 a 400 cm^{-1} .

4.5 Determinação da Tensão Superficial Crítica

A determinação da tensão superficial crítica (γ_c) foi realizada segundo o método proposto por Zisman (1964), adequado para superfícies de baixa energia, com valores de γ inferiores a 100 mN/m. Para isso, foi calculado o trabalho de adesão (W_a) de um líquido puro em contato com a superfície do filé de salmão, utilizando a equação:

$$W_a = 2\sqrt{\gamma_S^d \gamma_L^d} + \sqrt{\gamma_S^p \gamma} \quad (1)$$

Onde γ_S e γ_L são os componentes polares e dispersivos da superfície do sólido e do líquido testado, respectivamente.

A extrapolação da curva de Zisman foi realizada a partir dos ângulos de contato de três líquidos de referência (água ultrapura, bromonaftaleno e formamida), possibilitando a estimativa do γ_c dos filés de salmão, de acordo com a equação:

$$W_s = W_a - W_c = \gamma_{SV} - \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (2)$$

Para estimar a tensão superficial crítica (γ_c), foi utilizado o método de Zisman (1964), medindo-se o ângulo de contato para três líquidos de referência: formamida, bromonaftaleno e água ultrapura. As medições foram realizadas em um medidor de ângulo de contato (OCA 20, Dataphysics, Alemanha) pelo método da gota séssil, com 20 repetições a $21,1^\circ\text{C}$ ($\pm 0,4^\circ\text{C}$).

4.6 Análise da Molhabilidade

A avaliação da molhabilidade das soluções de revestimento foi realizada por meio da análise do coeficiente de espalhamento (W_s), além dos trabalhos de adesão (W_a) e coesão (W_c). Para determinar a tensão superficial da solução, utilizou-se o método da gota pendente, baseado no modelo de Laplace-Young, que relaciona tensão superficial, ângulo de contato e curvatura da interface líquido-gás (BEKETOV; SHYNKARENKO, 2022).

O ângulo de contato (θ), que expressa o grau de interação entre uma gota de líquido e uma superfície sólida, resulta do equilíbrio entre três tensões interfaciais: sólido-vapor (γ_{SV}), sólido-líquido (γ_{SL}) e líquido-vapor (γ_{LV}). A partir desses parâmetros, o coeficiente de espalhamento (W_s) foi determinado utilizando a seguinte equação:

$$W_s = W_a - W_c = \gamma_{SV} - \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (3)$$

Onde:

- W_a representa o trabalho de adesão, definido como:

$$W_a = \gamma_{LV} - \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (4)$$

- W_c corresponde ao trabalho de coesão, expresso por:

$$W_c = 2\gamma_{LV} \quad (5)$$

As medições do ângulo de contato (θ) e da tensão superficial líquido-vapor (γ_{LV}) foram realizadas com um medidor de ângulo de contato (OCA 20, Dataphysics, Alemanha). Para a coleta das amostras de revestimento, utilizou-se uma seringa de 500 mL (Hamilton, Suíça) equipada com uma agulha de 0,75 mm de diâmetro. A medição do ângulo de contato na superfície dos filés foi feita pelo método da gota sésil, com um tempo máximo de análise de 30 segundos por amostra. Cada solução foi testada 20 vezes, sob temperatura controlada de $21,1 \pm 0,4^\circ\text{C}$.

4.7 Critério de escolha para aplicação dos revestimentos em salmão

O critério adotado para a escolha da solução da carragenana utilizada nos revestimentos baseou-se nos resultados do teste de molhabilidade. A formulação que apresentou valores de W_s mais próximos de zero foi considerada a mais eficiente na formação de uma camada de revestimento comestível mais uniforme e estável sobre os filés de salmão.

4.8 Aplicação do revestimento nos filés de salmão

As soluções de revestimento foram esterilizadas antes da aplicação, utilizando luz UV (254 nm) por 2 minutos. As amostras de filé de salmão foram submersas na solução de revestimento por 10 segundos e, em seguida, secas por 1 minuto em uma tela de malha de aço inoxidável estéril. O grupo controle foi submetido ao mesmo processo, mas sem a aplicação do revestimento. Para cada tratamento, os filés de salmão ($n = 3$) foram embalados individualmente em sacos plásticos e armazenados a 0°C por um período de 18 dias. Ao longo desse período, amostras de peixe foram retiradas a intervalos regulares (0, 3, 6, 9, 12, 15 e 18 dias) para realização de análises microbiológicas e físico-químicas.

4.9 Análises físico-químicas para a vida de prateleira dos filés de salmão

4.9.1 Determinação do pH

A determinação do pH foi realizada com auxílio de um pHmetro digital (micro pH, Crison, Barcelona, Espanha). Para a análise, 10 g de músculo do filé de salmão foram homogeneizados com 100 mL de água destilada durante 30 segundos. Em seguida, a mistura será filtrada em papel de filtro Whatman nº 1, conforme descrito na metodologia do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008).

4.9.2 Determinação do Nitrogênio das Bases Voláteis Totais (N-BVT) e Nitrogênio da Trimetilamina (N-TMA)

A avaliação do Nitrogênio das Bases Voláteis Totais (N-BVT) e Nitrogênio da Trimetilamina (N-TMA) foi realizada a partir de amostras de pescado, que foram submetidas a um processo de homogeneização. Para a análise, 100 g da amostra foram misturados com 200 mL de solução de ácido tricloroacético (TCA) a 7,5% (v/v) e homogeneizados por 1 minuto. O extrato resultante foi então submetido à centrifugação a 1000 g, por 5 minutos, e o sobrenadante foi filtrado. A quantificação do nitrogênio volátil total (N-BVT) seguiu o método de destilação a vapor descrito por Malle e Tao (1987).

A determinação do Nitrogênio de Trimetilamina (N-TMA) utilizou o mesmo protocolo, com a diferença da adição de 20 mL de formaldeído a 35% (v/v) no tubo de alimentação, com o propósito de inativar as aminas primárias e secundárias, permitindo a reação específica das aminas terciárias. As concentrações de N-BVT e N-TMA foram calculadas com base no volume de ácido sulfúrico consumido durante a titulação, sendo os resultados expressos em miligramas de nitrogênio por 100 g de amostra.

4.9.3 Determinação de Substâncias Reativas ao Ácido Tiobarbitúrico (TBARS)

A oxidação lipídica dos filés de *Salmo salar* foi monitorada por meio da quantificação de Substâncias Reativas ao Ácido Tiobarbitúrico (TBARS), conforme metodologia descrita por Vyncke (1970), com adaptações.

O princípio do método baseia-se na reação entre o ácido tiobarbitúrico (TBA) e produtos secundários da oxidação lipídica, especialmente o malonaldeído (MDA), formando um complexo de coloração rósea mensurável espectrofotometricamente. Esse parâmetro é amplamente utilizado como marcador da deterioração química de pescados durante o armazenamento refrigerado.

Para obtenção do extrato, foram pesados 10 g de músculo do filé, os quais foram macerados e homogeneizados com 50 mL de solução de ácido tricloroacético (TCA) a 7,5% (m/v). A mistura permaneceu em repouso por aproximadamente 5 minutos para favorecer a extração dos compostos reativos, sendo posteriormente filtrada em papel de filtro qualitativo.

Do filtrado obtido, alíquotas de 5 mL foram transferidas para tubos de vidro contendo 5 mL de solução de ácido tiobarbitúrico (TBA) 0,02 M, sendo homogeneizadas em agitador de tubos. Para o branco, utilizou-se 5 mL de solução de TBA e 5 mL de solução de TCA a 7,5%.

Os tubos foram submetidos a aquecimento em banho-maria a 90 °C por 10 minutos para desenvolvimento da coloração característica do complexo TBA-MDA. Após esse período, as amostras foram resfriadas em banho de água para interromper a reação. Em seguida, procedeu-se à leitura da absorbância em espectrofotômetro digital no comprimento de onda de 532 nm.

A quantificação dos resultados foi realizada a partir de curva padrão preparada com 1,1,3,3-tetraetoxipropano (TEP), utilizado como precursor de malonaldeído. Os valores de TBARS foram expressos em mg de malonaldeído equivalente por quilograma de músculo (mg MDA eq./kg), calculados por meio da equação:

$$TBARS = \frac{ABS - 0,032}{0,0789} \quad (6)$$

As análises foram realizadas em triplicata, e os resultados utilizados para acompanhar a evolução da oxidação lipídica ao longo do armazenamento refrigerado

4.9.4 Determinação do Valor K

O índice K foi determinado conforme o método de Ryder (1985). Para a análise, 5 g de filé de salmão foram homogeneizados em 25 mL de ácido perclórico (0,6 mol/L), previamente refrigerado a 0°C, por 1 minuto.

Após a homogeneização, a mistura foi centrifugada a 2000 g por 10 minutos. O sobrenadante obtido teve seu pH ajustado entre 6,5 e 6,8 com uma solução de hidróxido de potássio (1 mol/L). O precipitado formado pelo perclorato de potássio foi eliminado por filtração em papel Whatman nº 1 e, posteriormente, o filtrado foi passado por uma membrana Millipore de 0,20 µm. As amostras foram armazenadas a -80°C até a análise.

Para a quantificação dos nucleotídeos e seus produtos de degradação, utilizou-se 20 µL do extrato filtrado, analisado por HPLC equipado com detector UV-VIS e utilizando uma coluna Nucleosil 120-5 C18. A separação dos nucleotídeos foi realizada com fase móvel composta por 0,04 mol/L de di-hidrogenofosfato de potássio e 0,06 mol/L de hidrogênio ortofosfato de potássio, dissolvidos na proporção 1:1 em água ultrapura, com fluxo de 0,8 mL/min.

A identificação e quantificação dos picos cromatográficos foram feitas a partir de curvas padrão de nucleotídeos degradativos do ATP, considerando ATP, ADP, AMP, IMP, inosina (Ino) e hipoxantina (Hx). O valor K foi calculado pela equação de Saito *et al.* (1959):

$$K\% = \frac{(Ino + Hx)}{(ATP + ADP + AMP + IMP + Ino + Hx)} \quad (7)$$

4.10 Análises Microbiológicas

A contagem aeróbia total (TPC) foi realizada segundo os protocolos da American Public Health Association (APHA), conforme descrito na 4.^a edição do *Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods* (DOWNES; ITO, 2001).

4.10.1 Preparo das Amostras

Para cada amostra, foram pesados 25 g de músculo de salmão de forma asséptica e transferidos para sacos estéreis para homogeneização (saco para stomacher). Acrescentaram-se 225 mL de água peptonada estéril a 0,1% (Becton, Dickinson and Co., Le Pont de Claix, França), obtendo-se a diluição inicial de 10^{-1} . As amostras foram homogeneizadas por 1–2 minutos em homogeneizador tipo Stomacher 3500 (Seward Medical, Worthing, Reino Unido). A partir desse homogenato prepararam-se diluições decimais seriadas (1 mL em 9 mL de diluente estéril) até 10^{-7} , conforme necessidade analítica.

4.10.2 Preparo das Placas e Incubação

Para determinação da TPC utilizou-se a técnica de semeadura superficial (*spread plate*). Alíquotas de 0,1 mL das diluições apropriadas foram distribuídas, em duplicata, sobre a superfície de placas de Petri estéreis contendo Ágar Padrão para Contagem (Plate Count Agar – PCA; Oxoid, CM0325, Basingstoke, Reino Unido). Após a absorção do inóculo, as placas foram secas por curto período em capela e incubadas invertidas a 30 °C por 72 h em estufa bacteriológica calibrada.

4.10.3 Determinação do Número de Unidades Formadoras de Colônias (UFC)

Após incubação, as colônias foram enumeradas com auxílio de contador automático de colônias (PHOENIX, modelo CP600). Para cálculo adotou-se a média das duplicatas nas placas com contagens entre 25 e 250 colônias.

A contagem foi calculada pela equação:

$$UFC/g = \frac{\text{número de colônias} \times \text{o inverso do fator de diluição}}{\text{volume inoculado}} \quad (8)$$

Os resultados foram expressos em log UFC/g, seguindo as recomendações de Downes e Ito (2001).

4.11 Análises Estatísticas

Os experimentos físico-químicos foram realizados em triplicata, já os microbiológicos foram em duplicata. A análise estatística foi conduzida por meio de Análise de Variância (ANOVA) e regressão linear, aplicando-se o teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para identificar diferenças significativas entre as médias. Todas as análises foram realizadas no software SigmaStat (versão de teste, 2003).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Molhabilidade

A avaliação do coeficiente de espalhamento (W_s) tem se estabelecido como um método preciso para quantificar a molhabilidade de soluções de carragenana em superfícies alimentares, fornecendo parâmetros essenciais para o ajuste de formulações e assegurando aderência e cobertura uniformes em diversas matrizes alimentícias (BAN *et al.*, 2021).

Os resultados de molhabilidade (Tabela 2) mostraram que o coeficiente de espalhamento (W_s) das soluções testadas variou de $-4,53 \pm 0,66$ a $-13,00 \pm 0,81$. As formulações contendo até 1,5% (m/v) de carragenana, mesmo na presença de até 0,2% (m/v) de Tween 80 (soluções 1–4), não apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$) e exibiram valores de W_s entre $-4,53$ e $-6,01$, indicando boa capacidade de cobertura da superfície do filé, provavelmente em função da viscosidade moderada das soluções. Resultados compatíveis foram relatados por SILVA *et al.* (2024), que observaram $W_s \approx -4,49$ para coberturas de carragenana 1% aplicadas em peito de frango. Em contraste, RIBEIRO *et al.* (2007) registraram $W_s \approx -45,28$ em morangos revestidos com uma formulação de carragenana, glicerol e Tween 80. Essa discrepância pode refletir diferenças na matriz alimentar, na composição da formulação e no método de aplicação.

Tabela 2 - Coeficiente de espalhamento (W_s) obtido para as soluções de carragenana testadas em filés de *Salmo salar*.

Soluções	Carragenana (m/v)	Tween (m/v)	Coeficiente de espalhamento (W_s)
1	1.0	0.0	-4.53 ± 0.66a
2	1.0	0.1	- 4.66 ± 0.42a
3	1.0	0.2	- 6.01 ± 0.44abc
4	1.5	0.0	- 5.27 ± 0.39a
5	1.5	0.1	- 8.32 ± 0.48be
6	1.5	0.2	- 9.01 ± 0.51ce
7	2.0	0.0	- 13.00 ± 0.81df
8	2.0	0.1	- 9.45 ± 0.47eg
9	2.0	0.2	- 12.13 ± 0.79fg

Fonte: Autora (2025). Os valores relatados são as médias \pm desvios-padrão ($n = 25$, intervalo de confiança de 95%, a $25,0 \pm 1$ °C). Letras diferentes na mesma coluna indicam uma diferença estatisticamente significativa (teste de Tukey, $p < 0,05$). Os valores em negrito são os melhores valores de molhabilidade.

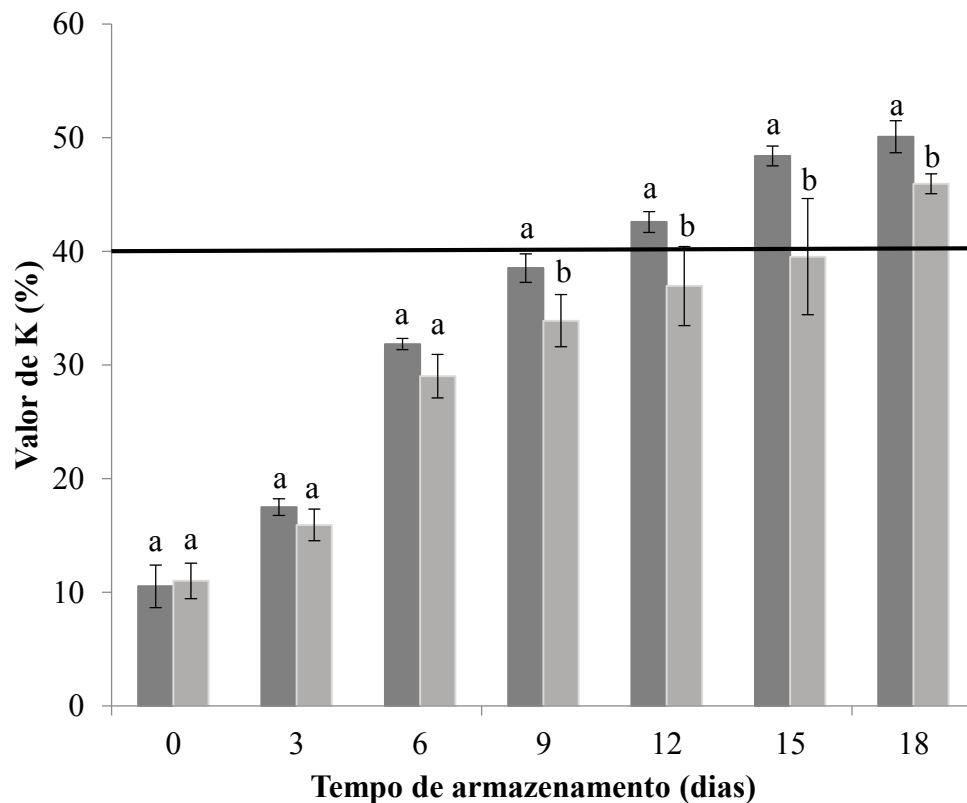
O aumento da concentração polimérica para 2,0% elevou a viscosidade das soluções e provocou queda acentuada do coeficiente de espalhamento W_s (até $-13,00$; $p < 0,05$), o que reflete maior coesão interna da matriz e menor capacidade de espalhamento sobre a superfície do filé. Esse comportamento é similar ao observado em filmes de κ -carragenana enriquecidos com óleos essenciais, que apresentam ângulos de contato superiores a 90° e superfícies mais hidrofóbicas (SANTOS *et al.*, 2023). A adição de Tween 80 (0,1–0,2% m/v) não trouxe melhoria significativa na molhabilidade das formulações mais viscosas, sugerindo que o efeito redutor de tensão superficial do surfactante foi suplantado pelas forças coesivas da rede polimérica (DE JESUS *et al.*, 2023). Em contrapartida, Madivoli *et al.* (2024) verificaram que a incorporação de amido em filmes à base de carragenana pode melhorar a molhabilidade, indicando que a interação entre polímeros e aditivos é determinante para as propriedades de espalhamento.

Considerando o equilíbrio entre baixas viscosidade e tensão superficial, adesão adequada ao filé e excelente repetibilidade (desvios-padrão inferiores a 1,0), a solução de 1,0% de carragenana sem adição de surfactante foi selecionada para revestir filés de salmão, mostrando-se promissora para aplicações em escala industrial de filmes comestíveis destinados à conservação de pescado.

5.2 Valor de K

Os valores de K do salmão foram calculados a partir da concentração de nucleotídeos ao longo dos 18 dias de armazenamento, como mostrado no Gráfico 1. Se o valor de K permanecer abaixo de 20%, o pescado é considerado fresco. Ao atingir cerca de 60%, ele já se encontra na fase inicial de decomposição. Valores iguais ou superiores a 65% indicam que o peixe não está mais seguro para o consumo (HWANG *et al.*, 2019).

Gráfico 1 – Efeito do revestimento de carragenana no Índice de K (%) em filés de *Salmo salar* ao longo do armazenamento refrigerado a 0 °C durante 18 dias.



Fonte: Autora (2025). Valor de K para amostra controle e amostra revestida de filés de salmão durante armazenamento a 0°C. As barras cinza-escuras representam a amostra controle e as barras cinza-claras representam a amostra com revestimento em filés de salmão. A linha horizontal está representando o limite de rejeição da carne do peixe, que é de 40%. Letras diferentes no mesmo dia indicam uma diferença estatisticamente significativa (teste de Tukey, $p < 0,05$).

Os valores de K evoluíram ao longo dos 18 dias de refrigeração, começando em 10,53% para o controle e 11,02% para o filé revestido com carragenana. Até o nono dia, ambos

os grupos mantiveram K abaixo de 30%, porém a amostra com revestimento apresentou aumento mais lento, atingindo cerca de 28% contra 32% do controle, o que sinaliza uma desaceleração na conversão de IMP em inosina e hipoxantina (WANG *et al.*, 2025). Em um estudo com filés de salmão foi observado que com 05 dias de armazenamento refrigerado, o valor de K atingiu 48,03%. Com 10 dias, o valor de K sofreu um aumento e chegou a 59,51% (CHEN *et al.*, 2022).

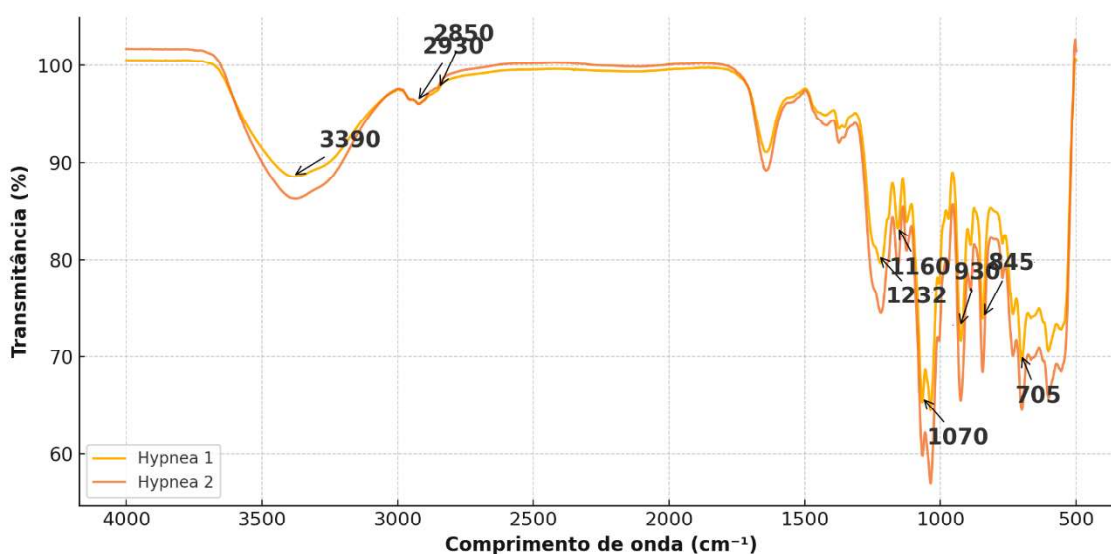
No décimo segundo dia, o controle ultrapassou o limite de rejeição de 40% ($\approx 42\%$), enquanto o filé revestido com carragenana situou-se em torno de 38%, atrasando o ponto crítico em aproximadamente três dias. Entre o décimo quinto e décimo oitavo dia, o valor de K continuou superior no controle ($\approx 50\%$) em relação à amostra com revestimento ($\approx 46\%$). Do ponto de vista estritamente experimental, ainda são raros os estudos que mensuram diretamente o valor de K em pescado revestidos com carragenana, mas o efeito barreira dessa matriz sobre a via $IMP \rightarrow Ino \rightarrow Hx$ já foi demonstrado em alguns estudos (WANG *et al.*, 2025; DE JESUS *et al.*, 2023). Esse retardamento pode ser atribuído à menor difusão de oxigênio e à redução da atividade microbiana sob o filme polimérico, mecanismo também observado em matrizes de carragenana/PVA funcionalizadas com ácido gálico, que exibiram menor permeabilidade a gases e vapores (DE JESUS *et al.*, 2023). A cinética de K reflete a via $ATP \rightarrow ADP \rightarrow AMP \rightarrow IMP \rightarrow HxR \rightarrow Hx$, amplamente, sendo o valor de K um parâmetro altamente confiável e reprodutível para avaliar frescor em peixes via HPLC (AGYEKUM *et al.*, 2020).

Em síntese, o revestimento de carragenana demonstrou capacidade efetiva de postergar o aumento do valor de K, estendendo em até 25% o período em que o salmão se mantém na faixa de frescor moderado ($K < 40\%$), o que reforça seu potencial para aplicações industriais na conservação de pescado. Do ponto de vista tecnológico, a arquitetura densa da rede polimérica da kappa carragenana impede a passagem de gases e dificulta a penetração de microrganismos e enzimas no tecido muscular (SANTOS *et al.*, 2023). Em conclusão, o revestimento de carragenana estendeu em cerca de 25% o intervalo durante o qual o salmão permaneceu dentro dos padrões de frescor aceitáveis ($K < 40\%$), comprovando sua eficácia como estratégia de preservação.

5.3 Análise de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos revestimentos

O espectro vibracional da carragenana obtida por extração aquosa da alga *H. pseudomusciformis* (Gráfico 2) das replicatas Hypnea 1 e Hypnea 2 revela curvas quase sobrepostas ao longo de toda a faixa de 4000–500 cm^{-1} , o que evidencia elevada reprodutibilidade no processo de extração e alta pureza do polissacarídeo extraído de *Hypnea pseudomusciformis*. A banda larga em torno de 3390 cm^{-1} é atribuída ao estiramento O–H de hidroxilas e moléculas de água residuais (SUBANDO *et al.*, 2023; DMITRENKO *et al.*, 2023), enquanto os picos em 2930 e 2850 cm^{-1} correspondem às vibrações simétrica e assimétrica de C–H em grupos metileno, responsáveis pela lipofilicidade do material (ZHAO *et al.*, 2018; DUMAN *et al.*, 2020). O sinal intenso em 1232 cm^{-1} indica o estiramento assimétrico O=S=O de grupos sulfato, característica marcante da kappa carragenana (JANCÍKOVÁ *et al.*, 2021), e as vibrações em 1160 cm^{-1} refletem o estiramento C–O–C de ligações glicosídicas (YOU *et al.*, 2022). As bandas em 1070 e 930 cm^{-1} comprovam a presença da ponte 3,6-anhidro-D-galactose, enquanto os picos em 845 e 705 cm^{-1} confirmam o posicionamento de éster sulfato na posição C4 da galactose (LIU *et al.*, 2019; ORTIZ-TAFOYA *et al.*, 2018).

Gráfico 2 - Espectroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) para a Carragenana extraída da *H. pseudomusciformis* na faixa de 4000 a 500 cm^{-1} .



Fonte: Autora (2025).

Na Tabela 3 pode ser evidenciada a atribuição dos picos FTIR do revestimento e seus impactos nas propriedades do filme.

Tabela 3 - Atribuição dos picos FTIR do revestimento e seus impactos nas propriedades do filme.

Pico (cm⁻¹)	Função	Impacto no filme
3390	O–H (hidroxilas e água)	Formação de filmes, barreira contra gases e vapor.
2930, 2850	C–H (simétrica e assimétrica)	Lipofilicidade, adesão a superfícies hidrofóbicas.
1232	O=S=O (grupos sulfato)	Estrutura da κ -carragenana, força do gel, solubilidade.
1160	C–O–C (ligações glicosídicas)	Estabilidade mecânica do filme.
1070, 930	3,6-anhidro-D-galactose	Formação de gel, propriedades viscoelásticas.
845, 705	Éster sulfato na C ₄ da galactose	Rigidez do filme, barreira física.

Fonte: Autora (2025).

A nitidez e intensidade desses sinais demonstram que a estrutura do polissacarídeo está preservada, o que é fundamental para garantir resistência mecânica e eficácia de barreira contra vapor de água e gases quando formulado como filme ou revestimento comestível. Pequenas variações na transmitância entre as replicatas sugerem diferenças mínimas na espessura ou na homogeneidade dos filmes, sem comprometer suas propriedades funcionais. Em suma, o espectro confirma a extração bem-sucedida de kappa carragenana de alta qualidade como o encontrado na literatura (THAKUR *et al.*, 2016; MARTINY *et al.*, 2020; CVETKOVIĆ *et al.*, 2025), apta para aplicação em revestimentos comestíveis destinados à conservação de pescado.

5.4 Tensão Superficial Crítica

A tensão superficial resulta da soma das forças intermoleculares, incluindo interações dispersivas, dipolares, de indução, ligações de hidrogênio e, em alguns casos, interações metálicas, conforme descrito por Zisman (1964). Termodinamicamente, corresponde

à energia necessária para expandir a área superficial de um líquido, sendo um parâmetro central em fenômenos interfaciais como formação de filmes, estabilidade de emulsões e processos de encapsulamento. Em sistemas alimentares envolvendo salmão, a tensão superficial exerce papel determinante na estabilidade de emulsões e revestimentos protetores, além de influenciar a eficiência do encapsulamento de compostos funcionais (CHENG *et al.*, 2024; STEINSHOLM *et al.*, 2020). Proteínas e peptídeos derivados do salmão podem atuar como agentes emulsificantes ao reduzir a energia para criação de novas interfaces óleo-água, sendo essa ação modulada pelas características hidrofílicas/hidrofóbicas e pela conformação molecular dessas biomoléculas (STEINSHOLM *et al.*, 2020).

O conceito de tensão superficial crítica, análogo à concentração micelar crítica (CMC) em sistemas surfactantes, descreve a concentração mínima de um agente tensioativo (incluindo proteínas) necessária para atingir a máxima redução da tensão superficial e otimizar o desempenho emulsificante (STEINSHOLM *et al.*, 2020). Em extratos proteicos de salmão, o grau de hidrólise influencia diretamente a CMC, de modo que hidrolisados menos extensos tendem a apresentar menor CMC e maior eficiência tensioativa (STEINSHOLM *et al.*, 2020). Embora valores específicos, como 30,13 mN/m, não sejam confirmados por estudos recentes, magnitudes semelhantes são compatíveis com matrizes alimentares ricas em proteínas e peptídeos, reforçando a relevância da modulação da tensão superficial e da CMC na elaboração de revestimentos e emulsões estáveis (CHENG *et al.*, 2024; STEINSHOLM *et al.*, 2020).

Neste estudo com salmão, a superfície apresenta valores de tensão superficial crítica e tensão superficial de $30,13 \pm 0,12 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $60,64 \pm 0,47 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, respectivamente. Essas características definem o salmão como um substrato de baixa energia superficial ($< 100 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$), associado a um componente dispersivo reduzido de valor $18,18 \pm 0,41 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$. Tal condição indica menor capacidade de participar de interações apolares.

Por outro lado, a superfície do salmão apresenta um componente polar mais elevado, de $42,46 \pm 0,37 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, normalmente relacionado ao alto teor de água presente na musculatura do peixe. Superfícies com esse perfil interagem predominantemente por forças dispersivas com líquidos associados, influenciando o espalhamento e o comportamento molhável de revestimentos aplicados sobre o tecido do salmão.

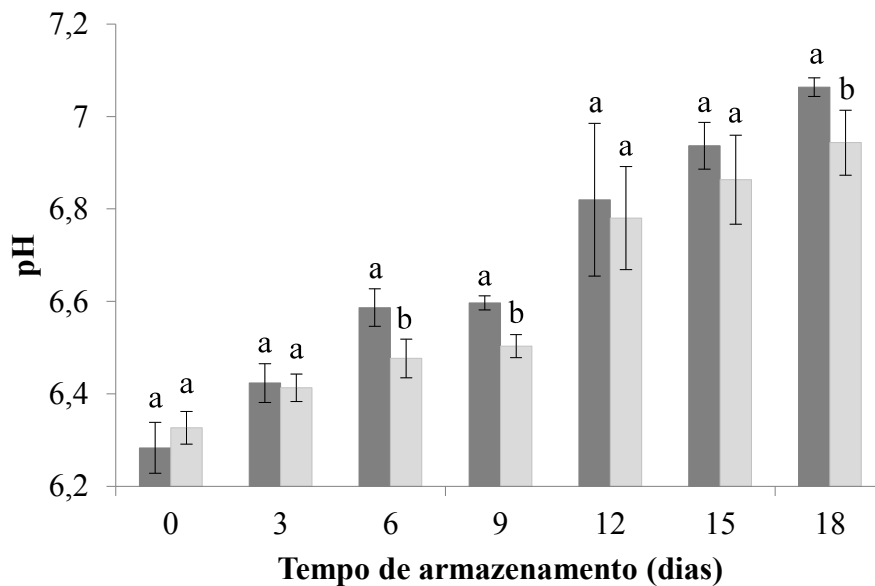
A presença de componentes apolares, como lipídios, em matrizes predominantemente polares contribui para reduzir a tensão superficial, uma vez que essas moléculas tendem a se acumular na interface e diminuir a energia requerida para ampliar a área

interfacial (LIU *et al.*, 2023; GUO *et al.*, 2023; ANDERSSON *et al.*, 2024). O aumento da fração apolar eleva o ângulo de contato e reduz progressivamente a tensão superficial até atingir um ponto de saturação, no qual a queda adicional deixa de ocorrer (LIU *et al.*, 2023). Em sistemas biológicos, essa contribuição pode representar cerca de 30% da tensão superficial total, afetando significativamente o comportamento interfacial (GUO *et al.*, 2023). A tensão superficial crítica marca o ponto em que ocorre molhabilidade completa ou formação espontânea de agregados, como micelas e vesículas. Em misturas contendo surfactantes ou moléculas anfífilas, incluindo lipídios presentes no salmão, a aproximação desse ponto depende da concentração e da estrutura molecular dos componentes (EFTHYMIOU *et al.*, 2021; MAYORAL *et al.*, 2021). Modelagens e simulações indicam ainda que a redução da tensão superficial é mais eficiente quando os constituintes apolares preferem adsorver-se na interface em vez de se autoassociarem (MAYORAL *et al.*, 2021). Dessa forma, os lipídios do salmão têm papel essencial na redução da tensão superficial e na aproximação da tensão superficial crítica, favorecendo processos como emulsificação, formação de agregados e estabilidade de revestimentos protetores.

5.5 Determinação do pH

A influência do revestimento à base de carragenana sobre o pH dos filés de salmão foi avaliada durante o armazenamento a 0 °C e pode ser verificada no Gráfico 3. O valor de pH inicial das amostras foi 6,40, e não se observou diferença estatisticamente significativa entre as amostras revestidas e o controle no momento zero ($p > 0,05$). Após seis dias de conservação a 0 °C, o pH do controle aumentou para 6,58, enquanto as amostras tratadas com carragenana apresentaram pH médio de 6,47 sendo essa diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$). No décimo oitavo dia de armazenamento verificou-se que o pH da amostra controle estava em 7,0, enquanto que as amostras revestidas apresentaram pH médio de 6,89.

Gráfico 3 – Influência do revestimento à base de carragenana sobre os valores de pH em filés de *Salmo salar* sob armazenamento refrigerado a 0 °C durante 18 dias.



Fonte: Autora (2025). Valores de pH para amostra controle e amostra revestida de filés de salmão durante armazenamento a 0°C. As barras cinza-escuras representam a amostra controle e as barras cinza-claras representam a amostra com revestimento em filés de salmão. Letras diferentes em um mesmo dia indicam uma diferença estatisticamente significativa (teste de Tukey, $p < 0,05$).

O pH inicial de peixes frescos costuma situar-se entre 6,0 e 6,5, podendo apresentar uma ligeira redução nas horas iniciais pós-morte em decorrência da produção de ácido láctico (BASDEKI *et al.*, 2025; HUSSEIN *et al.*, 2024; WALAA *et al.*, 2020; KUMARAVEL *et al.*, 2025). Ao longo do armazenamento refrigerado, observa-se geralmente um aumento progressivo do pH, especialmente após alguns dias, associado à degradação proteica e à geração de compostos voláteis pela ação conjunta de microrganismos e enzimas endógenas (BASDEKI *et al.*, 2025; HUSSEIN *et al.*, 2024; WALAA *et al.*, 2020; KUMARAVEL *et al.*, 2025; GUO *et al.*, 2023; CAI *et al.*, 2022). Valores de pH superiores a 6,8–7,0 são indicativos do início de deterioração e correlacionam-se com perda das qualidades sensoriais do produto (KUMARAVEL *et al.*, 2025; SÁEZ *et al.*, 2025). Fatores como espécie, sistema de cultivo, condições de abate e o tipo de acondicionamento influenciam a velocidade e o padrão temporal das variações de pH em tecido muscular (HUSSEIN *et al.*, 2024; KUMARAVEL *et al.*, 2025; CHAN *et al.*, 2021). Estratégias de embalagem, como vácuo ou atmosfera modificada, bem como a aplicação de conservantes naturais ou revestimentos com atividade antimicrobiana, têm

demonstrado capacidade de retardar o incremento do pH e, conseqüentemente, prolongar a vida útil dos produtos pesqueiros (LIU *et al.*, 2020; WALAA *et al.*, 2020; EHSANI *et al.*, 2020; DAS *et al.*, 2021).

O uso de revestimentos à base de carragenana, particularmente kappa-carragenana, tem demonstrado capacidade de retardar o aumento do pH durante o armazenamento, sugerindo menor atividade microbiana e enzimática no produto (KARIMZADEH *et al.*, 2024). Em filés de truta arco-íris, a aplicação de carragenana, sobretudo quando associada a óleos essenciais ou a absorvedores de oxigênio, mostrou-se ainda mais eficaz em controlar o aumento do pH e outros marcadores de deterioração, resultando em extensão significativa da vida útil (KARIMZADEH *et al.*, 2024). Além disso, filmes inteligentes produzidos com carragenana têm sido empregados como indicadores de frescor, apresentando mudanças de cor em resposta ao aumento do pH do pescado, o que reforça a sensibilidade e a utilidade desse parâmetro para o monitoramento da qualidade (YOU *et al.*, 2022; SHAVISI *et al.*, 2024; REN *et al.*, 2025).

5.6 Nitrogênio das Bases Voláteis Totais (N-BVT)

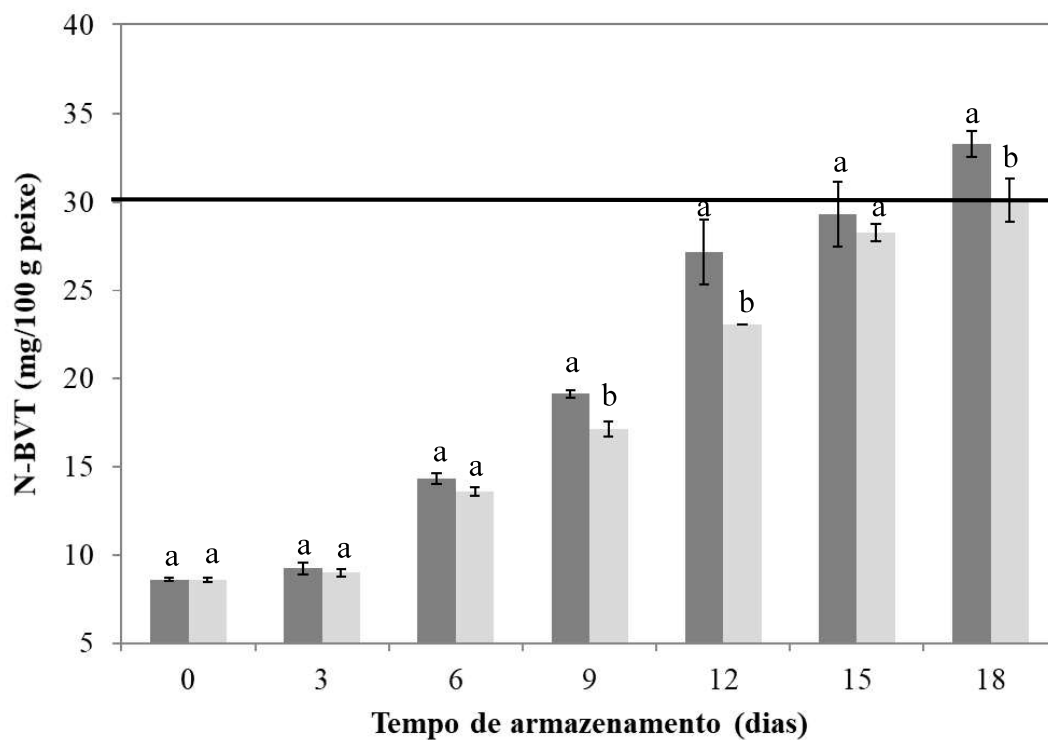
O Nitrogênio das Bases Voláteis Totais (N-BVT) é amplamente reconhecido como o principal parâmetro químico para avaliar o frescor e a deterioração de pescados. Corresponde à soma dos compostos nitrogenados voláteis liberados durante a degradação do tecido do pescado. Aumentos no N-BVT indicam perda de frescor e o início do processo de deterioração, sendo este parâmetro utilizado como critério para avaliar a aceitabilidade do produto para consumo (ZHANG *et al.*, 2023; ZHOU *et al.*, 2024; CUNHA *et al.*, 2024; KIM *et al.*, 2024).

O Nitrogênio das Bases Voláteis Totais (N-BVT) foi considerado aceitável quando inferiores a 30 mg de nitrogênio por 100 g de tecido, excluídos os elasmobrânquios, conforme critério do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 1997). Concentrações acima desse patamar são indicativas de produto impróprio para consumo (AMERI *et al.*, 2024; ZHANG *et al.*, 2023; ZHOU *et al.*, 2024; CUNHA *et al.*, 2024; KIM *et al.*, 2024).

O Gráfico 4 mostra os valores de N-BVT das amostras de salmão controle e revestidas durante o armazenamento refrigerado. Os valores iniciais de N-BVT observados (8,61 e 8,56 mg de N-BVT /100 g para as amostras controle e com revestimento,

respectivamente) indicam que o salmão apresentava elevada qualidade inicial, o que é compatível com a reduzida contagem de TPC registrada (3,02 log₁₀ UFC/g). Resultados iniciais, próximos aos encontrados neste estudo foram reportados para salmão tratado com curcumina (QIAN *et al.*, 2022) e em atmosfera modificada (KRITIKOS *et al.*, 2020).

Gráfico 4 - Evolução do teor de nitrogênio das bases voláteis totais (N-BVT, mg/100 g) em filés de *Salmo salar* armazenados a 0 °C durante 18 dias: comparação entre amostra controle e amostra revestida com carragenana.



Fonte: Autora (2025). Conteúdo de Nitrogênio das Bases Voláteis Totais (N-BVT) para amostra controle e amostra revestida de filés de salmão durante armazenamento a 0 °C. As barras cinza-escuras representam a amostra controle e as barras cinza-claras representam a amostra com revestimento em filés de salmão. A linha horizontal representa o limite de rejeição em peixes, que é de 30 mg de N-BVT/100 g. Letras diferentes em um mesmo dia indicam uma diferença estatisticamente significativa (teste de Tukey, $p < 0,05$).

Ao longo do armazenamento, os níveis de N-BVT aumentaram progressivamente, atingindo ao final do período valores de 33,26 mg/100 g nas amostras controle e 30,11 mg/100 g nas amostras com revestimento. No estudo de Kritikos *et al* (2020) com salmão

armazenamento a 2 °C em condições de atmosfera modificada, os valores de N-BVT permaneceram praticamente constantes nos primeiros dias. Entretanto, após o 4º dia observou-se um aumento expressivo, alcançando aproximadamente 22,7 mg N/100 g no momento em que o produto atinge o limite de rejeição sensorial, embora ainda abaixo do intervalo máximo estabelecido pela legislação (BRASIL, 1997).

Filmes inteligentes formulados com carragenana, particularmente quando associados à pectina e antocianinas, demonstraram capacidade de estender a vida útil do salmão, além de possibilitar o monitoramento do frescor por meio de alterações colorimétricas correlacionadas ao aumento do N-BVT. A aplicação dos filmes resultou em prolongamento da vida útil em até dois dias, ao retardar a elevação dos compostos nitrogenados voláteis e fornecer uma indicação visual da deterioração (ZHANG *et al.*, 2024). Em outro estudo filmes de carragenana incorporados com antocianinas de mirtilo também apresentaram elevada responsividade às variações de N-BVT, permitindo a avaliação não destrutiva do frescor do salmão, incluindo a possibilidade de integração com smartphones para leitura da mudança de cor (MU *et al.*, 2025).

A carragenana funciona como uma barreira físico-química, restringindo a difusão de oxigênio e reduzindo a perda de umidade. Esses efeitos contribuem para a limitação do crescimento microbiano e, conseqüentemente, para a menor formação de compostos nitrogenados voláteis (ZHANG *et al.*, 2024; MU *et al.*, 2025). A elevação dos valores de N-BVT apresenta forte correlação com a multiplicação microbiana e com os processos de degradação proteica, sendo intensificada pela exposição a temperaturas elevadas ou por condições inadequadas de armazenamento (QIAN *et al.*, 2022).

5.7 Nitrogênio de Trimetilamina (N-TMA)

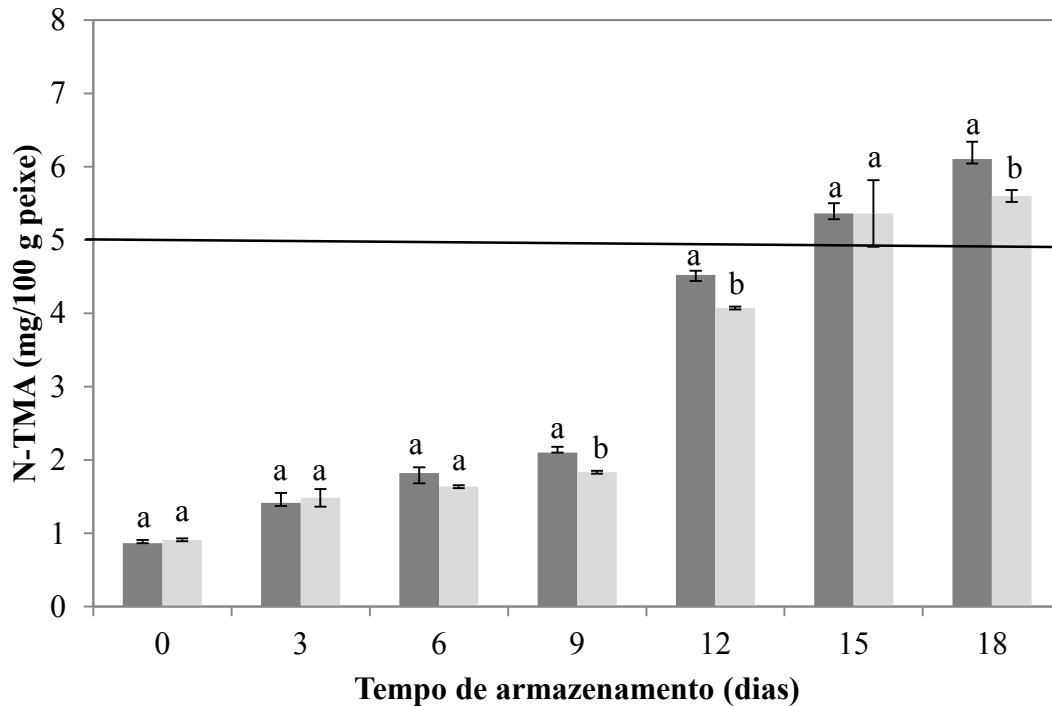
O Nitrogênio de Trimetilamina (N-TMA) constitui um dos principais compostos voláteis gerados durante a deterioração do pescado e é amplamente empregado como indicador químico de frescor e qualidade, estando sua ocorrência fortemente associada ao odor característico de peixe estragado. Sua formação decorre sobretudo da ação bacteriana e enzimática sobre o óxido de trimetilamina (TMAO), composto endógeno em diversos peixes marinhos, que é reduzido a trimetilamina (TMA) ao longo do armazenamento, conferindo o

odor desagradável típico do produto deteriorado (JNR *et al.*, 2023; GORIS *et al.*, 2020; ALI *et al.*, 2022; PRABHAKAR *et al.*, 2020).

Em amostras de peixe fresco, os teores de N-TMA costumam ser baixos (0,2–2 mg/100g), porém elevam-se de forma acentuada com o aumento do tempo de estocagem, mesmo sob refrigeração, refletindo a perda progressiva de frescor (JNR *et al.*, 2023; GORIS *et al.*, 2020; ALI *et al.*, 2022).

As concentrações de N-TMA no músculo de salmão armazenado a 0 °C mostram um comportamento típico de aumento progressivo durante o período de estocagem e estão demonstrados no Gráfico 5. Os valores iniciais foram de aproximadamente 0,87 mg de N-TMA /100 g para a amostra controle e 0,91 mg de N-TMA /100 g para a amostra revestida com carragenana. Um incremento gradual foi observado nos três primeiros dias, atingindo cerca de 1,41 mg e 1,38 mg de TMA-N/100 g para controle e revestida, respectivamente.

Gráfico 5 – Evolução dos teores de Nitrogênio de Trimetilamina (N-TMA, mg/100 g) em filés de *Salmo salar* armazenados a 0 °C durante 18 dias: comparação entre amostra controle e amostra revestida com carragenana.



Fonte: Autora (2025). Nitrogênio de Trimetilamina (N-TMA) para amostra controle e amostra revestida de filés de salmão durante armazenamento a 0 °C. As barras cinza-escuras representam a amostra controle e as barras cinza-claras representam a amostra com revestimento em filés de salmão. A linha horizontal representa o limite de rejeição em peixes, que geralmente está entre 5 e 10 mg de N-TMA/100 g. Letras diferentes em um mesmo dia indicam uma diferença estatisticamente significativa (teste de Tukey, $p < 0,05$).

Após nove dias de armazenamento, as amostras sem revestimento apresentaram maiores concentrações de N-TMA (2,10 mg/100 g) em comparação com as amostras revestidas (1,83 mg/100 g). Ao longo do período experimental, ambos os grupos exibiram aumento contínuo dos teores de N-TMA, alcançando valores finais de 6,10 mg/100 g (controle) e 5,60 mg/100 g (revestida), demonstrando menor taxa de formação do composto nas amostras tratadas. Foi verificado que o acúmulo de TMA ocorreu de forma mais lenta na amostra revestida com carragenana, que após 15 dias apresentou 4,53 mg de N-TMA /100 g, valor inferior ao limiar normalmente associado ao desenvolvimento de odor desagradável. Dessa forma, torna-se evidente que os revestimentos à base de carragenana são eficazes em inibir o

crescimento microbiano e, conseqüentemente, em limitar a produção de N-TMA, o que contribui para a extensão da vida útil do salmão fatiado.

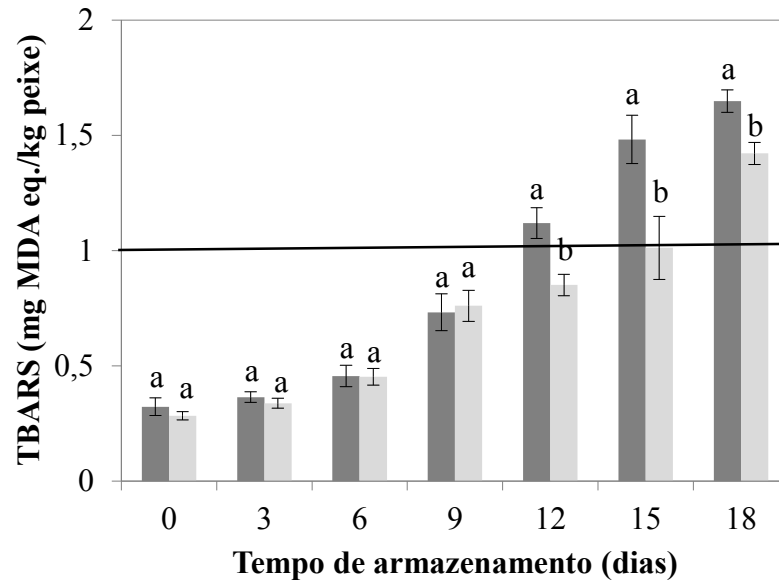
Os revestimentos funcionam como uma barreira física protetora, diminuindo a difusão de oxigênio para a superfície do pescado e, conseqüentemente, reduzindo a atividade microbiana envolvida na conversão do óxido de trimetilamina (TMAO) em N-TMA (ELSABAGH *et al.*, 2023; MEHRAIE *et al.*, 2023; CHUMSRI *et al.*, 2022; BALTI *et al.*, 2020).

5.8 Substâncias Reativas ao Ácido Tiobarbitúrico (TBARS)

O ensaio de TBARS constitui um método amplamente empregado na avaliação da oxidação lipídica em produtos pesqueiros, sendo considerado um marcador-chave da deterioração química e da perda de qualidade ao longo do armazenamento. Esse indicador quantifica a formação de compostos secundários da oxidação de ácidos graxos, especialmente o malonaldeído (MDA), cuja presença está associada à alteração de sabor, odor e estabilidade do pescado. O valor obtido no ensaio de TBARS expressa a concentração de produtos derivados da degradação oxidativa das gorduras, sobretudo o MDA, que está diretamente relacionado ao desenvolvimento de rancidez e ao declínio da qualidade sensorial (HAGHIGHI e YAZDANPANA, 2020; LI *et al.*, 2021; EL-FATAH *et al.*, 2023; AMIN *et al.*, 2021; EZZAT *et al.*, 2025). Valores de referência entre 1 e 2 mg MDA eq./kg, indicam maior progressão da deterioração lipídica, sendo amplamente utilizados como parâmetro para aceitação comercial ou rejeição de lotes conforme normas internacionais de qualidade (AMIN *et al.*, 2021; EZZAT *et al.*, 2025; HAMAD *et al.*, 2020).

A evolução dos valores de TBARS obtidos neste estudo está apresentada no Gráfico 6. As amostras controle de salmão (*Salmo salar*) mostraram aumento mais acentuado dos teores de TBARS em comparação com as amostras revestidas com carragenana, sendo observada diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos ao longo do armazenamento. Especificamente, as amostras controle apresentaram valor inicial de $0,32 \pm 0,03$ mg MDA eq./kg, que progrediu para $1,64 \pm 0,04$ mg MDA eq./kg após 18 dias de estocagem. As amostras revestidas iniciaram com $0,28 \pm 0,01$ mg MDA eq./kg e atingiram $1,42 \pm 0,04$ mg MDA eq./kg ao final do período experimental. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

Gráfico 6 – Evolução dos teores de Substâncias Reativas ao Ácido Tiobarbitúrico (TBARS, mg MDA eq./kg) em filés de *Salmo salar* durante armazenamento a 0 °C. Comparação entre amostra controle e amostra revestida com carragenana.



Fonte: Autora (2025). Valores de TBARS para amostra controle e amostra revestida de filés de salmão durante armazenamento a 0 °C. As barras cinza-escuras representam a amostra controle e as barras cinza-claras representam a amostra com revestimento em filés de salmão. A linha horizontal representa o limite de rejeição em peixes, que geralmente está entre 1 e 2 mg MDA eq./kg. Letras diferentes em um mesmo dia indicam uma diferença estatisticamente significativa (teste de Tukey, $p < 0,05$).

Os resultados aqui obtidos estão em consonância com achados prévios que indicam efeito retardador de revestimentos comestíveis à base de polissacarídeos sobre a oxidação lipídica (HASHEMI *et al.*, 2023; DU *et al.*, 2021; BREMENKAMP *et al.*, 2024). Em estudos comparativos, Zangh (2020) reportou valores de TBARS inferiores a 2,5 mg MDA eq./kg em filés de cavalinha revestidos com carragenana durante armazenamento congelado, valores mais elevados do que os observados no presente trabalho. Enquanto Khasanah (2024) descreveu TBARS de 1,11 mg MDA eq./kg em anchovas revestidas com carragenana após 21 dias, valor próximo ao encontrado nas amostras revestidas deste estudo. Além disso, é consensual na literatura que o tempo de armazenamento e o tipo de revestimento são determinantes na dinâmica de aumento dos teores de TBARS (YAZDANI *et al.*, 2025; HAMAD, 2021).

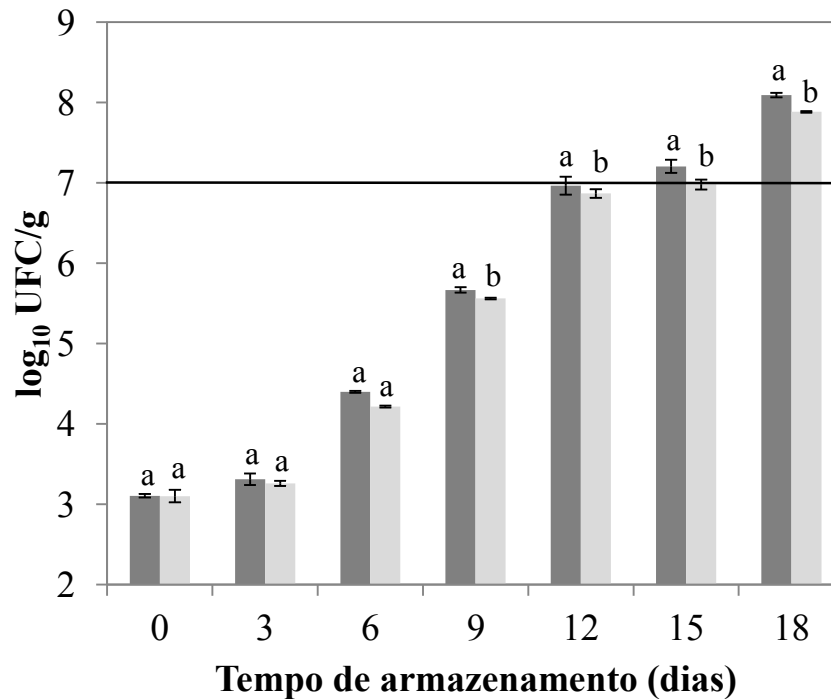
Em suma, os dados indicam que o revestimento à base de carragenana reduziu a velocidade de formação de produtos secundários da oxidação lipídica em filés de *Salmo salar* durante o armazenamento, postergando o incremento dos valores de TBARS em comparação ao tratamento controle e contribuindo para a manutenção da qualidade química do produto.

5.9 Análise microbiana

A contagem total de bactérias aeróbias (*Total Plate Count* – TPC), incubada a 30 °C, é amplamente utilizada como indicador da evolução da microbiota viável e da qualidade microbiológica de pescados refrigerados. Em produtos frescos de origem marinha, valores próximos a 7,0 log₁₀ UFC/g são geralmente associados ao limite de aceitabilidade microbiológica, refletindo deterioração sensorial perceptível (ICMSF, 2011).

A evolução da microbiota do salmão armazenado a 0 °C, com e sem revestimento de carragenana, está apresentada no Gráfico 7. No início do armazenamento, observou-se baixa carga bacteriana, com TPC de 3,02 log₁₀ UFC/g, valor compatível com peixes frescos recém-processados (LERFALL *et al.*, 2022; HOEL *et al.*, 2022; CHOI *et al.*, 2024). Durante os seis primeiros dias, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$). A partir desse período, verificou-se crescimento microbiano significativamente mais lento nas amostras revestidas em comparação ao controle ($p < 0,05$).

Gráfico 7 - Impacto do revestimento à base de carragenana sobre a contagem total de bactérias aeróbias em filés de *Salmo salar* armazenados a 0 °C durante 18 dias.



Fonte: Autora (2025). Contagem total de bactérias aeróbias (log UFC/g) para amostra controle e amostra revestida de filés de salmão durante armazenamento a 0 °C. As barras cinza-escuras representam a amostra controle e as barras cinza-claras representam a amostra com revestimento em filés de salmão. A linha horizontal indica o limite máximo aceitável para consumo, estabelecido em 7,0 log₁₀ UFC/g. Letras diferentes no mesmo dia representam distinções estatisticamente significativas de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$).

No 12º dia de armazenamento, o grupo controle atingiu 7,05 log₁₀ UFC/g, ultrapassando o limite de aceitabilidade microbiológica para produtos marinhos (ICMSF, 2011). Em contraste, as amostras revestidas apresentaram 6,88 log₁₀ UFC/g apenas no 15º dia, mantendo-se abaixo de 7,0 log₁₀ UFC/g até esse período. Esses resultados indicam que a aplicação do revestimento proporcionou extensão aproximada de três dias na vida útil microbiológica do salmão sob refrigeração.

Diversos estudos relatam comportamento semelhante em produtos pesqueiros revestidos com carragenana. Supriwanti *et al.* (2023) observaram redução significativa do crescimento microbiano em filés de atum recobertos com carragenana a 2,5%. Karimzadeh *et al.* (2024) demonstraram que revestimentos polissacarídicos retardaram o aumento da TPC em filés de truta refrigerados. Siregar *et al.* (2021) verificaram manutenção da TPC abaixo de 7,0

\log_{10} UFC/g por período prolongado em produtos recobertos, enquanto Khojah *et al.* (2020) relataram redução significativa da carga microbiana em tilápia revestida durante armazenamento refrigerado.

A eficácia desses revestimentos depende da concentração da carragenana, da composição da matriz polimérica e das condições de armazenamento (KHOJAH *et al.*, 2020; SUPRIWANTI *et al.*, 2023; SIREGAR *et al.*, 2021; KARIMZADEH *et al.*, 2024). O mecanismo de ação está associado principalmente à formação de uma barreira física semipermeável, capaz de reduzir a disponibilidade de oxigênio na superfície do produto e modular o crescimento da microbiota presente, contribuindo para o retardo da deterioração microbiana (SUPRIWANTI *et al.*, 2023; KARIMZADEH *et al.*, 2024).

O aumento da TPC ao longo do armazenamento foi acompanhado por elevação gradual do pH, comportamento amplamente descrito como consequência da produção de metabólitos alcalinos derivados da degradação proteica microbiana, incluindo amônia e aminas biogênicas (CHEN *et al.*, 2022b; TSAFACK; TSOPMO, 2022; VASCONCELOS *et al.*, 2021). Em diferentes matrizes de pescado, inclusive produtos fermentados, a intensificação da atividade microbiana está associada ao aumento de TVB-N e pH durante o armazenamento, refletindo a degradação proteica e a formação de compostos nitrogenados voláteis (CHEN *et al.*, 2022b). No presente estudo, observou-se incremento progressivo de TVB-N concomitante ao crescimento microbiano, reforçando a interdependência entre atividade bacteriana e alterações químicas.

Paralelamente, os valores de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) aumentaram durante o armazenamento, indicando progressão da oxidação lipídica dos ácidos graxos poli-insaturados característicos de *Salmo salar*. A oxidação lipídica pode ser favorecida pela maior exposição ao oxigênio e por metabólitos microbianos capazes de atuar como catalisadores de reações oxidativas. Estudos indicam que revestimentos polissacarídicos atuam como barreira difusional ao oxigênio, reduzindo a formação de malonaldeído e retardando a evolução dos valores de TBARS em filés de pescado refrigerados (YAZDANI *et al.*, 2025; KARIMZADEH *et al.*, 2024; SHEIKHA *et al.*, 2022).

De forma integrada, os tratamentos com carragenana apresentaram menor crescimento microbiano, menores incrementos de pH, menor acúmulo de TVB-N e menores valores de TBARS quando comparados ao controle. Esses resultados indicam que a aplicação do revestimento contribuiu simultaneamente para a modulação do crescimento bacteriano e

para a estabilidade química do produto, resultando em prolongamento da vida útil sob armazenamento refrigerado.

Assim, os achados deste estudo demonstram que a deterioração do salmão refrigerado ocorre por mecanismos interdependentes, nos quais crescimento microbiano, degradação proteica e oxidação lipídica evoluem de forma associada, sendo significativamente retardados pela aplicação de revestimento à base de carragenana.

6 CONCLUSÃO

Os dados experimentais indicam que revestimentos comestíveis formulados com carragenana extraída de *Hypnea pseudomusciformis* promovem atrasamento significativo dos processos de deterioração física-química e microbiológica em filés de *Salmo salar* refrigerados. A formulação 1,0% (m/v) sem surfactante mostrou-se a mais adequada em termos de molhabilidade e aplicabilidade, formando um filme que reduziu a velocidade de formação de inosina/hipoxantina (refletida pelo valor de K) e retardou o aumento da carga bacteriana (extensão aproximada de 3 dias até o limite aceitável de TPC). A análise FTIR corroborou a identidade química e a consistência do polímero extraído, o que reforça a replicabilidade do processo de extração.

No entanto, apesar dos resultados promissores, recomenda-se cautela antes da transferência direta para escala industrial: análises sensoriais formais, ensaios de textura e cor com painel treinado, investimentos em testes de estabilidade em condições de cadeia fria real (transporte e varejo), avaliação da interação do filme com embalagens comerciais e estudos toxicológicos/legais são necessários para validar segurança, aceitação do consumidor e conformidade regulatória. Além disso, a incorporação de compostos bioativos (antioxidantes e antimicrobianos) e testes em escala piloto podem otimizar o desempenho do revestimento e avaliar custo-benefício operacional. Em suma, a carragenana de *H. pseudomusciformis* constitui uma solução tecnicamente viável e ambientalmente compatível para ampliar a vida útil de filés de salmão refrigerados, com potencial de aplicação industrial após estudos complementares.

REFERÊNCIAS

- ABEL, N.; ROTABAKK, B. T.; RUSTAD, T.; AHLSEN, V. B.; LERFALL, J. Physicochemical and microbiological quality of lightly processed salmon (*Salmo salar* L.) stored under modified atmosphere. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 84, n. 12, p. 3364-3372, 2019.
- ABIDI, N. **FTIR microspectroscopy**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2021.
- ADANDÉ, R.; LIADY, M. N. D.; DJIDOHOKPIN, G.; CÉSAIRE, A. M. T.; FIOGBE, E. D. A review of captures and treatments of sea food, post mortem biochemical degradations of macro-molecules and impacts of certain factors on the quality of the fish. **International Journal of Fisheries and Aquatic Studies**, Delhi, v. 8, n. 4, p. 351–359, 2020.
- ADMASU, F.; MIKRU, A.; BALKIEW, K.; ADANE, M. Microbial profile of fresh and semicooked Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and hygienic practice of fish handlers in Hawassa, Ethiopia. **International Journal of Microbiology**, London, v. 2023, 2023.
- AGYEKUM, A. A.; KUTSANEDZIE, F. Y. H.; ANNAVARAM, V.; MINTAH, B. K.; ASARE, E. K.; WANG, B. FT-NIR coupled chemometric methods rapid prediction of K-value in fish. **Vibrational Spectroscopy**, Amsterdam, v. 108, 2020.
- AHMED, I.; JAN, K.; FATMA, S.; DAWOOD, M. Muscle proximate composition of various food fish species and their nutritional significance: a review. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**, Berlin, v. 106, n. 3, p. 690-719, 2022.
- AKRONG, M. O.; ANNING, A. K.; ADDICO, G. N. D.; HOGARH, J. N.; ADU-GYAMFI, A.; DEGRAFT-JOHNSON, K. A. A.; ALE, M.; MEYER, A. S. Biomass and carrageenan yields of *Hypnea musciformis* in relation to selected environmental variables in the coastal waters of Ghana. **Journal of Applied Phycology**, Dordrecht, v. 34, p. 2589-2601, 2022.
- ALAK, G.; KARA, A.; AKKOSE, A.; GELEN, S.; TANAS, Ş.; UÇAR, A.; PARLAK, V.; ATAMANALP, M. Effect of climate change on fillet quality and storage, *Oncorhynchus mykiss*, under controlled conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 104, n. 3, p. 1511-1520, 2024.
- ALI, M.; HASAN, M.; MOYADUZZAMAN, M.; FARUQUE, M. Post mortem variation of total volatile base nitrogen (TVB-N) and trimethylamine nitrogen (TMA-N) in Vetki (*Lates calcarifer*). **Khulna University Studies**, Khulna, 2022.
- AL-SAGHIR, S.; THURNER, K.; WAGNER, K.; FRISCH, G.; LUF, W.; RAZZAZI-FAZELI, E.; ELMADFA, I. Effects of different cooking procedures on lipid quality and cholesterol oxidation of farmed salmon fish (*Salmo salar*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 52, n. 16, p. 5290-5296, 2004.
- ÁLVAREZ-VIÑAS, M.; RIVAS, S.; TORRES, M.; DOMÍNGUEZ, H. Microwave-assisted extraction of carrageenan from *Sarcopeltis skottsbergii*. **Marine Drugs**, Basel, v. 21, 2023.

ALVES, S.; SANTOS, M.; MORAES-VALENTI, P.; SAMPAIO, D.; VALENTI, W. Environmental sustainability in the culture of macroalgae, oysters, and low-trophic fish. **Fishes**, Basel, v. 10, 2025.

AMAREGOUDA, Y.; KAMANNA, K.; GASTI, T. Fabrication of intelligent/active films based on chitosan/polyvinyl alcohol matrices containing *Jacaranda cuspidifolia* anthocyanin for real-time monitoring of fish freshness. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 218, p. 799-815, 2022.

AMERI, M.; AJJI, A.; KESSLER, S. Enhancing seafood freshness monitoring: integrating color change of a food-safe on-package colorimetric sensor with mathematical models, microbiological, and chemical analyses. **Current Research in Food Science**, Amsterdam, v. 9, 2024.

AMIN, A.; AHMED, A.; AHMED, O. Chemical and bacteriological risks of shrimp and clams (Gandofly) from Suez Gulf. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 5, p. 281-288, 2021.

ANDERSON, J. L.; ASCHE, F.; GARLOCK, T. M.; CHU, J. Aquaculture: its role in the future of food. **Animal Frontiers**, Champaign, v. 17, p. 159-173, 2017.

ANDERSSON, M.; HASSAN, N.; ALSAIFI, N. Prediction of surface tension using COSMO-RS. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 63, n. 51, 2024.

ANGGRAINI, J.; LO, D. Health impact of carrageenan and its application in food industry: a review. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Bristol, v. 1169, 2023.

ARULKUMAR, A.; SATHEESHKUMAR, K.; PARAMASIVAM, S.; RAMESHTHANGAM, P.; MIRANDA, J. Chemical biopreservative effects of red seaweed on the shelf life of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*). **Foods**, Basel, v. 9, 2020.

ASCHE, F.; STRAUME, H.; VÅRDAL, E. Perish or prosper: trade patterns for highly perishable seafood products. **Agribusiness**, Hoboken, v. 37, n. 4, p. 876-890, 2021.

ASENSIO-GRAU, A.; CALVO-LERMA, J.; HEREDIA, A.; ANDRÉS, A. In vitro digestion of salmon: influence of processing and intestinal conditions on macronutrients digestibility. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 342, 2021.

AVILA, L.; BARRETO, E.; MORAES, C.; MORAIS, M.; ROSA, G. Promising new material for food packaging: An active and intelligent carrageenan film with natural jaboticaba additive. **Foods**, Basel, v. 11, 2022.

BAGHI, F.; GHARSALLAOUI, A.; DUMAS, E.; GHNIMI, S. Advancements in biodegradable active films for food packaging: effects of nano/microcapsule incorporation. **Foods**, Basel, v. 11, 2022.

BAHARI, A.; MOELANTS, K.; HUC-MATHIS, D.; WALLECAN, J.; MANGIANTE, G.; MAZOYER, J.; HENDRICKX, M.; GRAUWET, T. Compositional and rheological analysis of carrageenan from the gametophyte phase of the red seaweed *Chondrus crispus* neutrally extracted at varying temperatures and time. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 133, 2022.

BALTI, R.; BALTI, R.; MANSOUR, M.; ZAYOUD, N.; BALC'H, R.; BRODU, N.; ARHALIASS, A.; MASSE, A. Active exopolysaccharides-based edible coatings enriched with red seaweed (*Gracilaria gracilis*) extract to improve shrimp preservation during refrigerated storage. **Food Bioscience**, Amsterdam, v. 34, 2020.

BAN, T.; MATSUMOTO, K.; NANZAI, B.; MORI, Y.; NABIKA, H. Bifurcation of chemically driven self-propelled droplets on a surfactant-adsorbed surface based on spreading coefficients. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 620, 2021.

BARIZÃO, C. L.; CREPALDI, M.; S. O.; DE OLIVEIRA, A.; MARTINS, A.; GARCIA, P.; BONAFÉ, E. Biodegradable films based on commercial κ -carrageenan and cassava starch to achieve low production costs. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 165, 2020.

BAROKAH, G.; NURHAYATI, T.; JANUAR, H.; e JACOEB, A. ¹H-NMR spectroscopy to measure the KI index of Bombay ducks during chilling storage as an approach to determine freshness. **Squalen Bulletin of Marine and Fisheries Postharvest and Biotechnology**, Jakarta, v. 18, n. 2, 2023.

BARILLÉ, L.; PATERSON, I.; OIRY, S.; ARIS, A.; COOK-COTTIER, E.; NURDIN, N. Variability of *Kappaphycus alvarezii* cultivation in South-Sulawesi (Indonesia) related to the monsoon shift: water quality, growth and colour quantification. **Aquaculture Reports**, Amsterdam, v. 40, 2025.

BASDEKI, E.; VASILAKI, S.; SENSI, M.; FLEMETAKIS, E.; BISCARINI, F.; POWER, D.; TSIRONI, T. Reviewing the correlation of fish quality alteration and in-package headspace composition: evidence from a pH freshness indicator case study. **International Journal of Food Science**, Philadelphia, 2025.

BEĆ, K.; GRABSKA, J.; HUCK, C. Miniaturized NIR spectroscopy in food analysis and quality control: promises, challenges, and perspectives. **Foods**, Basel, v. 11, 2022.

BEKETOV, G.; SHYNKARENKO, O. Surface wetting and contact angle: basics and characterisation. **Himia, Fizika ta Tehnologija Poverhni**, Kyiv, 2022.

BEKHIT, A.; GITERU, S.; HOLMAN, B.; HOPKINS, D. Total volatile basic nitrogen and trimethylamine in muscle foods: potential formation pathways and effects on human health. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Chicago, v. 20, n. 4, p. 3620-3666, 2021.

BERNARDO, Y.; ROSARIO, D.; DELGADO, I.; CONTE-JUNIOR, C. Fish Quality Index Method: Principles, weaknesses, validation, and alternatives—a review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Chicago, v. 19, n. 5, p. 2657-2676, 2020.

BERNHARDT, JOEY R.; O'CONNOR, MARY I. Aquatic Biodiversity Enhances Multiple Nutritional Benefits to Humans. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 118, n. 15, 2021.

BHATTACHARYYA, T.; PALLA, C.; DETHE, D.; JOSHI, Y. Rheological investigation of the network structure in mixed gels of Kappa and Iota Carrageenan. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 146, 2023.

BOYD, C.; D'ABRAMO, L.; GLENCROSS, B.; HUYBEN, D.; JUAREZ, L.; LOCKWOOD, G.; McNEVIN, A.; TACON, A.; TELETCHEA, F.; TOMASSO, J.; TUCKER, C.; VALENTI, W. Achieving sustainable aquaculture: historical and current perspectives and future needs and challenges. **Journal of the World Aquaculture Society**, Baton Rouge, v. 51, n. 3, p. 578-633, 2020.

BOYD, C.; McNEVIN, A.; DAVIS, R. The contribution of fisheries and aquaculture to the global protein supply. **Food Security**, Dordrecht, v. 14, p. 805-827, 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Portaria nº 185, de 13 de maio de 1997. Aprova o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade de Peixe Fresco (inteiro e eviscerado). **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**: seção 1, Brasília, DF, 19 maio 1997.

BREMENKAMP, I.; GALLAGHER, M. Edible coatings for ready-to-eat products: Critical review of recent studies, sustainable packaging perspectives, challenges and emerging trends. **Polymers**, Basel, v. 17, 2025.

BREMENKAMP, I.; SOUSA-GALLAGHER, M. Design and development of an edible coating for a ready-to-eat fish product. **Polymers**, Basel, v. 16, 2024.

CAI, M.; ZHONG, H.; LI, C.; ALIAKBARLU, J.; ZHANG, H.; CUI, H.; LIN, L. Application of composite coating of *Nostoc commune* *Vauch* polysaccharides and sodium carboxymethyl cellulose for preservation of salmon fillets. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 210, p. 394-402, 2022.

CAI, Z.; WANG, J.; LIU, C.; CHEN, G.; SANG, X.; ZHANG, J. Effects of high voltage atmospheric cold plasma treatment on the number of microorganisms and the quality of *Trachinotus ovatus* during refrigerator storage. **Foods**, Basel, v. 11, 2022.

CAO, C.; LIANG, X.; XU, Y.; KONG, B.; SUN, F.; LIU, H.; ZHANG, H.; LIU, Q.; WANG, H. Effects and mechanisms of different κ -carrageenan incorporation forms and ionic strength on the physicochemical and gelling properties of myofibrillar protein. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 257, 2023.

CHAN, S. S.; MOEN, B.; LØVDAL, T.; ROTH, B.; NILSSON, A.; PETTERSEN, M. K.; ROTABAKK, B. T. Extending the shelf life of Atlantic salmon (*Salmo salar*) with sub-chilled storage and modified atmosphere packaging in recyclable mono-material trays. **Foods**, Basel, v. 13, n. 1, 2024.

CHAN, S.; ROTABAKK, B.; LØVDAL, T.; LERFALL, J.; ROTH, B. Skin and vacuum packaging of portioned Atlantic salmon originating from refrigerated seawater or traditional ice storage. **Food Packaging and Shelf Life**, Amsterdam, v. 30, 2021.

CHANG, C.; VO, T.; SHENG, Y.; TSAO, H. Facile fabrication of 3D structure of carrageenan gel at room temperature and spontaneous formation of carrageenan microgels. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, Taipei, v. 169, 2025.

CHAUDHARY, V.; KAJLA, P.; DEWAN, A.; PANDISELVAM, R.; SOCOL, C.; MAERESCU, C. Spectroscopic techniques for authentication of animal origin foods. **Frontiers in Nutrition**, Lausanne, v. 9, 2022.

CHEN, B.; MEI, J.; XIE, J. Effects of packaging methods and temperature variations on the quality and microbial diversity of grouper (*Epinephelus lanceolatus*) during cold storage. **Food Bioscience**, Amsterdam, v. 60, 2024.

CHEN, H.; ZHANG, M.; BHANDARI, B.; YANG, C. Novel pH-sensitive films containing curcumin and anthocyanins to monitor fish freshness. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 100, 2020.

CHEN, J.; KONG, Q.; SUN, Z.; LIU, J. Freshness analysis based on lipidomics for farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) stored at different times. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 373, 2022a.

CHEN, J.; TANG, H.; ZHANG, M.; SANG, S.; JIA, L.; OU, C. Exploration of the roles of microbiota on biogenic amines formation during traditional fermentation of *Scomber japonicus*. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 13, art. 1030789, 2022b.

CHEN, L.; ZHAO, Y.; SHI, Q.; DU, Y.; ZENG, Q.; LIU, H.; ZHANG, Z.; ZHENG, H.; WANG, J. Preservation effects of photodynamic inactivation-mediated antibacterial film on storage quality of salmon fillets: insights into protein quality. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 444, 2024.

CHENG, C.; CHEN, S.; SU, J.; ZHU, M.; ZHOU, M.; CHEN, T.; HAN, Y. Recent advances in carrageenan-based films for food packaging applications. **Frontiers in Nutrition**, Lausanne, v. 9, 2022.

CHENG, H.; CHEN, L.; MCCLEMENTS, D. J.; YANG, T.; ZHANG, Z.; REN, F.; MIAO, M.; TIAN, Y.; JIN, Z. Starch-based biodegradable packaging materials: a review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. **Trends in Food Science & Technology**, Amsterdam, v. 114, p. 70-82, 2021.

CHENG, J.; KANDULA, N.; CORTES, V.; CHOI, H.; SINGH, P.; CUI, L. Pea protein isolate-based active films for salmon preservation: The role of different essential oils in film properties, antioxidant, and antibacterial activities. **Current Research in Food Science**, Amsterdam, v. 9, 2024.

CHOI, E.; KIM, Y.; LEE, Y.; CHO, T.; RHEE, M.; KIM, S. Microbial consortia in commercial salmon products: a comparative study using cultivation-dependent and high-throughput sequencing approaches. **Food Research International**, Amsterdam, v. 196, 2024.

CHUMSRI, P.; PANPIPAT, W.; CHEONG, L.; PANYA, A.; PHONSATTA, N.; CHAIJAN, M. Biopreservation of refrigerated mackerel (*Auxis thazard*) slices by rice starch-based

coating containing polyphenol extract from *Glochidion wallichianum* leaf. **Foods**, Basel, v. 11, 2022.

CIAMPA, A.; LAGHI, L.; PICONE, G. Validation of a H-NMR spectroscopy quantitative method to quantify trimethylamine content and K-index value in different species of fish. **Journal of Food Quality**, London, v. 2022, n. 1, 2022.

CIAMPA, A.; PICONE, G. Application of HR-NMR for the metabolic kinetic assessment of red mullet (*Mullus barbatus*) and bogue (*Boops boops*) samples during different temperature storage. **Metabolites**, Basel, v. 13, 2023.

CLSI. Clinical and Laboratory Standards Institute. Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing; Twenty-Third Informational Supplement. M100-S23. **CLSI**, Wayne, v. 33, n.1, p. 20, 2013.

CUI, H.; YANG, M.; SHI, C.; LI, C.; LIN, L. Application of xanthan-gum-based edible coating incorporated with *Litsea cubeba* essential oil nanoliposomes in salmon preservation. **Foods**, Basel, v. 11, n. 11, p. 1535, 2022a.

CUI, K.; LIU, N.; SUN, Y.; SUN, G.; WANG, S.; YANG, M.; WANG, X.; ZHOU, D.; GE, Y.; WANG, D.; WANG, M. Effect of drying processes on the occurrence of lipid oxidation-derived 4-hydroxy-2-hexenal and 4-hydroxy-2-nonenal in Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*). **Food Science & Nutrition**, Hoboken, v. 11, p. 1013-1023, 2022b.

CUNHA, D.; COELHO, A.; FERREIRA, L.; SANTOS, E.; TORRES-JUNIOR, A. Características físicas e bioquímicas do filé de *Pangasius bocourti* cultivado em Bom Jardim, Estado do Maranhão, Brasil. **Acta of Fisheries and Aquatic Resources**, Aracaju, v. 12, n. 2, 2024.

CVETKOVIĆ, K.; ĐORĐEVIĆ, N.; KARABEGOVIĆ, I.; DANILOVIĆ, B.; ĐORĐEVIĆ, D.; ĐORĐEVIĆ, S.; KUSHKEVYCH, I. Production and Testing of Carrageenan-Based Films Enriched with Chinese Hawthorn Extract in Strawberry Packaging. **Processes**, Basel, v. 13, n. 2, 2025.

DAS, K.; JAHAN, A.; HOSSAIN, M.; MEHBUB, M.; ISLAM, M. Effects of vacuum and modified atmosphere packaging on the shelf life of Rohu fish (*Labeo rohita*) stored at refrigerated temperature (4 °C). **International Food Research Journal**, Serdang, v. 28, n. 3, p. 586-593, 2021.

DE JESUS, G. A. M.; BERTON, S. B. R.; SIMÕES, B. M.; ZOLA, R. S.; MONTEIRO, J. P.; MARTINS, A. F.; BONAFÉ, E. G. κ -carrageenan/poly (vinyl alcohol) functionalized films with gallic acid and stabilized with metallic ions. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 253, 2023.

DE MELO SOARES, R.; DE OLIVEIRA FERNANDES, F.; DE ASSUNÇÃO, C.; BORBUREMA, H.; CARNEIRO, M.; MARINHO-SORIANO, E. Macroalgal diversity along an environmental gradient in a saltwork. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, London, v. 288, 2023.

DIAS, M.; AZEVEDO, V.; SANTOS, T.; POLA, C.; LARA, B.; BORGES, S.; SOARES, N.; MEDEIROS, E.; SARANTÓPOULOUS, C. Effect of active films incorporated with montmorillonite clay and α -tocopherol: potential of nanoparticle migration and reduction of lipid oxidation in salmon. **Packaging Technology and Science**, Chichester, v. 32, n. 1, p. 39–47, 2019.

DMITRENKO, M.; KUZMINOVA, A.; CHERIAN, R. M.; JOSHY, K. S.; PASQUINI, D.; JOHN, M. J.; HATO, M. J.; THOMAS, S.; PENKOVA, A. Edible carrageenan films reinforced with starch and nanocellulose: development and characterization. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 22, 2023.

DOAN, V.; LY, C.; MONDAL, S.; TRUONG, T.; NGUYEN, T.; CHOI, J.; LEE, B.; OH, J. Fcg-Former: identification of functional groups in FTIR spectra using enhanced transformer-based model. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 96, n. 30, 2024.

DOWNES, F. P.; ITO, K. Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods. 4. ed. **American Public Health Association**, Washington, p. 676, 2001.

DU, H.; LIU, C.; UNSALAN, O.; UNSALAN, Ç.; XIONG, S.; MANYANDE, A.; CHEN, H. Development and characterization of fish myofibrillar protein/chitosan/rosemary extract composite edible films and the improvement of lipid oxidation stability during the grass carp fillets storage. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, 2021.

DUMAN, O.; POLAT, T. G.; DIKER, C. Ö.; TUNÇ, S. Agar/ κ -carrageenan composite hydrogel adsorbent for the removal of Methylene Blue from water. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 160, p. 823-835, 2020.

EFTHYMIU, C.; BERGSTRÖM, L.; PEDERSEN, J.; PEDERSEN, J.; HANSSON, P. Self-assembling properties of ionisable amphiphilic drugs in aqueous solution. **Journal of Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 600, p. 701-710, 2021.

EHSANI, A.; HASHEMI, M.; AFSHARI, A.; AMINZARE, M.; RAEISI, M.; ZEINALI, T. Effect of different types of active biodegradable films containing lactoperoxidase system or sage essential oil on the shelf life of fish burger during refrigerated storage. **LWT – Food Science and Technology**, Amsterdam, v. 117, 2020.

EL-FATAH, R.; ROZAN, M.; ZIENA, H.; IMRE, K.; MORAR, A.; HERMAN, V.; ABDELNAEEM, H. Improvement of microbial quality, physicochemical properties, fatty acids profile, and shelf life of basa (*Pangasius bocourti*) fillets during chilling storage using pepsin, rosemary oil, and citric acid. **Foods**, Basel, v. 12, 2023.

ELHADY, S.; HABIB, E.; ABDELHAMEED, R.; GODA, M.; HAZEM, R.; MEHANNA, E.; HELAL, M.; HOSNY, K.; DIRI, R.; HASSANEAN, H.; IBRAHIM, A.; ELTAMANY, E.; ABDELMOHSEN, U.; AHMED, S. Anticancer effects of new ceramides isolated from the red sea red algae *Hypnea musciformis* in a model of Ehrlich ascites carcinoma: LC-HRMS analysis profile and molecular modeling. **Marine Drugs**, Basel, v. 20, 2022.

ELSABAGH, R.; IBRAHIM, S.; ABD-ELAATY, E.; ABDEEN, A.; RAYAN, A.; IBRAHIM, S.; ABDO, M.; IMBREA, F.; ŞMULEAC, L.; EL-SAYED, A.; ELGHAFAR, R.; MORSY, M. Chitosan edible coating: a potential control of toxic biogenic amines and

enhancing the quality and shelf life of chilled tuna filets. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lausanne, v. 7, 2023.

ENDERS, A. A.; NORTH, N. M.; FENSORE, C. M.; VELEZ-ALVAREZ, J.; ALLEN, H. C. Functional group identification for FTIR spectra using image-based machine learning models. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 93, n. 28, p. 9711-9718, 2021.

ERANDA, D.; CHAIJAN, M.; UYSAL-UNALAN, I.; PANPIPAT, W.; NAIK, A.; DIB, A.; KARNJANAPRATUM, S.; GAGAOUA, M. Biopreservation of pre-processed fresh fish by bio-based coating. **Food Bioscience**, Amsterdam, v. 58, 2024a.

ERANDA, D.; CHAIJAN, M.; PANPIPAT, W.; KARNJANAPRATUM, S.; CERQUEIRA, M.; CASTRO-MUÑOZ, R. Gelatin-chitosan interactions in edible films and coatings doped with plant extracts for biopreservation of fresh tuna fish products: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 280, pt. 2, 2024b.

EZATI, P.; RHIM, J. pH-responsive chitosan-based film incorporated with alizarin for intelligent packaging applications. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 102, 2020.

EZZAT, G.; KASSEM, G.; MALAK, N. Safety, quality attributes, and health risk assessments of sand smelt fish. **Scientific Reports**, London, v. 15, 2025.

FALCÓ, I.; RANDAZZO, W.; SÁNCHEZ, G.; LÓPEZ-RUBIO, A.; FABRA, M. On the use of carrageenan matrices for the development of antiviral edible coatings of interest in berries. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 92, p. 74-85, 2019.

FAKAYODE, S.; BAKER, G.; BWAMBOK, D.; BHAWAWET, N.; ELZEY, B.; SIRAJ, N.; MACCHI, S.; POLLARD, D.; PÉREZ, R.; DUNCAN, A.; WARNER, I. Molecular (Raman, NIR, and FTIR) spectroscopy and multivariate analysis in consumable products analysis. **Applied Spectroscopy Reviews**, Philadelphia, v. 55, p. 647-723, 2020.

FAN, X.; JIN, Z.; LIU, Y.; CHEN, Y.; KONNO, K.; ZHU, B.; DONG, X. Effects of super-chilling storage on shelf-life and quality indicators of *Coregonus peled* based on proteomics analysis. **Food Research International**, Amsterdam, v. 143, 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Informe da FAO: A produção mundial de pesca e aquicultura atinge novo recorde histórico**. FAO no Brasil, 07 jun. 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/1696371/>. Acesso em: 15 out 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The state of world fisheries and aquaculture 2024 – Blue transformation in action**. Rome: FAO, Rome, 2024.

FARAG, M. A.; ABIB, B.; QIN, Z.; ZE, X.; ALI, S. E. Dietary macrominerals: updated review of their role and orchestration in human nutrition throughout the life cycle with sex differences. **Current Research in Food Science**, Amsterdam, v. 6, 2023.

FARHAN, A.; HANI, N. Characterization of edible packaging films based on semi-refined kappa-carrageenan plasticized with glycerol and sorbitol. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 64, p. 48-58, 2017.

FARSANIPOOR, A.; KHODANAZARY, A.; HOSSEINI, S. Effect of chitosan-whey protein isolated coatings incorporated with tarragon (*Artemisia dracunculus*) essential oil on the quality of *Scomberoides commersonianus* fillets at refrigerated condition. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 155, p. 766-771, 2020.

FIDALGO, L.; SIMÕES, M.; CASAL, S.; LOPES-DA-SILVA, J.; CARTA, A.; DELGADILLO, I.; SARAIVA, J. Physicochemical parameters, lipids stability, and volatiles profile of vacuum-packaged fresh Atlantic salmon (*Salmo salar*) loins preserved by hyperbaric storage at 10 °C. **Food Research International**, Amsterdam, v. 127, 2020.

FIDALGO, L. G.; SIMÕES, M. M. Q.; CASAL, S.; LOPES-DA-SILVA, J. A.; DELGADILLO, I.; SARAIVA, J. A. Enhanced preservation of vacuum-packaged Atlantic salmon by hyperbaric storage at room temperature versus refrigeration. **Scientific Reports**, London, v. 11, n. 1, Art. 1668, 2021.

FINE, J.; RAJASEKAR, A.; JETHAVA, K.; CHOPRA, G. Spectral deep learning for prediction and prospective validation of functional groups. **Chemical Science**, Cambridge, v. 11, p. 4618-4630, 2020.

FIRDAYANTI, L.; YANTI, R.; RAHAYU, E.; HIDAYAT, C. Carrageenan extraction from red seaweed (*Kappaphycopsis cottonii*) using the bead mill method. **Algal Research**, Amsterdam, v. 69, 2023.

FLÓREZ-FERNÁNDEZ, N.; FALQUÉ, E.; DOMÍNGUEZ, H.; TORRES, M. Green extraction of carrageenans from *Mastocarpus stellatus*. **Polymers**, Basel, v. 14, 2022.

FREITAG, S.; SULYOK, M.; LOGAN, N.; ELLIOTT, C.; KRŠKA, R. The potential and applicability of infrared spectroscopic methods for the rapid screening and routine analysis of mycotoxins in food crops. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Chicago, v. 21, n. 6, p. 5199-5224, 2022.

FREITAS, J.; VAZ-PIRES, P.; CÂMARA, J. Quality Index Method for fish quality control: understanding the applications, the appointed limits and the upcoming trends. **Trends in Food Science & Technology**, Amsterdam, v. 111, p. 333–345, 2021.

FRÖBA, M.; GROSSE, M.; SETZ, C.; RAUCH, P.; AUTH, J.; SPANAUS, L.; MÜNCH, J.; RUÉTALO, N.; SCHINDLER, M.; MOROKUTTI-KURZ, M.; GRAF, P.; PRIESCHL-GASSAUER, E.; GRASSAUER, A.; SCHUBERT, U. Iota-carrageenan inhibits replication of SARS-CoV-2 and the respective variants of concern Alpha, Beta, Gamma and Delta. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 22, 2021.

FUCHS, A.; HUPFELD, E.; SIEBER, V. To gel or not to gel - Tuning the sulfation pattern of carrageenans to expand their field of application. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 333, 2024.

GACURA, J.; NARVARTE, B.; MENDOZA, E.; HINALOC, L.; AGUILAR, R.; IRANG-MAXION, E.; GONZAGA, S.; ROLEDA, M. To plant or not to plant? Nutrient uptake, growth, and biochemistry of eucheumatoids under low salinity as influenced by nutrient-rich freshwater outflow. **Journal of Phycology**, Hoboken 2025.

GARCÍA, M. R.; FERREZ-RUBIO, J. A.; VILAS, C. Assessment and prediction of fish freshness using mathematical modelling: a review. **Foods**, Basel, v. 11, n. 15, 2022.

GASPAR, M.; BRAGA, M. Edible films and coatings based on agrifood residues: a new trend in the food packaging research. **Current Opinion in Food Science**, Amsterdam, 2023.

GJEDREM, T.; ROBINSON, N.; RYE, M. The importance of selective breeding in aquaculture to meet future demands for animal protein: a review. **Aquaculture**, Amsterdam, v. 350, p. 117–129, 2012.

GONZÁLEZ-GRAGERA, E.; GARCÍA-LÓPEZ, J.; BOUTINE, A.; GARCÍA-MARÍN, M.; FONOLLÁ, J.; GIL-MARTÍNEZ, L.; FERNÁNDEZ, I.; MARTÍNEZ-BUENO, M.; BAÑOS, A. Improving the Quality and Safety of Fish Products with Edible Coatings Incorporating Piscicolin CM22 from a Psychrotolerant *Carnobacterium maltaromaticum* Strain. **Foods**, Basel, v. 13, 2024.

GOPIKA, P.; RADHAKRISHNAN, P.; BAIJU, P.; MUBEENAS, A. Fabrication of butterfly pea flower anthocyanin-incorporated colorimetric indicator film based on gelatin/pectin for monitoring fish freshness. **Food Hydrocolloids for Health**, Amsterdam, v. 4, 2023.

GORIS, M.; PUNTERVOLL, P.; ROJO, D.; CLAUSSEN, J.; LARSEN, Ø.; GARCÍA-MOYANO, A.; ALMENDRAL, D.; BARBAS, C.; FERRER, M.; BJERGA, G. Use of flavin-containing monooxygenases for conversion of trimethylamine in salmon protein hydrolysates. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 86, 2020.

GOVARI, M.; TRYFINOPOULOU, P.; PARLAPANI, F.; BOZIARIS, I.; PANAGOUE, E.; NYCHAS, G. Quest of intelligent research tools for rapid evaluation of fish quality: FTIR spectroscopy and multispectral imaging versus microbiological analysis. **Foods**, Basel, v. 10, 2021.

GUO, J.; WANG, R.; ZHANG, S.; ANTAO, D. Temperature dependency of the apolar surface tension component for water and its role in classifying apolar and polar interfacial interactions. **The Journal of Physical Chemistry C**, Washington, 2023.

GUO, X.; LIN, H.; XU, S.; HE, L. Recent advances in spectroscopic techniques for the analysis of microplastics in food. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 70, n. 5, 2022.

GUO, X.; WANG, N.; WEI, Y.; LIU, P.; DENG, X.; LEI, Y.; ZHANG, J. The effects of malonaldehyde on quality characteristics and protein oxidation of *Coregonus peled* during storage. **Foods**, Basel, v. 12, 2023.

GUO, Z.; FENG, X.; HAN, J.; ZHONG, T.; ZHENG, Z.; XIAO, Y.; YU, X. Inhibitory effects of κ -carrageenan oligosaccharides on histamine formation in Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) during cold storage. **Food Bioscience**, Amsterdam, v. 64, 2025.

GUPTA, R.; GUHA, P.; SRIVASTAV, P. Natural polymers in bio-degradable/edible film: a review on environmental concerns, cold plasma technology and nanotechnology application on food packaging—recent trends. **Food Chemistry Advances**, Amsterdam, 2022.

GUPTA, V.; BISWAS, D.; ROY, S. A comprehensive review of biodegradable polymer-based films and coatings and their food packaging applications. **Materials**, Basel, v. 15, 2022.

HAGHIGHI, M.; YAZDANPANA, S. Chitosan-based coatings incorporated with cinnamon and tea extracts to extend the fish fillets shelf life: Validation by FTIR spectroscopy technique. **Journal of Food Quality**, London, 2020.

HALE, J.; GERHÄUSER, J.; GAUKEL, V.; WEFERS, D. Commercially available carrageenans show broad variation in their structure, composition, and functionality. **European Food Research and Technology**, Berlin, v. 250, p. 2989-3003, 2024.

HAMAD, A. Changes in chemical composition, fatty acids and sensory quality of fried catfish fillets (*Clarias gariepinus*). **GSC Biological and Pharmaceutical Sciences**, London, 2021.

HAMAD, R.; ALSADI, I.; SALEH, A. Evaluation of freshness of some imported marine fish species retailed for sale in Al Beida City, Libya. **Damanhour Journal of Veterinary Sciences**, Damanhour, 2020.

HAMED, I.; JAKOBSEN, A.; LERFALL, J. Sustainable edible packaging systems based on active compounds from food processing byproducts: a review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Chicago, v. 21, n. 1, p. 198-226, 2021.

HANS, N.; GUPTA, S.; PATTNAIK, F.; PATEL, A. K.; NAIK, S.; MALIK, A. Valorization of *Kappaphycus alvarezii* through extraction of high-value compounds employing green approaches and assessment of the therapeutic potential of κ -carrageenan. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 250, 2023.

HAQ, M.; ALI, M.; PARK, J.; KIM, J.; ZHANG, W.; CHUN, B. Atlantic salmon (*Salmo salar*) waste as a unique source of biofunctional protein hydrolysates: emerging productions, promising applications, and challenges mitigation. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 462, 2025.

HASHEMI, S.; KAVEH, S.; ABEDI, E.; PHIMOLSIRIPOL, Y. Polysaccharide-based edible films/coatings for the preservation of meat and fish products: Emphasis on incorporation of lipid-based nanosystems loaded with bioactive compounds. **Foods**, Basel, v. 12, 2023.

HASSAN, M.; XU, Y.; SAYADA, J.; ZAREEF, M.; SHOAI, M.; CHEN, X.; LI, H.; CHEN, Q. Chemometrics-powered spectroscopic techniques for the measurement of food-derived phenolics and vitamins in foods: a review. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 473, 2025.

HASSOUN, A.; MÅGE, I.; SCHMIDT, W.; TEMIZ, H.; LI, L.; KIM, H.; NILSEN, H.; BIANCOLILLO, A.; AÏT-KADDOUR, A.; SIKORSKI, M.; SIKORSKA, E.; GRASSI, S.;

- COZZOLINO, D. Fraud in animal origin food products: advances in emerging spectroscopic detection methods over the past five years. **Foods**, Basel, v. 9, 2020.
- HE, S.; WANG, Y. Antimicrobial and antioxidant effects of kappa-carrageenan coatings enriched with cinnamon essential oil in pork meat. **Foods**, Basel, v. 11, 2022.
- HE, Q.; LI, Z.; YANG, Z.; ZHANG, Y.; LIU, J. A superchilling storage–ice glazing (SS-IG) of Atlantic salmon (*Salmo salar*) sashimi fillets using coating protective layers of *Zanthoxylum* essential oils (EOs). **Aquaculture**, Amsterdam, v. 514, p. 734506, 2020.
- HENRY, C.; McSORLEY, E.; CONWAY, M.; YEATES, A.; MULHERN, M.; STRAIN, C.; SPENCE, T.; WIJNGAARDEN, E.; STRAIN, J.; ALLSOPP, P. Effect of fish consumption on the interactions between the gut microbiota and inflammatory markers: results from the iFISH study. **Proceedings of the Nutrition Society**, Cambridge, v. 83, 2024.
- HILLIOU, L. Structure–elastic properties relationships in gelling carrageenans. **Polymers**, Basel, v. 13, 2021.
- HILLIOU, L.; MORAES, I.; ALMEIDA, P. From the seaweeds' carrageenan composition to the hybrid carrageenans' hydrogel elasticity: identification of a relationship based on the content in iota-carrageenan. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 162, 2024.
- HMANI, I.; KTARI, L.; ISMAIL, A.; M'DADEL, C.; BOUR, M. Mediterranean seaweeds as source of bioactive compounds: case study of some red algae (*Rhodophyta*) from north coast of Tunisia. **Journal of Applied Phycology**, Dordrecht, p. 1437-1444, 2021.
- HO, P.; ZIN, M.; PORTMAN, K.; MAMAT, H.; RUSLI, N.; SCOTT, D.; ZAINOL, M. Effect of *Antigonon leptopus* extract in corn starch-glycerol based film as colourimetric indicator film for monitoring fish freshness. **Food Research**, Amsterdam, v. 8, n. 3, p. 476–486, 2024.
- HOEL, S.; LERFALL, J.; JAKOBSEN, A. Growth and spoilage potential of an *Aeromonas salmonicida* strain in refrigerated Atlantic cod (*Gadus morhua*) stored under various modified atmospheres. **Foods**, Basel, v. 11, 2022.
- HONEY, O.; NIHAD, S.; RAHMAN, M.; RAHMAN, M.; ISLAM, M.; CHOWDHURY, M. Exploring the antioxidant and antimicrobial potential of three common seaweeds of Saint Martin's Island of Bangladesh. **Heliyon**, Amsterdam, v. 10, 2024.
- HOQ, M. E.; HAQUE, M. A.; HASAN, J.; ISLAM, M. Z.; ISLAM, M. M. Inclusion of red seaweed (*Hypnea musciformis*) improves nutritional quality of vegetable salad. **Bangladesh Journal of Fisheries**, Dhaka, v. 32, n. 2, p. 369-371, 2021.
- HOSSAIN, Md. S.; SIFAT, S. A.; HOSSAIN, M. A.; SALLEH, S.; HOSSAIN, M.; AKTER, S.; HOSSAIN, M. B. Comparative assessment of bioactive compounds, antioxidant capacity and nutritional quality of red seaweeds and water spinach. **Regional Studies in Marine Science**, Amsterdam, v. 46, 2021.

HUA, Q.; WONG, C.; LI, D. Postbiotics enhance the functionality of a probiotic edible coating for salmon fillets and the probiotic stability during simulated digestion. **Food Packaging and Shelf Life**, Amsterdam, v. 34, 2022.

HUANG, J.; CHEN, B.; ZENG, Q.; LIU, Y.; LIU, H.; ZHAO, Y.; WANG, J. Application of the curcumin-mediated photodynamic inactivation for preserving the storage quality of salmon contaminated with *L. monocytogenes*. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 359, 2021.

HUANG, J.; ZHOU, Y.; CHEN, M.; HUANG, J.; LI, Y.; HU, Y. Evaluation of negative behaviors for single specific spoilage microorganism on little yellow croaker under modified atmosphere packaging: biochemical properties characterization and spoilage-related volatiles identification. **LWT - Food Science and Technology**, Amsterdam, v. 140, 2021.

HUANG, Y.; HUANG, W.; JEN, H.; LIU, B.; HUANG, K.; HWANG, D. Comparative variations of extractive nitrogenous components and quality in fresh muscle and dried product of rabbitfish (*Siganus fuscescens*) in Taiwan. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, Philadelphia, v. 29, p. 693-706, 2020.

HUGHES, M.; LEONARDI, P.; GENOVESE, D. Native hybrid carrageenans from *Sarcopeltis skottsbergii* and *Sarcothalia crispata*: The role of counterions on their gelling properties. **Algal Research**, Amsterdam, v. 73, 2023.

HUSSEIN, A.; ALMASOODI, I.; ATALLAH, A. Comparison of microbial and chemical changes in common carp (*Cyprinus carpio*) fillets reared in earthen basins, river cages and river fish during storage in refrigerator. **Journal of Kerbala for Agricultural Sciences**, Kerbala, v. 11, n. 4, 2024.

INTERNATIONAL COMMISSION ON MICROBIOLOGICAL SPECIFICATIONS FOR FOODS. *Microorganisms in Food 8: Use of Data for Assessing Process Control and Product Acceptance*. New York: Springer, 2011. 400 p.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos físico-químicos para análise de alimentos. 4. ed. São Paulo: **Instituto Adolfo Lutz**, 2008.

IQBAL, W.; ANDALIB, S.; MOHANI, S.; HASAN, M.; ARMAN, M.; ALI, L. Elemental analysis of carrageenans isolated from *Hypnea musciformis* red algae of Karachi coast using SEM-EDX. **Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences**, Karachi, v. 35, n. 2, p. 561-570, 2022.

ISLAM, M. M.; HASAN, J.; ALI, M. Z.; HOQ, M. E. Culture of three seaweed species in Cox's Bazar coast, Bangladesh. **Bangladesh Journal of Zoology**, Dhaka, v. 49, n. 1, p. 47-56, 2021.

ISWAHYUNI, H.; SUYATMA, N.; WULANDARI, N.; IRIANTO, H.; DEWI, F.; N., N.; SINURAT, E.; NURBAYASARI, R.; G., G.; FRANSISKA, D. Application of edible coating made from blends of VCO nanoemulsion, iota carrageenan, and alginate for pindang fish preservation by using response surface methodology. **Green Materials**, London, v. 13, n. 1, 2023.

JÄÄSKELÄINEN, E.; JAKOBSEN, L.; HULTMAN, J.; EGGERS, N.; BERTRAM, H.; BJÖRKROTH, J. Metabolomics and bacterial diversity of packaged yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and salmon (*Salmo salar*) show fish species-specific spoilage development during chilled storage. **International Journal of Food Microbiology**, Amsterdam, v. 293, p. 44–52, 2019.

JACOBSEN, Á.; MIKALSEN, S.; JOENSEN, H.; EYSTURSKARÐ, J. Composition and dynamics of the bacterial communities present in the post-slaughter environment of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and correlations to gelatin degrading activity. **PeerJ**, San Diego, v. 7, 2019.

JANCÍKOVÁ, S.; DORDÉVIC, D.; SEDLÁČEK, P.; NEJEZCHLEBOVÁ, M.; TREML, J.; TREMLOVA, B. Edible films from carrageenan/orange essential oil/trehalose—structure, optical properties, and antimicrobial activity. **Polymers**, Basel, v. 13, n. 3, 2021.

JAYAKODY, M.; VANNIARACHCHY, M.; WIJESEKARA, I. Seaweed derived alginate, agar, and carrageenan based edible coatings and films for the food industry: a review. **Journal of Food Measurement and Characterization**, New York, p. 1-33, 2022.

JELIANI, Z.; SOHRABIPOUR, J.; SOLTANI, M.; RABIEI, R.; YOUSEFZADI, M. Seasonal variations in growth and phytochemical compounds of cultivated red alga, *Hypnea flagelliformis*, in southern coastlines of Iran. **Journal of Applied Phycology**, Dordrecht, v. 33, p. 2459-2470, 2021.

JENSEN, I.; EILERTSEN, K.; OTNÆS, C.; MÆHRE, H.; ELDEVOLL, E. An update on the content of fatty acids, dioxins, PCBs and heavy metals in farmed, escaped and wild Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in Norway. **Foods**, Basel, v. 9, 2020.

JIA, Z.; SHI, C.; ZHANG, J.; JI, Z. Comparison of freshness prediction method for salmon fillet during different storage temperatures. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, 2021.

JIANG, F.; LIU, Y.; XIAO, Q.; CHEN, F.; WENG, H.; CHEN, J.; ZHANG, Y.; XIAO, A. Eco-friendly extraction, structure, and gel properties of ι-carrageenan extracted using Ca (OH)₂. **Marine Drugs**, Basel, v. 20, 2022.

JIANG, J.; ZHANG, W.; NI, W.; SHAO, J. Insight on structure-property relationships of carrageenan from marine red algal: a review. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 257, 2021.

NR, M.; GENTLEMAN, P.; ADOWEI, P.; DIKIO, E. Evaluation of total volatile bases and trimethylamine in hake (*Merluccius capensis*) fish preserved at low temperature in Vanderbijlpark, South Africa. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, [S. I.], v. 28, n. 3, 2023.

JURIĆ, M.; BANDIĆ, L.; CARULLO, D.; JURIĆ, S. Technological advancements in edible coatings: Emerging trends and applications in sustainable food preservation. **Food Bioscience**, Amsterdam, v. 58, 2024.

KAMER, D.; KAYNARCA, G.; YÜCEL, E.; GÜMÜŞ, T. Development of gelatin/PVA based colorimetric films with a wide pH sensing range winery solid by-product (Vinasse) for monitor shrimp freshness. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 220, p. 627-637, 2022.

KARIMZADEH, Z.; FALLAH, A.; DEHKORDI, S.; SHAFIEI, S.; GHASEMI, M. The active kappa-carrageenan coating and oxygen absorber packaging for the preservation of chilled rainbow trout fillets. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 283, 2024.

KARNWAL, A.; KUMAR, G.; SINGH, R.; SELVARAJ, M.; MALIK, T.; TAWAHA, A. Natural biopolymers in edible coatings: applications in food preservation. **Food Chemistry: X**, Amsterdam, v. 25, 2025.

KHASANAH, L.; SWASTAWATI, F.; ROMADHON, R. Effectiveness edible coating with the addition of liquid smoke on the oxidation rate and shelf life of anchovies (*Stolephorus spp.*). **International Journal of Research Publication and Reviews**, Bhopal, 2024.

KIBENGE, F. Emerging viruses in aquaculture. **Current Opinion in Virology**, London, v. 34, p. 97-103, 2019.

KIM, E.; JE, Y. Fish consumption and the risk of dementia: systematic review and meta-analysis of prospective studies. **Psychiatry Research**, Amsterdam, v. 317, 2022.

KIM, S.; YUN, D.; LEE, G.; PARK, S.; LIM, J.; CHOI, J.; PARK, K.; CHO, J. Prediction and visualization of total volatile basic nitrogen in yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) using shortwave infrared hyperspectral imaging. **Foods**, Basel, v. 13, 2024.

KIRK, R. S.; SAWYER, R. Pearson's Composition and Analysis of Foods. London: **Longman Scientific and Technical**, 1991.

KHAN, A.; EZATI, P.; RHIM, J. pH indicator integrated with carbon quantum dots of glucose to monitor the quality of fish and shrimp. **Food and Bioprocess Technology**, New York, v. 17, p. 554-569, 2024.

KHARBACH, M.; ALAOUI MANSOURI, M.; TAABOUZ, M.; YU, H. Current application of advancing spectroscopy techniques in food analysis: data handling with chemometric approaches. **Foods**, Basel, v. 12, n. 14, 2023.

KHASANAH, L.; SWASTAWATI, F.; ROMADHON, R. Effectiveness edible coating with the addition of liquid smoke on the oxidation rate and shelf life of anchovies (*Stolephorus spp.*). **International Journal of Research Publication and Reviews**, Bhopal, v. 5, n. 6, p. 4425-4431, 2024.

KHOJAH, S. Bio-based coating from fish gelatin, k-carrageenan and extract of pomegranate peels for maintaining the overall qualities of fish fillet. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, Philadelphia, v. 29, n. 8, p. 810-822, 2020.

KHOTIMCHENKO, M.; TIASTO, V.; KALITNIK, A.; BEGUN, M.; KHOTIMCHENKO, R.; LEONTEVA, E.; BRYUKHOVETSKIY, I.; KHOTIMCHENKO, Y. Antitumor potential of carrageenans from marine red algae. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 246, 2020.

KIM, D.; PARK, S.; SHIN, H. Fish Freshness Indicator for Sensing Fish Quality during Storage. **Foods**, Basel, v. 12, 2023.

KIRAN-YILDIRIM, B.; HALE, J.; WEFERS, D.; GAUKEL, V. Ice recrystallization inhibition of commercial κ -, ι -, and λ -carrageenans. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 290, 2021.

KOEHN, J. ZACHARY; ALLISON, EDWARD H.; GOLDEN, CHRISTOPHER D.; HILBORN, RAY. The Role of Seafood in Sustainable Diets. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 17, n. 3, p. 035003, 2022.

KOLANOWSKI, W. Salmonids as natural functional food rich in omega-3 PUFA. **Applied Sciences**, Basel, v. 11, n. 5, art. 2409, 2021.

KRITIKOS, A.; ASKA, I.; EKONOMOU, S.; MALLOUCHOS, A.; PARLAPANI, F.; HAROUTOUNIAN, S.; BOZIARIS, I. Volatilome of chill-stored European seabass (*Dicentrarchus labrax*) fillets and Atlantic salmon (*Salmo salar*) slices under modified atmosphere packaging. **Molecules**, Basel, v. 25, n. 8, p. 1981, 2020.

KUNJULAKSHMI, S.; HARIKRISHNAN, S.; MURALI, S.; D'SILVA, J.; BINSI, P.; MURUGADAS, V.; ALFIYA, P.; DELFIYA, D.; SAMUEL, M. Development of portable, non-destructive freshness indicative sensor for Indian Mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) stored under ice. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 287, 2020.

KIZILKAYA, P.; KAYA, M. The effect of a chitosan/TiO₂-nanoparticle/rosmarinic acid-based nanocomposite coating on the preservation of refrigerated rainbow trout fillets (*Oncorhynchus mykiss*). **Food Science of Animal Resources**, Daejeon, v. 43, p. 1170-1182, 2023.

KOCIRA, A.; KOZŁOWICZ, K.; PANASIEWICZ, K.; STANIAK, M.; SZPUNAR-KROK, E.; e HORTYŃSKA, P. Polysaccharides as edible films and coatings: characteristics and influence on fruit and vegetable quality—a review. **Agronomy**, Basel, v. 11, 2021.

KOIRALA, P.; NIRMAL, N.; WORAPRAYOTE, W.; VISESSANGUAN, W.; BHANDARI, Y.; KARIM, N.; NOR-KHAIZURA, M.; SARICAOGLU, F. Nano-engineered edible films and coatings for seafood products. **Food Packaging and Shelf Life**, Amsterdam, v. 38, 2023.

KRAVCHENKO, A.; ANASTYUK, S.; GLAZUNOV, V.; SOKOLOVA, E.; ISAKOV, V.; YERMAK, I. Structural characteristics of carrageenans of red alga *Mastocarpus pacificus* from Sea of Japan. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 229, 2020.

KRAVCHENKO, A.; ANASTYUK, S.; GLAZUNOV, V.; SOKOLOVA, E.; ISAKOV, V.; YERMAK, I. Structural peculiarities of carrageenans from Far Eastern red seaweed *Mazzaella parksii* (Gigartinales). **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 228, p. 346-357, 2022.

KRAVCHENKO, A.; MENCHINSKAYA, E.; ISAKOV, V.; GLAZUNOV, V.; YERMAK, I. Carrageenans and their oligosaccharides from red seaweeds *Ahnfeltiopsis flabelliformis* and *Mastocarpus pacificus* (Phyllophoraceae) and their antiproliferative activity. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 24, 2023.

KRITIKOS, A.; ASKA, I.; EKONOMOU, S.; MALLOUCHOS, A.; PARLAPANI, F. F.; HAROUTOUNIAN, S. A.; BOZIARIS, I. S. Volatilome of chill-stored European seabass (*Dicentrarchus labrax*) fillets and Atlantic salmon (*Salmo salar*) slices under modified atmosphere packaging. **Molecules**, Basel, v. 25, n. 8, 2020.

KUBIRIZA, G.; SEMPIJJA, D.; MUBIRU, E.; SEMWANGA, N.; ODOLI, C.; ZALWANGO, J.; MASETTE, M. Oxidative stability and proximate composition of silver cyprinid (*Rastrineobola argentea*) used for fishmeal in East Africa. **Journal of Applied Aquaculture**, Philadelphia, v. 33, p. 246-266, 2021.

KUMAR, L.; RAMAKANTH, D.; AKHILA, K.; e GAIKWAD, K. Edible films and coatings for food packaging applications: a review. **Environmental Chemistry Letters**, Luxembourg, v. 20, p. 875-900, 2021.

KUMAR, Y.; POONG, S.; GACHON, C.; BRODIE, J.; SADE, A.; LIM, P. Impact of elevated temperature on the physiological and biochemical responses of *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta). **PLoS ONE**, California, v. 15, 2020.

KUMARAVEL, B.; AMUTHA, A.; MARY, T.; AGRAWAL, A.; SINGH, A.; SARAN, S.; GOVINDARAJAN, N. Automated seafood freshness detection and preservation analysis using machine learning and paper-based pH sensors. **Scientific Reports**, London, v. 15, 2025.

KUNYABOON, S.; THUMANU, K.; PARK, J.; KHONGLA, C.; YONGSAWATDIGUL, J. Evaluation of lipid oxidation, volatile compounds and vibrational spectroscopy of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) during ice storage as related to the quality of its washed mince. **Foods**, Basel, v. 10, art. 2357, 2021.

KUREK, M.; PIŠONIĆ, P.; ŠČETAR, M.; JANČI, T.; ČANAK, I.; FILIPEC, S.; BENBETTAIEB, N.; DEBEAUFORT, F.; GALIĆ, K. Edible coatings for fish preservation: Literature data on storage temperature, product requirements, antioxidant activity, and coating performance—A review. **Antioxidants**, Basel, v. 13, n. 11, 2024.

LE, T.; TAKAHASHI, K.; OKAZAKI, E.; OSAKO, K. Mitigation of lipid oxidation in tuna oil using gelatin pouches derived from horse mackerel (*Trachurus japonicus*) scales and incorporating phenolic compounds. **LWT – Food Science and Technology**, Amsterdam, v. 128, 2020.

LEE, D.; TANG, J.; LEE, S.; JUN, S. Effect of oscillating magnetic fields (OMFs) and pulsed electric fields (PEFs) on supercooling preservation of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fillets. **Foods**, Basel, v. 13, n. 16, 2024.

LEE, J.; WI, G.; CHOI, M. The rheological properties and stability of gelled emulsions applying to κ -carrageenan and methyl cellulose as an animal fat replacement. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 136, 2022.

LEIWAKABESSY, J.; BATMOMOLIN, W.; SILABAN, B.; MAILLOA, M. The Decrease in Quality of Fresh Fish from Floating Net Cage Cultivation in Ambon Bay at Room Temperature. **AGRITEKNO: Journal of Agricultural Technology**, Ambon, v. 13, n. 1, 2024.

LEMOS, M.; PRATA, J.; RODRIGUES, I.; MARTINS-COSTA, S.; ARCHER, B.; MACHADO, J.; DILÃO, R.; VAZ-PIRES, P.; DA COSTA, M. An exploratory study on spoilage bacteria and *Listeria monocytogenes* in fresh salmon: extending shelf-life using vacuum and seasonings as natural preservatives. **Veterinary Sciences**, Basel, v. 10, 2023.

LERFALL, J.; SHUMILINA, E.; JAKOBSEN, A. N. The significance of *Shewanella* sp. strain HSO12, *Photobacterium phosphoreum* strain HS254 and packaging gas composition in quality deterioration of fresh saithe fillets. **LWT – Food Science and Technology**, Amsterdam, v. 154, 2022.

LI, H.; WANG, Y.; ZHANG, J.; LI, X.; WANG, J.; YI, S.; ZHU, W.; XU, Y.; LI, J. Prediction of the freshness of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) using E-nose, E-tongue, and colorimeter based on biochemical indexes analyzed during frozen storage of whole fish. **Food Chemistry**, Barking, v. 402, 2022.

LI, H.; YU, Y.; XIONG, G.; LIAO, T.; ZU, X. Cobalt-60 and electron beam irradiation induced lipid oxidation on largemouth bass (*Micropterus salmoides*). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 100, n. 12, p. 4612-4617, 2020.

LI, J.; ZHOU, G.; PENG, X.; DONG, X.; YONGTAO, X.; REGENSTEIN, J.; DU, M.; SUN, L. Spoilage microbes' effect on freshness and IMP degradation in sturgeon fillets during chilled storage. **Food Bioscience**, Amsterdam, v. 41, 2021.

LI, Q.; ZHANG, J.; ZHU, J.; LIN, H.; SUN, T.; CHENG, L. Effects of gallic acid combined with epsilon-polylysine hydrochloride incorporated in a pullulan–CMC edible coating on the storage quality of sea bass. **RSC Advances**, London, v. 11, p. 29675-29683, 2021.

LI, X.; LIU, D.; DANG, S.; ZHANG, L.; MUNSOP, K. Corn starch/polyvinyl alcohol based films incorporated with curcumin-loaded Pickering emulsion for application in intelligent packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 188, p. 974-982, 2021.

LI, Y.; NI, Y.; HE, W.; LI, H.; ZHANG, W.; TAN, L.; ZHAO, J.; XU, B. Mussel-inspired highly adhesive carrageenan-based coatings with self-activating enhanced activity for meat preservation. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 348, 2024.

LI, Y.; ZHAO, N.; LI, Y.; ZHANG, D.; SUN, T.; LI, J. Dynamics and diversity of microbial community in salmon slices during refrigerated storage and identification of biogenic amine-producing bacteria. **Food Bioscience**, Amsterdam, v. 52, 2023.

LI, Y.; JIA, S.; HONG, H.; ZHANG, L.; ZHUANG, S.; SUN, X.; LIU, X.; LUO, Y. Assessment of bacterial contributions to the biochemical changes of chill-stored blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) fillets: protein degradation and volatile organic compounds accumulation. **Food Microbiology**, Amsterdam, v. 91, 2020.

LIU, C.; TSAI, G.; PAN, C.; SHANG, K.; TSENG, H.; CHAI, H.; HSIAO, H. Dual bacterial strains TTI for monitoring fish quality in food cold chain. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 87, n. 8, p. 3562-3572, 2022.

LIU, F.; DUAN, G.; YANG, H. Recent advances in exploiting carrageenans as a versatile functional material for promising biomedical applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 235, 2023.

LIU, J.; LAN, W.; SUN, X.; XIE, J. Effects of chitosan grafted phenolic acid coating on microbiological, physicochemical and protein changes of sea bass (*Lateolabrax japonicus*) during refrigerated storage. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 85, n. 8, p. 2506-2515, 2020.

LIU, Y.; AN, D.; XIAO, Q.; CHEN, F.; ZHANG, Y.; WENG, H.; XIAO, A. A novel κ -carrageenan extracting process with calcium hydroxide and carbon dioxide. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 197, 2022.

LIU, Y.; CHEN, J.; LI, H.; WANG, Y. Nanocomplexes film composed of gallic acid loaded ovalbumin/chitosan nanoparticles and pectin with excellent antibacterial activity: Preparation, characterization and application in coating preservation of salmon fillets. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 259, 2024.

LIU, Y.; LIN, Y.; CAO, B.; WU, K.; WANG, L. Mechanism of the polysiloxane concentration-dependent hydrophobicity in epoxy resin based on a thermodynamic ring model with saturation effect. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, Piscataway, v. 30, p. 571-579, 2023.

LIU, Y.; QIN, Y.; BAI, R.; ZHANG, X.; YUAN, L.; LIU, J. Preparation of pH-sensitive and antioxidant packaging films based on κ -carrageenan and mulberry polyphenolic extract. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 134, p. 993-1001, 2019.

LOUDIYI, M.; TEMIZ, H.; SAHAR, A.; AHMAD, M.; BOUKRIA, O.; HASSOUN, A.; AÏT-KADDOUR, A. Spectroscopic techniques for monitoring changes in the quality of milk and other dairy products during processing and storage. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Abingdon, v. 62, p. 3063-3087, 2020.

LOZANO-MUÑOZ, I.; MUÑOZ, S.; DÍAZ, N.; MEDINA, A.; BAZAES, J.; RIQUELME, C. Nutritional enhancement of farmed salmon meat via non-GMO *Nannochloropsis gaditana*: eicosapentaenoic acid (EPA, 20:5 n-3), docosapentaenoic acid (DPA, 22:5 n-3) and vitamin D3 for human health. **Molecules**, Basel, v. 25, art. 4615, 2020.

LU, Y.; YAO, G.; YU, J.; QIU, J.; QIAN, Y.; HUANG, X.; XU, Y. Optimization and detection of freshness biomarkers of Atlantic salmon subjected to different vacuum packaging conditions during storage at 0 °C by metabolomics and molecular docking. **Foods**, Basel, v. 13, 2024.

MA, M.; LIU, Y.; ZHANG, S.; YUAN, Y. Edible coating for fresh-cut fruit and vegetable preservation: biomaterials, functional ingredients, and joint non-thermal technology. **Foods**, Basel, v. 13, 2024.

MADIVOLI, E.; KISATO, J.; KIMANI, P.; KAMAU, K. Evaluation of the food barrier and mechanical properties of carrageenan-starch composite films. **Food Science & Nutrition**, Hoboken, v. 13, 2024.

MAI, T.; CHOI, J.; PARK, D.; PARK, S.; KIM, H. Evaluation of the nutritional potential of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) tissues based on the contents of essential fatty acids. **Aquaculture Reports**, Amsterdam, v. 36, 2024.

MAKAM, R.; OMAR, W.; AHMAD, D.; NOR, N.; SHAMJUDDIN, A.; AMIN, N. The potential of carboxymethyl cellulose from empty fruit bunch as versatile material in food coating: A review. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 338, 2024.

MALGA, J.; TRIGO, M.; MARTÍNEZ, B.; AUBOURG, S. Preservative effect on canned mackerel (*Scomber colias*) lipids by addition of octopus (*Octopus vulgaris*) cooking liquor in the packaging medium. **Molecules**, Basel, v. 27, 2022.

MALLE, P.; TAO, S. H. Rapid Quantitative Determination of Trimethylamine using Steam Distillation. **Journal of Food Protection**, Amsterdam, v. 50, n. 9, p. 756-760, 1987.

MALLOUCHOS, A.; MIKROU, T.; GARDELI, C. Gas Chromatography–Mass Spectrometry-Based Metabolite Profiling for the Assessment of Freshness in Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata*). **Foods**, Basel, v. 9, 2020.

MARINGGAL, B.; HASHIM, N.; TAWAKKAL, I.; e MOHAMED, M. Recent advance in edible coating and its effect on fresh/fresh-cut fruits quality. **Trends in Food Science and Technology**, Amsterdam, v. 96, p. 253-267, 2020.

MARTINS, V.; PINTADO, M.; MORAIS, R.; MORAIS, A. Recent highlights in sustainable bio-based edible films and coatings for fruit and vegetable applications. **Foods**, Basel, v. 13, 2024.

MARTINY, T. R.; PACHECO, B. S.; PEREIRA, C. M. P.; MANSILLA, A.; ASTORGA, M. S.; DOTTO, G. L.; MORAES, C. C.; ROSA, G. S. A novel biodegradable film based on κ -carrageenan activated with olive leaves extract. **Food Science & Nutrition**, Hoboken, v. 8, n. 7, p. 3147-3156, 2020.

MATHEW, S.; JAISWAL, A.; JAISWAL, S. Carrageenan-based sustainable biomaterials for intelligent food packaging: A review. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 342, 2024.

MAYORAL, E.; ARCOS-CASARRUBIAS, J.; GOICOCHEA, G. Self-assembly of model surfactants as reverse micelles in nonpolar solvents and their role as interfacial tension modifiers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 615, 2021.

MCHALE, G.; AFIFY, N.; ARMSTRONG, S.; WELLS, G.; LEDESMA-AGUILAR, R. The Liquid Young's Law on SLIPS: Liquid–liquid interfacial tensions and Zisman plots. **Langmuir**, Washington, v. 38, n. 32, p. 10032–10042, 2022.

MEHRAIE, A.; KHANZADI, S.; HASHEMI, M.; AZIZZADEH, M. New coating containing chitosan and *Hyssopus officinalis* essential oil (emulsion and nanoemulsion) to protect shrimp (*Litopenaeus vannamei*) against chemical, microbial and sensory changes. **Food Chemistry: X**, Amsterdam, v. 19, 2023.

MENDES, M.; COTAS, J.; GUTIÉRREZ, I.; GONÇALVES, A.; CRITCHLEY, A.; HINALOC, L.; ROLEDA, M.; PEREIRA, L. Advanced extraction techniques and physicochemical properties of carrageenan from a novel *Kappaphycus alvarezii* cultivar. **Marine Drugs**, Basel, v. 22, n. 11, 2024.

MENDIVIL, C. Dietary fish, fish nutrients, and immune function: a review. **Frontiers in Nutrition**, Lausanne, v. 7, 2021.

MERLO, T.; CONTRERAS-CASTILLO, C.; SALDAÑA, E.; BARANCELLI, G.; DARGELIO, M.; YOSHIDA, C.; RIBEIRO, E.; MASSARIOLI, A.; VENTURINI, A. Incorporation of pink pepper residue extract into chitosan film combined with a modified atmosphere packaging: Effects on the shelf life of salmon fillets. **Food Research International**, Ottawa, v. 125, 2019.

MEZHOUDI, M.; SALEM, A.; ABDELHEDI, O.; FAKHFAKH, N.; MABROUK, M.; KHORCHANI, T.; DEBEAUFORT, F.; JRIDI, M.; ZOUARI, N. Development of active edible coatings based on fish gelatin enriched with *Moringa oleifera* extract: Application in fish (*Mustelus mustelus*) fillet preservation. **Food Science & Nutrition**, Hoboken, v. 10, p. 3979-3992, 2022.

MINICH, J.; POORE, G.; JANTAWONGSRI, K.; JOHNSTON, C.; BOWIE, K.; BOWMAN, J.; KNIGHT, R.; NOWAK, B.; ALLEN, E. Microbial ecology of Atlantic salmon (*Salmo salar*) hatcheries: impacts of the built environment on fish mucosal microbiota. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 86, 2020.

MIRZAEI, A.; ESMKHANI, M.; ZALLAGHI, M.; NEZAFAT, Z.; JAVANSHIR, S. Biomedical and environmental applications of carrageenan-based hydrogels: a review. **Journal of Polymers and the Environment**, Cham, v. 31, p. 1679-1705, 2022.

MITELUȚ, A.; POPA, E.; DRAGHICI, M.; POPESCU, P.; POPA, V.; BUJOR, O.; ION, V.; e POPA, M. Latest developments in edible coatings on minimally processed fruits and vegetables: a review. **Foods**, Basel, v. 10, 2021.

MOHAN, D. *et al.* Associations of fish consumption with risk of cardiovascular disease and mortality among individuals with or without vascular disease from 58 countries. **JAMA Internal Medicine**, Chicago, v. 181, n. 5, p. 631-649, 2021.

MOLVERSMYR, E.; DEVLE, H.; NAESS-ANDRESEN, C.; EKEBERG, D. Identification and quantification of lipids in wild and farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*), and salmon feed by GC-MS. **Food Science & Nutrition**, Hoboken, v. 10, p. 3117–3127, 2022.

MOEINI, A.; PEDRAM, P.; FATTAHI, E.; CERRUTI, P.; SANTAGATA, G. Edible polymers and secondary bioactive compounds for food packaging applications: antimicrobial, mechanical, and gas barrier properties. **Polymers**, Basel, v. 14, 2022.

MOHAMED, S.; EL-SAKHAWY, M.; EL-SAKHAWY, M. Polysaccharides, protein and lipid-based natural edible films in food packaging: a review. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 238, 2020.

MOHAMMADALINEJHAD, S.; ALMASI, H.; MORADI, M. Immobilization of Echinum amoenum anthocyanins into bacterial cellulose film: a novel colorimetric pH indicator for freshness/spoilage monitoring of shrimp. **Food Control**, Amsterdam, v. 113, 2020.

MOHIUDDIN, M.; BANIK, U.; IQBAL, M.; CHAMILY, F.; RAHMAN, M.; NAHIDUZZAMAN, M.; WAHAB, M.; RAHMAN, M.; ASADUZZAMAN, M. Influence of cultivation systems and associated environmental factors on the growth performance of *Hypnea musciformis* seaweed at the south-east coast of the Bay of Bengal, Bangladesh. **Aquaculture Reports**, Amsterdam, v. 32, 2023.

MOHSENI-SHAHRI, F.; MEHRZAD, A.; KHOSHBIN, Z.; SARABI-JAMAB, M.; KHANMOHAMADI, F.; VERDIAN, A. Polyphenol-loaded bacterial cellulose nanofiber as a green indicator for fish spoilage. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 224, p. 1174-1182, 2023.

MOLVERSMYR, E.; DEVLE, H.; NAESS-ANDRESEN, C.; EKEBERG, D. Identification and quantification of lipids in wild and farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*), and salmon feed by GC-MS. **Food Science & Nutrition**, Hoboken, v. 10, p. 3117-3127, 2022.

MØRETRØ, T.; MOEN, B.; HEIR, E.; HANSEN, A.Å.; LANGSRUD, S. Contamination of salmon fillets and processing plants with spoilage bacteria. **International Journal of Food Microbiology**, Amsterdam, v. 237, p. 98–108, 2016.

MOULAZADEH, A.; RANJBAR, R.; ARDESTANI, D.; KESHAVARZI, A.; KARIMZADEH, F.; RAHNAVARD, M.; JELIANI, Z.; NAJAFIPOUR, S. Evaluation of phenolic content, antioxidant activity and cytotoxic effects of *Ulva lactuca* and *Hypnea musiformis* marine algae on MDA-MB-468 cell line. **Journal of Advanced Biomedical Sciences**, Iran, 2022.

MOZZON, M.; FOLIGNI, R.; MANNOZZI, C.; VITTORI, S. Assessment of lipid oxidation in fish and fish products processed by cold plasma technologies. **Applied Food Research**, Amsterdam, v. 4, 2024.

MU, H.; LI, L.; YANG, C.; CHEN, S.; YAN, B.; GAO, H.; WEI, C. Effects of dietary fishmeal levels on adenosine triphosphate-related compounds and freshness of raw and cooked muscle in large yellow croaker *Larimichthys crocea*. **Aquaculture Reports**, Amsterdam, v. 26, 2022.

MU, L.; BI, J.; ZHAO, H.; LI, J.; HOU, H.; ZHANG, G.; HAO, H.; ZHOU, L. Intelligent pH-responsive films based on natural blueberry anthocyanins: a non-destructive monitoring system for the freshness of aquatic products with prospective smartphone compatibility. **Food Chemistry: X**, Amsterdam, v. 28, 2025.

MYRONYUK, O. Determination of critical surface tension of wetting of textured water-repellent surfaces. **Technology Audit and Production Reserves**, Ukraine, v. 2, n. 1, p. 10-13, 2023.

MYRONYUK, O.; RAKS, V.; BAKLAN, D.; VASYLIEV, G.; VANAGAS, E.; KURDIL, N.; SIVOLAPOV, P. Water repellent coatings with hierarchal structures obtained on anodized aluminum with femtosecond laser ablation. **Applied Nanoscience**, Cham, v. 12, p. 523–531, 2021.

NANDIYANTO, A.; RAGADHITA, R.; FIANDINI, M. Interpretation of Fourier transform infrared spectra (FTIR): a practical approach in the polymer/plastic thermal decomposition. **Indonesian Journal of Science and Technology**, Indonesia, v. 8, n. 1, 2023.

NAUER, F.; MARCHI, F.; NAVES, M.; PLASTINO, E.; OLIVEIRA, M. A species dilemma: utilizing biological species concept to reconcile DNA barcode and morphological divergences for *Hypnea pseudomusciformis* (Gigartinales, Rhodophyta). **Journal of Applied Phycology**, Dordrecht, v. 34, p. 697-708, 2021.

NAUER, F.; NAVES, M.; PLASTINO, E.; OLIVEIRA, M.; FUJII, M. Ecotypes of *Hypnea pseudomusciformis* (Cystocloniaceae, Rhodophyta) revealed by physiological, morphological, and molecular data. **Journal of Applied Phycology**, Dordrecht, v. 32, p. 4399-4409, 2020.

NAUER, F.; OLIVEIRA, M.; PLASTINO, E.; YOKOYA, N.; FUJII, M. Thermal tolerance of *Hypnea pseudomusciformis* ecotypes (Cystocloniaceae, Rhodophyta) related to different floristic provinces along the Brazilian coast. **Phycological Research**, Hoboken, v. 70, 2022.

NARVARTE, B.; MENDOZA, E.; GACURA, J.; HINALOC, L.; ROLEDA, M. Diel variations in nutrient physiology among commercially important eucaumatoids *Kappaphycus alvarezii*, *K. striatus* and *Eucauma denticulatum*. **Planta**, Berlin, v. 261, n. 5, p. 96, 2025.

NAVARRETE, P.; ESPEJO, R. T.; ROMERO, J. Molecular analysis of microbiota along the digestive tract of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). **Microbial Ecology**, New York, v. 57, p. 550–561, 2009.

NDAWALA, M.; MSUYA, F.; CABARUBIAS, J.; KAMBEY, C.; BURIYO, A.; MVUNGI, E.; COTTIER-COOK, E. Effect of biosecurity practices and diseases on growth and carrageenan properties of *Kappaphycus alvarezii* and *Eucauma denticulatum* cultivated in Zanzibar, Tanzania. **Journal of Applied Phycology**, Dordrecht, 2022.

NEHRA, A.; BISWAS, D.; SIRACUSA, V.; e ROY, S. Natural gum-based functional bioactive films and coatings: a review. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 24, 2022.

NEORI, A.; BRONFMAN, Y.; VAN RIJN, J.; GUTTMAN, L.; KRUPNIK, N.; SHPIGEL, M.; SAMOCHA, T.; DAVIS, D.; QIU, X.; ABELIN, P.; ISRAEL, Á. The suitability of *Ulva fasciata*, *Ulva compressa*, and *Hypnea musciformis* for production in an outdoor spray cultivation system, with respect to biomass yield and protein content. **Journal of Applied Phycology**, Dordrecht, v. 32, p. 3183-3197, 2020.

NIE, P.; HALLERMAN, E. Advancing the sustainability of aquaculture. **Reviews in Aquaculture**, Hoboken, v. 13, n. 2, p. 781-782, 2021.

NIE, X.; ZHANG, R.; CHENG, L.; ZHU, W.; LI, S.; CHEN, X. Mechanisms underlying the deterioration of fish quality after harvest and methods of preservation. **Food Control**, Amsterdam, v. 135, 2022.

NIKRAVAN, L.; ZAMANPOUR, S.; HASHEMI, M.; MARASHI, S.; NOORI, S. Application of nanotechnology to develop carrageenan-based films and coatings as carriers for essential oils. **Current Pharmaceutical Biotechnology**, Sharjah, 2024.

NOVOA, D.; RODRÍGUEZ, J.; MARTINEZ, I.; ROZO-TORRES, G. Emulsifying potential of *Hypnea musciformis* carrageenan: a natural alternative for oil-in-water emulsions. **Vitae**, Medellín, v. 32, n. 2, 2025.

NURANI, W.; ANWAR, Y.; BATUBARA, I.; ARUNG, E.; FATRIASARI, W. *Eucheuma cottonii* as a renewable source of kappa-carrageenan and other cosmetic ingredients. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, p. 129458, 2024.

NURDIANI, R.; NINGSIH, O.; FAUZI, A.; YASMIN, P.; PUSPITASARI, D.; ASTUTI, R.; KUSUMA, B. Antioxidant and antibacterial activities of patin fish skin gelatin edible coating with carrageenan and red ginger essential oil. **Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada**, Indonesia, v. 27, n. 1, 2025.

OMWANGE, K.; SAITO, Y.; ZICHEN, H.; KHALIDUZZAMAN, A.; KURAMOTO, M.; OGAWA, Y.; KONDO, N.; SUZUKI, T. Evaluating Japanese dace (*Tribolodon hakonensis*) fish freshness during storage using multispectral images from visible and UV excited fluorescence. **LWT - Food Science and Technology**, Amsterdam, v. 151, 2021.

OMWANGE, K.; RIZA, D.; SEN, N.; SHIIGI, T.; KURAMOTO, M.; OGAWA, Y.; KONDO, N.; SUZUKI, T. Fish freshness monitoring using UV-fluorescence imaging on Japanese dace (*Tribolodon hakonensis*) fisheye. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 287, 2020.

ORTIZ-TAFOYA, M.; TECANTE, A. Physicochemical characterization of sodium stearyl lactylate (SSL), polyoxyethylene sorbitan monolaurate (Tween 20) and ι-carrageenan. **Data in Brief**, Amsterdam, v. 19, p. 642-650, 2018.

OVELAND, E.; BØKEVOLL, A.; ARAUJO, P.; HEMRE, G. Frozen storage procedures for salmon and plaice samples: Nutrient composition and implications for preservation. **Journal of Food Science**, Hoboken, v. 89, p. 4660-4670, 2024.

PALANI, K.; BALASUBRAMANIAN, B.; MALAISAMY, A.; MALUVENTHEN, V.; ARUMUGAM, V.; AL-DHABI, N.; ARASU, V.; PUSHPARAJ, K.; LIU, W.; ARUMUGAM, M. Sulfated polysaccharides derived from *Hypnea valentiae* and their potential of antioxidant, antimicrobial, and anticoagulant activities with in silico docking. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine**, London, 2022.

PAN, Z.; LI, L.; SHEN, Z.; CHEN, Y.; LI, M. Effects of tea polyphenol treatments on the quality and microbiota of crisp grass carp fillets during storage at 4 °C. **Applied Sciences**, Basel, v. 11, n. 10, 2021.

PANAGIOTAKOS, D.; KOUVARI, M. Fish and cardiovascular disease prevention: time for a closer collaboration between basic science and clinical research. **Cardiovascular Research**, Oxford, v. 117, p. 94-96, 2021.

PEDRÓS-GARRIDO, S.; CONDÓN-ABANTO, S.; CLEMENTE, I.; BELTRÁN, J. A.; LYNG, J. G.; BOLTON, D.; BRUNTON, N.; WHYTE, P. Efficacy of ultraviolet light (UV-C) and pulsed light (PL) for the microbiological decontamination of raw salmon (*Salmo salar*) and food contact surface materials. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, Amsterdam, v. 50, p. 124-131, 2018.

PEREIRA, S.; KIMPARA, J.; VALENTI, W. A bioeconomic analysis of the potential of seaweed *Hypnea pseudomusciformis* farming to different targeted markets. **Aquaculture Economics & Management**, London, v. 24, p. 507-525, 2020a.

PEREIRA, S.; KIMPARA, J.; VALENTI, W. A simple substrate to produce the tropical epiphytic algae *Hypnea pseudomusciformis*. **Aquacultural Engineering**, Amsterdam, v. 89, 2020b.

PEREIRA, S.; KIMPARA, J.; VALENTI, W. Sustainability of the seaweed *Hypnea pseudomusciformis* farming in the tropical Southwestern Atlantic. **Ecological Indicators**, Amsterdam, 2020c.

PEREZ-VAZQUEZ, A.; BARCIELA, P.; CARPENA, M.; PRIETO, M. Edible coatings as a natural packaging system to improve fruit and vegetable shelf life and quality. **Foods**, Basel, v. 12, 2023.

PETERSEN, M.; YU, Z.; LU, X. Application of Raman spectroscopic methods in food safety: a review. **Biosensors**, Basel, v. 11, 2021.

PHAM, T.; NGUYEN, L.; DAM, M.; BARANYAI, L. Application of edible coating in extension of fruit shelf life: review. **AgriEngineering**, Basel, v. 5, p. 520-536, 2023.

PIETSCH, C.; MÜLLER, G.; MOURABIT, S.; CARNAL, S.; e BANDARA, K. Occurrence of fungi and fungal toxins in fish feed during storage. **Toxins**, Basel, v. 12, 2020.

PILLAI, A.; EAPEN, A.; ZHANG, W.; ROY, S. Polysaccharide-based edible biopolymer-based coatings for fruit preservation: a review. **Foods**, Basel, v. 13, 2024.

PRABHAKAR, P. K.; SRIVASTAV, P. P.; PATHAK, S. S.; DAS, K. Mathematical modeling of total volatile basic nitrogen and microbial biomass in stored rohu (*Labeo rohita*) fish. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lausanne, v. 5, 2021.

PRABHAKAR, P.; VATSA, S.; SRIVASTAV, P.; PATHAK, S. A comprehensive review on freshness of fish and assessment: analytical methods and recent innovations. **Food Research International**, Amsterdam, v. 133, p. 109157, 2020.

PRAKASH, P.; SWAPNIL, N.; SHEIKH, S.; TEKAM, I.; BHALCHANDRA, N.; MADHAV, G.; MUNILKUMAR, S. Nutritional significance of fish in combating malnutrition. **International Journal of Environment and Climate Change**, India, v. 13, n. 11, p. 249-258, 2023.

PRIYA, K.; THIRUNAVOOKARASU, N.; CHIDANAND, D. Recent advances in edible coating of food products and its legislations: A review. **Journal of Agriculture and Food Research**, Amsterdam, 2023.

PUSCASELU, R.; BEŞLIU, I.; GUTT, G. Edible biopolymers-based materials for food applications—The eco alternative to conventional synthetic packaging. **Polymers**, Basel, v. 13, 2021.

QIAN, Y.; YU, J.; YU, Y.; XIE, J.; YANG, S. Effects of immersing treatment of curcumin and piperine combined with vacuum packaging on the quality of salmon (*Salmo salar*) during cold chain logistics. **Frontiers in Nutrition**, Lausanne, v. 9, 2022.

QI, M.; YAN, H.; ZHANG, Y.; YUAN, Y. Impact of high voltage prick electrostatic field (HVPEF) processing on the quality of ready-to-eat fresh salmon (*Salmo salar*) fillets during storage. **Food Control**, Amsterdam, v. 137, 2022.

RADOOR, S.; KANDEL, D.; PARK, K.; JAYAKUMAR, A.; KARAYIL, J.; LEE, J. Low-cost and eco-friendly PVA/carrageenan membrane to efficiently remove cationic dyes from water: Isotherms, kinetics, thermodynamics, and regeneration study. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 350, 2023.

RAHMAWATI, I.; LIVIAWATY, E.; PRATAMA, R. I.; JUNIANTO. Carrageenan in Seaweed (*Eucheuma* sp.) and Use of Carrageenan in Fishery Food Products: A Review. **Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research**, India, v. 23, n. 6, p. 1-10, 2023.

RAJAMANI, R.; KHORA, S. Studies on in vitro antioxidant potentials and characterization of κ -carrageenan based biodegradable film from red algae, *Hypnea valentiae* (Turner) Montagne, 1841. **Journal of Food Science and Technology**, New York, 2024.

RAMADAS, B.; RHIM, J.; ROY, S. Recent progress of carrageenan-based composite films in active and intelligent food packaging applications. **Polymers**, Basel, v. 16, 2024.

RASHID, A.; QAYUM, A.; BACHA, S.; LIANG, Q.; LIU, Y.; KANG, L.; CHI, Z.; CHI, R.; HAN, X.; EKUMAH, J.; VIRK, M.; REN, X.; MA, H. Novel Pullulan-Sodium Alginate Film Incorporated with Anthocyanin-loaded Casein-carboxy methyl cellulose Nanocomplex for Real-time Fish and Shrimp Freshness Monitoring. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 156, 2024.

RATHOD, N.; RANVEER, R.; BENJAKUL, S.; KIM, S.; PAGARKAR, A.; PATANGE, S.; OZOGUL, F. Recent developments of natural antimicrobials and antioxidants on fish and fishery food products. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Hoboken, v. 20, n. 4, p. 4182-210, 2021.

REDA, R.; EL-MURR, A.; ABDEL-BASSET, N.; METWALLY, M.; IBRAHIM, R. Infection dynamics of *Shewanella* spp. in Nile tilapia under varied water temperatures: a hematological, biochemical, antioxidant-immune analysis, and histopathological alterations. **Fish & Shellfish Immunology**, Amsterdam, v. 149, 2024.

- REKSTEN, A.; HO, Q.; NØSTBAKKEN, O.; MARKHUS, M.; KJELLEVOLD, M.; BØKEVOLL, A.; HANNISDAL, R.; FRØYLAND, L.; MADSEN, L.; DAHL, L. Temporal variations in the nutrient content of Norwegian farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*), 2005–2020. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 373, 2021.
- REN, M.; WANG, N.; LU, Y.; WANG, C. Preparation and characterization of antioxidative and pH-sensitive films based on κ -carrageenan/carboxymethyl cellulose blended with purple cabbage anthocyanin for monitoring hairtail freshness. **Foods**, Basel, v. 14, n. 4, 2025.
- RIBEIRO, A.; ESTEVINHO, B.; ROCHA, F. Preparation and Incorporation of Functional Ingredients in Edible Films and Coatings. **Food and Bioprocess Technology**, New York, v. 14, p. 209-231, 2020.
- RIBEIRO, C.; VICENTE, A.; TEIXEIRA, J.; MIRANDA, C. Optimization of edible coating composition to retard strawberry fruit senescence. **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v. 44, p. 63–70, 2007.
- RIZWAN, S.; SALEEM, M.; HASSAN, H.; RAZA, M.; KANWAL, R.; KABIR, M.; GHAFFAR, R.; FADLADDIN, Y.; RAFIQ, N.; MATIN, A.; KHAN, A.; GULAHMADOV, S.; ARAI, T. Biomedical properties, characterization of seaweeds species and antimicrobial activity. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 84, 2024.
- RODRIGUES, J. A. G.; ARAÚJO, I. W. F.; PAULA, G. A.; LIMA, T. B.; BESSA, E. F.; BENEVIDES, N. M. B. Carragenana da epífita *Hypnea musciformes* obtida do cultivo experimental de *Solieria filiformis* em Flecheiras, Estado do Ceará, Brasil. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 137-144, 2011.
- RODRÍGUEZ-CANTO, W.; CERQUEIRA, M.; CHEL-GUERRERO, L.; PASTRANA, L.; AGUILAR-VEGA, M. *Delonix regia* galactomannan-based edible films: Effect of molecular weight and κ -carrageenan on physicochemical properties. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 103, 2020.
- ROUT, S.; PRADHAN, K. A review on antimicrobial nano-based edible packaging: Sustainable applications and emerging trends in the food industry. **Food Control**, Amsterdam, 2024.
- ROY, D.; ROY, K.; TOMČALA, A.; MATOUŠEK, J.; MRÁZ, J.; STEJSKAL, V. Fatty acid and energy (ATP-related compounds) metabolism of Eurasian perch (*Perca fluviatilis*) sperm: Endogenous metabolic strategy. **Aquaculture**, Amsterdam, v. 579, 2023.
- RUDKE, A.; DA SILVA, M.; DE ANDRADE, C.; VITALI, L.; FERREIRA, S. Green extraction of phenolic compounds and carrageenan from the red alga *Kappaphycus alvarezii*. **Algal Research**, Amsterdam, v. 67, 2022.
- RUDKE, A.; ZANELLA, E.; STAMBUK, B.; DE ANDRADE, C.; FERREIRA, S. Deconstruction of *Kappaphycus alvarezii* biomass by pressurized solvents to increase the carrageenan purity. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, v. 155, 2024.

- RUPERT, R.; RODRIGUES, K.; THIEN, V.; YONG, W. Carrageenan from *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae): metabolism, structure, production, and application. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 13, 2022.
- RYDER, J. M. Determination of adenosine triphosphate and its breakdown products in fish muscle by high-performance liquid chromatography. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 33, p. 678–680, 1985.
- SABER, H.; RUSHDI, M.; SABER, A.; ABDELMOHSEN, U.; PEREIRA, L. Evaluation of the genus *Hypnea* phytochemical and pharmacological potential. **Algal Research**, Amsterdam, v. 81, 2024.
- SÁEZ, M.; SABIO, J.; GALAFAT, A.; VIZCAÍNO, A.; ALARCÓN-LÓPEZ, F.; MOYA, T. Evaluation of white grape marc extract as an additive to extend the shelf-life of fish fillets. **Foods**, Basel, v. 14, 2025.
- SAITO, T.; ARAI, K.; MATSUYA, M. A new method for estimating the freshness of fish. **Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries**, Tokyo, v. 24, p. 749, 1959.
- SAJIB, M.; LANGELAND, M.; UNDELAND, I. Effect of antioxidants on lipid oxidation in herring (*Clupea harengus*) co-product silage during its production, heat-treatment and storage. **Scientific Reports**, London, v. 12, 2022.
- SAJIB, M.; WU, H.; FRISTEDT, R.; UNDELAND, I. Hemoglobin-mediated lipid oxidation of herring filleting co-products during ensilaging and its inhibition by pre-incubation in antioxidant solutions. **Scientific Reports**, London, v. 11, 2021.
- SALEHI, F. Edible coating of fruits and vegetables using natural gums: a review. **International Journal of Fruit Science**, London, v. 20, n. sup. 2, p. S570–S589, 2020.
- SANTOS, C.; RAMOS, A.; LUÍS, Â.; AMARAL, M. E. Production and characterization of k-carrageenan films incorporating *Cymbopogon winterianus* essential oil as new food packaging materials. **Foods**, Basel, v. 12, 2023.
- SAPNA; SHARMA, C.; PATHAK, P.; YADAV, S. P.; GAUTAM, S. Potential of emerging “all-natural” edible coatings to prevent post-harvest losses of vegetables and fruits for sustainable agriculture. **Progress in Organic Coatings**, Amsterdam, v. 193, 2024.
- SASAKI, N.; JONES, L.; CARPENTER, D. Fish consumption and omega-3 polyunsaturated fatty acids from diet are positively associated with cognitive function in older adults even in the presence of exposure to lead, cadmium, selenium, and methylmercury: a cross-sectional study using NHANES 2011–2014 data. **The American Journal of Clinical Nutrition**, Lausanne, v. 119, p. 283–293, 2024.
- SASIKALA, M.; MOHAN, S.; SWARNAKUMARI, S. Highlights of spectroscopic analysis – a review. **International Journal of Pharma and Bio Sciences**, India, v. 11, n. 2, p. 136–145, 2021.

SELE, V.; ØRNSRUD, R.; SLOTH, J.; BERNTSSEN, M.; AMLUND, H. Selenium and selenium species in feeds and muscle tissue of Atlantic salmon. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, Amsterdam, v. 47, p. 124-133, 2018.

SETO, KATHERINE; FIORELLA, KATHRYN J. From Sea to Plate: The Role of Fish in a Sustainable Diet. **Frontiers in Marine Science**, Lausanne, v. 4, 2017.

SHAVISI, N. Electrospun fiber mats based on chitosan-carrageenan containing *Malva sylvestris* anthocyanins: Physic-mechanical, thermal, and barrier properties along with application as intelligent food packaging materials. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 266, 2024.

SHARMA, S.; NAKANO, K.; KUMAR, S.; KATIYAR, V. Edible packaging to prolong postharvest shelf-life of fruits and vegetables: a review. **Food Chemistry Advances**, Amsterdam, v. 4, 2024.

SHEIKHA, A.; ALLAM, A.; OZ, E.; KHAN, M.; PROESTOS, C.; OZ, F. Edible xanthan/propolis coating and its effect on physicochemical, microbial, and sensory quality indices in mackerel tuna (*Euthynnus affinis*) fillets during chilled storage. **Gels**, Basel, v. 8, art. 405, 2022.

SHI, C.; JI, Z.; ZHANG, J.; JIA, Z.; YANG, X. Preparation and characterization of intelligent packaging film for visual inspection of tilapia fillets freshness using cyanidin and bacterial cellulose. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 205, p. 357-365, 2022.

SHI, C.; ZHANG, J.; JIA, Z.; YANG, X.; ZHOU, Z. Intelligent pH indicator films containing anthocyanins extracted from blueberry peel for monitoring tilapia fillet freshness. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 101, n. 5, 2021.

SIDDIQUE, I. Exploring functional groups and molecular structures: a comprehensive analysis using FTIR spectroscopy. **Ssrn Electronic Journal**, Amsterdam, v. 9, n. 2, p. 70-76, 2024.

SILVA, J. M. L.; SILVA, E. M. C.; MATOS, J. A.; ALCÂNTARA, L. O.; SOUZA, B. W. S. The wettability of carrageenan-based edible coatings on chicken breasts. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, 2024.

SILVA, S.; TEIXEIRA, J.; SILVA, C. Recent advances in the use of edible films and coatings with probiotic and bacteriocin-producing lactic acid bacteria. **Food Bioscience**, Amsterdam, v. 56, 2023.

SIMONA, J.; DANI, D.; PETR, S.; MARCELA, N.; JAKUB, T.; BOHUSLAVA, T. Edible films from carrageenan/orange essential oil/trehalose—structure, optical properties, and antimicrobial activity. **Polymers**, Basel, v. 13, 2021.

SIREGAR, E.; SILALAH, J.; SURYANTO, D. Application of partial hydrolysis of virgin coconut oil (VCO) on carrageenan-based edible coating as *Sphyraena barracuda* fishball preservative during room storage. **Journal of Food and Pharmaceutical Sciences**, Indonesia, 2021.

SOARES, N.; SILVA, P.; BARBOSA, C.; PINHEIRO, R.; VICENTE, A. Comparing the effects of glazing and chitosan-based coating applied on frozen salmon on its organoleptic and physicochemical characteristics over six-months storage. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 194, p. 79-86, 2017.

SOTO-DÁVILA, M.; VALDERRAMA, K.; INKPEN, S.; HALL, J.; RISE, M.; SANTANDER, J. Effects of vitamin D2 (ergocalciferol) and D3 (cholecalciferol) on Atlantic salmon (*Salmo salar*) primary macrophage immune response to *Aeromonas salmonicida* subsp. *salmonicida* infection. **Frontiers in Immunology**, Lausanne, v. 10, 2020.

SOUZA, B. W. S.; CERQUEIRA, M. A.; RUIZ, H. A.; MARTINS, J. T.; CASARIEGO, A.; TEIXEIRA, J. A.; VICENTE, A. A. Effect of chitosan-based coatings on the shelf life of salmon (*Salmo salar*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 58, n. 21, p. 11456–11462, 2010.

SPRAGUE, M.; FAWCETT, S.; BETANCOR, M.; STRUTHERS, W.; TOCHER, D. Variation in the nutritional composition of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fillets with emphasis on EPA and DHA contents. **Journal of Food Composition and Analysis**, Amsterdam, v. 94, 2020.

STEINSHOLM, S.; OTERHALS, Å.; UNDERHAUG, J.; ASPEVIK, T. Emulsion and surface-active properties of fish solubles based on direct extraction and after hydrolysis of Atlantic cod and Atlantic salmon backbones. **Foods**, Basel, v. 10, 2020.

SUÁREZ-MEDINA, M. D.; SÁEZ-CASADO, M. I.; MARTÍNEZ-MOYA, T.; RINCÓN-CERVERA, M. Á. The effect of low temperature storage on the lipid quality of fish, either alone or combined with alternative preservation technologies. **Foods**, Basel, v. 13, n. 7, 2024.

SUBANDO, T.; PRANOTO, Y.; WITASARI, L. Optimization and characterization of arrowroot porous starch using thermostable α -amylase by response surface methodology. **Research Square**, Durham, 2023.

SUHAG, R.; KUMAR, N.; PETKOSKA, A.; UPADHYAY, A. Film formation and deposition methods of edible coating on food products: A review. **Food Research International**, Amsterdam, v. 136, 2020.

SUPRIWANTI, S.; WARSIDAH, W.; PRAYITNO, D. Characterization of seaweed caragenan *Eucheuma cottonii* and its application as edible coating. **Berkala Sainstek**, Indonesia, v. 11, n. 2, p. 114-120, 2023.

SUTER, F.; ZINELIS, S.; PATCAS, R.; SCHÄTZLE, M.; ELIADES, G.; ELIADES, T. Roughness and wettability of aligner materials. **Journal of Orthodontics**, London, v. 47, p. 223-231, 2020.

SYROPOULOU, F.; PARLAPANI, F. F.; KAKASIS, S.; NYCHAS, G.-J. E.; BOZIARIS, I. S. Primary processing and storage affect the dominant microbiota of fresh and chill-stored sea bass products. **Foods**, Basel, v. 10, n. 3, Art. 671, 2021.

SYROPOULOU, F.; ANAGNOSTOPOULOS, D. A.; PARLAPANI, F. F.; KARAMANI, E.; STAMATIOU, A.; TZOKAS, K.; NYCHAS, G.-J. E.; BOZIARIS, I. S. Microbiota Succession of Whole and Filleted European Sea Bass (*Dicentrarchus labrax*) during Storage under Aerobic and MAP Conditions via 16S rRNA Gene High-Throughput Sequencing Approach. **Microorganisms**, Basel, v. 10, n. 9, Art. 1870, 2022.

TAHILUDDIN, A.; DAMSIK, S. Prevalence of Ice-Ice Disease in *Kappaphycus* spp. and *Eucheuma denticulatum* Farms in Sibutu, Tawi-Tawi, Philippines. **Aquaculture Studies**, Ankara, v. 23, n. 5, 2023.

TAVAKOLI, S.; MUBANGO, E.; TIAN, L.; NDRI, Y.; TAN, Y.; HONG, H.; LUO, Y. Novel intelligent films containing anthocyanin and phycocyanin for nondestructively tracing fish spoilage. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 402, p. 134203, 2022.

TAVARES, J.; MARTINS, A.; FIDALGO, L. G.; LIMA, V.; AMARAL, R. A.; PINTO, C. A.; SILVA, A. M.; SARAIVA, J. A. Fresh fish degradation and advances in preservation using physical emerging technologies. **Foods**, Basel, v. 10, n. 4, Art. 780, 2021.

TAVASSOLI-KAFRANI, E.; SHEKARCHIZADEH, H.; MASOUDPOUR-BEHABADI, M. Development of edible films and coatings from alginates and carrageenans. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdam, v. 137, p. 360-374, 2016.

THAKUR, R.; SABERI, B.; PRISTIJONO, P.; GOLDING, J.; STATHOPOULOS, C.; SCARLETT, C.; BOWYER, M.; VUONG, Q. Characterization of rice starch- ι -carrageenan biodegradable edible film. Effect of stearic acid on the film properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 93, p. 952-960, 2016.

TIBBETTS, S.; PATELAKIS, S. Apparent digestibility coefficients (ADCs) of intact-cell marine microalgae meal (*Pavlova* sp. 459) for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). **Aquaculture**, Amsterdam, v. 546, 2022.

TIBBETTS, S.; PIERCEY, M.; PATELAKIS, S.; STRATTON, B. Single-cell protein (SCP) meals from *Methylovorus mentalis* as feed ingredients for freshwater Atlantic salmon (*Salmo salar* L.): Digestibility, growth performance, nutrient utilization, and fish health. **Aquaculture**, Amsterdam, v. 598, 2024.

TILAMI, S.; SAMPELS, S. Nutritional value of fish: lipids, proteins, vitamins, and minerals. **Reviews in Fisheries Science & Aquaculture**, London, v. 26, p. 243-253, 2018.

TIRONI, V.; TOMÁS, M.; AÑÓN, M. Lipid and protein deterioration during the chilled storage of minced sea salmon (*Pseudoperca semifasciata*). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 87, p. 2239–2246, 2007.

TSAFACK, P.; TSOPMO, A. Effects of bioactive molecules on the concentration of biogenic amines in foods and biological systems. **Heliyon**, Amsterdam, v. 8, art. e10456, 2022.

TSIRONI, T.; STOFOROS, N.; TAOUKIS, P. Quality and shelf-life modeling of frozen fish at constant and variable temperature conditions. **Foods**, Basel, v. 9, 2020.

UDAYAKUMAR, S.; GIRIGOSWAMI, A.; GIRIGOSWAMI, K. Biological activities of carrageenan from red algae: a mini review. **Current Pharmacology Reports**, Cham, v. 10, p. 12-26, 2024.

UDO, T.; MUMMALETI, G.; MOHAN, A.; SINGH, R.; KONG, F. Current and emerging applications of carrageenan in the food industry. **Food Research International**, Amsterdam, v. 173, pt. 2, 2023.

UMARAW, P.; MUNEKATA, P.; VERMA, A.; BARBA, F.; SINGH, V.; KUMAR, P.; LORENZO, J. Edible films/coating with tailored properties for active packaging of meat, fish and derived products. **Trends in Food Science and Technology**, Amsterdam, v. 98, p. 10-24, 2020.

VALENCIA, P.; VALDIVIA, S.; NUÑEZ, S.; OVISSIPOUR, R.; PINTO, M.; RAMÍREZ, C.; PÉREZ, A.; RUZ, M.; GARCÍA, P.; JIMÉNEZ, P.; ALMONACID, S. Assessing the enzymatic hydrolysis of salmon frame proteins through different by-product/water ratios and pH regimes. **Foods**, Basel, v. 10, 2021.

VANDANJON, L.; BURLOT, A.; ZAMANILEHA, E.; DOUZENEL, P.; RAVELONANDRO, P.; BOURGOUGNON, N.; BEDOUX, G. The use of FTIR spectroscopy as a tool for the seasonal variation analysis and for the quality control of polysaccharides from seaweeds. **Marine Drugs**, Basel, v. 21, 2023.

VASCONCELOS, H.; COELHO, L.; MATIAS, A.; SARAIVA, C.; JORGE, P.; DE ALMEIDA, J. Biosensors for biogenic amines: a review. **Biosensors**, Basel, v. 11, art. 82, 2021.

VÁZQUEZ-DELFIN, E.; ROBLEDO, D.; VÁSQUEZ-ELIZONDO, R.; FREILE-PELEGRÍN, Y. Seasonal variation in the biomass, reproduction and biochemical composition of *Hypnea musciformis* (*Cystocloniaceae*, *Rhodophyta*) from Playa Xcalacoco, Quintana Roo, Mexico. **Aquatic Botany**, Amsterdam, v. 184, 2023.

VERDEGEM, M.; BUSCHMANN, A.; LATT, U.; DALSGAARD, A.; LOVATELLI, A. The contribution of aquaculture systems to global aquaculture production. **Journal of the World Aquaculture Society**, Hoboken, 2023.

VYNCKE, W. Direct Determination of the Thiobarbituric Acid Value in Trichloroacetic Acid Extracts of Fish as a Measure of Oxidative Rancidity. **Fette, Seifen, Anstrichmittel**, Berlin, v. 72, n. 12, p. 1084-1087, 1970.

VOLPE, M.; COCCIA, E.; SIANO, F.; DI STASIO, M.; PAOLUCCI, M. Rapid evaluation methods for quality of trout (*Oncorhynchus mykiss*) fresh fillet preserved in an active edible coating. **Foods**, Basel, v. 8, 2019.

WACHIRATTANAPONGMETEE, K.; KATEKAEW, S.; WEERAPREEYAKUL, N.; THAWORNCHINSOMBUT, S. Differentiation of protein types extracted from tilapia byproducts by FTIR spectroscopy combined with chemometric analysis and their antioxidant protein hydrolysates. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 437, 2023.

WALAA, M.; SHEREEN, A.; MOHAMED, N. Quality evaluation of Nile tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) fillets by using chitosan and nanochitosan coating during refrigerated storage. **World's Veterinary Journal**, Tehran, v. 10, n. 2, p. 237-245, 2020.

WANG, K.; LI, Z.; LI, J.; LIN, H. Raman spectroscopic techniques for nondestructive analysis of agri-foods: a state-of-the-art review. **Trends in Food Science & Technology**, Amsterdam, v. 118, pt. A, p. 490-504, 2021.

WANG, S.; XIANG, W.; FAN, H.; XIE, J.; QIAN, Y. Study on the mobility of water and its correlation with the spoilage process of salmon (*Salmo salar*) stored at 0 and 4 °C by low-field nuclear magnetic resonance (LF NMR ¹H). **Journal of Food Science and Technology**, New York, v. 55, p. 173-182, 2017.

WANG, X.; GUO, C.; GUO, H. Progress of carrageenan-based films and coatings for food packaging applications. **Packaging Technology and Science**, Chichester, v. 37, n. 6, p. 533-550, 2024.

WANG, Y.; LI, F.; WANG, X.; MA, C. Integrating hypoxanthine and K value for reliable and rapid freshness assessment in marine fish. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 470, 2025.

WANG, Z.; LIN, Y.; LU, X.; AFRIN, F.; TIAN, Y.; HIRAI, T.; TAKAKI, K.; YUAN, C. Postharvest quality evaluation of masu salmon (*Oncorhynchus masou*) during ice storage by spinal cord and bleeding. **Journal of Food Composition and Analysis**, Amsterdam, v. 135, 2024.

WEI, M.; PARRISH, C.; GUERRA, N.; TIBBETTS, S.; COLOMBO, S. Dietary inclusion of a marine microalgae meal for Atlantic salmon (*Salmo salar*): Impact of *Pavlova sp.* 459 on growth performance and tissue lipid composition. **Aquaculture**, Amsterdam, v. 553, 2022.

WEI, M.; SHAN, M.; ZHANG, L.; CHEN, N.; TIE, H.; XIAO, Y.; LI, Z. Preparation of gelatin/ κ -carrageenan active films through procyanidins crosslinking: Physicochemical, structural, antioxidant and controlled release properties. **Food Hydrocolloids**, Amsterdam, 2024.

WIBOWO, C.; SALSABILA, S.; MUNA, A.; RUSLIMAN, D.; WASISTO, H. Advanced biopolymer-based edible coating technologies for food preservation and packaging. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Hoboken, v. 23, n. 1, p. 1-31, 2023.

WU, H.; FORGHANI, B.; ABDOLLAHI, M.; UNDELAND, I. Lipid oxidation in sorted herring (*Clupea harengus*) filleting co-products from two seasons and its relationship to composition. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 373, 2021.

WU, H.; GHIRMAI, S.; UNDELAND, I. Stabilization of herring (*Clupea harengus*) by-products against lipid oxidation by rinsing and incubation with antioxidant solutions. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 316, 2020.

WU, P.; FU, Y.; XU, J.; GAO, X.; FU, X.; WANG, L. The preparation of edible water-soluble films comprising κ -carrageenan/carboxymethyl starch/gum ghatti and their

application in instant coffee powder packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 277, 2024.

XIONG, Y.; KAMBOJ, M.; AJLOUNI, S.; FANG, Z. Incorporation of salmon bone gelatine with chitosan, gallic acid and clove oil as edible coating for the cold storage of fresh salmon fillet. **Food Control**, Amsterdam, v. 125, 2021.

XUAN, G.; GUO, M.; LIN, H.; SUI, J.; WANG, J. Study on volatile chemicals as spoilage indexes of salmon by HS-SPME-GC-MS technique during non-frozen storage. **Molecules**, Basel, v. 28, n. 13, 2022.

XU, J.; RICCIOLI, C.; SUN, D. Application of near-infrared hyperspectral imaging for assessment of oxidative degradation in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets during cold storage. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEAR INFRARED SPECTROSCOPY, 17., 2015, Foz do Iguauçu, Brasil. Anais... Foz do Iguauçu: **International Council for Near Infrared Spectroscopy**, 2015.

XU, Z. L.; ZHAO, X.; YANG, W. H.; MEI, J.; XIE, J. Effect of magnetic nano-particles combined with multi-frequency ultrasound-assisted thawing on the quality and myofibrillar protein-related properties of salmon (*Salmo salar*). **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 445, 2024.

XUE, T.; JIANG, Q.; XIANG, L.; XIAO, J.; FAN, D.; WANG, M.; ZHAO, Y. Effect of chemical modification of κ -carrageenan on its inhibitory effect against heterocyclic amine (HAs) formation in roasted tilapia fish patties. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 253, 2023.

YAASHIKAA, P.; KAMALESH, R.; KUMAR, S.; SARAVANAN, A.; VIJAYASRI, K.; RANGASAMY, G. Recent advances in edible coatings and their application in food packaging. **Food Research International**, Amsterdam, v. 173, 2023.

YAN, J.; CUI, R.; QIN, Y.; LI, L.; YUAN, M. A pH indicator film based on chitosan and butterfly pudding extract for monitoring fish freshness. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 177, p. 328-336, 2021.

YANG, X.; LAN, W.; SUN, X. Effect of chlorogenic acid grafted chitosan on microbiological compositions of sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fillets: dominant spoilage bacteria, inhibition activity and membrane damage mechanisms. **International Journal of Food Microbiology**, Amsterdam, v. 411, 2023.

YAZDANI, N.; YEGANEH, S.; KHARYEKI, M.; NAGHDI, S. Chitosan-coated rainbow trout fillets with *Chlorella vulgaris* hydrolysate: shelf-life extension under refrigeration. **Food Science & Nutrition**, Hoboken, v. 13, 2025.

YI, Z.; XIE, J. Assessment of spoilage potential and amino acids deamination & decarboxylation activities of *Shewanella putrefaciens* in bigeye tuna (*Thunnus obesus*). **LWT – Food Science and Technology**, Amsterdam, v. 156, 2022.

YIN, X.; WANG, H.; LU, W.; GE, L.; CUI, Y.; ZHAO, Q.; LIANG, J.; SHEN, Q.; LIU, A.; XUE, J. Evaluation of lipid oxidation characteristics in salmon after simulation of cold chain

interruption using rapid evaporation ionization mass spectrometry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 72, n. 2, p. 1391–1404, 2024.

YOKOYA, N.; NAUER, F.; OLIVEIRA, M. Concise review of the genus *Hypnea* J.V. Lamouroux, 1813. **Journal of Applied Phycology**, Dordrecht, v. 32, p. 3585-3603, 2020.

YOU, S.; ZHANG, X.; WANG, Y.; JIN, Y.; WEI, M.; WANG, X. Development of highly stable color indicator films based on κ -carrageenan, silver nanoparticle and red grape skin anthocyanin for marine fish freshness assessment. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 216, p. 655-669, 2022.

ZAMANILEHA, E.; BURLOT, A.; LATIRE, T.; MARTY, C.; DOUZENEL, P.; VANDANJON, L.; BOURGOUGNON, N.; RAVELONANDRO, P.; BEDOUX, G. Biochemical composition and seasonal variations of the Madagascar algae *Eucheuma denticulatum* (Solieriaceae, Rhodophyta). **Marine Drugs**, Basel, v. 23, 2025.

ZENG, P.; CHEN, X.; QIN, Y.; ZHANG, Y.; WANG, X.; WANG, J.; NING, Z.; RUAN, Q.; ZHANG, Y. Preparation and characterization of a novel colorimetric indicator film based on gelatin/polyvinyl alcohol incorporating mulberry anthocyanin extracts for monitoring fish freshness. **Food Research International**, Amsterdam, v. 126, 2019.

ZENG, Q.; HU, D.; WANG, R.; LI, Y.; WEN, Y.; XIAO, H.; ZHAO, Y.; WANG, J. Curcumin-loaded emulsions stabilized by the succinylated Antarctic krill proteins: Establishment of photodynamic inactivation to preserve salmon. **LWT– Food Science and Technology**, Amsterdam, 2023.

ZHANG, B.; FANG, C.; HAO, G.; ZHANG, Y. Effect of kappa-carrageenan oligosaccharides on myofibrillar protein oxidation in peeled shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during long-term frozen storage. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 245, p. 254-261, 2018.

ZHANG, B.; PÉREZ-WON, M.; TABILO-MUNIZAGA, G.; AUBOURG, S. Inhibition of lipid damage in refrigerated salmon (*Oncorhynchus kisutch*) by a combined treatment of CO₂ packaging and high-pressure processing. **International Journal of Food Science & Technology**, Oxford, v. 56, n. 11, p. 5968-5976, 2021.

ZHANG, B.; YAN, H.; SU, L.; CHEN, X. Kappa-carrageenan oligosaccharides retard the progression of protein and lipid oxidation in mackerel (*Scomber japonicus*) fillets during frozen storage. **RSC Advances**, London, v. 10, p. 20827–20836, 2020.

ZHANG, L.; YU, D.; XU, Y.; JIANG, Q.; XIA, W.; YU, D. Changes in quality and microbial diversity of refrigerated carp fillets treated by chitosan/zein bilayer film with curcumin/nisin-loaded pectin nanoparticles. **Food Bioscience**, Amsterdam, 2023.

ZHANG, M.; ZHANG, M.; ZHAO, Z.; ZHU, J.; WAN, X.; LV, Y.; TANG, C.; XU, B. Preparation and characterization of intelligent and active bi-layer film based on carrageenan/pectin for monitoring freshness of salmon. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 276, 2024.

ZHANG, Q.; JIA, S.; BAI, Y.; ZHOU, X.; DING, Y. Formation mechanisms of reactive carbonyl species from fatty acids in dry-cured fish during storage in the presence of free radicals. **Journal of Future Foods**, v. 1, n. 2, p. 203-210, 2021.

ZHANG, W.; MA, J.; SUN, D.-W. Raman spectroscopic techniques for detecting structure and quality of frozen foods: principles and applications. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 61, n. 16, p. 2623-2639, 2021.

ZHANG, Y.; LUO, Q.; DING, K.; LIU, S.; SHI, X. A smartphone-integrated colorimetric sensor of total volatile basic nitrogen (TVB-N) based on Au@MnO₂ core-shell nanocomposites incorporated into hydrogel and its application in fish spoilage monitoring. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 335, 2021.

ZHANG, Z.; TANG, H.; CAI, K.; LIANG, R.; TONG, L.; OU, C. A novel indicator based on polyacrylamide hydrogel and bromocresol green for monitoring the total volatile basic nitrogen of fish. **Foods**, Basel, v. 12, 2023.

ZHANG, Z.; WANG, Y.; LI, L.; ZHENG, J.; WANG, C.; LAI, B.; YAN, J.; WU, H. Gelation and film-forming properties of ternary composite gels constructed by scallop (*Patinopecten yessoensis*) protein hydrolysates, SDS, and polysaccharides. **Food Hydrocolloids**, 2024.

ZHAO, A.-Q.; YU, L.; YANG, M.; WANG, C.-J.; WANG, M.-M.; BAI, X. Effects of the combination of freeze-thawing and enzymatic hydrolysis on the microstructure and physicochemical properties of porous corn starch. **Food Hydrocolloids**, v. 83, p. 465–472, 2018.

ZHAO, C.; ZHU, J.; ZHANG, C.; WANG, W.; QU, W.; WANG, W.; LI, W.; WU, H. Preparation of mechanically strong and active composite films based on fish myofibrillar proteins: The dual effects of oxidized polyphenol crosslinking and layered double hydroxide reinforcement. **Food Hydrocolloids**, v. 129, 2022.

ZHENG, R.; LIAO, G.; KANG, J.; XIONG, S.; LIU, Y. An intelligent myofibrillar protein film for monitoring fish freshness by recognizing differences in anthocyanin (*Lycium ruthenicum*) -induced color change. **Food Research International**, v. 192, 2024.

ZHOU, Y.; CHEN, F.; CHEN, S.; XIAO, Q.; WENG, H.; YANG, Q.; XIAO, A. Preparation and Characterization of κ -Carrageenan Modified with Maleic Anhydride and Its Application in Films. **Marine Drugs**, Basel, v. 19, 2021.

ZHOU, C.; SUN, D.; J.; QIN, A.; TANG, B.; LIN, X.; CAO, S. Assembly-induced emission of copper nanoclusters: revealing the sensing mechanism for detection of volatile basic nitrogen in seafood freshness on-site monitoring. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 16, p. 6533-6547, 2024.

ZHUANG, S.; LIU, Y.; GAO, S.; TAN, Y.; HONG, H.; LUO, Y. Mechanisms of fish protein degradation caused by grass carp spoilage bacteria: a bottom-up exploration from the molecular level, muscle microstructure level, to related quality changes. **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 403, 2022b.

ZHUANG, S.; TIAN, L.; LIU, Y.; WANG, L.; HONG, H.; LUO, Y. Amino acid degradation and related quality changes caused by common spoilage bacteria in chill-stored grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). **Food Chemistry**, Amsterdam, v. 399, 2022a.

ZISMAN, W. A. Contact angle, wettability, and adhesion. In: AMERICAN CHEMICAL SOCIETY (ed.). *Advances in Chemistry Series*. **American Chemical Society**, v. 43, p. 1–5, 1964.