



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ANALÍTICA E FÍSICO-QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

JOÃO VICTOR DA PAZ RIBEIRO

ANÁLISE DO TEOR DE ELEMENTOS TRAÇOS E SEU TEOR BIOACESSÍVEL EM
AMOSTRAS DE MACROALGAS DO ESTADO DO CEARÁ-BRASIL

FORTALEZA

2025

JOÃO VICTOR DA PAZ RIBEIRO

ANÁLISE DO TEOR DE ELEMENTOS TRAÇOS E SEU TEOR BIOACESSÍVEL EM
AMOSTRAS DE MACROALGAS DO ESTADO DO CEARÁ-BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Química do Centro
de Ciências da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
bacharel em Química.

Orientador: Profa. Dra. Wladiana Oliveira
Matos

Coorientador: MSc. Iago Gabriel Medeiros
Nobre

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R369a Ribeiro, João Victor da Paz.
 Análise do teor de elementos traços e seu teor bioacessível em amostras de macroalgas do estado do
Ceará-Brasil / João Victor da Paz Ribeiro. – 2025.
 44 f. : il. color.

 Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,
Curso de Química, Fortaleza, 2025.

 Orientação: Profa. Dra. Wladiana Oliveira Matos.

 Coorientação: Prof. Me. Iago Gabriel Medeiros Nobre.

 1. Elementos-traços. 2. Metais. 3. Bioacessibilidade. 4. Macroalgas. I. Título.

CDD 540

JOÃO VICTOR DA PAZ RIBEIRO

ANÁLISE DO TEOR DE ELEMENTOS TRAÇOS E SEU TEOR BIOACESSÍVEL EM
AMOSTRAS DE MACROALGAS DO ESTADO DO CEARÁ-BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Química do Centro
de Ciências da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
bacharel em Química.

Aprovada em: 30/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wladiana Oliveira Matos (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Luan Fonseca da Silva
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

MSc. Iago Gabriel Medeiros Nobre
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Ciomara e Cleyton.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por estarem presentes em minha vida e darem todo o apoio incondicional as minhas decisões.

À Profa. Dra. Wladiana Oliveira Matos, pela sua orientação e por fornecer as oportunidades necessárias para o ganho de experiência e vivência em laboratório.

Ao Prof. Dr. Francisco Luan Fonseca da Silva, por aceitar participar da banca, cedendo parte do seu tempo para me avaliar.

Ao Iago, por ter aceitado o papel de orientador profissional e oferecido contribuições e sugestões para o meu trabalho.

À minha namorada, Lorena, por toda a sua paciência e por estar frequentemente em minha vida, nos momentos batalhadores e nos momentos felizes.

Aos meus amigos, Carlos Araujo, Daniel Guedes, Gustavo Soares, Helias Bruno, Mário Sanches, Kayanne Kelly, Leticia Kelly, Victor Hugo e Samuel Mattos por todos os momentos de descontrações e diversões que ajudaram a tornar a graduação mais leve, e por oferecerem suas amizades nas dificuldades encontradas.

Ao PET Química UFC, pelas oportunidades que me ofereceram, possibilitando meu crescimento, não só como acadêmico, mas também como cidadão.

Ao LEQA, por toda a aprendizagem e experiência que me foi proporcionada, assim como meus colegas de laboratório, pelas sugestões e críticas ditas.

À todos os professores e professoras com quem tive aulas na graduação, cuja dedicação e empenho possibilitaram um rico aprendizado.

À Instituição FNDE (Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação) pelo apoio financeiro e manutenção da minha bolsa.

À CAPES, por todo o auxílio financeiro.

À Universidade Federal do Ceará, por toda a sua estrutura e oportunidades oferecidas.

À NUTEC (Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará) pelo auxílio nos experimentos, assim como o espaço.

Ao LAAM (Laboratório de Análise de Alimentos e Micronutrientes) pela cooperação.

À Universidade Estadual do Ceará, pela oportunidade e estrutura.

RESUMO

As macroalgas podem ter diversas aplicações, por exemplo alimento e aditivo de metabólito em produtos industriais. Esses organismos apresentam a capacidade de acumular diversos elementos, assim, a fim de avaliar seus componentes e o quanto deles podem ser absorvidos pelo organismo humano, coletou-se espécies de macroalgas marrom (*Sargassum vulgare*), verde (*Ulva lactuca*) e vermelha (*Gracilaria birdiae*) de forma a se ter um estudo com um representante de cada filo. Fez-se uma análise da concentração total de metais presentes nas amostras, após decomposição em meio ácido – 3 ml HNO₃ e 1 ml de H₂O₂ – com aquecimento assistido por micro-ondas. Para estudar a absorção desses elementos, fez-se a análise de bioacessibilidade, sendo realizada por simulação da digestão humana *in vitro*, com uso de soluções gástrica e intestinal. Dessa maneira, tanto a concentração total, quanto a bioacessível foi determinada por ICP-OES. A *Sargassum vulgare* mostrou as maiores concentrações totais dos elementos, como Al ($823 \pm 7 \text{ mg kg}^{-1}$), Sr ($768 \pm 20 \text{ mg kg}^{-1}$) e V ($4,86 \pm 0,37 \text{ mg kg}^{-1}$). Já nas *Ulva lactuca* e *Gracilaria birdiae* concentrações mais reduzidas e semelhantes foram observadas com As ($2,56 \pm 0,11 \text{ mg kg}^{-1}$ e $5,04 \pm 0,34 \text{ mg kg}^{-1}$), Ba ($2,68 \pm 0,67 \text{ mg kg}^{-1}$ e $0,983 \pm 0,034 \text{ mg kg}^{-1}$), Sb ($0,323 \pm 0,109 \text{ mg kg}^{-1}$ e $0,274 \pm 0,042 \text{ mg kg}^{-1}$) e V ($1,13 \pm 0,05 \text{ mg kg}^{-1}$ e $2,02 \pm 0,15 \text{ mg kg}^{-1}$). Para todos os elementos analisados uma reduzida quantidade bioacessível deles é capaz de ser absorvida pela macroalga marrom, tendo o arsênio o maior teor bioacessível para a amostra (33,2%). Nas macroalgas verde e vermelha, elementos, por exemplo, Pb (90,79% e 81,98%, respectivamente), podem ser mais absorvidos pelo seu consumo, enquanto os outros elementos analisados têm teores mais reduzidos, tal como As (31,38% e 59,6%, respectivamente para *Ulva lactuca* e *Gracilaria birdiae*). A ausência de uma regulação específica para macroalgas no Brasil faz com que não se haja fiscalização, e consequentemente, a saúde alimentar dos consumidores desse organismo se encontra em risco.

Palavras-chave: Elementos-traços; Metais; Bioacessibilidade; Macroalgas.

ABSTRACT

Macroalgae can have a variety of applications, including food and as a metabolite additive in industrial products. These organisms can accumulate various elements. Therefore, to evaluate their components and their absorption by the human body, brown (*Sargassum vulgare*), green (*Ulva lactuca*), and red (*Gracilaria birdiae*) macroalgae species were collected to conduct a study with a representative of each phylum. The total metal concentration in the samples was analyzed after decomposition in an acidic medium (3 ml HNO₃ and 1 ml H₂O₂) with microwave-assisted heating. To study the absorption of these elements, bioaccessibility analysis was performed by simulating human digestion in vitro using gastric and intestinal solutions. Thus, both the total and bioaccessible concentrations were determined by ICP-OES. *Sargassum vulgare* showed the highest total concentrations of elements, such as Al (823±7 mg kg⁻¹), Sr (768±20 mg kg⁻¹) and V (4.86±0.37 mg kg⁻¹). In *Ulva lactuca* and *Gracilaria birdiae*, lower and similar concentrations were observed with As (2.56±0.11 mg kg⁻¹ and 5.04±0.34 mg kg⁻¹), Ba (2.68±0.67 mg kg⁻¹ and 0.983±0.034 mg kg⁻¹), Sb (0.323±0.109 mg kg⁻¹ and 0.274±0.042 mg kg⁻¹) and V (1.13±0.05 mg kg⁻¹ and 2.02±0.15 mg kg⁻¹). For all elements analyzed, a reduced bioaccessible amount of them are capable of being absorbed by the brown macroalgae, with arsenic having the highest bioaccessible content for the sample (33.2%). In green and red macroalgae, elements such as Pb (90.79% and 81.98%, respectively) can be more readily absorbed through consumption, while other elements analyzed have lower levels, such as As (31.38% and 59.6%, respectively, for *Ulva lactuca* and *Gracilaria birdiae*). The lack of specific regulations for macroalgae in Brazil means there is no oversight, and consequently, the health of consumers of this organism is at risk.

Keywords: Trace elements; Metals; Bioaccessibility; Macroalgae.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura química das clorofilas (Clorofila A: R=Grupo metil (-CH ₃) e Clorofila B: R=Grupo aldeído (-CHO)).	17
Figura 2. Carrageninas (Kappa, Iota e Lambda).	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Leituras utilizadas para determinação dos elementos-traços no ICP-OES.....	29
Tabela 2. Recuperação obtida para elementos do material certificado.....	32
Tabela 3. Concentração total de elementos inorgânicos nas macroalgas.	32
Tabela 4. Concentração e teor bioacessíveis das espécies químicas nas amostras.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FDA	Food and Drug Administration
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry
IUPAC	International Union of Pure Applied Chemistry
LMT	Limite Máximo Tolerável
LOAEL	Lowest Observable Adverse Effect Level
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
trad.	Tradutor
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Principais polissacarídeos das macroalgas	18
3.2 Biodisponibilidade e bioacessibilidade	20
3.3 Elementos-Traços	21
3.4 Espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado	23
3.4.1 Nebulizador	24
3.4.2 Câmara de Nebulização	25
3.4.3 Tocha.....	25
3.4.5 Dispositivo de Seleção de Comprimento de Onda	26
3.4.6 Detector	26
4 METODOLOGIA.....	28
4.1 Coletas	28
4.2 Preparo de amostras.....	28
4.2.1 Análise da concentração total dos elementos	28
4.2.2 Análise da fração bioacessível dos elementos	30
5 RESULTADOS.....	32
5.1 Concentração total dos elementos inorgânicos.....	32
5.2 Bioacessibilidade.....	36
6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS	40
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

As algas são organismos autotróficos fotossintetizantes, isto é, estes organismos absorvem dióxido de carbono (CO_2), e com a utilização da luz solar, convertem-na a energia (usada para suas funções) liberando oxigênio (O_2). Elas são encontradas majoritariamente em ambientes aquático ou onde há umidade adequada. Esses organismos são classificados em microalgas e macroalgas; macroalgas são algas que podem ser visíveis a olho nu, sem auxílio de microscópio, sendo a base da cadeia alimentar marinha, servindo como produtores primários, em contrapartida que as microalgas são organismos menores, que em virtude do seu tamanho, sua visualização na ausência da utilização de equipamentos auxiliares é dificultada (PEREIRA, 2021).

Macroalgas têm em sua composição polissacarídeos e minerais, tornando-as interessantes para algumas indústrias, principalmente no setor alimentício, visto que em determinados países orientais seu consumo é elevado (BANK, 2023). Destaca-se, ainda, utilizações para fins ambientais, uma vez que as algas atuam como biorremediadores, servindo como alerta de poluição, bem como possível organismo em biotratamento de águas poluídas (SGARIONI, 2025).

O consumo alimentício de algas marinhas já vem sendo realizado desde o século VI na China, sendo ele na atualidade muito amplo, tanto neste país quanto em outros países orientais, como Japão e República da Coreia. Destaca-se que a utilização de tais seres é feita também na medicina alternativa, através de receitas caseiras (MCHUGH, 2003). No ocidente o consumo aumentou nas últimas décadas, por fornecer fonte alternativa sustentável de alimentos, produtos químicos e combustíveis pela sua biomassa (BUSCHMANN *et al.*, 2017).

A composição das macroalgas é, assim, de interesse alimentício e industrial, por consequência deste foco no organismo, é de importância significativa conhecimentos e estudos acerca de sua estrutura, habitat onde vivem, participação efetiva em meio a biota e outros retratos, por exemplo a composição química e nutricional (PEÑALVER *et al.*, 2020).

As macroalgas são fontes de nutrientes, como vitaminas e antioxidantes, entretanto, tem uma capacidade de acumular metais tóxicos, o que pode ocasionar potenciais riscos ao se ter o consumo desses organismos (PAZ *et al.*, 2019). A toxicidade pode ser interpretada como uma alteração da normalidade do organismo, podendo ser irreversível, essa variação pode trazer riscos à saúde, tanto de forma aguda (que acontece em um intervalo de tempo relativamente curto após a exposição), quanto de forma crônica (a qual tem efeitos sub-letais,

geralmente com exposição prolongada a pequenas quantidades do contaminante, e letais) que podem afetar significativamente a vida útil do organismo (EGOROVA & ANANIKOV, 2017).

As substâncias (nutrientes, íons metálicos dentre outros) que compõem o organismo das macroalgas podem não ser absorvidos em sua totalidade pelo organismo humano, pois a absorção é feita, comumente, pela passagem das espécies químicas pelas membranas das células que revestem o trato gastrointestinal (DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2023). O conhecimento acerca das quantidades que podem ser absorvidas de determinado elemento é alvo de estudo da bioacessibilidade. O teor bioacessível pode ser interpretado como a quantidade de um determinado componente capaz de ser absorvido pelo organismo humano (SAURA-CALIXTO, SERRANO & GOÑI, 2007). Estudos referentes a fração bioacessível são escassos no nordeste brasileiro, principalmente em macroalgas do estado do Ceará.

A escassez deste conhecimento expõe à ignorância as pessoas que realizam seu consumo como alimento, uma vez que essa alimentação está ocorrendo sem que se saiba seus nutrientes e quão nutritivo as macroalgas podem ser. Isso por sua vez pode ser sanado com simulações (bioacessibilidade).

Uma análise bioacessível, porém, por apresentar uma não garantia de absorção, traz um retrato incompleto acerca das quantidades que podem ser absorvidas pelo organismo humano. De forma semelhante a análise bioacessível, um outro estudo para definir a porção que é absorvida pode ser executado, esse estudo é chamado de biodisponibilidade. A fração biodisponível traz a informação do quanto, de fato, pode ser absorvido, todavia, por ser realizado em simulação, há limitações no seu uso (COZZOLINO, 1997).

Perante o pouco conhecimento acerca dos teores bioacessíveis, especificamente dos elementos-traços, em algas, fez-se o estudo com o intuito de possibilitar maiores informações sobre a quantidade desses elementos que podem ser assimiladas pelo ser humano.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Avaliar a composição de elementos inorgânicos e seu teor bioacessível em amostras de macroalgas do litoral cearense.

2.2 Objetivos específicos

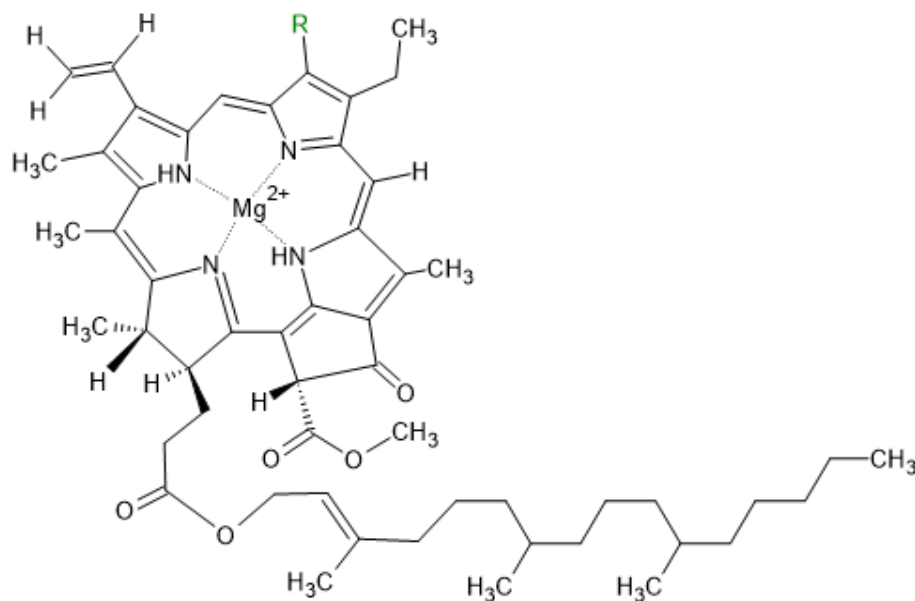
- Determinar a concentração total de elementos traços (Al, As, Ba, Bi, Cd, Co, Cr, Ni, P, Pb, Sb, Se, Sn, Sr, V e Zn) nas amostras;
- Quantificar o teor bioacessível dos elementos totais encontrados;
- Verificar a conformidade ou não conformidade com as legislações reguladoras existentes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As macroalgas são classificadas, como pertencente a 3 grupos: Rhodophytas (macroalgas vermelhas), Chlorophytas (macroalgas verdes) e Phaeophytas (macroalgas marrons); a depender da pigmentação apresentada por estes organismos. As algas verdes e vermelhas são, normalmente, menores contando tamanho de poucos centímetros a 1 metro. Ao passo que as algas marrons são geralmente as maiores, tendo espécies que alcançam um comprimento maior que 20 metros (MCHUGH, 2003).

As macroalgas apresentam distinções que não se restringem a pigmentação, embora esta seja a principal característica observada, por exemplo, tem-se: habitat e estrutura. Todas elas têm a presença da clorofila, entretanto os filos mostram diferenças na forma como elas absorvem luz para realizar a fotossíntese. As clorophyceas têm majoritariamente composição de clorofilas A e B (Figura 1), que absorve luzes azul e vermelha, esses organismos são encontrados, normalmente, em águas rasas e iluminadas, além de ambientes terrestres, como rocha úmida. As phaeophyceas são de coloração marrom (ou pardas) devido a fucoxantina, capazes de aproveitar a luz em regiões mais profunda ou turva, predominam em zonas costeiras frias. As rhodophyceas contêm ficobilinas (que tem em sua composição ficoeritrina), conferindo sua tonalidade avermelhada, ela absorve, principalmente, a luz verde, permitindo uma sobrevivência em profundidades maiores que outras algas, geralmente não convivem, esse grupo pode ser também encontrado em recifes de corais (ANDRADE, 2025).

Figura 1. Estrutura química das clorofilas (Clorofila A: R=Grupo metil (-CH₃) e Clorofila B: R=Grupo aldeído (-CHO)).



Adaptado de: Streit *et al.*, 2005.

As macroalgas têm como benefícios em suas aplicações: o fácil cultivo, o rápido crescimento (comparado a plantas terrestres), a não ocupação de terras agrícolas, dentre outras. Essas características são interessantes para as indústrias, uma vez que com um crescimento em menor tempo, a elevada demanda solicitada pode ser atendida, além de que estando presente em oceanos, não se tem a necessidade de competir os recursos (por exemplo, água doce e solo) com a agricultura tradicional (PALATNIK & ZILBERMAN, 2017).

Os polissacarídeos são componentes importantes de interesse, encontradas em animais, fungos, bactérias, e nas macroalgas. Polissacarídeos são polímeros naturais de carboidratos, não-tóxicos, biocompatíveis, biodegradáveis, e podem ser formados pela união de monossacarídeos. Esse grupo de macromolécula é rica em grupos -OH, esse grupamento possibilita a existência de ligações de hidrogênio, intra e intermolecular, contribuindo para solubilidade dos polímeros. Os principais polissacarídeos extraídos das macroalgas são: agaranas, alginato e carragenanas (VASCONCELOS, ARAÚJO & SANTANA, 2015).

3.1 Principais polissacarídeos das macroalgas

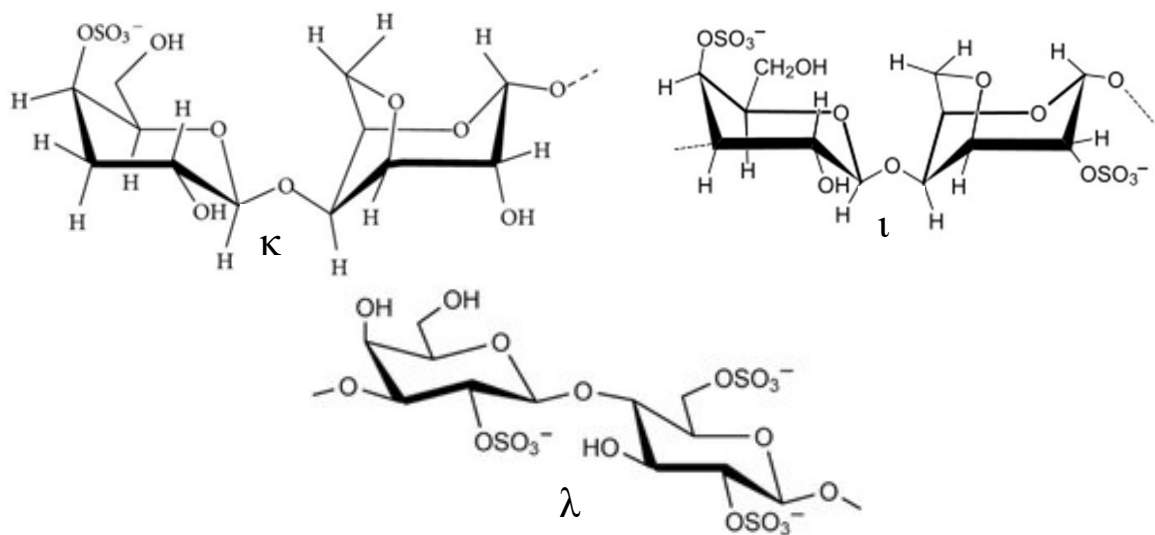
Espécies de algas do gênero *Gracilaria* têm ampla utilização na indústria, devido, principalmente, a obtenção de ágar a partir desse grupo, sendo essa a principal forma de obtenção. Ágar é um tipo de hidrocoloide, uma substância não cristalina com moléculas muito grandes e que se dissolve em água para dar uma solução espessa (viscosa), essa característica o torna útil em algumas aplicações, por exemplo, agente espessante, aumentando a viscosidade das soluções (PEÑALVER *et al.*, 2020).

O ágar, segundo relatório da FAO (2003), é extraído principalmente de algas vermelhas, majoritariamente de espécies do gênero *Gelidium* e *Gracilaria*, a expansão na indústria devido ao pré-tratamento desta última com uma base (ou sal iônico de um metal alcalino ou alcalinoterroso), realizado antes da extração, na década de 1950, foi de elevada importância perante a disponibilidade anterior de espécies selvagens do gênero *Gelidium*, apesar de se ter um menor rendimento. Ágar-ágar, assim também chamado, têm diversas aplicações, algumas delas são: serigrafia fotográfica (tintas), nanotecnologia e alimentação, onde pode ser como usada como filmes comestíveis em comidas, além de outras características com as quais tem similaridades com a carragenana (LAHAYE & ROCHAS, 1991; MOSTAFAVI & ZAEIM, 2020).

A carragenana é extraída, majoritariamente, de algas vermelhas, como a espécie *Chondrus crispus* e as espécies de *Eucheuma*. A utilização de espécies de *Eucheuma* começou

a ser realizada na década de 70, nas Filipinas, esse cultivo foi responsável por um maior fornecimento de matéria-prima para a indústria alimentícia. Há 3 tipos de carragenana: Iota (ι), Kappa (κ) e Lambda (λ), que têm estruturas químicas (Figura 2) e propriedades distintas, motivando aplicações diversas. Suas utilizações estão relacionadas à sua capacidade de formar soluções espessas. Iota pode ser usado para formar géis elásticos com sais de cálcio, assim como géis estáveis ao congelamento/descongelamento. Kappa é usado para formar géis fortes e rígidos com sais de potássio. Lambda forma soluções viscosas, sem formar géis. Possíveis aplicações desses polissacarídeos são em: carnes processadas, pasta de dentes, geleias de sobremesa, sorvetes e sobremesas lácteas; essas variedades se devem a sua viscosidade, sua capacidade de agente floculante, agente gelificante, além de outras características (NECAS, 2013; MCHUGH, 2003).

Figura 2. Carrageninas (Kappa, Iota e Lambda).



Adaptado de: HANS, MALIK & NAIK, 2020

Alginatos são comuns nas paredes das células de algas marrons, na forma de sais de ácidos algínico, como sais de cálcio, de magnésio e de sódio. Espécies dos gêneros *Laminaria* e *Undaria* são usadas para obtenção do alginato. Além de ser um biopolímero, é um poli-eletrólito capaz de formar hidrogéis na presença de cátions divalentes, e tem propriedades coloidais, além da sua capacidade de atuar como agente espessante, estabilizante, emulsificantes, dentre outros. A ingestão desse biopolímero pode auxiliar ainda na redução da obesidade, resistência a diabetes, regulação da microbiota intestinal e nas atividades antitumorais (GACESA, 1987; MÜLLER, SANTOS & BRÍGIDO, 2011).

As fibras alimentares são carboidratos não absorvidos e não digeridos, normalmente, são associados à parte comestível das plantas. A depender da solubilidade as fibras podem ser agrupadas em: fibras solúveis e fibras insolúveis. Fibras solúveis são responsáveis por um maior tempo de trânsito intestinal e está relacionada à diminuição do esvaziamento gástrico, ao retardo da absorção de glicose, além da redução do colesterol, em razão de suas propriedades físicas que conferem viscosidade ao conteúdo luminal. Fibra insolúvel é a porção mais abundante das fibras, contribuindo para redução do tempo de trânsito intestinal, retardo da hidrólise do amido e aumento do volume do bolo fecal (CATALANI *et al.*, 2003).

As macroalgas são também destaques com respeito a muito dos seus polissacarídeos, que podem ser considerados fibras, as fibras solúveis se mostram em teores maiores, e a razão fibras solúveis/fibras insolúveis é mais elevada que os valores observados em vegetais terrestres; apesar do aparelho enzimático humano não conseguir digerir estes componentes, algumas colônias bacterianas conseguem exercitar essa digestão (PEÑALVER *et al.*, 2020).

3.2 Biodisponibilidade e bioacessibilidade

O teor biodisponível pode ser vista como a porção da quantia total de uma espécie química, que é absorvida pelo trato alimentar, e então, de fato disponível para o uso (pelo metabolismo ativo do animal) ou armazenagem (HOUSE, 1998). A eficiência do processo é tida como perspectiva principal, visto que a mimetização da absorção pelo organismo pode advir tanto de técnicas *in vitro*, quanto *in vivo*. A primeira com aplicação de culturas de células específicas, que visam tornar compatível o experimento com as condições reais. Enquanto a segunda, é realizada, obtendo o teor biodisponível a partir dos elementos e/ou dos compostos dependentes dos elementos, com animais de laboratórios e humanos voluntários (COZZOLINO, 1997).

As principais desvantagens, entretanto, são os custos e a dificuldade de impor condições experimentais, a qual *in vivo*, por exemplo, dietas rigorosas devem ser seguidas, exigindo disciplina e período de alguns dias para que a influência da alimentação seja processada (COZZOLINO, 1997).

A quantidade de determinado elemento que pode ser absorvida é definida como fração bioacessível, é frisado que a fração encontrada talvez não seja assimilada em sua totalidade. A determinação dessa quantidade é feita por experimentos que simulem as condições encontradas no trato digestivo humano (boca, estômago e intestino). Dessa forma, o método

usado para uma análise bioacessível é um método *in vitro* (SAURA-CALIXTO; SERRANO & GOÑI, 2006). A absorção segura dos nutrientes de determinados elementos é um conhecimento estritamente necessário para o estudo da quantidade dos constituintes que serão potencialmente absorvidos, sendo este um tópico de interesse dentro da nutrição e das dietas realizados pela população.

Essa simulação *in vitro* traz aspectos positivos, tais como menor complexidade, melhor controle das variáveis em laboratório (dentre outros temperatura, agitação, tempo de exposição), fazendo com que haja menor possibilidade de interferências e erros indeterminados associados aos experimentos. Todavia, por ser realizado com uso de reagentes sintéticos, pode ocorrer diferenças significativas do experimento para as condições reais, como a presença de micro-organismos na flora intestinal (GRUNDY; MOUGHAN & WILDE, 2024). Assim, a simulação *in vitro* traz boas vantagens, porém limitações.

A perspectiva advinda desse estudo auxiliará na nutrição oferecida pelos alimentos, ademais o quanto de determinado constituinte pode ser ingerido para satisfazer a exigência do corpo e não causar malefícios.

3.3 Elementos-Traços

Elementos-traços são elementos em quantidades muito reduzidas, em níveis de ppm (partes por milhão). A captura desses elementos, geralmente metais, pelas macroalgas ocorre com complexos mecanismos, como troca iônica, adsorção por forças físicas, nessa etapa de sorção há a participação de polissacarídeos estruturais (DAVIS, VOLESKY & VIEIRA, 2000). Essas espécies, apesar da concentração que apresentam, têm elevada importância para os organismos. Alguns elementos podem participar de processos metabólicos, auxiliando na manutenção da homeostase (processo pelo qual o organismo mantém constantes as condições internas necessárias para a vida), enquanto outros não realizam função equivalente (ZORODDU *et al.*, 2019).

Quadro 1. Elementos-traços e algumas de suas formas e efeitos.

Elementos	Local de presença	Forma principal como é encontrado	Efeitos	Fonte
Al	Crosta terrestre	Al ³⁺	Mutagênico, inflamogênico e pro-oxidação	EXLEY, 2003 EFSA, 2008
As	Ubíquo	As ³⁺ , As ⁵⁺ e	Carcinogênico	ÖTLEŞ &

		Arsenocompostos		ÇAĞINDI, 2010
			Toxicidade aos sistemas	
Ba	Litologias aquíferas	Ba ²⁺ (sais naturais)	cardiovascular, renal, hematológico e endócrino	KRAVCHENKO <i>et al.</i> , 2014
Bi	Solos	Bi ³⁺	Neurotoxicidade e hepatotoxicidade	WANG, LI & SUN, 2019
Cd	Água, ar e solo. Atividades humanas auxiliam na sua presença no ambiente	Sais e óxidos	Patologias vasculares, apoptose e distúrbios do ciclo menstrual	GENCHI <i>et al.</i> , 2020
Pb	Ubíquo	Inorgânico e orgânico (mais tóxico)	Generalizados ao organismo, principalmente, sistema nervoso central e rins	PATTE & PAIN, 2002; TONG SCHIRNDING & PRAPAMONTOL, 2020
Co	Crosta continental, como mineral (cobaltita, eritrita e esmaltita)	Co ²⁺ e Co ³⁺ , como óxidos e sulfetos	Na tireoide	BARCELOUX & BARCELOUX, 1999
Cr	Crosta continental, como mineral (cromita)	Cr ³⁺ e Cr ⁶⁺	Reações citotóxicas e genotóxicas	SHRIVASTAVA <i>et al.</i> , 2002 TUMOLO <i>et al.</i> , 2020
P	Sistemas biológicos	Compostos fosfatados		ELSER, 2012
Mo	Crosta terrestre, como mineral	Mo ²⁺ , Mo ³⁺ , Mo ⁴⁺ e Mo ⁶⁺	Deformações articulares	TALLKVIST & OSKARSSON, 2015
Ni	Solos e vulcões	Ni ²⁺ , como óxido ou sulfeto	Vertigo, anemia e excreção de cálcio	DAS; DAS & DHUNDASI, 2010

Sb	Oceanos, rios e lagoas	Sb^{3+} e Sb^{5+}	e zinco Inibidor da piruvato desidrogenase	PERIFERAKIS et al., 2022
Sn	Crosta terrestre (cassiterita)	Inorgânico (Se^{2+} e Se^{4+} (como complexos coloidais)) e orgânico (absorvido em proteínas).	Depressão do sistema imunológico da glândula tireoide	CIMA et al., 2011 RUDEL, 2003
Sr	Mineral	Sr^{2+}	Deficiência de fósforo e raquitismo	NIELSEN, 2004
V	Crosta continental e águas marinhas	Estados de oxidação -III a +V.	Irritação das conjuntivas e do sistema respiratório	REHDER, 2013 SANDSTEAD, 1981
Zn	Crosta terrestre	Zn^{2+}	Naúseas, vômitos e dores abdominais	CRUZ & SOARES, 2011 VAHRENKAMP, 2007

Fonte: Próprio autor.

3.4 Espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado

A análise de elementos em reduzidas concentrações exige um método de elevada sensibilidade, assim, a espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES, sigla em inglês) é utilizada. Conforme indicado pela nomenclatura, o método de análise é baseado nos princípios de emissão (atômica, iônica e molecular) dos elementos, em que as espécies após sofrerem estímulo, e ter seus elétrons excitados a um nível de maior energia, retornam a um nível de menor energia, emitindo a energia excedente na forma de fótons (luz). Pelo fato de se ter níveis quantizados de energia, os comprimentos de onda emitidos são característicos para cada espécie, sendo,

portanto, possível a determinação da concentração de elementos-traços (VINADÉ & VINADÉ, 2005).

A emissão pode ser ocasionada de diversas formas, sendo uma delas por fonte de plasma. O plasma é um gás com espécies secundárias, como exemplo moléculas do gás positivamente ionizadas e elétrons livres, em elevadas temperaturas (VINADÉ & VINADÉ, 2005).

O ICP-OES é composto pelas partes: Nebulizador, Câmara de Nebulização, Tocha, Dispositivo de Seleção de Comprimento de Onda e Detector.

3.4.1 Nebulizador

A amostra é inserida dentro do equipamento pelo nebulizador, essa introdução é baseada na sucção da amostra por um gás. A amostra ao ser levada pelo tubo, será arrastada pelo gás (de Argônio, geralmente), formando um aerossol. Os sistemas de introdução mais comumente usados são os nebulizadores pneumáticos (sigla em inglês PNs, *pneumatic nebulizers*), havendo três tipos: Concêntrico, Fluxo-Cruzado e Babington. O funcionamento deles são semelhantes, e se baseiam no princípio de Venturi, quando um gás vindo de um tubo, ao entrar em uma constrição, isso é uma região de menor diâmetro, tem a velocidade do fluxo aumentada, em detrimento de uma redução de pressão, criando abaixo dele uma local de vácuo que irá auxiliar na sucção da amostra (HOU & JONES, 2000).

O nebulizador concêntrico tem como características a excelente sensibilidade e estabilidade, porém o entupimento é favorecido quando se tem um elevado teor de sólidos dissolvidos. A amostra é sugada por um capilar interno e convertida em aerossol no tubo externo (HOU & JONES, 2000).

Nebulizador de fluxo-cruzado (*Cross-Flow*) são usados 2 tubos capilares que se encontram em 90°, a aspiração e a conversão em aerossol são feitas pelo fluxo de argônio no capilar vertical que flui pelo capilar horizontal, onde passa a amostra (GINÉ-ROSIAS, 1998).

No nebulizador Babington, a amostra é introduzida em um sulco na forma de V, de 1 a 2 mm, e pressionada por um fluxo de alta pressão de argônio para um orifício, após a passagem tem-se a formação do aerossol (GINÉ-ROSIAS, 1998).

Um dispositivo auxiliar é, geralmente, utilizado para manter a constância de vazão no nebulizador e evitar complicações por entupimentos, bombeando a amostra para dentro do equipamento. Esse dispositivo é a bomba peristáltica, que tem como maior efeito a precisão nas medidas (GINÉ-ROSIAS, 1998).

3.4.2 Câmara de Nebulização

A câmara de nebulização é um dispositivo que tem a função de selecionar as gotas menores do aerossol – gás com partículas em suspensão – impedindo que as gotículas maiores sigam para o plasma. Ao se ter essa separação, um aerossol com partículas mais uniformes é formado, e efeitos como o resfriamento ou a extinção do plasma se torna menos propício a ocorrer, garantindo um processo com maior eficiência na transferência de energia. Ademais, a câmara de nebulização por selecionar as partículas, em função do seu tamanho, faz com que parte da amostra seja perdida, podendo essa perda alcançar até 95% do volume total de amostra (GINÉ-ROSIAS, 1998).

3.4.3 Tocha

A tocha é formada por 3 tubos, além de fios organizados em espirais (bobinas) e uma fonte externa de energia (Gerador de rádio-frequência (RF)). Na tocha ocorre a exposição do aerossol ao plasma, em princípio, o aerossol sofre evaporação do solvente, transformando-se em aerossol seco. Os elementos que estão presentes são atomizados, podem sofrer ionização, e então tem-se a excitação. Há 3 tubos concêntricos formando a tocha: o tubo interno transporta o aerossol proveniente do sistema de injeção de amostras, o tubo intermediário entra um gás que garante a estabilidade do plasma e alimenta a tocha do plasma, e no tubo mais externo passa um gás frio, que resfria o plasma, mantendo-o em uma única região, além de impedir a deposição de sais nas paredes do dispositivo (GINÉ-ROSIAS, 1998).

Após a passagem pelo plasma, há o resfriamento e os níveis energéticos decaem para um estado de menor energia ou o estado fundamental, emitindo fótons. O plasma pode ser considerado um gás com diversas espécies secundárias, tais como elétrons livres e gás ionizado positivamente, em temperaturas muito elevadas (a depender do elemento usado para esse fim). O plasma começa a ser formado na região de entrada do gás, devido a uma fonte de Tesla que provoca as primeiras ionizações do gás. Nas espirais tem-se a passagem de corrente elétrica pelos fios por ação do gerador de RF, que faz com que as linhas de campo formadas interajam com os elétrons oriundos da ionização. Esses elétrons são acelerados, ganhando elevada energia cinética, a energia por vez, é transferida para as outras espécies do meio, por meio de colisões. As colisões ocorriam continuamente liberando energia, assim como a formação de outras espécies secundária. Esses processos são contínuos, até que se obtenha um o plasma (HOU & JONES, 2000)

As emissões a partir da tocha pode ser observada por 2 configurações distintas. Uma é a chamada de posição radial (*radial view*), onde o plasma é operado em orientação vertical e a

leitura analítica é feita a partir do lado do plasma. Nessa orientação o comprimento e a sensibilidade são limitados, porém há uma melhor linearidade e menos interferências do que a visualização axial. A posição axial (*axial view*) observa o sinal emitido no fim do plasma, essa configuração permite melhores limites de detecção (LD) do que a radial view, em razão de um caminho de visualização mais longo, entretanto, se tem uma maior interferência de matriz (HOU & JONES, 2000).

3.4.5 Dispositivo de Seleção de Comprimento de Onda

Os fótons oriundos do elemento são orientados para a fenda de entrada do policromador, onde através de espelhos, prisma, rede de difração (dispositivos que tem sulcos ou ranhuras capazes de dispersar a luz em seus comprimentos de onda após a incisão) ou outros dispositivos similares, os comprimentos de onda (λ) de interesse, preestabelecidos para cada espécie química, são selecionados. Esse dispositivo pode operar sobre configurações distintas, a depender do equipamento e do fabricante. Essas configurações podem ser tanto de sistemas ópticos sequenciais, quanto simultâneos. A distinção reside, como proposto pela nomenclatura, na seleção dos comprimentos de ondas; assim, o dispositivo pode atuar selecionando os comprimentos de ondas desejados de forma sequencial (um após o outro), ou simultaneamente (VINADÉ & VINADÉ, 2005).

Um efeito oriundo dos sistemas ópticos é velocidade de leitura dos comprimentos de ondas, que é mais veloz nos sistemas simultâneos, além de ser menos suscetíveis a interferências. Os sistemas ópticos sequenciais, geralmente, tem um maior tempo de análise, devido aos procedimentos realizados. Uma das configurações possíveis dos sistemas ópticos é a configuração Echelle, a qual a radiação proveniente da tocha passa pela fenda de entrada, sendo direcionada por espelhos até uma rede de difração. Esta rede de difração é móvel e sua posição é escolhida de acordo com os λ especificados. Os comprimentos de onda dispersos pela grade de difração são levados para uma câmara de espelhos que direcionada os λ de interesse para uma fenda de saída (VINADÉ & VINADÉ, 2005).

Há uma fibra óptica, na fenda de saída, cuja função é levar o transportar o comprimento de onda específico para o detector (HOU & JONES, 2000).

3.4.6 Detector

O detector mais comum para o ICP-OES é o tubo fotomultiplicador, ele é responsável pela conversão do sinal luminoso em um sinal elétrico, que originará o valor de concentração obtido no experimento, havendo o uso de ideias como o efeito fotoelétrico e a emissão secundária. Esse tubo é composto, dentre outros, por dínodos, série de eletrodos

mantidos em tensão progressivamente mais elevadas, e ânodos, que convertem o sinal luminoso em corrente elétrica (GINÉ-ROSIAS, 1998).

4 METODOLOGIA

4.1 Coletas

As amostras de algas foram coletadas no município de Trairi, em setembro de 2023, especificamente na praia de Flecheiras, durante o período de maré baixa. As amostras alcançadas por esta coleta foram: *Sargassum vulgare* (Phaeophyta), *Ulva Lactuca* (Chlorophyta). A coleta da *Gracilaria birdiae* (Rhodophyta) foi realizada, em abril de 2022, no município de Amontada, praia de Moitas, devido a sua ausência na praia de Flecheiras, por conta do elevado interesse local. Todas as amostras foram coletadas frescas, manualmente, em sacos plásticos.

4.2 Preparo de amostras

Em laboratório, fez-se a lavagem com água corrente, posteriormente o enxague com água ultrapura. O congelamento das amostras foi feito a -20°C , liofilizadas e então trituradas em moinho de facas.

4.2.1 Análise da concentração total dos elementos

A pesagem de aproximadamente 0,200g da amostra foi realizada em balança analítica e transferida para tubos de teflon, 2mL de HNO_3 (Sigma Aldrich, 65% m m⁻¹) e 1mL de H_2O_2 (Dinâmica, 30% m m⁻¹) foram adicionados, que foi submetido a um aumento de temperatura por 15min até 200°C (programa de aquecimento) em forno micro-ondas Milestone (modelo Start D), a temperatura foi mantida constante por 25 min. Posteriormente, os tubos foram deixados em descanso para resfriamento à temperatura ambiente, e assim, o conteúdo deles foi transferido para tubo Falcon® e diluído para 20 mL com água ultrapura (resistividade de $18.2 \text{ M}\Omega \text{ cm}$), obtida de um sistema de purificação Mili-Q (Milipore).

Para cada amostras de algas marinhas fez-se três replicatas do preparo de amostras, e posteriormente, o ICP-OES (Thermo Fisher Scientific, modelo ICAP 6000) foi usado para quantificar os analitos. Os parâmetros operacionais usados nas análises estão dispostos no quadro 2 e as linhas usadas para as determinações de cada elemento na tabela 1.

Quadro 2. Parâmetros operacionais usados nas análises.

Nebulizador	Concêntrico
Câmara de spray	Ciclônica
Potência de radiofrequência	1150 W

Vazão do gás do plasma de argônio	12 L min ⁻¹
Vazão do gás auxiliar de argônio	1,00 L min ⁻¹
Vazão do gás de nebulização de argônio	0,6 L min ⁻¹
Fluxo de introdução de amostra	1,4 L min ⁻¹
Diâmetro interno do tubo central	2 mm

Fonte: Próprio autor.

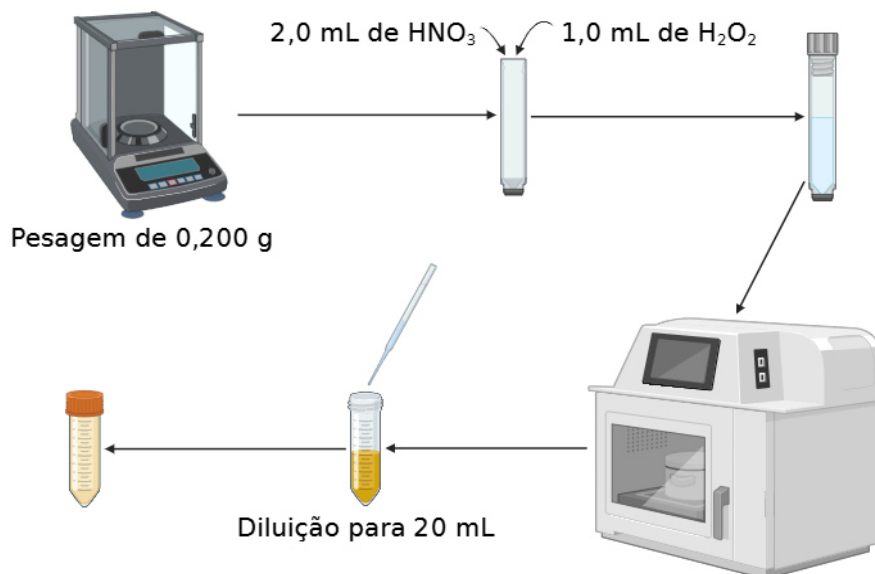
Tabela 1. Leituras utilizadas para determinação dos elementos-traços no ICP-OES.

Elementos	Linhas das leituras (nm)	Elementos	Linhas das leituras (nm)
Al	308,2	Ni	341,4
As	193,7	P	177,4
Ba	233,5	Pb	220,3
Bi	223,0	Sb	217,5
Cd	214,4	Sr	346,4
Co	228,6	V	292,4
Cr	267,7	Zn	206,2
Mo	204,5		

Fonte: Próprio autor.

O material de referência certificado (macroalga marrom, *Fucus vesiculosus*, “Seaweed bladderwrack”, CD-200) foi submetido ao mesmo procedimento analítico das macroalgas. Para avaliar a veracidade das análises de macroalgas, determinou-se o teor total de alguns elementos do material certificado, aplicando o mesmo procedimento para a amostra de material certificado (MRC).

Imagem 1. Esquema de representação da decomposição ácida assistida por micro-ondas.



Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Análise da fração bioacessível dos elementos

Os fluídos gástrico e intestinal foram usados para simular as condições do estômago e do intestino delgado, a fim de garantir a atividade enzimática, os fluídos foram preparados imediatamente antes do experimento, e os ajustes de pH nos estágios digestivos foram feitos, em cada etapa, com soluções de HCl (Vetec) $0,6 \text{ mol L}^{-1}$ e NaOH (Vetec) $1,0 \text{ mol L}^{-1}$. A solução gástrica foi simulada em meio de HCl $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ com solução de pepsina $10\% \text{ m v}^{-1}$. A simulação da solução intestinal foi feita com $1,25\% \text{ m v}^{-1}$ de sais biliares (Sigma) em meio de NaHCO_3 (Sigma) $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e $0,2\% \text{ m v}^{-1}$ de pancreatina (Sigma) em uma suspensão composta.

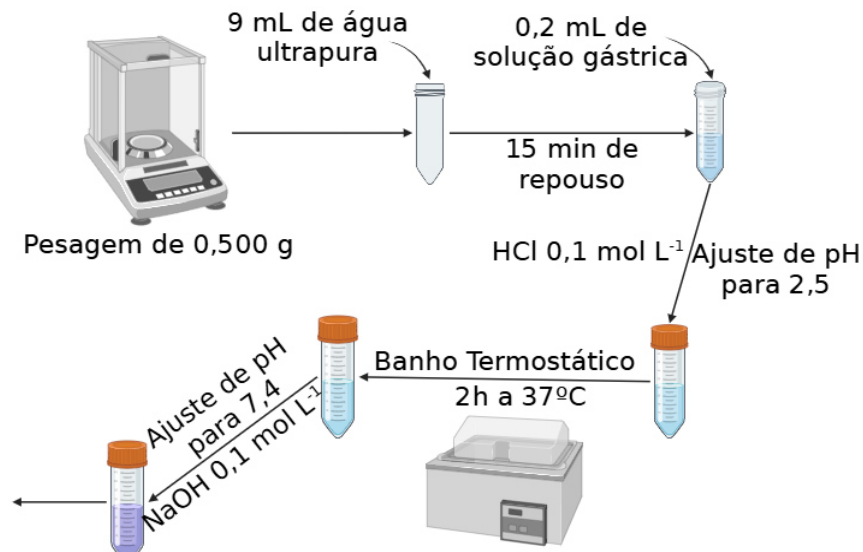
A análise foi executada *in vitro*, com base em condições gastrointestinais, segundo o método proposto por LAPARRA *et al.*, 2003. A pesagem de aproximadamente $0,500 \text{ g}$ da amostra foi realizada em tubo Falcon, a qual fez-se acréscimo de $9,5 \text{ mL}$ de água ultrapura e Alfa-amilase (Sigma) 3701 U mL^{-1} , o pH da solução foi ajustado para 2,0, em virtude da adição de HCl $0,6 \text{ mol L}^{-1}$ e $200 \mu\text{L}$ de uma solução de fluido gástrico, fez-se o selamento com plástico filme e fechou-se com tampa.

Os frascos com as amostras foram submetidos a uma temperatura de 37°C e incubadas, por um período de 2h, com agitação de 150 rpm na posição horizontal. Na etapa seguinte a atividade enzimática da pepsina foi interrompida ao ser exposta a um banho de gelo por 15 min. Em seguida, um volume de $2,5 \text{ mL}$ de fluido intestinal foi adicionado à solução e o pH foi ajustado para 7,0 com solução de $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ de NaOH, uma segunda

incubação foi realizada nas mesmas condições da 1ª (temperatura de 37°C, agitação de 150 rpm por 2h).

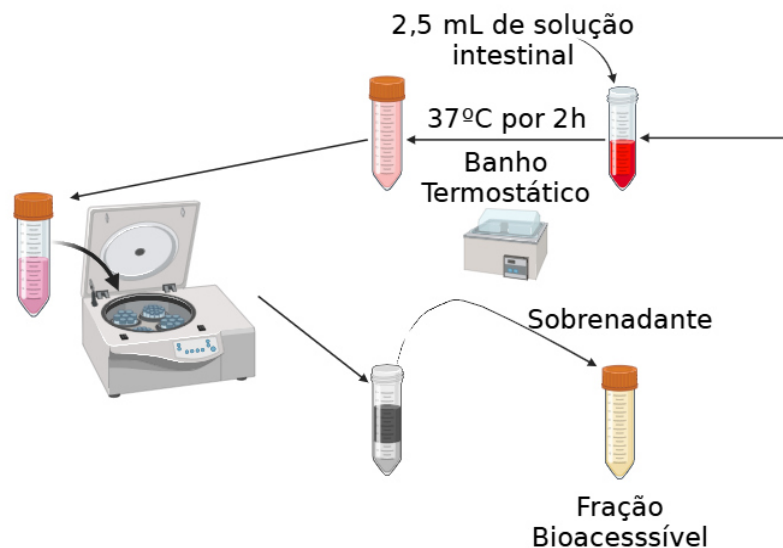
Por fim, fez-se o uso de banho de gelo para interrupção novamente da atividade enzimática, realizou-se a separação do sobrenadante da fração residual com centrifugação a 3600 rpm por 20 min. Todas as amostras foram feitas em triplicatas.

Imagem 2. Esquema de simulação da digestão gástrica.



Fonte: Próprio autor.

Imagem 3. Esquema de simulação da digestão intestinal.



Fonte: Próprio autor.

5 RESULTADOS

O material certificado tem o valor tabelado apenas para alguns elementos (As, Cd, Pb e Zn), por isso a comparação com todos os elementos não é passível de ser realizado. Os elementos tiveram uma boa porcentagem de recuperação, ficando acima de 80%, exceto para o selênio, cuja taxa de recuperação não foi determinada, pois a concentração encontrada foi inferior ao limite de detecção do equipamento usado (tabela 2).

Tabela 2. Recuperação obtida para elementos do material certificado.

Elementos	Taxa de Recuperação (%)
As	82,8
Cd	80,0
Pb	98,0
Se	-
Zn	89,3

Fonte: Próprio autor.

A partir das análises realizadas, obteve-se os resultados para a concentração total dos elementos químicos nas amostras de macroalgas, a concentração bioacessível e o teor bioacessível, em relação a totalidade dos elementos.

5.1 Concentração total dos elementos inorgânicos

A tabela 3 traz os valores de concentrações determinados por ICP-OES, após a decomposição ácida assistida por aquecimento em forno micro-ondas.

Tabela 3. Concentração total de elementos inorgânicos nas macroalgas.

Elementos	Amostras de macroalgas		
	<i>Sargassum vulgare</i>	<i>Ulva lactuca</i>	<i>Gracilaria birdiae</i>
	Concentração média \pm Desvio Padrão (mg kg ⁻¹)		
Al	823 \pm 7	322 \pm 13	291 \pm 16
As	34,8 \pm 1,9	2,56 \pm 0,11	5,04 \pm 0,34
Ba	26,6 \pm 1,4	2,68 \pm 0,67	0,983 \pm 0,034
Bi	< LD	<LD	<LD
Cd	0,159 \pm 0,01	0,152 \pm 0,005	0,421 \pm 0,015
Co	1,53 \pm 0,07	0,384 \pm 0,030	0,663 \pm 0,039
Cr	9,89 \pm 1,58	10,5 \pm 1,9	2,05 \pm 0,36

Mo	0,526±0,013	0,194±0,013	0,338±0,015
Ni	7,65±0,12	5,83±1,03	1,15±0,20
P	1,06x10 ³ ±15	883±12	1,22x10 ³ ±49
Pb	1,55±0,10	0,348±0,009	0,474±0,050
Sb	<LD	0,323±0,109	0,274±0,042
Sn	<LD	<LD	<LD
Sr	768±20	73,3±2,9	29,6±3,0
V	4,86±0,37	1,13±0,05	2,02±0,15
Zn	10,8±0,8	4,98±0,34	17,7±1,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

A concentração de alumínio na *Sargassum vulgare* é significativamente maior do que nas outras espécies, essa concentração pode apresentar risco para a saúde humana se for superior ao recomendável, a ingestão semanal tolerável provisória (ISTP) para o alumínio é 2 mg kg⁻¹ de peso corporal, assim, considerando o consumo de 20 gramas por dia, indivíduos com peso superiores a 57,70 kg poderiam estar em risco. A concentração de alumínio é mais reduzida nas outras amostras, o que as torna menos perigosas.

O arsênio total determinado nas amostras apresenta uma concentração que traz preocupações, acerca dos efeitos que ele poderá ocasionar no organismo do consumidor final. A concentração de metais em macroalgas não tem regulamentação específica no Brasil, embora tenha para frutos do mar (tais como, molusco, lagosta e outros crustáceos). A ANVISA (2022) estabelece o limite máximo tolerável (LMT) como 1,00 mg kg⁻¹ para moluscos e crustáceos. A partir dos valores encontrados percebe-se que as 3 amostras estudadas estão acima do limite recomendável, sendo a *Ulva lactuca*, a de menor quantidade de As, o que pode acarretar riscos ao consumo direto ou indireto, destaca-se que algumas macroalgas podem ter parte de seus componentes usados devido a capacidade de atuação como agentes espessantes, contribuindo, então, para a quantidade de elementos presentes em sorvetes e geleias, por exemplo.

A quantidade de bário presente na *Gracilaria birdiae* e na *Ulva lactuca* é significativamente menor do que na *Sargassum vulgare*. O limite de exposição oral de bário pode ser calculado indiretamente, a partir do valor especificado pela FDA (2022), sendo igual a 5,11 mg kg⁻¹, considerando o consumo semanal, as espécies *Gracilaria birdiae* e *Ulva lactuca*, mostram uma segurança com respeito a ingestão de Ba. Para a outra espécie seu consumo pode ser negativo para a saúde humana.

Para o cádmio, as concentrações totais determinadas para as amostras ($<0,5 \text{ mg kg}^{-1}$) não causam riscos pelo consumo, uma vez que o LMT para crustáceos e moluscos (exemplos de frutos do mar) é, respectivamente $0,50 \text{ mg kg}^{-1}$ e $2,00 \text{ mg kg}^{-1}$. Em relação a produtos como sorvetes a base de frutas, sorvetes de leite ou creme são $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$ e para sorvetes de água saborizados é $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$, o que pode trazer uma apreensão em aplicações das macroalgas em sorvetes (ANVISA, 2022).

A administração oral de cloreto de cobalto, na faixa de concentração $3-4 \text{ mg kg}^{-1}$ de peso corporal em crianças (como tratamento de anemia falciforme), resultou em efeitos goitrogênicos (dificuldade na absorção de iodo, podendo ocasionar hipotireoidismo), as concentrações de Co nas macroalgas estão em níveis seguros ($<2,0 \text{ mg kg}^{-1}$), menos do que o necessário para causar malefícios (BARCELOUX, 1998).

Um estudo com ratos mostrou que o limite de exposição diário, via oral, ao cromo é $10,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (FDA, 2022), por comparação com os valores encontrados nas algas, tem-se uma proximidade aos limites para a *Sargassum vulgare* ($9,89 \text{ mg kg}^{-1}$) e a *Ulva lactuca* ($10,48 \text{ mg kg}^{-1}$), entretanto, ambas estão com concentrações seguras, análogo a *Gracilaria birdiae* que apresentou uma quantidade bem menor.

A quantidade humana dietética mínima de molibdênio foi estimada em $0,025 \text{ mg}$ por dia, com base na ingestão diária segura e adequada, estimou-se um limite de $0,075$ a $0,250 \text{ mg}$ por dia. Assim, pelos resultados a *Ulva lactuca* estaria dentro de uma faixa adequada, enquanto as outras amostras podem apresentar riscos, visto que não há um grande excesso, porém estudos indicaram efeitos adversos, em ratos e coelhos, com semanas de exposições contínuas (TALLKVIST & OSKARSSON, 2015).

Segundo relatório da FDA (2022), um estudo com ratos indicou que o menor nível de níquel, onde se causava efeitos adversos era $2,2 \text{ mg kg}^{-1}$ por dia, analisando a concentração encontradas nas algas, tem-se motivos para preocupações, pois as quantidades estão acima do especificado no relatório ($>5,0 \text{ mg kg}^{-1}$), exceto para a *Gracilaria birdiae* que traz um valor mais reduzido.

Gracilaria birdiae apresentou a maior quantidade fósforo (1220 mg kg^{-1}), entre as amostras, a qual é um dos poucos elementos estudados em que se teve essa observação, pelo mostrado na tabela. Observa-se que a *Ulva lactuca* foi a única amostra com concentração de P inferior a 1000 mg kg^{-1} .

A ANVISA (2022) regula o LMT de chumbo, em alguns frutos marinhos, tais como moluscos bivalves ($1,50 \text{ mg kg}^{-1}$) e crustáceos ($0,50 \text{ mg kg}^{-1}$), pelos dados apresentados, apesar da *Sargassum vulgare* ter a maior concentração entre as espécies ($1,55 \text{ mg kg}^{-1}$),

trazendo o risco de intoxicação por Pb, para outras amostras de macroalgas a concentração é inferior a $0,50 \text{ mg kg}^{-1}$, o que deixa o consumidor final menos propenso a efeitos tóxicos para o chumbo.

A Organização Mundial da Saúde (2022) propõe um limite de $0,0006 \text{ mg}$ por kg de peso corporal por dia como nível máximo de exposição recomendável (abreviado como ingestão diária total) para o antimônio. Apesar de se ter uma quantidade reduzida de Sb nas amostras, há o risco de malefícios pelo consumo das espécies vistas, visto que a concentração está muito acima da ingestão diária total ($>0,20 \text{ mg kg}^{-1}$), exceto para a *Sargassum vulgare*, cuja concentração de Sb está abaixo do limite de detecção do equipamento, portanto, em quantidade muito reduzida.

A *Sargassum vulgare* apresentou uma concentração de Sr superior a 10 vezes a quantidade na *Ulva lactuca*, isso é uma observação interessante, que ilustra a diferença que pode haver entre espécies de filos distintos. Não há relatos de sobredose de estrôncio em fontes literárias, assim comparações com esses valores não foi possível.

O vanádio tem um valor limite para efeitos adversos observáveis igual $0,12 \text{ mg}$ por kg de peso corporal diariamente, então em adultos (supondo indivíduos com peso mínimo de 40 kg) há uma segurança no consumo de *Sargassum vulgare*, cuja concentração total é a mais elevada entre as espécies ($4,86 \text{ mg kg}^{-1}$), em relação ao V (FDA, 2022).

O zinco é um elemento essencial ao metabolismo, intoxicação por este elemento não é comum, embora sobredoses possam gerar efeitos agudos que necessitem intervenção médica (SANDSTEAD, 1981; CRUZ & SOARES, 2009). A *Gracilaria birdiae* apresenta a maior concentração de Zn, dentre as amostras estudadas, ainda assim, essa quantidade não é elevada o suficiente para ser considerada perigosa.

Sargassum vulgare e *Ulva lactuca* mostraram concentrações similares em diversos elementos químicos (Cd, Cr, Cu, Mo, Ni e Pb), isso pode ser um indicativo da influência da localização a qual fez-se a coleta das amostras.

SÁNCHEZ-RODRIGUEZ *et al* (2001) realizou um estudo no México com diversas amostras de algas, entre elas *Sargassum sinicola* e *Gracilaria pachidermatica*. Em termos comparativos das concentrações de elementos traços determinados para as respectivas espécies detectou-se, de forma geral, que as amostras *Sargassum sinicola* (macroalga marrom) e *Gracilaria pachidermatica* (macroalga vermelha) apresentaram um maior teor dos elementos, com exceção, todavia, do As ($0,23 \text{ mg kg}^{-1}$ e $13,4 \text{ mg kg}^{-1}$ para as macroalgas vermelha e marrom, respectivamente), do Cr ($7,17 \text{ mg kg}^{-1}$ e $2,63 \text{ mg kg}^{-1}$ para as macroalgas vermelha e marrom, respectivamente), do Co e do Zn ($1,02 \text{ mg kg}^{-1}$ e 26 mg kg^{-1} a para

macroalga marrom, respectivamente). SEEPERSAUD *et al* (2018) fez um estudo em Trinidad e Tobago com a *Sargassum vulgare*, as concentrações dos elementos (entre eles Cd, Ni, Pb e Zn) obtidas foram mais elevadas do que a desse estudo, com exceção do Ni que teve um valor próximo ($7,59 \text{ mg kg}^{-1}$).

TODOROV, WALLE & CONKLIN (2022) analisou amostras de macroalgas adquiridas em mercados dos Estados Unidos, obtendo concentrações dos elementos mais elevadas para a *Ulva lactuca*, exceto para o Cr ($1,98 \text{ mg kg}^{-1}$), Ni ($2,96 \text{ mg kg}^{-1}$), Sb (inferior a $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$) e próxima a Sr ($58,3 \text{ mg kg}^{-1}$).

RIBEIRO *et al* (2024) determinou a variação de concentração dos elementos totais, nas estações chuvosas e secas, em algumas amostras de macroalgas, entre elas: *Sargassum vulgare*, *Ulva lactuca* e *Gracilaria birdiae*. Alguns elementos expuseram distinções aos valores de concentração na estação seca e na estação chuvosa, tais como Cr e V. Essas distinções, por exemplo, a concentração de cromo na amostra de alga *Ulva lactuca* deste trabalho ($10,48 \text{ mg kg}^{-1}$) é significativamente mais elevada da concentração encontrada, para a mesma espécie, na estação seca e chuvosa ($0,35$ e $1,92 \text{ mg kg}^{-1}$). Isso é uma evidência da influência da sazonalidade na composição de macroalgas. Outros aspectos que podem exercer impacto significativo na quantidade de elementos nas algas são: os ambientes aquáticos (oceanos, lagoas e rios) e terrestres (solo e rochas), a diversidade entre as espécies, a morfologia, as necessidades biológicas e a organização celular.

5.2 Bioacessibilidade

O experimento *in vitro* tornou possível a análise por bioacessibilidade das algas feófitas, clorófitas e rodófitas, que resultaram nos dados dispostos na tabela abaixo.

Tabela 4. Concentração e teor bioacessíveis das espécies químicas nas amostras.

Amostras de macroalgas						
Elementos	<i>Sargassum vulgare</i>		<i>Ulva lactuca</i>		<i>Gracilaria birdiae</i>	
	C (mg kg^{-1})	Teor bioacessível (%)	C (mg kg^{-1})	Teor bioacessível (%)	C (mg kg^{-1})	Teor bioacessível (%)
Al	$4,45 \pm 1,54$	$0,54 \pm 0,00$	$9,10 \pm 2,50$	$2,82 \pm 0,01$	$14,1 \pm 0,7$	$4,82 \pm 0,00$
As	$11,5 \pm 0,3$	$33,2 \pm 0,02$	$0,984 \pm 0,028$	$38,4 \pm 0,02$	$3,00 \pm 0,08$	$59,6 \pm 0,03$
Ba	$7,61 \times 10^{-2}$	$0,29 \pm 0,00$	$0,842 \pm 0,121$	$31,38 \pm 0,05$	$1,02 \pm 0,04$	$104,09 \pm 0,3$

	$\pm 1,59 \times 10^{-2}$					
Bi	<LD	-	<LD	-	<LD	-
Cd	<LD	-	<LD	-	$1,73 \times 10^{-2}$	$4,10 \pm 0,00$
Co	<LD	-	<LD	-	$\pm 1 \times 10^{-3}$	
Cr	<LD	-	<LD	-	$0,282 \pm 0,004$	$42,47 \pm 0,03$
Cu	<LD	-	<LD	-	<LD	-
Mo	<LD	-	<LD	-	<LD	-
Ni	$0,181 \pm 0,001$	$2,36 \pm 0,00$	$0,204 \pm 0,033$	$3,50 \pm 0,01$	$7,82 \times 10^{-2}$	$6,81 \pm 0,01$
P	215 ± 88	$20,30 \pm 0,08$	329 ± 10	$37,27 \pm 0,02$	$\pm 2,33 \times 10^{-2}$	
Pb	$0,148 \pm 0,004$	$9,55 \pm 0,01$	$0,316 \pm 0,017$	$90,79 \pm 0,10$	968 ± 6	$79,47 \pm 0,01$
Sb	<LD	-	<LD	-	$0,389 \pm 0,097$	$81,98 \pm 0,20$
Sn	<LD	-	<LD	-	<LD	-
Sr	$31,1 \pm 7,0$	$4,06 \pm 0,01$	$18,7 \pm 0,3$	$25,54 \pm 0,01$	<LD	-
V	<LD	-	<LD	-	$15,4 \pm 0,9$	$52,14 \pm 0,02$
Zn	<LD	-	$4,07 \pm 0,35$	$81,68 \pm 0,08$	$0,673 \pm 0,057$	$33,31 \pm 0,01$
					$8,12 \pm 0,23$	$45,92 \pm 0,03$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores apontam que uma reduzida parcela do alumínio é bioacessível, a *Sargassum vulgare* que apresentou a maior concentração total de Al tem a concentração e o teor bioacessível mais baixa, ao passo que a *Gracilaria birdiae* com a menor concentração total entre as 3 amostras mostra o maior teor e concentração bioacessível.

A *Gracilaria birdiae* traz a mais elevada fração de arsênio, potencialmente capaz de ser absorvida, próxima a 60%. As macroalgas marrom e verde tem teores semelhantes, respectivamente, iguais a 33,19% e 38,44% do total. As porcentagens encontradas não são constantes para todas as algas de iguais espécies, embora seja possível inferir que uma concentração muito elevada do elemento poderá ocasionar altas concentrações bioacessíveis, mantendo um teor razoável em relação a totalidade.

O bário bioacessível na macroalga vermelha tem o maior teor, praticamente sua totalidade, enquanto para as outras amostras, essas quantidades são inferiores a 40%, assim pouco do Ba, de fato, pode ser absorvido por elas. Os compostos de bário são, normalmente, poucos solúveis em água, sendo isso um fator de possível influência para a bioacessibilidade desse metal em alimentos (KRAVCHENKO, 2014).

Cádmio e cobalto estão, principalmente, em suas formas não bioacessíveis. Suas concentrações para as macroalgas marrom e verde foram abaixo do limite de detecção do ICP-OES, ao passo que a macroalga vermelha mostrou valores reduzidos, pela fração bioacessível, observa-se que ambos podem ser passíveis de serem absorvidos, sendo o cobalto o de teor bioacessível mais elevado (cerca de 10 vezes maior).

A *Sargassum vulgare* e a *Ulva lactuca* têm uma concentração total de níquel superior ao valor mínimo onde se tem efeitos adversos, todavia, esse Ni é potencialmente capaz de ser absorvido, de forma muito reduzida, devido a sua bioacessibilidade (inferior a 5% do total). Para a macroalga vermelha, não foi observado uma grande distinção (6,81%).

O fósforo tem as maiores quantidades entre os elementos, tanto em termos totais, quanto em quantidades bioacessíveis, e está com uma concentração capaz de ser usada para as funções biológicas. Há, para este elemento, uma surpresa, pois espera-se que, devido a importância nutricional do P, por exemplo no ácido ribonucleico, ácido desoxirribonucleico, além do fosfato, haja uma elevada absorção, entretanto para a macroalga marrom (*Sargassum vulgare*) e verde (*Ulva lactuca*) a potencial absorção é inferior a 40%. Para a macroalga vermelha (*Gracilaria birdiae*) que já tem a maior concentração total, o teor bioacessível (79,47%) alarga ainda mais a diferença para as outras amostras.

O chumbo apresentou uma elevada fração bioacessível, exceto na *Sargassum vulgare*, que foi inferior a 10% (significativamente diferente das outras espécies), mostrando que, apesar de ela ter a maior concentração de Pb total, apenas uma pequena parte é capaz de ser absorvida. Enquanto a *Ulva lactuca* e *Gracilaria birdiae* que tinham menores quantidades do elemento podem assimilá-lo em grande parte.

O estrôncio total na *Sargassum vulgare* está muito elevado, porém com o ensaio da bioacessibilidade, sua quantidade capaz de ser absorvida é significativamente menor. O seu valor de concentração bioacessível apenas é maior do que nas outras espécies, pois a quantidade total está muito mais elevada do que as outras, entretanto, a potencial absorção observada é inferior a 5%. Analisando, exclusivamente, o teor bioacessível nas outras amostras percebe-se que ela é cerca de 5 vezes maior, para a *Ulva lactuca* (25,54%), e 10 vezes maior, para a *Gracilaria birdiae* (52,14%).

O vanádio, que apresentou uma concentração inferior a 5 mg kg⁻¹ total para as amostras, não teve uma concentração passível de ser quantificada pelo equipamento, para as amostras de macroalgas marrom e verde. A macroalga vermelha, *Gracilaria birdiae*, diferentemente, pôde ter quase a terça parte do V total de forma bioacessível.

A *Ulva lactuca*, entre as espécies analisadas, apresentou o maior teor bioacessível de Zn, onde uma quantidade de 81,68% é capaz de ser absorvida no organismo humano, por isso é uma boa fonte de zinco na alimentação. Para a macroalga vermelha, esta quantidade foi levemente menor do que 50%, ao passo que a macroalga marrom traz uma concentração bioacessível menor, inferior ao limite de quantificação do equipamento.

Nas 3 amostras de macroalgas analisadas, bismuto, cromo, molibdênio e estanho tiveram uma quantidade potencialmente capaz de ser absorvida inferior ao limite de detecção do equipamento, considerando um efeito tóxico para a saúde humana, uma baixa concentração dessas espécies transmite uma informação positiva.

Para a *Sargassum vulgare* os elementos com maiores teores bioacessíveis são arsênio e fósforo, com teores próximos, entretanto, nota-se que as frações são, de forma geral, reduzidas. O chumbo e zinco são os de maiores teores na *Ulva lactuca*, a qual estão presentes com mais de 50% de bioacessibilidade, em relação ao total. E na *Gracilaria birdiae* os elementos com maiores teores de bioacessibilidade, superiores a 50%, são Ba, P, Pb e Sr.

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Os resultados apresentados ilustram um aspecto relevante dentro da temática de segurança alimentar no consumo alimentos marinhos e seus derivados, entretanto, há uma vacância relevante, referente às quantidades totais de elementos que podem ser absorvidas pelo organismo humano e as que são de fato absorvidas pelo organismo. Apesar de se ter concentrações de alertas para alguns elementos nas amostras analisadas, a fração bioacessível é reduzida dentro do contexto geral.

É válido refletir que para uma melhor segurança no consumo de tais organismos, necessita-se de diretrizes que regulamentam as quantidades seguras de espécies químicas que podem ser ingeridas pela alimentação, isso por sua vez, é disponibilizado com base, nos conhecimentos obtidos por bioacessibilidade, biodisponibilidade, especiação química, dentre outros.

A ausência de uma regulação brasileira específica para consumo seguro de metais em macroalgas, faz com que se tenha uma fiscalização inexistente, deixando como referência de ingestão o valor dos limites máximos toleráveis, entretanto esta avaliação não é feita em consideração o ambiente da qual o alimento provém, e nem a forma de ingestão.

Em acréscimo, as macroalgas podem servir de alimento para outros organismos aquáticos, fazendo com que as diversas espécies químicas presentes no organismo sejam passadas pela cadeia alimentar para níveis tróficos superiores, atingindo a espécie humana também de forma indireta.

Averiguando a variação da concentração, devido as distintas estações e épocas anuais, estudos complementares, podem ser realizados para que seja possível uma visualização mais ampla para o conhecimento de como a concentração total varia em longos períodos de tempos, assim como a influência que as alterações no meio e clima podem ocasionar.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Instrução Normativa Nº 160**. Disponível em: <<https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=433607>>. Acesso em: 22 jul. 2025.
- ANDRADE, Lucas. Algas Vermelhas, Verdes e Marrons: Diferenças e Usos em Diversas Indústrias. **Focus Guia**. [s.l], 2025. Disponível em: < <https://focusguia.com/2025/04/07/algas-vermelhas-verdes-e-marrons-diferencas-e-usos-em-diversas-industrias/> >. Acesso em: 29 jun. 2025.
- BARCELOUX, Donald G.; BARCELOUX, Donald. Cobalt. **Journal of toxicology: Clinical toxicology**, v. 37, n. 2, p. 201-216, 1999.
- CATALANI, Lidiane A.; KANG, Éster Mi Sun; DIAS, Maria C. Gonçalves; MACULEVICIUS, Janete. Fibras alimentares. **Rev Bras Nutr Clin**, v. 18, n. 4, p. 178-82, 2003.
- CIMA, Francesca et al. Tin: environmental pollution and health effects. **Encyclopedia of environmental health**, v. 10, p. 351-359, 2011.
- COMISSÃO EUROPEIA. **(CE) nº 1881/2006.**, 19 dez. 2006. Disponível em: < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006R1881-20230326>>. Acesso em: 24 jun. 2025.
- COZZOLINO, Silvia M. Franciscato. Biodisponibilidade de minerais. **Revista de nutrição**, v. 10, p. 87-98, 1997.
- CRUZ, Josilaine B. Fernandes; SOARES, Henrique Freire. Uma revisão sobre o zinco. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 15, n. 1, p. 207-222, 2011.
- DA SILVA JUNIOR, Ediu Carlos et al. Content, speciation and in vitro bioaccessibility of trace elements in seaweeds and derived food products. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 118, p. 105162, 2023.
- DAS, Kusal K.; DAS, Swastika N.; DHUNDASI, Salim A. Nickel: molecular diversity, application, essentiality and toxicity in human health. **Biometals: molecular structures**,

binding properties and applications. New York, NY: Nova Science Publishers, v. 20, p. 33-58, 2010.

DAVIS, T. A.; VOLESKY, B.; VIEIRA, R. H. S. F. Sargassum seaweed as biosorbent for heavy metals. **Water research**, v. 34, n. 17, p. 4270-4278, 2000.

EGOROVA, Ksenia S.; ANANIKOV, Valentine P. Toxicity of metal compounds: knowledge and myths. **Organometallics**, v. 36, n. 21, p. 4071-4090, 2017.

ELSER, James J. Phosphorus: a limiting nutrient for humanity?. **Current opinion in biotechnology**, v. 23, n. 6, p. 833-838, 2012.

EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY (EFSA). Safety of aluminium from dietary intake-scientific opinion of the panel on food additives, flavourings, processing aids and food contact materials (AFC). **EFSA Journal**, v. 6, n. 7, p. 754, 2008.

EXLEY, Christopher. Human exposure to aluminium. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 15, n. 10, p. 1807-1816, 2013.

FDA. Q3D(R2) ELEMENTAL IMPURITIES Guidance for Industry. **Food and Drug Administration**, [s.l: s.n.]. 2022. Disponível em:
<<https://www.fda.gov/media/148474/download>>. Acesso em: 20 jul. 2025.

GACESA, Peter. Alginates. **Carbohydrate polymers**, v. 8, n. 3, p. 161-182, 1988.

GENCHI, Giuseppe et al. The effects of cadmium toxicity. **International journal of environmental research and public health**, v. 17, n. 11, p. 3782, 2020.

GINÉ-ROSIAS, Maria Fernanda Georgina. Espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente:(ICP-AES). **Piracicaba: CPG-CENA-USP**, 1998.

HANS, Nidhi; MALIK, Anushree; NAIK, Satyanarayan. Antiviral activity of sulfated polysaccharides from marine algae and its application in combating COVID-19: Mini review. **Bioresource technology reports**, v. 13, p. 100623, 2021.

HOU, Xiandeng; JONES, Bradley T. Inductively coupled plasma/optical emission spectrometry. **Encyclopedia of analytical chemistry**, v. 2000, p. 9468-9485, 2000.

HOUSE, William A. Trace element bioavailability as exemplified by iron and zinc. **Field Crops Research**, v. 60, n. 1-2, p. 115-141, 1999.

IAIN, Samson M.; CHASSÉ, Mathieu. Scandium. **Encyclopedia of Geochemistry**, p. 1-4, 2016.

KRAVCHENKO, Julia et al. A review of the health impacts of barium from natural and anthropogenic exposure. **Environmental geochemistry and health**, v. 36, n. 4, p. 797-814, 2014.

LAHAYE, Marc; ROCHAS, Cyrille. Chemical structure and physico-chemical properties of agar. **Hydrobiologia**, v. 221, n. 1, p. 137-148, 1991.

LAPARRA, José Moisés et al. Estimation of arsenic bioaccessibility in edible seaweed by an in vitro digestion method. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 20, p. 6080-6085, 2003.

MCHUGH, D. J. A guide to the seaweed industry. Rome: **Food And Agriculture Organization Of The United Nations**, 2003.

MORRISON, G. H., CHENG, K. L., GRASSERBEUER, M. General Aspects of Trace Analytical Methods-IV. Recommendations for Nomenclature, Standard Procedures and Reporting of Experimental Data for Surface Analysis. **International Union Of Pure And Applied Chemistry**. v. 51, n. 11, p. 2243–2250, 1979.

MOSTAFAVI, Fatemeh Sadat; ZAEIM, Davood. Agar-based edible films for food packaging applications-A review. **International journal of biological macromolecules**, v. 159, p. 1165-1176, 2020.

MÜLLER, José Miguel; SANTOS, Renata Lopes dos; BRIGIDO, Rivelí Vieira. Produção de alginato por microrganismos. **Polímeros**, v. 21, p. 305-310, 2011.

NECAS, Jiri et al. Carrageenan: a review. **Veterinarni medicina**, v. 58, n. 4, p. 187-205, 2013.

NIELSEN, S. Pors. The biological role of strontium. **Bone**, v. 35, n. 3, p. 583-588, 2004.

OLIVEIRA, Daniela Moura de; BASTOS, Deborah Helena Markowicz. Biodisponibilidade de ácidos fenólicos. **Química Nova**, v. 34, p. 1051-1056, 2011.

ÖTLEŞ, Semih; ÇAĞINDI, Özlem. Health importance of arsenic in drinking water and food. **Environmental geochemistry and health**, v. 32, n. 4, p. 367-371, 2010.

PALATNIK, Ruslana Rachel; ZILBERMAN, David. Economics of natural resource utilization-the case of macroalgae. In: **International Conference on Dynamics, Games and Science**. Cham: Springer International Publishing, 2014. p. 1-21.

PATTEE, Oliver H.; PAIN, Deborah J. Lead in the environment. In: **Handbook of ecotoxicology**. CRC Press, 2002. p. 397-432.

PAZ, S. et al. Toxic metals (Al, Cd, Pb and Hg) in the most consumed edible seaweeds in Europe. **Chemosphere**, v. 218, p. 879–884, 1 mar. 2019.

PEÑALVER, Rocío et al. Seaweeds as a functional ingredient for a healthy diet. **Marine drugs**, v. 18, n. 6, p. 301, 2020.

PEREIRA, Leonel. Macroalgae. **Encyclopedia**, v. 1, n. 1, p. 177-188, 2021.

PERIFERAKIS, Argyrios et al. Availability, toxicology and medical significance of antimony. **International journal of environmental research and public health**, v. 19, n. 8, p. 4669, 2022.

REHDER, Dieter. Vanadium. Its role for humans. **Interrelations between essential metal ions and human diseases**, p. 139-169, 2013.

RIBEIRO, Emanuelle E. V. et al. Profile of inorganic elements of seaweed from the Brazilian Northeast coast. **Marine Pollution Bulletin**, v. 202, p. 116413, 2024.

RÜDEL, Heinz. Case study: bioavailability of tin and tin compounds. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 56, n. 1, p. 180-189, 2003.

SAMSON, Iain M.; CHASSÉ, Mathieu. Scandium. In: **Encyclopedia of geochemistry**. Springer, Cham, 2016. p. 1-5.

SÁNCHEZ-RODRIGUEZ, I. et al. Elemental concentrations in different species of seaweeds from Loreto Bay, Baja California Sur, Mexico: implications for the geochemical control of metals in algal tissue. **Environmental Pollution**, v. 114, n. 2, p. 145-160, 2001.

SANDSTEAD, Harold H. Zinc in human nutrition. In: **Disorders of mineral metabolism**. Academic Press, p. 93-157, 1981.

SAURA-CALIXTO, F.; SERRANO, J.; GOÑI, I. Intake and bioaccessibility of total polyphenols in a whole diet. **Food Chemistry**, v. 101, n. 2, p. 492–501, 2007.

SEEPERSAUD, Mohindra A. et al. Environmental monitoring of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in *Sargassum filipendula* and *Sargassum vulgare* along the eastern coastal waters of Trinidad and Tobago, West Indies. **Journal of Applied Phycology**, v. 30, n. 3, p. 2143-2154, 2018.

SEIXAS, Tércia G.; DO A KEHRIG, Helena. O selênio no meio ambiente. **Oecologia Brasiliensis**, v. 11, n. 2, p. 264-276, 2007.

SELBY, H. H.; WHISTLER, Roy L. Agar. In: Industrial gums. **Academic Press**, p. 87-103, 1993.

SGARIONI, Mariana. Estrutura flutuante usa algas nativas para combater poluição das águas. **UOL**, Rio de Janeiro, 26 de fevereiro de 2025. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006R1881-20230326>>. Acesso em: 19 mai. 2025.

SHRIVASTAVA, Richa et al. Effects of chromium on the immune system. **FEMS immunology and medical microbiology**, v. 34, n. 1, p. 1-7, 2002.

SLIKKERVEER, A.; WOLFF, F. A. DE. Pharmacokinetics and Toxicity of Bismuth Compounds. **Medical toxicology and adverse drug experience**, v. 4, p. 303–323, 1989.

SMITH-SIMON, Cassandra; WILBUR, Sharon B.; HUGHES, Brian James. **Toxicological Profile for Beryllium**. US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1993.

STREIT, Nivia Maria et al. As clorofilas. **Ciência Rural**, v. 35, p. 748-755, 2005.

SUN, Hongzhe; ZHANG, Li; SZETO, Ka-Yee. Bismuth in medicine. **Metal ions in biological systems**, v. 41, p. 333-378, 2004.

TALLKVIST, Jonas; OSKARSSON, Agneta. Molybdenum. In: **Handbook on the Toxicology of Metals**. Academic Press, 2015. p. 1077-1089.

TAYLOR, Tammy P. et al. Beryllium in the environment: a review. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 38, n. 2, p. 439-469, 2003.

TODOROV, Todor I.; WOLLE, Mesay M.; CONKLIN, Sean D. Distribution of 26 major and trace elements in edible seaweeds from the US market. **Chemosphere**, v. 294, p. 133651, 2022.

TONG, Shilu; SCHIRNDING, Yasmin E. von; PRAPAMONTOL, Tippawan. Environmental lead exposure: a public health problem of global dimensions. **Bulletin of the world health organization**, v. 78, n. 9, p. 1068-1077, 2000.

TUMOLO, Marina et al. Chromium pollution in European water, sources, health risk, and remediation strategies: An overview. **International journal of environmental research and public health**, v. 17, n. 15, p. 5438, 2020.

VAHRENKAMP, Heinrich. Why does nature use zinc-a personal view. **Dalton transactions**, n. 42, p. 4751-4759, 2007.

VASCONCELOS, Andreanne Gomes; DE ARAÚJO, Karla Vasconcelos; SANTANA, Lucas de Araújo Bastos. Polissacarídeos extraídos de algas marinhas e suas aplicações biotecnológicas: uma revisão. **Revista Brasileira de Inovação Tecnológica em Saúde**. 2236-1103, 2015.

WAMBACH, Paul F.; LAUL, J. C. Beryllium health effects, exposure limits and regulatory requirements. **Journal of Chemical Health & Safety**, v. 15, n. 4, p. 5-12, 2008.

WANG, Runming; LI, Hongyan; SUN, Hongzhe. Bismuth: environmental pollution and health effects. **Encyclopedia of environmental health**, p. 415, 2019.

WORLD BANK. GLOBAL SEAWEED NEW AND EMERGING MARKETS REPORT 2023. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.worldbank.org>. Acesso em: 24 jun. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality**. 4. ed. Geneva: World Health Organization, p. 459-461, 2022.

ZORODDU, Maria Antonietta et al. The essential metals for humans: a brief overview. **Journal of inorganic biochemistry**, v. 195, p. 120-129, 2019.