

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Instituto de Ciências Exatas**

**Programa de Especialização em Estatística**

Ivan Monclaro Carneiro

**O crescimento vertical de *Sargassum* na área afetada pelo efluente térmico da Central  
Nuclear Almirante Álvaro Alberto**

Belo Horizonte 2023

Ivan Monclaro Carneiro

**O crescimento vertical de *Sargassum* na área afetada pelo efluente térmico da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto**

Monografia de especialização apresentada ao Programa de Especialização em Estatística da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Estatística.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Nogueira  
Demarqui

Belo Horizonte 2023

2023, Ivan Monclaro Carneiro.

Todos os direitos reservados.

Carneiro, Ivan Monclaro.

C289c O crescimento vertical de Sargassum na área afetada pelo efluente térmico da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto [recurso eletrônico] / Ivan Monclaro Carneiro —2023.

1 recurso online (26 f. il, color.): pdf.

Orientador: Fábio Nogueira Demarqui.

Monografia (especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Estatística

Referências: 23-26.

1. Estatística. 2. Algas. 3. Bioindicador. 4. Impacto ambiental.

II. Demarqui, Fábio Nogueira. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Estatística. III. Título.

CDU 519.2 (043)



**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Instituto de Ciências Exatas**

E-mail: [pgest@ufmg.br](mailto:pgest@ufmg.br)  
Tel: 3409-5923 – FAX:

**Departamento de Estatística**  
**P Programa de Pós-Graduação / Especialização**  
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha  
31270-901 – Belo Horizonte – MG

**ATA DO 307ª. TRABALHO DE FIM DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA DE IVAN MONCLARO CARNEIRO.**

Aos treze dias do mês de setembro de 2023, às 09:15 horas, com utilização de recursos de videoconferência a distância, reuniram-se os professores abaixo relacionados, formando a Comissão Examinadora homologada pela Comissão do Curso de Especialização em Estatística, para julgar a apresentação do trabalho de fim de curso do aluno **Ivan Monclaro Carneiro**, intitulado: “O crescimento vertical de Sargassum na área afetada pelo efluente térmico da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto”, como requisito para obtenção do Grau de Especialista em Estatística. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Professor Fábio Nogueira Demarqui – Orientador, após dar conhecimento aos presentes do teor das normas regulamentares, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores com a respectiva defesa do candidato. Após a defesa, os membros da banca examinadora reuniram-se sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foi atribuída a seguinte indicação: o candidato foi considerado Aprovado condicional às modificações sugeridas pela banca examinadora no prazo de 30 dias a partir da data de hoje por unanimidade. O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente Ata, que será assinada por todos os membros participantes da banca examinadora. Belo Horizonte, 13 de setembro de 2023.

Prof. Fábio Nogueira Demarqui (Orientador)  
Departamento de Estatística / UFMG

Documento assinado digitalmente

**gov.br**

MARCELO AZEVEDO COSTA  
Data: 13/09/2023 15:03:36-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Marcelo Azevedo Costa  
Departamento de Engenharia de Produção / UFMG

*Maria Teresa Menezes de Széchy*  
Prof.<sup>a</sup> Maria Teresa Menezes de Széchy  
Departamento de Botânica / UFRJ

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas que contribuíram de maneira fundamental para a realização desta monografia:

À Dr. Maria Teresa Menezes de Széchy, pela generosidade em ceder os dados utilizados neste estudo e pelo constante apoio, incluindo sugestões valiosas e críticas construtivas que enriqueceram o estudo. Sua amizade e incentivo ao estudo da psicologia são inestimáveis e fundamentais em minha vida profissional.

À Msc. Ana Paula Accacio Veloso, cuja coleta e disponibilização dos dados foram essenciais para a condução deste trabalho.

Ao Dr. Fábio Demarqui, meu orientador, pela atenção dedicada, interesse e paciência em compartilhar seu conhecimento em estatística.

Aos professores do curso, cujos ensinamentos proporcionaram a base sobre a qual este trabalho foi construído.

Aos meus colegas de turma, cujo apoio mútuo foi inestimável. Agradeço por terem me auxiliado nos trabalhos, compartilhado materiais e experiências, e por dividirem as dificuldades que enfrentamos ao longo desta especialização.

## RESUMO

O crescimento vertical das macroalgas formadoras de dossel é um componente fundamental nos ecossistemas costeiros, onde esses organismos desempenham um papel dominante. Em algas com crescimento pseudo-perene, como o *Sargassum*, onde ocorre a perda dos ramos laterais após eventos reprodutivos ou distúrbios ambientais, a taxa de crescimento vertical torna-se crucial para a restauração do dossel, desempenhando um papel importante na manutenção de diversos serviços ecossistêmicos. É bem compreendido que distúrbios naturais e antropogênicos podem afetar a taxa de crescimento das macroalgas. Neste estudo, investigamos a taxa de crescimento vertical de *Sargassum* em áreas influenciadas pelo efluente térmico da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), localizada no Saco Piraquara de Fora, na Baía da Ilha Grande. Acompanhamos o crescimento vertical de 20 indivíduos de *Sargassum* durante 30 dias em dois períodos: inverno de 2005 e verão de 2006. Essa observação foi realizada em cinco locais, sendo três dentro do Saco Piraquara de Fora e dois fora dessa área, sendo um no Saco Piraquara de Dentro e outro no Saco do Sítio. Utilizamos *Generalized Additive Models* para ajustar os modelos, permitindo avaliar se existem diferenças significativas na média e na variância do crescimento vertical do *Sargassum* entre os períodos e os sítios. Essa comparação foi feita com o intuito de verificar se há diferenças no crescimento vertical entre os locais afetados pelo efluente térmico em comparação com os locais não afetados, e se essa tendência varia com o período estudado. Detectamos diferenças estatisticamente significantes na média da taxa de crescimento vertical entre os três locais localizados dentro da área de influência do efluente térmico e os dois locais localizados fora dessa área. Esse padrão persistiu nos dois períodos avaliados, evidenciando uma redução no crescimento vertical em sítios submetidos ao efluente térmico. Nossos resultados relacionam a redução na média da taxa de crescimento vertical de *Sargassum* aos distúrbios promovidos pelo lançamento do efluente térmico da CNAAA, e sugere o uso desse descritor para fins de detecção de impacto por aumento de temperatura da água do mar.

Palavras-chave: algas formadoras de dossel; macroalgas; aquecimento; bioindicador; impacto ambiental.

## ABSTRACT

The vertical growth of canopy-forming macroalgae is a fundamental component in coastal ecosystems, where these organisms play a dominant role. In algae with pseudo-perennial life cycle, such as *Sargassum*, where the loss of lateral branches occurs after reproductive events or environmental disturbances, the vertical growth rate becomes crucial for canopy restoration, playing a significant role in maintaining various ecosystem services. It is well understood that both natural and anthropogenic disturbances can affect the growth rate of macroalgae. In this study, we investigated the vertical growth rate of *Sargassum* in areas influenced by the thermal effluent from the Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), located in Saco Piraquara de Fora, Baía da Ilha Grande. We monitored the vertical growth of 20 *Sargassum* individuals for 30 days during two periods: winter 2005 and summer 2006. This observation was conducted at five sites, three within Saco Piraquara de Fora and two outside this area, one in Saco Piraquara de Dentro and another in Saco do Sítio. We employed Generalized Additive Models to adjust the models, allowing us to assess if there are significant differences in the mean and variance of *Sargassum*'s vertical growth between periods and sites. This comparison aimed to determine if there are differences in vertical growth between sites affected by thermal effluent compared to unaffected sites and if this trend varies with the studied period. We detected statistically significant differences in the mean vertical growth rate between the three sites located within the thermal effluent influence area and the two sites located outside this area. This pattern persisted in both evaluated periods, indicating a reduction in vertical growth at sites subjected to thermal effluent. Our findings relate the reduction in *Sargassum*'s mean vertical growth rate to disturbances caused by the release of CNAAA's thermal effluent, suggesting the use of this descriptor for detecting impacts from increased seawater temperature.

Keywords: canopy-forming algae; macroalgae; heating; bioindicator; environmental impact.

## Lista de Figuras

Figura 1 – Mapa da área de estudo.....	11
Figura 2 – Boxplot dados de crescimento.....	13
Figura 3 – Histograma e QQ-plot dos resíduos do modelo de regressão simples.....	14
Figura 4 – Histograma e QQ-plot dos resíduos do modelo linear com ajuste de variância.....	15
Figura 5 – Intervalo de confiança das diferenças entre as médias.....	16
Figura 6 – Intervalo de confiança das diferenças entre as variâncias.....	17

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 – Resultado modelo global.....	17
Tabela 2 – Comparações múltiplas da média.....	18
Tabela 3 – Comparações múltiplas da variância.....	19

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
2.1 Área de estudo.....	12
2.2 Coleta e análise de dados.....	12
3. RESULTADOS.....	15
4. DISCUSSÃO .....	20
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	23
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	

## 1. Introdução

A importância das macroalgas formadoras de habitat para o ecossistema costeiro tem sido relatada em diversos estudos que apontam para o grande número de serviços ecossistêmicos prestados por essas macroalgas (Coleman & Wernberg, 2017; Graham, 2004; Smale et al., 2013; Vásquez et al., 2014). A complexidade do habitat nas assembleias de costões rochosos é parcialmente moldada por algumas características das macroalgas dominantes, como densidade, cobertura e altura (Carvalho et al., 2018; Chen et al., 2020). A altura, em particular, é fundamental para a formação da estrutura tridimensional que fornece diferentes microhabitats adequados para uma diversidade de espécies (Steneck et al., 2002).

Na costa brasileira, *Sargassum* é um dos principais gêneros de algas formadora de habitat, e sua importância para a diversidade de peixes (Eggertsen et al., 2017; Ornellas & Coutinho, 1998), invertebrados (Carvalho et al., 2018; Longo et al., 2019) e para o sequestro de carbono (Gouvêa et al. 2020) o coloca como uma das algas mais importantes do infralitoral dos costões rochosos. Apesar de sua importância, o desaparecimento de *Sargassum* tem sido relatado em diferentes regiões da costa brasileira, e está relacionado ao aquecimento global, urbanização, eutrofização e poluição térmica (Carneiro et al., 2021; De Paula et al., 2020; Gorman et al., 2020; Szechy et al., 2017).

As espécies de *Sargassum* da costa brasileira apresentam uma história de vida pseudo-perene, na qual o apressório e o eixo principal são considerados partes perenes, e os ramos laterais partes não perenes (Paula 1988). Para essas espécies, a altura pode ser drasticamente afetada pela perda de seus ramos laterais. Por exemplo, Széchy et al. (2006) observaram que a altura dos indivíduos de uma população de *S. vulgare* C. Agardh do sudeste do Brasil atingiu valores máximos no verão e valores mínimos no final do inverno, o que estava relacionado à senescência dos ramos laterais férteis após seus picos reprodutivos em junho-agosto. O reestabelecimento da altura do dossel depende, dentre outros fatores, da taxa de crescimento vertical do talo.

Experimentos manipulativos evidenciaram que diferentes fatores, como nutrientes (Schaffelke & Klumpp, 1998), intensidade luminosa (Wang et al., 2021), salinidade (Zou et al., 2018) e temperatura da água do mar (Gouvêa et al., 2022; Graba-Landry et al., 2020) podem afetar a taxa de crescimento relativo das espécies de *Sargassum*. Na costa temperada quente do Brasil, Gouvêa et al. (2022), em um estudo manipulativo, evidenciaram uma redução na taxa de

crescimento de *Sargassum cymosum* em temperaturas acima de 30°C, sugerindo essa temperatura como o limite letal para as populações desta região. Além disso, estudos observacionais sugerem que o movimento da água, a estação do ano e as perturbações antropogênicas, como a exposição a metais provenientes de rejeitos de mineração, também podem afetar a taxa de crescimento de *Sargassum* (Costa et al., 2019; May-Lin & Ching-Lee, 2013; Vuki & Price, 1994).

Na região sudeste do Brasil, especificamente no município de Angra dos Reis, a Central Nuclear Almirante Álvaro Alerto (CNAAA) está em operação comercial desde 1985. Sua operação causa uma série de perturbações no ambiente marinho, como aumento da temperatura da água do mar, aumento na velocidade da corrente próxima ao emissário, e aumento nos níveis de cloro (Vilanova et al., 2004). A temperatura da água do mar superficial ao redor da CNAAA pode subir até 8°C acima da temperatura ambiente, dependendo da distância à saída, estação do ano, condições oceanográficas, profundidade e volume do efluente associado à operação da CNAAA (Mayer-Pinto et al., 2012). Estudos observacionais têm mostrado o efeito negativo da operação da CNAAA em descritores de *Sargassum*, como diminuição da frequência de ocorrência (Széchy et al., 2017) e da abundância (Carneiro et al., 2021). No entanto, apesar da taxa de crescimento vertical ser um aspecto importante para o desenvolvimento do dossel das macroalgas, e para a formação de habitat para outras espécies associadas aos bancos de *Sargassum*, nenhum estudo avaliou o efeito do efluente térmico da CNAAA nesse descritor.

O objetivo deste estudo foi avaliar a taxa de crescimento vertical de indivíduos de *Sargassum* em sítios dentro e fora da área afetada pelo efluente térmico da CNAAA, a fim de compreender como a taxa de crescimento vertical de *Sargassum*, e consequentemente a capacidade de reestabelecer o dossel, pode ser afetada pelas perturbações causadas pela operação da CNAAA. Além disso, o estudo avaliou se a taxa de crescimento vertical varia dependendo da época do ano.

## 2. Material e métodos

### 2.1 Área de estudo

A Baía da Ilha Grande (BIG) é uma baía de clima temperado quente, localizada no sudeste do Brasil, que abrange 65.258 hectares. O ecossistema marinho da BIG inclui habitats diversos, como praias arenosas, costões rochosos, manguezais e estuários, que abrigam uma grande variedade de espécies. Um estudo feito através de Avaliação Rápida Marinha (RAP) foi realizado na BIG, revelando a presença de aproximadamente 900 espécies de peixes, macroalgas e invertebrados (Creed et al., 2007). Apesar de sua importância ecológica, a BIG está ameaçada por diversas perturbações antropogênicas, como invasão de espécies exóticas, urbanização não planejada, desenvolvimento turístico insustentável e as atividades da CNAAA (Creed et al., 2007),

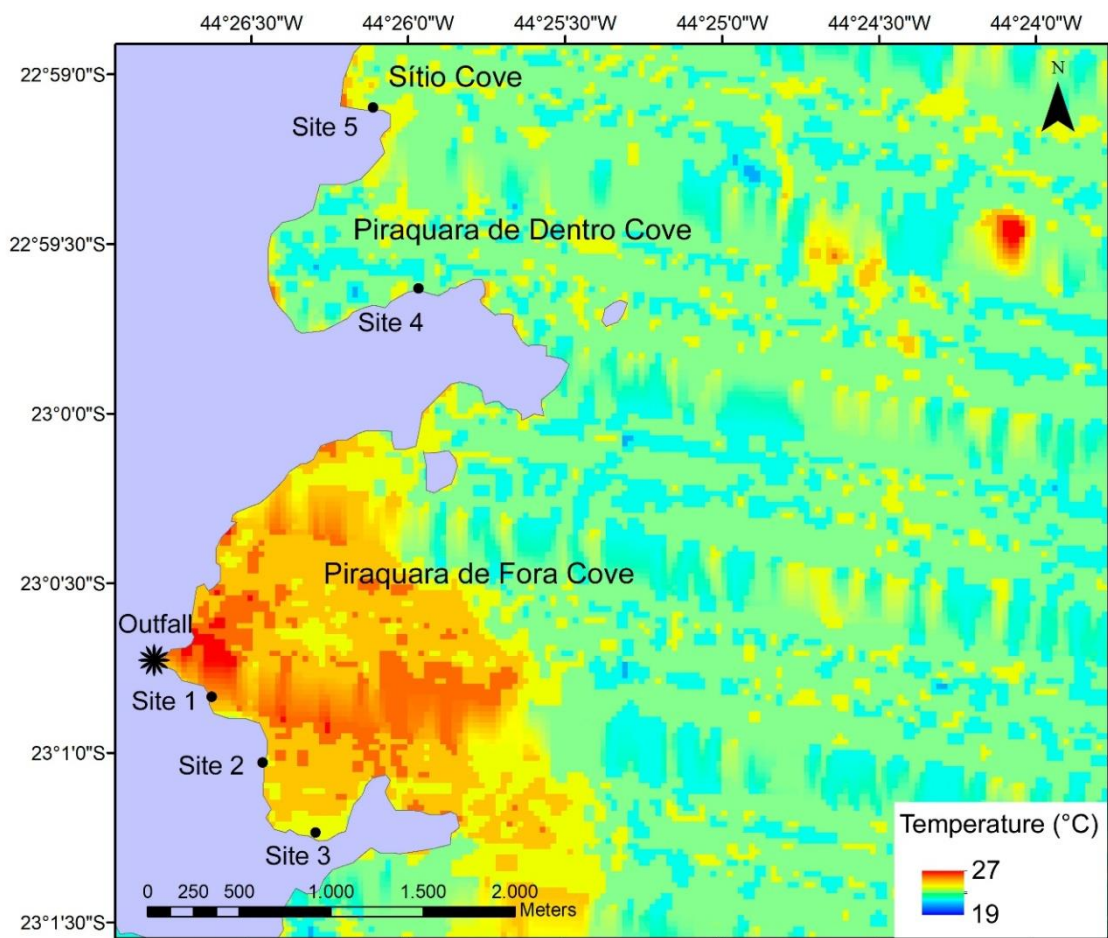
A CNAAA está localizada na porção central da BIG e inclui duas unidades operacionais, denominadas Angra 1 e Angra 2, que iniciaram suas operações comerciais em 1985 e 2000, respectivamente. Para dissipar o calor gerado durante a operação, a CNAAA utiliza um sistema de bombeamento que retira água do mar da Enseada de Itaorna e a libera na Enseada de Piraquara de Fora (Figura 1). O processo de descarga resulta em uma pluma térmica que aumenta a temperatura nas proximidades da saída do efluente. A ausência de desenvolvimento urbano e outras modificações significativas no continente ao longo da costa da Enseada de Piraquara de Fora, devido ao seu status de unidade de conservação integral (Estação Ecológica de Tamoios), nos leva a supor que a saída do efluente é a perturbação antropogênica mais proeminente na enseada.

### 2.2 Coleta e análise de dados

Para determinar o efeito do efluente da CNAAA na taxa de crescimento de *Sargassum*, 20 indivíduos adultos foram marcados aleatoriamente *in situ* em cada um dos 5 locais, com diferentes distâncias da saída do efluente. O sítio 1, mais próximo da saída, o sítio 2 e o sítio 3 estão dentro da Enseada de Piraquara de Fora e, portanto, sob o efeito do efluente térmico da CNAAA (Figura 1). Os sítios 4 e 5 estão fora da Enseada de Piraquara de Fora, portanto, não são afetados diretamente pelo efluente térmico (Figura 1). O sítio 4 está localizado na Enseada de Piraquara de Dentro, e o sítio 5 está localizado na Enseada do Sítio. Cada indivíduo marcado foi podado, removendo os ramos laterais primários, até uma altura de 5 cm acima do apressório. Os indivíduos podados foram observados durante 30 dias, e seu crescimento durante o período

foi estimado pela altura final menos 5 cm. Esse procedimento foi repetido em dois períodos, de agosto a setembro de 2005, e de março a abril de 2006. A temperatura média da superfície da água do mar no inverno de 2005 foi de 28°C no sítio 1, 27,1°C no sítio 2 e 25,5°C no sítio 3, e no verão de 2006 foi de 32°C no sítio 1, 31,4°C no sítio 2 e 30,5°C no sítio 3 (Programa de Medição da Temperatura da Água do Mar da Eletronuclear - Ano de 2005 e 2006; n=6).

Figura 1 – Mapa da área de estudo com a indicação da temperatura superficial da água do mar estimada pelo satélite Landsat 7.



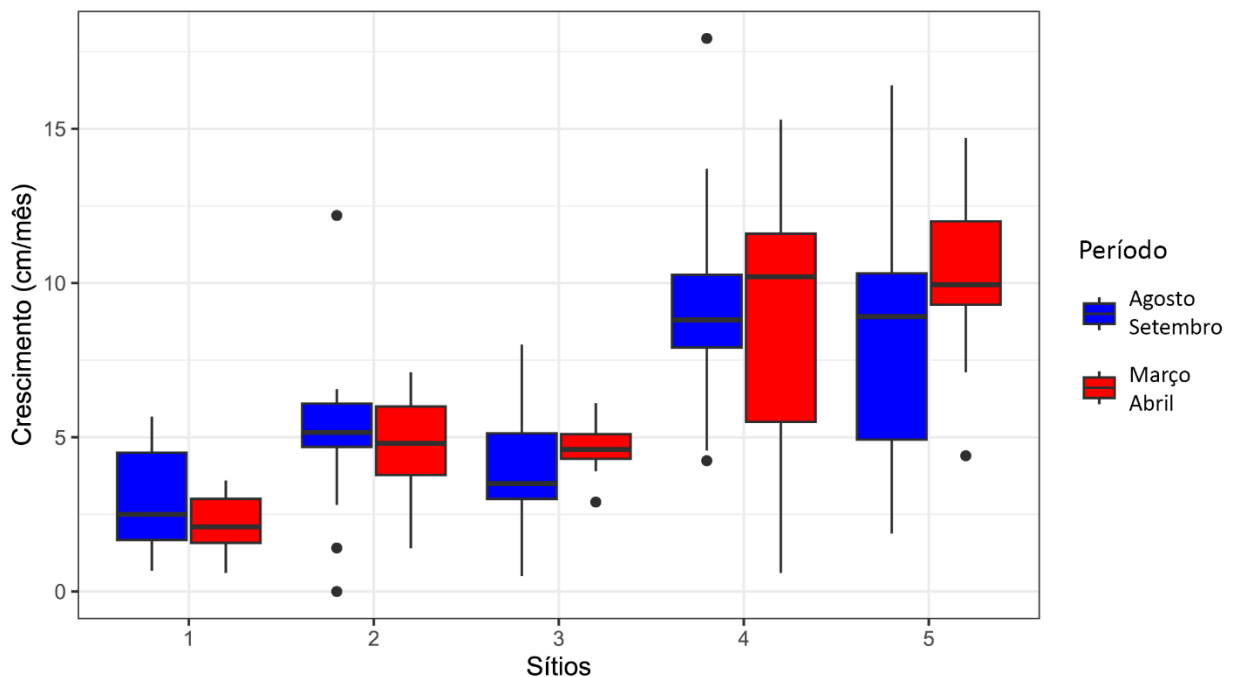
A análise descritiva evidenciando a taxa de crescimento de *Sargassum* em diferentes sítios e períodos foi realizada utilizando gráficos de boxplot com o pacote ggplot2 (Wickham et al., 2016) do software R (R Core Team, 2022). Para comparar o crescimento de *Sargassum* entre os sítios e os diferentes períodos, foram ajustados diferentes modelos, como modelos lineares simples e os modelos lineares para localização, escala e forma (Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape - GAMLSS) a fim de avaliar o modelo que apresenta o melhor ajuste dos resíduos. Os modelos lineares partem de pressupostos como a relação linear entre as

variáveis explicativas e resposta, e a normalidade e homogeneidade das variâncias dos resíduos (Mongomery & Runger, 2021). O pacote *gamlss* (Stasinopoulos et al., 2023) através da função *gamlss*, possibilita ajustar em um mesmo modelo os parâmetros de locação e escala, isto é, a tendência central e a variabilidade da variável resposta. O ajuste de variabilidade é dado pelo termo *sigma.formula* e pode ajustar a heteroscedasticidade presente em diferentes níveis dos preditores. Na função *gamlss*, o ajuste da variabilidade é feito usando a função de ligação log. Os resíduos dos modelos foram testados através de testes estatísticos como Shapiro-Wilk, para normalidade, Bartlett para homoscedasticidade, além de análises gráficas. Após a escolha do modelo mais adequado, comparações múltiplas entre os locais foram realizadas usando o pacote *emmeans* (Lenth et al. 2023) usando a função *emm*, que promove uma interface com o pacote *multcomp* e a função *glht*, que realiza uma comparação par-a-par dos diferentes níveis de um fator dado outro fator. Em nosso caso, comparamos a média e a variabilidade da taxa de crescimento entre os sítios em cada período avaliado.

### 3. Resultados

Durante o período de agosto a setembro de 2005, a taxa de crescimento vegetativo de *Sargassum* variou de 0,6 a 5,7 cm/mês no sítio 1 (n=14), de 0 a 12,2 cm/mês no sítio 2 (n=16), de 0,5 a 8 cm/mês no sítio 3 (n=20), de 4,2 a 17,9 cm/mês no sítio 4 (n=18) e de 1,9 a 16,4 cm/mês no sítio 5 (n=19). Entre março e abril de 2006, a taxa de crescimento de *Sargassum* variou de 0,6 a 3,6 cm/mês no sítio 1 (n=10), de 1,4 a 7,1 cm/mês nos sítios 2 (n=14) e 3 (n=12), de 0,6 a 15,3 cm/mês no sítio 4 (n=19) e de 7,1 a 14,7 cm/mês no sítio 5 (n=18) (Figura 2)

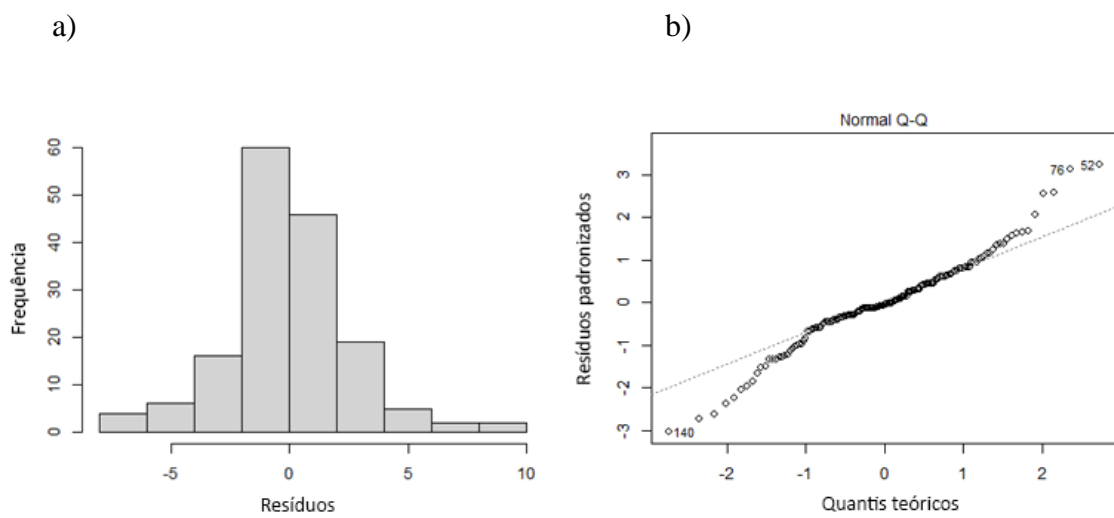
Figura 2 – Boxplot com os valores da taxa de crescimento vertical (cm) nos 5 sítios em cada período avaliado, Agosto – Setembro e Março – Abril. Sítios 1, 2 e 3 localizados dentro do Saco Piraquara de Fora, e sítios 4 e 5 fora do Saco Piraquara de Fora.



Observando o boxplot, podemos ver que parece haver uma diferença na média e uma diferença entre os períodos em alguns sítios. Para confirmarmos isso, ajustamos inicialmente um modelo linear com distribuição Gaussiana, com os fatores Sítio e Período, ortogonais e fixos, e considerando a interação entre esses fatores. Entretanto, após o ajuste do modelo, vimos que os resíduos não apresentaram distribuição normal (teste de Shapiro-Wilk com p-valor < 0.001) e nem homogeneidade das variâncias (teste de Bartlett com p-valor < 0.001 para os dois fatores), que são pressupostos importantes para esse modelo. A distribuição dos resíduos parece ter uma

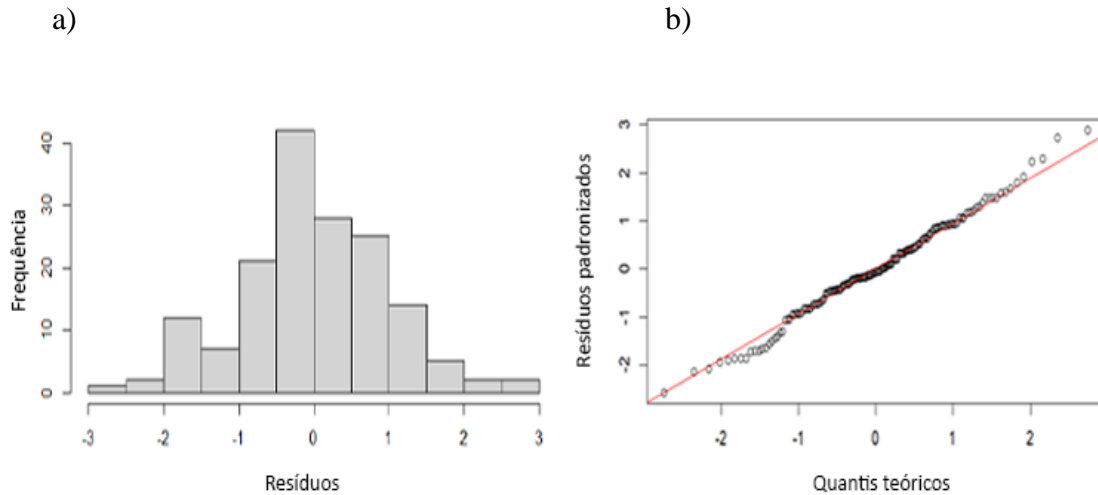
cauda pesada, se assemelhando mais a uma distribuição t de Student (Fig. 3a). Essas caudas pesadas refletem a discrepância nos valores extremos do QQ-plot (Fig. 3b), e no resultado do teste de Shapiro.

Fig. 3- a) Histograma dos resíduos do modelo linear normal; b) Gráfico Quantile-Quantile (QQ-plot) indicando os quantis dos resíduos do modelo linear e a teórica dada uma distribuição normal.



Existem algumas opções para tentar lidar com esses dois problemas sem necessariamente fazer com que os dados passem por uma transformação. Uma delas é considerar um ajuste feito através da função *gamlss*, que permite a modelagem tanto a média (locação) quanto a variância (escala) da variável resposta normalmente distribuída, considerando o mesmo *design* do modelo linear tradicional, com os fatores fixos Sítio e Período. O modelo apresentou normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk com p-valor de 0.57) (Fig. 4 a, b).

Fig. 4 - a) Histograma dos resíduos do modelo com distribuição normal e ajuste das variâncias; b) Gráfico Quantile-Quantile (QQ-plot) indicando os quantis dos resíduos do modelo e a teórica dada uma distribuição normal.



Com relação aos efeitos dos fatores sobre o parâmetro de locação (média), foi encontrada diferença significativa entre os sítios, e uma interação significativa entre os sítios e o período (Tabela 1). De forma semelhante, para o parâmetro de escala (variabilidade) observaram-se diferenças entre os sítios, entre os períodos, e interação entre sítios e o período (Tabela 1b).

Tabela 1 – Resultado do modelo com ajuste de variância ajustado comparando o sítio 1 com os demais sítios; o período 1 (agosto – setembro) com o período 2 (março – abril); e o sítio 1 período 2, com os demais sítios no período 2. Comparação feita para: a) média (localização); e b) variância (escala).

	a) Média			b) Variância		
	Erro padrão	valor t	Pr(> t )	Erro padrão	valor t	Pr(> t )
Intercepto	0.4448	6.479	<b>&lt;0.001</b>	0.18898	2.695	<b>0.008</b>
Sítio 2	0.6997	3.630	<b>&lt;0.001</b>	0.25877	1.009	0.315
Sítio 3	0.6014	1.611	0.109	0.24640	0.342	0.733
Sítio 4	0.8598	7.605	<b>&lt;0.001</b>	0.25198	2.497	<b>0.014</b>
Sítio 5	0.9572	5.523	<b>&lt;0.001</b>	0.24906	3.203	<b>0.002</b>
Periodo2	0.5232	-1.264	0.208	0.29277	-2.209	<b>0.029</b>
Sítio 2: Periodo2	0.8747	-0.134	0.894	0.39074	0.999	0.320
Sítio 3: Periodo2	0.7017	2.071	<b>0.040</b>	0.39036	-0.401	0.689
Sítio 4: Periodo2	13.182	-0.129	0.898	0.37391	2.514	<b>0.013</b>
Sítio 5: Periodo2	11.338	2.483	<b>0.014</b>	0.37391	0.460	0.647

Devido à interação encontrada nos modelos que avaliam os parâmetros de localização e a escala, as comparações múltiplas entre os sítios foram feitas separadamente em cada período, isto é, uma comparação entre os sítios para o período de agosto-setembro de 2005 e outra para o período março-abril de 2006. As comparações múltiplas para as médias no período entre agosto-setembro de 2005 indicaram diferenças significativas entre os sítios 1 e 2, 1 e 4, 1 e 5, 2 e 4, 2 e 5, 3 e 4, 3 e 5 (Tabela 2a; Fig. 5a). Para o período entre março-abril de 2006 diferenças significativas nas médias foram detectadas entre o sítio 1 e todos os demais, entre os sítios 2 e 4, 2 e 5, 3 e 4, 3 e 5 (Tabela 2b; Fig. 5b). As comparações múltiplas para a variância do crescimento entre os sítios, indicou para o período entre agosto-setembro de 2005 diferenças significativas entre os sítios 1 e 5 e 3 e 5 (Tabela 3a; Fig. 6a), e para o período março-abril de 2006 diferenças significativas foram detectadas entre os sítios 1 e 4, 1 e 5, 2 e 4, 3 e 4, e 3 e 5 (Tabela 3b; Fig. 5b).

Tabela 2 – Comparações múltiplas da média do crescimento vertical entre os sítios no período entre: a) agosto – setembro; b) março - abril

Contrast	a) Agosto - Setembro 2005				b) Março - Abril 2006			
	Estimate	Std. Error	t value	p.value	Estimate	Std. Error	t value	p.value
Sítio 1 - Sítio 2	-2.221	0.743	-2.989	<b>0.0269</b>	-2.423	0.525	-4.616	<b>&lt;0.001</b>
Sítio 1 - Sítio 3	-0.969	0.601	-1.611	0.4932	-2.422	0.362	-6.697	<b>&lt;0.001</b>
Sítio 1 - Sítio 4	-6.539	0.860	-7.605	<b>&lt;.0001</b>	-6.369	0.999	-6.375	<b>&lt;0.001</b>
Sítio 1 - Sítio 5	-5.287	0.957	-5.523	<b>&lt;.0001</b>	-8.102	0.608	-13.332	<b>&lt;0.001</b>
Sítio 2 - Sítio 3	1.252	0.72	1.740	0.413	0.001	0.504	0.002	1
Sítio 2 - Sítio 4	-4.318	0.946	-4.563	<b>0.0001</b>	-3.947	1.059	-3.726	<b>0.002</b>
Sítio 2 - Sítio 5	-3.066	1.036	-2.960	<b>0.0292</b>	-5.679	0.702	-8.089	<b>&lt;0.001</b>
Sítio 3 - Sítio 4	-5.571	0.840	-6.633	<b>&lt;.0001</b>	-3.948	0.988	-3.994	<b>0.001</b>
Sítio 3 - Sítio 5	-4.318	0.939	-4.597	<b>0.0001</b>	-5.681	0.59	-9.627	<b>&lt;0.001</b>
Sítio 4 - Sítio 5	1.252	1.122	1.115	0.7981	-1.733	1.103	-1.572	0.518

Fig. 5 – Intervalo de confiança da diferença entre as médias do crescimento vertical dos pares de sítios nos períodos: a) agosto – setembro e b) março - abril

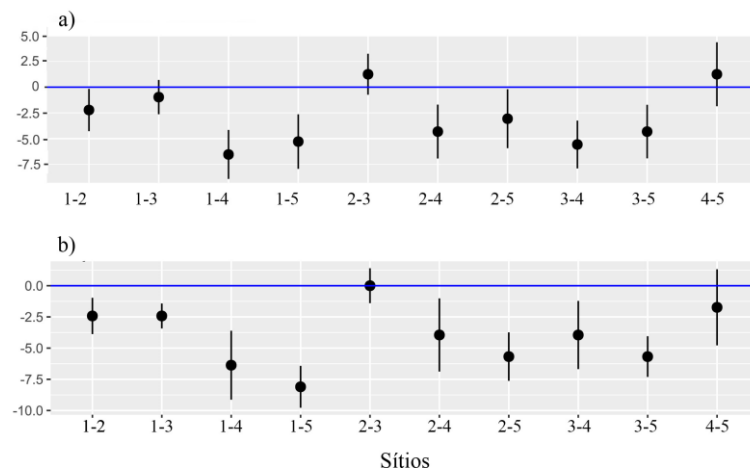
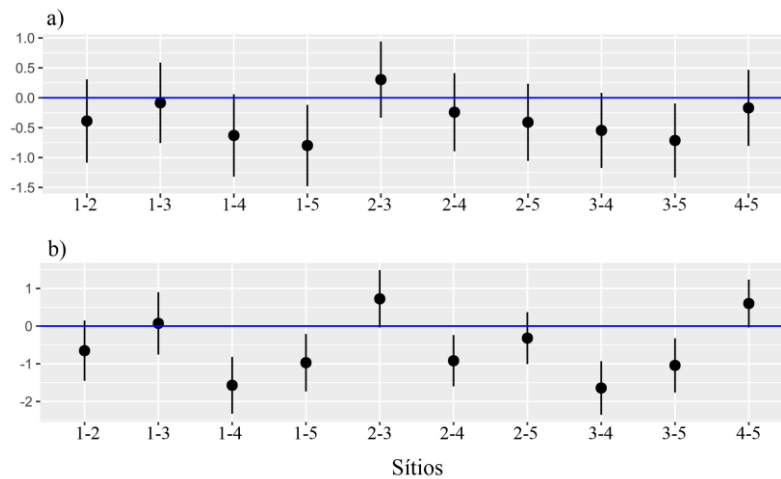


Tabela 3 - Comparações múltiplas da variância do crescimento vertical entre os sítios no período entre: a) agosto – setembro; b) março - abril

	a) Agosto - Setembro 2005				b) Março - Abril 2006			
	Estimate	Std. Error	z ratio	p.value	Estimate	Std. Error	z ratio	p.value
Sítio 1 - Sítio 2	-0.3882	0.255	-1.521	0.549	-0.6512	0.293	-2.224	0.171
Sítio 1 - Sítio 3	-0.0842	0.246	-0.342	0.997	0.0722	0.303	0.239	0.999
Sítio 1 - Sítio 4	-0.6292	0.252	-2.497	0.091	-1.5693	0.276	-5.681	< <b>0.001</b>
Sítio 1 - Sítio 5	-0.7976	0.249	-3.203	<b>0.012</b>	-0.9695	0.279	-3.476	<b>0.005</b>
Sítio 2 - Sítio 3	0.304	0.233	1.303	0.689	0.7234	0.278	2.601	0.072
Sítio 2 - Sítio 4	-0.2409	0.239	-1.008	0.852	-0.9181	0.249	-3.686	<b>0.002</b>
Sítio 2 - Sítio 5	-0.4094	0.236	-1.734	0.413	-0.3183	0.252	-1.263	0.714
Sítio 3 - Sítio 4	-0.5449	0.23	-2.372	0.123	-1.6415	0.261	-6.296	< <b>0.001</b>
Sítio 3 - Sítio 5	-0.7134	0.227	-3.149	<b>0.014</b>	-1.0417	0.264	-3.953	< <b>0.001</b>
Sítio 4 - Sítio 5	-0.1684	0.233	-0.724	0.951	0.5998	0.233	2.579	0.074

Fig. 6 – Intervalo de confiança da diferença entre as variâncias do crescimento vertical dos pares de sítios nos períodos: a) agosto – setembro e b) março - abril



## 4. Discussão

A detecção de diferenças significativas na média da taxa de crescimento de *Sargassum* em sítios dentro e fora da área de influência do efluente da CNAAA aponta para um possível impacto da operação da CNAAA nesse descritor. Em particular, as comparações par-a-par indicaram que os 3 sítios localizados dentro do Saco Piraquara de Fora, sob influência do efluente, apresentaram uma menor média na taxa de crescimento quando comparados aos 2 sítios localizados fora da área de influência do efluente. É importante observar que apesar dos efeitos da sazonalidade serem detectados em alguns sítios, a diferença na taxa de crescimento entre sítios dentro e fora da área de influência do efluente foi consistente nos dois períodos, indicando que mesmo em condições climáticas diversas, presentes nos dois períodos avaliados, o crescimento vertical médio é menor nos sítios dentro do Saco Piraquara de Fora.

Taxas de crescimento vertical mais baixas nos indivíduos de *Sargassum* na Enseada de Piraquara de Fora podem ter importantes consequências para o ecossistema costeiro desta área. Como *Sargassum* apresenta uma história de vida pseudo-perene, perdendo seus ramos laterais após o pico reprodutivo, a recuperação de sua estrutura tridimensional depende da taxa de crescimento vertical de seu talo. Uma taxa de crescimento vertical mais baixa pode afetar a altura do dossel criado por esse organismo, e, conseqüentemente, afetar as assembleias de peixes e invertebrados (Carvalho et al., 2018; Eggertsen et al., 2017; Longo et al., 2019; Ornellas & Coutinho, 1998) que dependem do habitat fornecido pelos bancos de *Sargassum*.

Os efeitos das perturbações causadas pelo efluente da CNAAA na taxa de crescimento também foram observados em outros descritores das populações de *Sargassum*, como a frequência de ocorrência (Széchy et al., 2017) e a abundância (Carneiro et al., 2021). Os resultados do presente estudo sugerem que a taxa de crescimento vertical do *Sargassum* também pode ser utilizada como um indicador das perturbações ambientais, especialmente as relacionadas ao aumento de temperatura da água do mar. É importante ressaltar que os efeitos da perturbação na frequência e abundância geralmente são detectados após uma exposição de longo prazo, e a taxa de crescimento pode ser um indicador mais rápido da perturbação. A sensibilidade da taxa de crescimento a perturbações antropogênicas também foi evidenciada em indivíduos de *Sargassum* expostos a metais provenientes de rejeitos de mineração (Costa et al., 2019).

Embora nosso estudo não tenha tido como objetivo estabelecer uma relação causal entre o aumento da temperatura e a taxa de crescimento, é inevitável levantar insights e hipóteses sobre

a perturbação proporcionada pela CNAAA e a taxa de crescimento vertical do *Sargassum*. Temperaturas acima de 30°C são comumente encontradas na área de influência da CNAAA (Enseada da Piraquara de Fora), especialmente no verão. Essas temperaturas podem reduzir as taxas de crescimento do *Sargassum* da região de clima temperado quente do Brasil, como evidenciado por Gouvêa et al. (2022) em uma população da praia de Cardoso - SC. Uma redução na taxa de crescimento em temperaturas acima de 30°C também foi observada em diferentes espécies de *Sargassum* na costa da Austrália (Graba-Landry et al., 2020). Embora as temperaturas na Enseada da Piraquara de Fora estivessem abaixo de 30°C durante o inverno de 2005, é possível que danos crônicos na fotossíntese e degradação de compostos químicos (Urrea-Victoria et al., 2020) possam ter ocorrido em um período anterior, como no verão de 2005. Outra possibilidade é que os indivíduos de *Sargassum* de Piraquara de Fora possam estar alocando energia para a produção de carotenoides ou compostos fenólicos a fim de manter sua integridade fisiológica (Gouvêa et al., 2022), ou investindo em crescimento de novos ramos laterais, e não no crescimento vertical dos ramos já existentes. Esses possíveis efeitos podem limitar a capacidade dos indivíduos de alocar recursos para o crescimento vertical, mesmo durante os meses mais frios do inverno. O aquecimento também pode afetar indiretamente o crescimento de macroalgas, aumentando a atividade de herbivoria (Kinnby et al., 2021; Smale, 2020; Wahl et al., 2015), especialmente de tartarugas, caranguejos e anfípodes, que são comuns na BIG (Creed et al., 2007).

Apesar das evidências encontradas, nosso estudo carece de comparações nos sítios avaliados antes da implementação da CNAAA, e do lançamento do efluente térmico. Dessa forma, nosso estudo possui um delineamento do tipo Controle e Impacto, o que causa uma série de incertezas em nossas conclusões (Underwood, 1994). Por exemplo, não podemos afirmar que o crescimento vertical de *Sargassum* era maior nos sítios 1,2 e 3, localizados no Saco Piraquara de Fora, antes do início das operações da CNAAA, e diminuiu após o início das operações. A nossa escolha de locais controle reflete condições semelhantes às encontradas no Saco Piraquara de Fora, mas diferenças na herbivoria, no batimento de ondas podem ocorrer entre os sítios causando um efeito de confusão em nossas conclusões. Entretanto, o batimento de ondas na região é predominante no inverno, e as diferenças encontradas no crescimento vertical dentro e fora da pluma em nossos estudos foram independentes do período estudado. Se essa fosse uma variável determinante para o crescimento vertical, provavelmente uma interação com o período seria detectada. Mais estudos que avaliam o efeito do aquecimento na produção primária e na bioquímica de indivíduos de *Sargassum* da Enseada de Piraquara de Fora, e sua

interação com outros fatores ambientais, são necessários para compreender como o aumento de temperatura promovido pela CNAAB está afetando a taxa de crescimento de *Sargassum*.

## 5. Considerações finais

O presente estudo avaliou a taxa de crescimento vertical de indivíduos de *Sargassum* dentro e fora da área de influência da pluma térmica oriunda da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. Os resultados indicam para o efeito negativo do efluente térmico na taxa de crescimento, onde os três sítios localizados no Saco Piraquara de Fora, apresentaram um valor médio de crescimento vertical mais baixo do que os sítios localizados no Saco Piraquara de Dentro, e Saco do sítio, ambos fora da área de influência do efluente térmico. Esse padrão foi observado em dois períodos, o que reforça o efeito negativo do efluente. Esse efeito negativo pode ter consequências importantes para o ecossistema costeiro do Saco Piraquara de Fora, já que a taxa de crescimento é um importante componente para a manutenção do dossel de *Sargassum*, e conseqüentemente para os organismos que dependem desse dossel para sua sobrevivência.

## 6. Referências

- Carneiro, I. M., Diaz, R. dos S., Bertocci, I., & de Széchy, M. T. M. (2021). The Fucales Index: A new tool for monitoring subtidal rocky habitats, and its application to an Atlantic bay subjected to nuclear power plant's effluents. *Marine Pollution Bulletin*, 172(July), 112804. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112804>
- Carvalho, N. F., Grande, H., Rosa Filho, J. S., & Jacobucci, G. B. (2018). The structure of gammarid amphipod (Crustacea, Peracarida) assemblages associated with Sargassum (Phaeophyta, Fucales) and their link with the structural complexity of algae. *Hydrobiologia*, 820(1), 245–254. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3661-5>
- Chen, Y., Cooper, P., & Fulton, C. (2020). Sargassum epifaunal communities vary with canopy size, predator biomass and seascape setting within a fringing coral reef ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*, 640, 17–30. <https://doi.org/10.3354/meps13282>
- Coleman, M. A., & Wernberg, T. (2017). Forgotten underwater forests: The key role of fucoids on Australian temperate reefs. *Ecology and Evolution*, 7(20), 8406–8418. <https://doi.org/10.1002/ECE3.3279>
- Costa, G. B., Ramlov, F., Ramos, B., Koerich, G., Gouvea, L., Costa, P. G., Bianchini, A., Maraschin, M., & Horta, P. A. (2019). Physiological damages of Sargassum cymosum and Hypnea pseudomusciformis exposed to trace metals from mining tailing. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(36), 36486–36498. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06691-w>
- Creed, J. C., Pires, D. O., & Figueiredo, M. A. O. (2007). *Biodiversidade marinha da baía da Ilha Grande*. Secretaria Nacional de Biodiversidade e Florestas, Ministério do Meio Ambiente.
- De Paula, J. C., Lopes-Filho, E. A. P., Carvalho, W. F., Coração, A. C. S., & Yoneshigue-Valentin, Y. (2020). Long-term changes in macroalgae assemblages reveal a gradual biodiversity loss over the last 200 years in the hypereutrophic Guanabara Bay. *Marine Environmental Research*, 162(September). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105153>
- Eggertsen, L., Ferreira, C. E. L., Fontoura, L., Kautsky, N., Gullström, M., & Berkström, C. (2017). Seaweed beds support more juvenile reef fish than seagrass beds in a south-western Atlantic tropical seascape. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 196, 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.06.041>
- Gorman, D., Horta, P., Flores, A. A. V., Turra, A., Berchez, F. A. S., Batista, M. B., Lopes Filho, E. S., Melo, M. S., Ignacio, B. L., Carneiro, I. M., Villaça, R. C., & Széchy, M. T. M. (2020). Decadal losses of canopy-forming algae along the warm temperate coastline of Brazil. *Global Change Biology*, 26(3), 1446–1457. <https://doi.org/10.1111/gcb.14956>
- Gouvêa, L. P., Horta, P. A., Fragkopoulou, E., Gurgel, C. F. D., Peres, L. M. C., Bastos, E., Ramlov, F., Burle, G., Koerich, G., Martins, C. D. L., Serrão, E. A., & Assis, J. (2022). Phenotypic Plasticity in Sargassum Forests May Not Counteract Projected Biomass Losses Along a Broad Latitudinal Gradient. *Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10021-022-00738-9>

- Graba-Landry, A. C., Loffler, Z., McClure, E. C., Pratchett, M. S., & Hoey, A. S. (2020). Impaired growth and survival of tropical macroalgae (*Sargassum* spp.) at elevated temperatures. *Coral Reefs*, 39(2), 475–486. <https://doi.org/10.1007/s00338-020-01909-7>
- Graham, M. H. (2004). Effects of Local Deforestation on the Diversity and Structure of Southern California Giant Kelp Forest Food Webs. *Ecosystems*, 7(4), 341–357. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0245-6>
- Kinby, A., Toth, G. B., & Pavia, H. (2021). Climate Change Increases Susceptibility to Grazers in a Foundation Seaweed. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.688406>
- Lenth, R. V., Bolker, B., Buerkner, P., Giné-Vázquez, I., Herve, M., Jung, M., Love, J., Miguez, F., Riebi, H., Singmann, S., (2023). Package ‘emmeans’: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means <https://cran.r-project.org/web/packages/emmeans/emmeans.pdf>
- Longo, P. A. D. S., Mansur, K. F. R., Leite, F. P. P., & Passos, F. D. (2019). The highly diverse gastropod assemblages associated with *Sargassum* spp. (Phaeophyceae: Fucales) habitats. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 99(6), 1295–1307. <https://doi.org/10.1017/S0025315419000304>
- Mayer-Pinto, M., Ignacio, B. L., Széchy, M. T. M., Viana, M. S., Curbelo-Fernandez, M. P., Lavrado, H. P., Junqueira, A. O. R., Vilanova, E., & Silva, S. H. G. (2012). How Much Is Too Little to Detect Impacts? A Case Study of a Nuclear Power Plant. *PLoS ONE*, 7(10), 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047871>
- May-Lin, B. Y., & Ching-Lee, W. (2013). Seasonal growth rate of *Sargassum* species at Teluk Kemang, Port Dickson, Malaysia. *Journal of Applied Phycology*, 25(3), 805–814. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9963-5>
- Ornellas, A. B., & Coutinho, R. (1998). Spatial and temporal patterns of distribution and abundance of a tropical fish assemblage in a seasonal *Sargassum* bed, Cabo Frio Island, Brazil. *Journal of Fish Biology*, 53(SUPPL. A), 198–208. <https://doi.org/10.1111/J.1095-8649.1998.TB01027.X>
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Schaffelke, B., & Klumpp, D. W. (1998). Short-term nutrient pulses enhance growth and photosynthesis of the coral reef macroalga *Sargassum baccularia*. *Marine Ecology Progress Series*, 170, 95–105. <https://doi.org/10.3354/MEPS170095>
- Smale, D. A. (2020). Impacts of ocean warming on kelp forest ecosystems. *New Phytologist*, 225(4), 1447–1454. <https://doi.org/10.1111/NPH.16107>
- Smale, D. A., Burrows, M. T., Moore, P., O’Connor, N., & Hawkins, S. J. (2013). Threats and knowledge gaps for ecosystem services provided by kelp forests: a northeast Atlantic perspective. *Ecology and Evolution*, 3(11), 4016–4038. <https://doi.org/10.1002/ECE3.774>
- Stasinopoulos, M., Rigby, B., Voudouris, V., Akantziliotou, C., Enea, M., Kiose, D. (2023). Generalised Additive Models for Location Scale and Shape. <https://cran.r-project.org/web/packages/gamlss/gamlss.pdf>

- Steneck, R. S., Graham, M. H., Bourque, B. J., Corbett, D., Erlandson, J. M., Estes, J. A., & Tegner, M. J. (2002). Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future. *Environmental Conservation*, 29(4), 436–459. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000322>
- Széchy, M. T. M., Galliez, M., & Marconi, M. I. (2006). *Quantitative variables applied to phenological studies of Sargassum vulgare C. Agardh ( Phaeophyceae - Fucales ) from Ilha Grande Bay , State of Rio de Janeiro*. 29(1), 27–37. [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-84042006000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-84042006000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=en)
- Széchy, M. T. M., Koutsoukos, V. S., Barboza, C. A. M. (2017). Long-term decline of brown algal assemblages from southern Brazil under the influence of a nuclear power plant. *Ecological Indicators*, 80, 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.019>
- Underwood, A. J. (1994). On beyond BACI: Sampling designs that might reliably detect environmental disturbances. *Ecological Applications*, 4(1), 3–15. <https://doi.org/10.2307/1942110>
- Urrea-Victoria, V., Nardelli, A. E., Floh, E. I. S., & Chow, F. (2020). *Sargassum stenophyllum* (Fucales, Ochrophyta) responses to temperature short-term exposure: photosynthesis and chemical composition. *Revista Brasileira de Botanica*, 43(4), 733–745. <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00639-y>
- Vásquez, J. A., Zuñiga, S., Tala, F., Piaget, N., Rodríguez, D. C., & Vega, J. M. A. (2014). Economic valuation of kelp forests in northern Chile: values of goods and services of the ecosystem. *Journal of Applied Phycology*, 26(2), 1081–1088. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0173-6>
- Vilanova, E., Mayer-pinto, M., Patricia Curbelo-Fernandez, M., & Henrique Gonçalves Silva, S. DA. (2004). The impact of a nuclear power plant discharge on the sponge community of a tropical bay (SE Brazil ). *Boll. Mus. Ist. Biol. Univ. Genova*, 2003(0), 647–654.
- Vuki, V. C., & Price, I. R. (1994). Seasonal changes in the *Sargassum* populations on a fringing coral reef, Magnetic Island, Great barrier reef region, Australia. *Aquatic Botany*, 48(2), 153–166. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(94\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0304-3770(94)90082-5)
- Wahl, M., Molis, M., Hobday, A. J., Dudgeon, S., Neumann, R., Steinberg, P., Campbell, A. H., Marzinelli, E., & Connell, S. (2015). The responses of brown macroalgae to environmental change from local to global scales: direct versus ecologically mediated effects. *Perspectives in Phycology*, 2(1), 11–29. <https://doi.org/10.1127/pip/2015/0019>
- Wang, Y., Zhong, Z., Song, Q., Li, J., Li, J., & Zhengyi, L. (2021). Effects of temperature and light on growth rate and photosynthetic characteristics of *Sargassum horneri*. *J. Ocean Univ. China (Oceanic and Coastal Sea Research)*, 20(1), 101–110. <https://doi.org/10.1007/s11802-021-4507-8>
- Wickham, H., Chang, W. (2016). Package “ggplot2.” Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics Version, 2 (1), pp. 1–189.
- Yee, T.W., Mitchell, N.D. (1991). Generalized additive models in plant ecology. *J. Veg. Sci.*, 2 (5), pp. 587-602

Zou, X.X., Xing, S.S., Su, X., Zhu, J., Huang, H.Q., & Bao, S.X. (2018). The effects of temperature, salinity and irradiance upon the growth of *Sargassum polycystum* C. Agardh (Phaeophyceae). *Journal of Applied Phycology*, 30, 1207–1215.  
<https://doi.org/10.1007/s10811-017-1282-4>