

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de **14/03/2026**.

**ECOFISIOLOGIA DE MACROALGAS EXPOSTAS À ACIDIFICAÇÃO:
BIOENSAIOS FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

FERNANDA RIBEIRO DE FREITAS

São Vicente

2025

FERNANDA RIBEIRO DE FREITAS

**ECOFISIOLOGIA DE MACROALGAS EXPOSTAS À ACIDIFICAÇÃO:
BIOENSAIOS FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Tese apresentada ao Instituto de Biociências, Campus do Litoral Paulista, UNESP, para obtenção do título de Doutora no Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade de Ambientes Costeiros.

Orientador(a): Dr Milton Lima Netto

Coorientador(a): Dr^a Franciane Pellizari

São Vicente

2025

F866e

Freitas, Fernanda Ribeiro de

ECOFISIOLOGIA DE MACROALGAS EXPOSTAS À
ACIDIFICAÇÃO: BIOENSAIOS FRENTE ÀS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS / Fernanda Ribeiro de Freitas. -- São Vicente, 2025
62 p. : tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Biociências, São Vicente

Orientador: Milton Lima Neto

Coorientadora: Franciane Pellizzari

1. Botânica. 2. Fisiologia vegetal. 3. Ecologia.

AO MEU QUERIDO FILHO,

BENJAMIN,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A **Deus** por me dar forças e proporcionar a realização de mais esse sonho;

À **NS do Rocio** por nunca me desamparar nos momentos mais difíceis.

À minha **família** pela paciência, auxílio e compreensão, em especial ao meu marido Jeferson Mendes, que sempre esteve ao meu lado me apoiando nos momentos felizes e tristes, sempre me incentivando a nunca desistir.

Ao meu **filho** Benjamin pela paciência e entendimento de minhas ausências.

Ao meu **orientador** Dr Milton Lima pelos ensinamentos, acolhida e apoio nessa jornada.

À minha **coorientadora** Profª Drª Franciane Pellizzari pela amizade, companheirismo, incentivo e a todos os ensinamentos acadêmicos e de vida;

Ao **professor** Ítalo Braga por ceder seu laboratório para os experimentos.

Aos **alunos** do laboratório que auxiliaram nas análises bioquímicas.

Letícia Barboza, minha IC que ajudou nas análises de fluorescência.

Aos **meus alunos** do ensino médio que me tem como espelho em suas jornadas e torcem muito por essa conquista.

Às meninas **do Laquamar** que sempre se ajudaram de alguma forma, seja com literatura, coletas ou palavras de apoio.

Um agradecimento especial a todos que me ajudaram, pois foram muitas pessoas, praticamente nada do que está aqui eu fiz sozinha, com a graça de Deus tive a sorte de ter pessoas incríveis proativas que me ajudaram muito! Obrigada de coração, o mérito desse trabalho também é de vocês.

RESUMO

A acidificação do oceano influencia a composição química do mar e pode causar efeitos consideráveis nos ecossistemas aquáticos. A *Ulva lactuca*, uma macroalga essencial nos ecossistemas costeiros, pode ser impactada de várias formas pela acidificação, incluindo a diminuição da taxa de crescimento, mudanças na composição química e alterações na estrutura do ecossistema. A capacidade desta espécie de tolerar mudanças de temperatura e luminosidade é extensivamente pesquisada. Esta característica tem sido observada em regiões com temperaturas que oscilam entre 0° C e 28°C, sendo a maior taxa de crescimento registrada entre 10 e 15 °C. Em temperaturas que variam de 7°C a 10°C, *U. lactuca* é capaz de se adaptar a níveis reduzidos de radiação luminosa, além de tolerar uma ampla gama de variações de salinidade. Portanto, levando em conta a tolerância a alterações ambientais a vasta distribuição mundial e a abundância de algas do gênero *Ulva*, esses seres parecem ser modelos promissores para a avaliação de agentes estressores ambientais, tais como a acidificação dos oceanos. As macroalgas, seres que realizam fotossíntese e têm um papel fundamental nos ecossistemas costeiros, surgem como potenciais parceiras na atenuação dos impactos da acidificação. Ademais, a variedade funcional das macroalgas possibilita que diversas espécies ocupem diversos nichos, fortalecendo a resiliência dos ecossistemas marinhos. A alteração do pH pode afetar a cadeia alimentar marinha e a biodiversidade, comprometendo a pesca e a segurança alimentar. A compreensão e mitigação da acidificação oceânica são essenciais para a preservação dos oceanos e dos serviços que eles fornecem ao planeta. Com as mudanças climáticas e a acidificação dos oceanos, as algas estão enfrentando novos desafios. A ecofisiologia das algas investiga como essas mudanças afetam a sua fisiologia, distribuição geográfica e suas interações com outros organismos. Entender as funções ecológicas dos oceanos e fomentar sua preservação é crucial para lidar com os desafios trazidos pela acidificação e assegurar a sustentabilidade marinha.

Palavras-chave: Ecofisiologia, Macroalgas, Metabolismo, antioxidantes.

ABSTRACT

Ocean acidification influences the chemical composition of the sea and can have significant effects on aquatic ecosystems. *Ulva lactuca*, an essential macroalgae in coastal ecosystems, can be impacted in several ways by acidification, including decreased growth rate, changes in chemical composition, and alterations in ecosystem structure. The ability of this species to tolerate changes in temperature and light is extensively researched. This characteristic has been observed in regions with temperatures ranging from 0°C to 28°C, with the highest growth rate recorded between 10 and 15°C. At temperatures ranging from 7°C to 10°C, *U. lactuca* is able to adapt to reduced levels of light radiation, in addition to tolerating a wide range of salinity variations. Therefore, considering the tolerance to environmental changes, the vast worldwide distribution and the abundance of algae of the genus *Ulva*, these beings appear to be promising models for the evaluation of environmental stressors, such as ocean acidification. Macroalgae, beings that perform photosynthesis and play a fundamental role in coastal ecosystems, emerge as potential partners in mitigating the impacts of acidification. Furthermore, the functional variety of macroalgae allows several species to occupy different niches, strengthening the resilience of marine ecosystems. Changes in pH can affect the marine food chain and biodiversity, compromising fisheries and food security. Understanding and mitigating ocean acidification are essential for the preservation of the oceans and the services they provide to the planet. With climate change and ocean acidification, algae are facing new challenges. The ecophysiology of algae investigates how these changes affect their physiology, geographic distribution and their interactions with other organisms. Understanding the ecological functions of the oceans and promoting their preservation is crucial to dealing with the challenges brought by acidification and ensuring marine sustainability.

Keywords: Ecophysiology, Macroalgae, Metabolism, Antioxidants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Média mensal de dióxido de carbono globalmente calculada sobre locais de superfície marinha. Fonte: Global Monitoring Laboratory, (NOAA 2023).....	13
Figura 2: Reações da química do carbono na água e a relação com fotossíntese algal, respiração algal e animal, e calcificação de organismos com conchas ou acúmulo de íons carbonato. (Adaptado de Schneider, 2021).....	15
Figura 3. Bombas físicas e biológicas do dióxido de carbono. (Fonte da imagem https://theoceanexplained.wordpress.com/2021/07/13/the-three-carbon-pumps-of-the-ocean-biological-carbonate-and-physical/).....	16
Figura 4: <i>Ulva lactuca</i> Linnaeus, imagem obtida no costão da Ilha do Mel no litoral do Paraná em 2023.....	24
Figura 5: <i>Petalonia fascia</i> (OF Muller) Kuntze coletada na Ilha do Mel, litoral do Paraná em 2023.	25
Figura 6: Localização do ponto de amostragem de organismos da espécie <i>Ulva fasciata</i> e <i>Petalonia fascia</i> na Ilha do Mel, Litoral do Paraná.....	44
Figura 7: Desenho experimental do projeto realizado com <i>Ulva lactuca</i> e <i>Petalonia fascia</i> em três cenários de acidificação.....	45
Figura 8: Rendimento quântico potencial de PSII (Fv/Fm), (Valores de média ± erro padrão) para algas da espécie <i>Ulva fasciata</i> e <i>Petalonia fascia</i> experimentalmente expostas a diferentes cenários de acidificação.....	49
Figura 9: Eficiência quântica efetiva de PSII (YII) (Valores de média ± erro padrão) para algas da espécie <i>Ulva fasciata</i> e <i>Petalonia fascia</i> experimentalmente expostas a diferentes cenários de acidificação.....	50
Figura 10: Taxa de transporte de elétrons (ETR), (Valores de média ± erro padrão) em espécies de <i>Ulva fasciata</i> e <i>Petalonia fascia</i> experimentalmente expostas a diferentes cenários de acidificação.....	51
Figura 11: Extinção não fotoquímica (NPQ), (Valores de média ± erro padrão) para algas da espécie <i>Ulva fasciata</i> e <i>Petalonia fascia</i> experimentalmente expostas a diferentes cenários de acidificação.....	51
Figura 12: Teor de peróxido de hidrogênio (A) e peroxidação lipídica (B) em <i>Petalonia</i> e <i>Ulva</i> expostas em diferentes cenários de acidificação. Dados são média e DP (n=3).....	53
Figura 13: Superóxido dismutase SOD (A), catalase CAT (B), peroxidase do ascorbato APX (C) e glutatona reduzida GR (D) em <i>Petalonia</i> e <i>Ulva</i> expostas em diferentes cenários de acidificação. Dados são média e DP (n=3).....	55
Figura 14: Diagramas de ordenação de PCA (A) Os dois primeiros componentes explicaram 32,2% e 36,9% das variâncias, respectivamente.....	57

LISTA DE TABELAS

1. Comparação de espécies de *Ulva* spp analisadas em diferentes concentrações de CO₂21
2. Matéria fresca, conteúdo de clorofila a e proteína solúvel total em *Ulva lactuca* e *Petalonia fasciata* expostas a diferentes pHs. Diferentes letras maiúsculas representam diferença significativa para a mesma espécie entre os diferentes pHs. Diferentes letras minúsculas representam diferença significativa para espécies diferentes no mesmo pH (P<0.05).....49

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	10
CAPÍTULO 1: MACROALGAS MARINHAS NÃO CALCIFICANTES E SUAS POSSÍVEIS RESPOSTAS FRENTE À ACIDIFICAÇÃO DOS OCEANOS	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. DESENVOLVIMENTO	14
2.1 <i>BIOGEOQUÍMICA MARINHA VS ACIDIFICAÇÃO DOS OCEANOS</i>	14
2.2 <i>EFEITOS DA ACIDIFICAÇÃO DA ÁGUA DO MAR EM ALGAS NÃO CALCIFICANTES</i>	18
3. ALGAS COMO BIOINDICADORAS AMBIENTAIS	23
3.1 ACIDIFICAÇÃO E SEUS EFEITOS NO GÊNERO DE ALGAS MARINHA COSMOPOLITA, <i>ULVA</i> .	23
3.2 ACIDIFICAÇÃO E SEUS EFEITOS EM GÊNERO DE ALGAS MARINHA PARDAS (PHAEOPHYCEAE) FOLIÁCEAS	25
3.3 <i>ESTRESSE ECOFISIOLÓGICO EM MACROALGAS NÃO CALCIFICANTES VS CONDIÇÕES DE ACIDIFICAÇÃO</i>	26
CONCLUSÃO	28
REFERÊNCIAS	28
CAPÍTULO 2: IMPACTOS DO PH SOBRE <i>ULVA LACTUCA</i> E <i>PETALONIA FASCIA</i>: ESTUDO DA PEROXIDAÇÃO LIPÍDICA E ATIVIDADES ENZIMÁTICAS	39
INTRODUÇÃO	40
2. MATERIAL & MÉTODOS	44
2.1 ÁREA DE ESTUDO	44
2.2 DESIGN EXPERIMENTAL	44
2.3 ANÁLISE DE FLUORESCÊNCIA DE CLOROFILA	46
2.4 CONTEÚDO RELATIVO DE ÁGUA (C.R.A)	46
2.5 DANO DE MEMBRANA E PROTEÍNAS SOLÚVEIS TOTAIS.	46
2.6 DETERMINAÇÃO DOS TEORES DE CLOROFILA <i>A</i>	47
2.7 TEOR DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO E PEROXIDAÇÃO LIPÍDICA	47
2.8 <i>ATIVIDADE CATALASE, SOD, APX, GR E CAT</i>	47
2.9 <i>ANÁLISE ESTATÍSTICA</i>	48
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS	58

Introdução Geral

Os níveis de CO₂ atmosférico aumentam constantemente desde a revolução industrial. Atualmente a concentração de CO₂ atmosférico é de 412 ppm, um aumento de 47% desde o início da Revolução Industrial (OMM, 2023). Este aumento de CO₂ é considerado um dos principais fatores responsáveis pelas alterações climáticas em vigência (Kabir *et al*, 2023). Além disso, a alta concentração de dióxido de carbono atmosférico pode resultar em mudança na composição química dos oceanos, uma vez que na interface atmosfera/oceano há absorção de aproximadamente 25 a 30% do CO₂ antropogênico pelos oceanos. Os oceanos cobrem mais de 70% da superfície da Terra e sustentam 97% da superfície terrestre. Ao absorver mais de 90% do excesso de calor libertado no ambiente do globo e quase um terço das emissões de dióxido de carbono (CO₂), retarda o aquecimento global e regula o clima global. No entanto, os ecossistemas marinhos são altamente vulneráveis às atividades humanas (Landrigan *et al.*, 2020). À medida que o CO₂ atmosférico aumenta, a interação com a superfície do oceano alterará a química da água do mar, resultando no conhecido processo de acidificação.

As algas marinhas são vulneráveis a mudanças físicas e químicas no ambiente marinho, e os impactos das mudanças climáticas, e antropogênicas (atuais e futuras) em ecossistemas dominados por grandes bancos de macroalgas está cada vez melhor elucidado (Harley *et al*, 2012, Pellizzari *et al.* 2014, 2017, 2020a, b 2013). Embora se saiba que a acidificação dos oceanos tem impacto na fisiologia das algas marinhas, os efeitos nas fases iniciais das macroalgas são desconhecidos devido à falta de dados (Navarro *et al.* 2020). Biomarcadores de relevância molecular podem estimular respostas enzimáticas nas células das algas *Ulva lactuca* e *Petalonia fascia*. Muitas vezes, essas respostas são diretamente afetadas pelas espécies reativas de oxigênio (EROs), bioprodutos resultantes do metabolismo do oxigênio. O complexo formado pela catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) e glutathione redutase (GR) é um exemplo de enzima com atividade antioxidante.

A proposta foi investigar os efeitos da acidificação oceânica sobre as macroalgas. No capítulo 1, foi realizada uma revisão de literatura abordando como a acidificação oceânica afeta as comunidades de macroalgas não-calcárias fisiologicamente e ecologicamente. No capítulo 2, são apresentados os dados de experimentos com as espécies *Ulva lactuca* Linnaeus e *Petalonia fascia* (O.F.Müller) Kuntze, 1898, em três cenários de acidificação oceânica previsto pelo IPCC para o ano de 2100.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nossos dados indicam que em relação aos testes das duas espécies em diferentes pH a macroalga *Ulva lactuca* é a mais adaptável, obtendo um melhor trabalho fotossintético em pH 7,5. A *Petalonia fascia* na presença de maior acidez produz menos fotossíntese em relação a *Ulva* que é mais sensível em mudanças de pH.

Em pH 6,5 ambas as espécies não conseguem ativar mecanismos de fotoproteção (NPQ).

Em relação aos antioxidantes, a CAT apresentou melhores resultados na macroalga *Ulva lactuca* e a APX na *Petalonia fascia*.

Desta forma, este trabalho fornece informações que podem informar abordagens para aumentar a tolerância ao estresse em *Ulva sp* e *Petalonia sp*.

Para obtenção de maiores informações sobre a respostas das algas às condições previstas de mudanças climáticas, é necessário que no futuro experimentos multifatoriais com diversos estressores sejam conduzidos com duração estendida. Contudo, é importante ainda que trabalhos que avaliem os mecanismos bioquímicos, como pigmentos acessórios, e fisiológicos das macroalgas frente a eventos extremos sejam realizados, agregando dados capazes de auxiliar no melhor entendimento das respostas desses organismos frente as mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ALSCHER, R. (2022). Heath, Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants, *Journal of Experimental Botany*, Volume 53, Issue 372, 15 May 2002, Pages 1331–1341.
- BARBOSA, K. B. F., COSTA, N. M. B., ALFENAS, R. DE C. G., DE PAULA, S. O., MINIM, V. P. R., & BRESSAN, J.. (2010). Estresse oxidativo: conceito, implicações e fatores modulatórios. *Revista De Nutrição*, 23(4), 629–643.

BARBOSA, F. K.; COSTA, N. M.; ALFENAS, R. CG.; DE PAULA, S. O.; MINIM, V. R.; BRESSAN, J. Oxidative stress: concept, implications and modulating factors. *Revista de Nutrição* vol. 23 issue 4 (2010) pp: 629-643 Published by Pontifícia Universidade Católica de Campina

BARBOZA, L. Avaliação dos efeitos da acidificação oceânica na fotossíntese de *Ulva fasciata*. 2023.

CARMAK, I.; HORST, W. J. Effect of Al lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glicine max L.*). *Physiologia Plantarum*, Copenhagen, v. 834, p. 463-468, 1991.

CHURCH, John A.; WHITE, Neil J. A 20th century acceleration in global sea-level rise. **Geophysical research letters**, v. 33, n. 1, 2006.

FISCHETTI, Mark. STORM OF THE CENTURY* EVERY TWO YEARS. **Scientific American**, v. 308, n. 6, p. 58-67, 2013.

FOYER; NOCTOR. (2011). "Ascorbate and glutathione: the heart of the redox hub." *Plant physiology* vol. 155,. 2-18.

GAO, G. *et al.* (2018). Global warming interacts with ocean acidification to alter PSII function and protection in the diatom *Thalassiosira weissflogii*. *Environmental and Experimental Botany*, v. 147, p. 95-103.

GRIFFITH, O.W. Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2-vinylpyridine. *Analytical Biochemistry*, v.106, p.207-212, 1980.

IPCC, 2014. Part A: Global and Sectoral Aspects. (Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.*, p. 1132

KANG *et al.* (2021). Evaluating bloom potential of the green-tide forming alga *Ulva ohnoi* under ocean acidification and warming, *Science of The Total Environment*, Volume 769, 2021, 144443, ISSN 0048-9697.

KRAMER, D. M., JOHNSON, G., KIIRATS, O., & EDWARDS, G. E. (2004). New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes. *Photosynthesis research*, 79, 209-218.

LEE, H.-Y.; HONG, Y.-N.; CHOW, W. S. Photoinactivation of photosystem II complexes and photoprotection by non-functional neighbours in *Capsicum annuum L.* leaves. *Planta*, v. 212, p. 332-342, 2001.

LI Z, XIAO L, SUN X, LUO C, LI R, ZHANG W, WANG Z, XIAO H, SHU W. An ESIPT-based ratiometric fluorescent probe for detecting H₂O₂ in water environment and biosystems.

Sci Total Environ. 2023 Apr 1;867:161609. Epub 2023 Jan 13. PMID: 36642271; PMCID: PMC9837204.

MARINHO-SORIANO; (2021) MACROALGAS MARINHAS: BIOLOGIA, ECOLOGIA E IMPORTÂNCIA ECONÔMICA. CIÊNCIAS DO MAR: dos oceanos do mundo ao Nordeste do Brasil Editora: Via Design Publicações.

MAXWELL, K., JOHNSON, G.N.: Chlorophyll fluorescence — a practical guide. — J. Exp. Bot. 51: 659–668, 2000.

MHAMDI, Amna; NOCTOR, Graham; BAKER, Alison. Plant catalases: peroxisomal redox guardians. Archives of Biochemistry and Biophysics, v. 525, n. 2, p. 181-194, 2012.

MURATA, N., *et al.* (2007). “Photoinhibition of photosystem II under environmental stress.” *Biochimica et biophysica acta* vol. 1767,6: 414-21.

NETO, M. *et al.* Understanding photosynthesis in a spatial–temporal multiscale: The need for a systemic view. Theoretical and Experimental Plant Physiology, v. 33, n. 2, p. 113-124, 2021.

NETO, M. *et al.* Dissipation of excess photosynthetic energy contributes to salinity tolerance: a comparative study of salt-tolerant *Ricinus communis* and salt-sensitive *Jatropha curcas*. Journal of plant physiology, v. 171, n. 1, p. 23-30, 2014.

RIEBESELL, U *et al.* “Enhanced biological carbon consumption in a high CO₂ ocean.” *Nature* vol. 450,7169 (2007): 545-8.

ROLÃO, M. Resposta antioxidativa de cafeeiros (*Coffea arabica*) exposto ao metal pesado cádmio. Piracicaba, 2010.

SOUSA, G. T.; NETO, M. C. L.; CHOUERI, R. B.; CASTRO, I. B. Photoprotection and antioxidative metabolism in *Ulva lactuca* exposed to coastal oceanic acidification scenarios in the presence of Irgarol. Aquatic Toxicology 230, 105717, 2021

SUÁREZ-ÁLVAREZ, S., GÓMEZ-PINCHETTI, J. L., & GARCÍA-REINA, G. (2012). Effects of increased CO₂ levels on growth, photosynthesis, ammonium uptake and cell composition in the macroalga *Hypnea spinella* (Gigartinales, Rhodophyta). *Journal of applied phycology*, 24, 815-823.

SUDHAKAR R, GOWDA N AND VENU G. 2001. Mitotic abnormalities induced by silk dyeing industry effluents in the cells of *Allium cepa*. Cytologia 66: 235-239.

VINUGANESH, A. *et al.* (2022). Influence of seawater acidification on biochemical composition and oxidative status of green algae *Ulva compressa*. Science of the Total Environment, v. 806, p. 150445

ZHANG, Haihan *et al.* Effects of hydrogen peroxide on *Scenedesmus obliquus*: Cell growth, antioxidant enzyme activity and intracellular protein fingerprinting. Chemosphere, v. 287, p. 132185, 2022.

ZHOU, Tingru *et al.* Supressão da cianobactéria de floração aquática *Microcystis aeruginosa* por algicida peróxido de hidrogênio maximizada por meio de morte celular programada. *Journal of dangerous materials* , v. 393, p. 122394, 2020.

WANG, Kaiying *et al.* Effects of acidification during storage on emissions of methane, ammonia, and hydrogen sulfide from digested pig slurry. *Biosystems Engineering*, v. 122, p.2

WANG, Chao *et al.* *Effects of iron on growth, antioxidant enzyme activity, bound extracellular polymeric substances and microcystin production of Microcystis aeruginosa* FACHB-905. *Ecotoxicology and environmental safety*, v. 132, p. 231-239, 2016.