



MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS RISCOS E PERSPECTIVAS NO PORTO DO ITAQUI

GOVERNO DO
MARANHÃO
TRABALHANDO PARA TODOS

EMAP
Empresa Maranhense
de Administração Portuária



**PORTO DO
ITAQUI**

Copyright 2026 by i-EDUCAM

Organização: Gerência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP)

Capa: Enom de Oliveira Silva

Foto da capa: Cedida pela EMAP

Presidente da EMAP: Oquerlina Maria Costa Silva

Diretora de Relações Institucionais da EMAP: Cristiana Leal Ferreira Duailibe Costa

INDEXADO POR / INDEXED BY

Bibliografia Brasileira Gerência de Pesquisa Desenvolvimento e Inovação da EMAP (organização)

Gerência de Pesquisa Desenvolvimento e Inovação da EMAP (organização)

ISBN: 978-65-272-2531-7

DOI: 10.29327/5850749

Título: Mudanças climáticas globais: riscos e perspectivas no porto do Itaqui

Tipo de Suporte: E-book

Formato de Ebook: PDF



i-EDUCAM

www.i-educam.com.br

Link para a publicação:

Os autores de cada capítulo são responsáveis pelos textos e fotografias.

O conteúdo publicado não representa a posição oficial do i-EDUCAM

Sumário

APRESENTAÇÃO

Scarlleth Patricia Salomão da Silva	
Gabriel Fernando Mateucci Cássia	
Gabrielle de Jesus Souza	
Carlos César Santos Júnior	
Wesley Lima Barbosa	
Luane Lemos Felicio Agostinho	
.....	06-09

CAPÍTULO 01

Sistemas Meteorológicos Globais e Seus Impactos Regionais

Wesley Lima Barbosa	
DOI: 10.29327/5850749.1-1	
.....	11-19

CAPÍTULO 02

Modelagem Hidrodinâmica e de Ondas ao Largo do Maranhão

Cláudia K. Parise, Sebastián A. G. Loyola, Heitor Perotto, Leonardo G. de Lima, João Luiz, B. de Carvalho, Luis Felipe F. de Mendonça, Luciano P. Pezzi, Alessandro L. Aguiar.	
DOI: 10.29327/5850749.1-2	
.....	21-70

CAPÍTULO 03

Cenários e Projeções de Mudanças Climáticas sobre a Hidrossedimentologia da Bacia Hidrográfica do Rio Mearim

Jadson Freire da Silva, Elisabeth Regina Cavalcanti Silva, Rodrigo de Queiroga Miranda, Pedro Paulo Lima Silva, Filipe Daniel Dutra de Moraes, Yenê Medeiros Paz	
DOI: 10.29327/5850749.1-3	
.....	72-89

CAPÍTULO 04

Monitoramento Ambiental em Ecossistemas Costeiros: Uma Estratégia Fundamental diante das mudanças climáticas

Lorena Karine Santos Sousa, Jordana Adorno Furtado, Wallacy Borges Teixeira Silva, Hanna, Gabriely Pinto Gonçalves, Ligia Tchaicka

DOI: 10.29327/5850749.1-4

..... 91-116

CAPÍTULO 05

A Sustentabilidade no Oceano: Desafios e Estratégias para Portos Brasileiros em Relação ao ODS 14

Darlaine Ribeiro Cunha, Clóvis Bôsko Mendonça Oliveira, Newton Narciso Pereira, Marcelo de Santana Porte, Renilson José Silva Resende, Natália Viana Diniz, Sérgio Sampaio Cutrim, Markus Dannylo Carneiro Costa,

DOI: 10.29327/5850749.1-5

..... 118-137

CAPÍTULO 06

Gestão do Carbono na Agricultura Brasileira: A Era do Sensoriamento Remoto e Big Data

Gustavo André de Araújo Santos

DOI: 10.29327/5850749.1-6

..... 139-166

CAPÍTULO 07

ÁRVORES NATIVAS AMAZÔNICAS E SEQUESTRO DE CARBONO: contribuições científicas para a sustentabilidade do Porto do Itaqui

Fábio Afonso Mazzei Moura de Assis Figueiredo, Anyela Marcela Ríos-Ríos, Carlos Wendell Soares Dias, Cinthya Veras de Aguiar, Diego Pereira Santos, Fabrício de Oliveira Reis, Jailma Ribeiro de Andrade, Nahor Daniel Ribeiro Diniz, Sérgio Heitor Sousa Felipe, Thayanna Vieira Costa, Tiago Massi Ferraz, Thais Roseli Corrêa

DOI: 10.29327/5850749.1-7

.....168- 187

CAPÍTULO 08

Conexão verde: Hub de energia on-shore para navios em Itaqui

Clôvis Bôsko Mendonça, Darliane Ribeiro Cunha, Prof. José Gomes de Matos, Prof. Shigeaki Leite de Lima, Hercules Araújo Oliveira, Vitor Renato Pereira Santos

DOI: 10.29327/5850749.1-8

..... 189-206

Apresentação

As mudanças climáticas deixaram de ser um assunto distante ou restrito ao meio acadêmico. Seus efeitos já são percebidos no cotidiano de pessoas, cidades e atividades econômicas, especialmente em regiões costeiras. O aumento do nível do mar, as chuvas mais intensas ou irregulares, os ventos mais fortes e as alterações no comportamento dos oceanos afetam diretamente a forma como esses territórios são ocupados, planejados e utilizados. Não se trata de projeções abstratas ou relatórios internacionais distantes. As mudanças climáticas já fazem parte da realidade do presente, manifestando-se nos padrões de chuva que se alteram, na intensidade dos ventos, na dinâmica dos rios, na circulação oceânica e nas condições que moldam diariamente a operação portuária. São processos globais que se tornam locais e que exigem respostas igualmente concretas.

Diante desse cenário, os portos assumem um papel estratégico. Além de serem fundamentais para o desenvolvimento econômico e para a circulação de mercadorias, estão localizados em áreas naturalmente sensíveis às variações do clima. A operação portuária depende de condições ambientais relativamente estáveis, como segurança para a navegação, controle do canal de acesso e previsibilidade do tempo. Quando essas condições se alteram, surgem desafios diretos para a eficiência das operações, a segurança das pessoas e a preservação da infraestrutura. Compreender o clima é, portanto, compreender o território. Os sistemas meteorológicos de grande escala influenciam o regime pluviométrico regional; a variabilidade oceano-atmosfera repercute nas bacias hidrográficas; as transformações no transporte de sedimentos alcançam o estuário e dialogam diretamente com a realidade portuária. Infraestrutura, ambiente e clima formam um sistema interdependente no qual nenhum componente pode ser compreendido isoladamente.

Além disso, os temas atrelados a mudanças climáticas, como descarbonização, transição energética e corredores verdes, vêm ganhando espaço na agenda geoeconômica global, uma vez que surgem com potencial de gerar novos negócios e novas cadeias de valor que podem conduzir a pauta econômica e definir as parcerias comerciais nos próximos anos. Nesse contexto, a ciência aplicada emerge como eixo estruturante para a resposta aos desafios climáticos. A modelagem hidrodinâmica e de ondas, as projeções climáticas, as análises hidrossedimentológicas e o uso de tecnologias de monitoramento e sensoriamento remoto demonstram que é possível reduzir incertezas e qualificar decisões. A ciência deixa de ser apenas interpretativa e passa a ser estratégica — ferramenta concreta para antecipar riscos, planejar investimentos e fortalecer a resiliência institucional.

Em razão disso, o Porto do Itaqui tem assumido posição de destaque na agenda de mitigação das mudanças climáticas no setor portuário brasileiro. Foi o primeiro porto público do país a contratar um Plano de Descarbonização estruturado, desenvolvido em parceria com a Fundación Valenciaport, da Espanha, referência internacional em sustentabilidade portuária. O trabalho permitiu não apenas a realização de um inventário abrangente de emissões de gases de efeito estufa, incluindo fontes tradicionalmente não consideradas em inventários portuários, mas também a construção de cenários futuros de emissões, metas de redução e estratégias para a transição energética do complexo portuário. Essa iniciativa posicionou o Itaqui entre os portos pioneiros da América Latina na incorporação de critérios climáticos ao planejamento estratégico de longo prazo. Ao fomentar pesquisas e integrar conhecimento científico à gestão, o Porto do Itaqui

consolida uma postura proativa diante dos desafios climáticos, reconhecendo que investir em ciência é investir em futuro e que a infraestrutura mais importante de uma organização é aquela que sustenta suas decisões: a infraestrutura do conhecimento.

Por outro lado, o Porto do Itaqui, situado na Baía de São Marcos, no litoral do Maranhão, encontra-se em um ambiente marcado por grandes variações de maré, intensa movimentação de sedimentos, influência de rios e forte interação entre oceano e atmosfera. O Itaqui opera em um sistema natural dinâmico e complexo. Por isso, compreender o comportamento do clima e do ambiente costeiro é fundamental para entender os desafios e as oportunidades da gestão portuária na região. O monitoramento contínuo reforça essa compreensão ao transformar dados em conhecimento e conhecimento em governança. Ao observar de forma sistemática os ecossistemas costeiros, a dinâmica fluvial e as variáveis atmosféricas, cria-se uma base sólida para decisões responsáveis e sustentáveis. Adaptar-se às mudanças climáticas não é agir após o impacto; é construir capacidade de resposta antes que ele se imponha.

Além da inserção nesse ambiente costeiro peculiar, o Itaqui destaca-se como o principal porto do Arco Norte e o quarto maior porto público do Brasil em volume de cargas movimentadas. Em 2025, atingiu 36,8 milhões de toneladas, com forte protagonismo na exportação de grãos sólidos vegetais. Ao longo da última década, o crescimento expressivo da movimentação consolidou sua importância estratégica para a logística nacional, ao mesmo tempo em que ampliou a complexidade operacional e a necessidade de soluções estruturantes, tecnológicas e inovadoras. A sustentabilidade percorre essa agenda como princípio orientador. Seja na proteção dos oceanos em consonância com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 14, na gestão do carbono no setor produtivo ou na valorização de espécies nativas amazônicas como aliadas na mitigação climática, evidencia-se que desenvolvimento econômico e responsabilidade ambiental não são escolhas excludentes. São dimensões complementares de um mesmo compromisso institucional.

O protagonismo do Itaqui nessa agenda extrapola seus limites operacionais. A experiência adquirida na elaboração de inventários de emissões e na construção de estratégias de descarbonização contribuiu para impulsionar iniciativas setoriais mais amplas, como a criação e participação em fóruns colaborativos nacionais dedicados à redução das emissões no setor portuário e aquaviário. O porto também participa ativamente da construção de referenciais técnicos nacionais relacionados à contabilização de emissões e à transição energética portuária, reforçando seu papel como agente indutor de inovação e sustentabilidade no país.

Nesse contexto, a Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP) tem estruturado uma agenda consistente de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, voltada à construção de soluções aplicadas aos desafios do porto. Desde 2022, por meio de seu programa de fomento à pesquisa, já foram investidos mais de 15 milhões de reais em dezenas de projetos desenvolvidos em parceria com universidades locais, com destaque para o eixo ambiental. Esse esforço tem como foco compreender os impactos das mudanças climáticas sobre o sistema costeiro e desenvolver estratégias que fortaleçam a resiliência operacional e ambiental do porto. Mais do que reunir estudos técnicos, este

livro reflete um esforço institucional de aproximação entre ciência e prática que vai muito além da simples compilação de pesquisas. Trata-se de um posicionamento deliberado da organização em reconhecer que o conhecimento produzido nas universidades e centros de pesquisa só se torna verdadeiramente transformador quando dialogado com a realidade operacional do porto, quando confrontado com os desafios concretos enfrentados diariamente pelos gestores e equipes operacionais, e quando integrado às decisões estratégicas de longo prazo.

Ao longo dos capítulos desta obra, fica evidente a importância fundamental da cooperação entre pesquisadores, gestores e equipes operacionais. Essa colaboração não é um arranjo ocasional ou um exercício acadêmico desconectado da realidade. É, antes, a expressão de uma cultura de decisão baseada em conhecimento, inovação e responsabilidade ambiental que o Porto do Itaqui vem cultivando de forma consistente. Cada pesquisa apresentada neste livro é resultado dessa integração entre diferentes perspectivas e saberes. Os pesquisadores trazem rigor metodológico e compreensão profunda dos processos naturais; os gestores trazem visão estratégica e compreensão das prioridades institucionais; as equipes operacionais trazem conhecimento prático e experiência acumulada. Essa convergência de saberes cria um ambiente propício para que a inovação não seja apenas tecnológica, mas também institucional e gerencial, permitindo que soluções cientificamente robustas se transformem em práticas operacionais efetivas.

É a partir dessa compreensão que este livro foi concebido. A obra reúne pesquisas desenvolvidas com o apoio do edital de pesquisas do Porto do Itaqui, que incentivou a produção de conhecimento voltado à análise dos impactos das mudanças climáticas e da variabilidade do clima sobre o ambiente costeiro e as atividades portuárias. Ao reunir pesquisas voltadas à compreensão dos impactos climáticos e ao desenvolvimento de soluções para mitigação e adaptação, esta obra reflete o compromisso do Porto do Itaqui com uma agenda climática abrangente, alinhada aos desafios globais da descarbonização e à construção de sistemas portuários mais resilientes, competitivos e preparados para o futuro. Não se trata apenas de responder aos imperativos ambientais do presente, mas de antecipar os desafios que virão, de construir capacidades institucionais que permitam ao porto se adaptar às mudanças, e de posicionar a organização como referência no setor portuário brasileiro e latino-americano em matéria de sustentabilidade e inovação. Este compromisso se materializa em cada página desta obra, em cada estudo apresentado, em cada análise que conecta a ciência ao planejamento estratégico e à operação cotidiana do porto.

Nos primeiros capítulos do livro, o leitor é introduzido aos principais processos climáticos e meteorológicos que atuam em escala global e regional. Esses capítulos apresentam, de forma didática, como fenômenos atmosféricos influenciam o regime de chuvas, os ventos e a circulação atmosférica no Maranhão, criando a base necessária para compreender os impactos observados no ambiente costeiro e nas operações do porto.

Na sequência, a obra avança para a análise da dinâmica oceânica e costeira da Baía de São Marcos. Capítulos dedicados a esse tema discutem o comportamento das correntes, das ondas e dos processos de transporte de sedimentos, mostrando como essas variáveis interferem no canal de acesso, na navegação e na manutenção da infraestrutura portuária. Essa abordagem permite ao leitor compreender de que forma o ambiente físico responde às variações do clima e às forçantes naturais da região.

O livro também dedica espaço à apresentação de estudos baseados em modelagem ambiental, uma ferramenta essencial para analisar sistemas complexos e projetar cenários futuros. Esses capítulos explicam como modelos numéricos são utilizados para simular o comportamento do oceano e da atmosfera, avaliar riscos associados a eventos extremos e apoiar o planejamento de longo prazo do Porto do Itaquí frente às mudanças climáticas.

Em uma etapa complementar, a obra aborda estratégias voltadas à sustentabilidade e à mitigação dos impactos climáticos. Capítulos específicos discutem iniciativas relacionadas ao sequestro de carbono, ao uso de soluções baseadas na natureza e à integração de práticas ambientais às políticas institucionais do porto, evidenciando como ciência e sustentabilidade podem caminhar juntas no contexto portuário.

Ao final da leitura, o público perceberá que discutir mudanças climáticas no contexto do Porto do Itaquí não significa tratar de um problema distante ou abstrato. Trata-se de compreender processos que já influenciam, de forma direta, a navegação, a logística, a segurança e o planejamento da infraestrutura. A resiliência portuária não se constrói apenas com concreto e aço, mas com informação, planejamento e visão de longo prazo. É na convergência entre conhecimento científico, gestão estratégica e responsabilidade ambiental que se desenha o futuro do Porto do Itaquí — um futuro em que inovação e sustentabilidade caminham lado a lado, transformando desafios globais em oportunidades de fortalecimento institucional. Ao apresentar diferentes perspectivas e estudos aplicados, a obra convida o leitor a entender o presente e a refletir sobre caminhos possíveis para tornar o Porto do Itaquí cada vez mais preparado, resiliente e sustentável.



Capítulo 01

SISTEMAS METEOROLÓGICOS GLOBAIS E SEUS IMPACTOS REGIONAIS

Wesley Lima Barbosa

DOI: 10.29327/5850749.1-1

view online: [https://publicacoes.even3.com.br/book/
mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495](https://publicacoes.even3.com.br/book/mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495)

Sistemas Meteorológicos Globais e Seus Impactos Regionais

Wesley Lima Barbosa

Resumo

O capítulo inaugura a obra ao conduzir o leitor por uma introdução clara e fundamentada aos principais sistemas meteorológicos que atuam em escala global e que influenciam diretamente o clima do Maranhão e do litoral onde se insere o Porto do Itaqui. O texto estabelece as bases necessárias para compreender como processos atmosféricos de grande escala se refletem no comportamento do tempo e do clima em nível regional, conectando fenômenos globais a impactos locais. Ao longo do capítulo, são apresentados os principais mecanismos que controlam a distribuição das chuvas, a circulação dos ventos e a variabilidade climática na região, com destaque para sistemas como a Zona de Convergência Intertropical e outros padrões atmosféricos que modulam o regime climático do Norte e Nordeste do Brasil. O autor explica de forma didática como esses sistemas interagem com as características geográficas e ambientais do Maranhão, influenciando diretamente a dinâmica hidrológica e costeira. O capítulo também discute como essas variações climáticas se manifestam na bacia do rio Mearim, afetando o transporte de sedimentos e as condições do canal de acesso ao Porto do Itaqui. Ao relacionar clima, hidrologia e dinâmica costeira, o texto evidencia a importância de compreender os processos atmosféricos como parte integrante do planejamento e da gestão portuária. Mais do que uma descrição dos sistemas meteorológicos, o capítulo oferece ao leitor uma visão integrada entre ciência do clima e aplicações práticas, mostrando como o conhecimento sobre os padrões atmosféricos globais e regionais contribui para a tomada de decisão, a avaliação de riscos e a adaptação das operações portuárias frente às mudanças climáticas. Ao apresentar conceitos fundamentais de forma acessível, este capítulo cumpre o papel de abrir a obra, preparando o leitor para os temas abordados nos capítulos seguintes e reforçando a ideia central do livro: compreender o clima é essencial para compreender o funcionamento e o futuro do Porto do Itaqui.

1. INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre, essencial para a manutenção da vida, formou-se há cerca de 4,6 bilhões de anos. Inicialmente composta por hidrogênio e hélio, sua composição evoluiu ao longo do tempo com a liberação de gases vulcânicos, surgimento da fotossíntese e o acúmulo de oxigênio. Essa transformação permitiu o desenvolvimento de uma atmosfera rica em nitrogênio e oxigênio, regulando a temperatura do planeta por meio do efeito estufa natural (CATLING, 2020).

Contudo, a partir da Revolução Industrial, no século XVIII, a queima intensiva de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), associada ao desmatamento e à urbanização acelerada, promoveu um desequilíbrio no balanço radiativo terrestre. A concentração de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x), passou a crescer de forma exponencial, intensificando o aquecimento global (Ferretti DF, 2005).

Os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), especialmente o Sexto Relatório de Avaliação (AR6), demonstram com elevado grau de confiança que a influência humana é a principal responsável pelo aquecimento observado desde meados do século XX. O IPCC destaca impactos já visíveis nos sistemas atmosféricos, oceânicos e terrestres, com aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, alterações no ciclo hidrológico e elevação do nível do mar (IPCC, 2021).

Neste capítulo, discutiremos como os fenômenos atmosféricos globais se manifestam regionalmente, com foco especial nos sistemas meteorológicos que influenciam a bacia do rio Mearim e seus desdobramentos sobre o transporte sedimentar no canal de acesso ao Porto do Itaqui. Também abordaremos como esses fenômenos podem afetar a logística de escoamento de commodities como soja e milho.

Mas antes disso, vamos entender o atual contexto climatológico das chuvas sobre o estado. A figura 1 mostra a média de chuvas no Maranhão entre 1991 e 2020. O mapa mostra um padrão bem acentuado diferenciando as chuvas que acontecem no norte do estado, região a qual recebe os maiores volumes anuais de chuva (mais de 1.850 mm/ano), e ao sul maranhense, região que apresenta os menores índices (menos de 1.090 mm/ano). Entre essas duas regiões, o centro, o leste e o oeste do estado ficam em uma faixa intermediária, com chuvas variando entre 1.100 mm e 1.850 mm ao ano.

Esse comportamento pode ser explicado pela combinação dos sistemas meteorológicos discutidos nas próximas páginas:

Figura 1 - Climatologia de chuva no Maranhão (1991–2020).

Observa-se que o norte do estado apresenta os maiores índices de chuva, enquanto o sul concentra os menores valores.



Fonte: SEMA

- SISTEMAS METEOROLÓGICOS E SEUS IMPACTOS REGIONAIS

A região do Maranhão, onde está inserida a bacia hidrográfica do rio Mearim, é marcada por um clima tropical úmido, com um regime de chuvas monomodal concentrado entre os meses de janeiro e maio, e uma estação seca entre junho e dezembro. A média anual de precipitação no vale do Mearim varia entre 1.800 mm na foz do rio (ou baixo Mearim) e 1.000 mm na nascente do rio (ou alto Mearim) (DOS SANTOS, et al., 1965).

Os principais sistemas meteorológicos responsáveis pelas chuvas sobre a bacia do rio Mearim incluem:

- ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL (ZCIT): A ZCIT constitui o principal sistema meteorológico responsável pelo início do período chuvoso no norte do Maranhão. Seu deslocamento ocorre de forma sazonal, acompanhando a migração da insolação máxima. Durante o verão no Hemisfério sul (dezembro, janeiro e fevereiro), a ZCIT avança em direção ao sul da linha do Equador, alcançando a faixa latitudinal onde se encontra o norte maranhense. Esse movimento inter-hemisférico, ilustrado no esquema abaixo, é fortemente controlado pelas condições oceânicas, uma vez que a temperatura da superfície do mar regula a posição e a intensidade desse sistema atmosférico (MOLION e BERNARDO, 2002).

Quando as águas do Atlântico Norte apresentam temperaturas mais elevadas, condição associada à fase positiva do dipolo do Atlântico, a ZCIT tende a se posicionar ao norte da linha do Equador. Nessa configuração, a região norte do Maranhão recebe pouca ou quase nenhuma precipitação, correspondendo ao período de estiagem que se estende, em geral, de junho a dezembro.

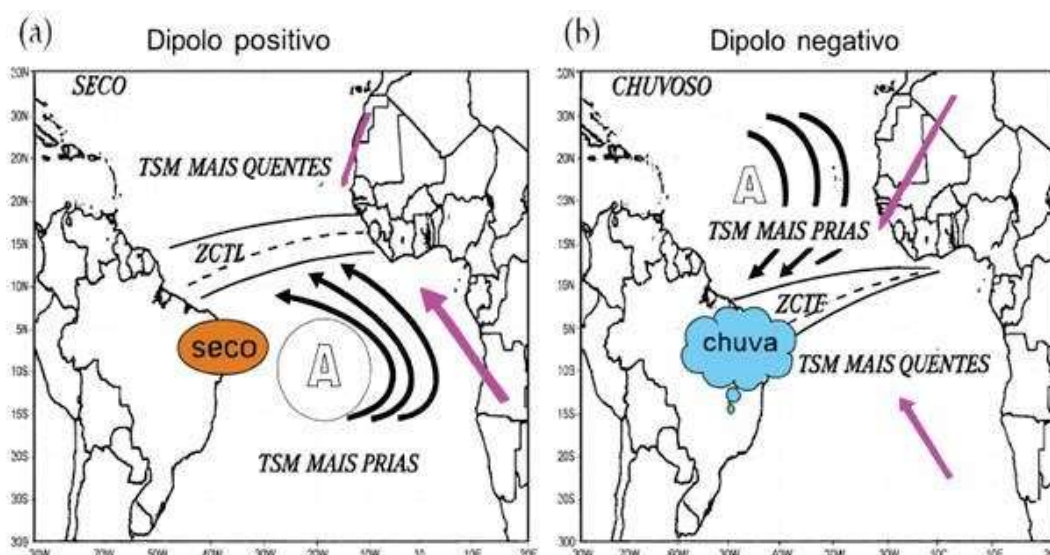
Por outro lado, quando as águas do Atlântico Sul estão mais quentes, caracterizando a fase negativa do dipolo, a ZCIT desloca-se para o sul do Equador. Nesse cenário, intensificam-se os índices pluviométricos sobre o norte maranhense, marcando o período da estação chuvosa.

Além do aquecimento diferenciado do Atlântico Tropical, o posicionamento da ZCIT também é condicionado pela atuação de dois sistemas de grande escala: os Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Atlântico Norte (ASAN). No esquema ilustrativo (Figura 2), esses sistemas aparecem representados pela letra “A” e correspondem a centros de alta pressão atmosférica. Por sua natureza, funcionam como dispersores de ventos, gerando

os alísios de sudeste no hemisfério sul (no flanco norte do ASAS) e os alísios de nordeste no hemisfério norte (no flanco sul do ASAN). A posição e a intensidade desses anticiclones modulam diretamente o deslocamento da ZCIT sobre o Atlântico Tropical (KAYANO e ANDREOLI, 2009).

De modo geral, tanto as variações na temperatura da superfície do mar quanto a configuração dos Anticiclones Subtropicais determinam a quantidade de chuva que atinge a bacia do rio Mearim. Esse regime pluviométrico, por sua vez, controla a dinâmica fluvial e intensifica o transporte de sedimentos durante os períodos de cheia associados aos picos de precipitação.

Figura 2 - Representação esquemática do Dipolo do Atlântico Tropical e seus impactos na precipitação no Maranhão.



Fonte: Adaptado de UVO (1998).

(a) Dipolo positivo: caracterizado por anomalias positivas de TSM (Temperatura da Superfície do Mar) no Atlântico Tropical Norte e anomalias negativas no Atlântico Tropical Sul, o que desloca a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para norte, favorecendo condições secas sobre o Maranhão. (b) Dipolo negativo: associado a anomalias negativas de TSM no Atlântico Tropical Norte e anomalias positivas no Atlântico Tropical Sul, o que desloca a ZCIT para sul, intensificando a chuva na bacia hidrográfica do rio Mearim.

- VÓRTICES CICLÔNICOS DE ALTOS NÍVEIS (VCANs): O VCANs são caracterizados como sistemas meteorológicos compostos por centros de pressão baixa que se formam na alta troposfera e se estendem até níveis médios. No centro desses grandes giros, o ar é frio com movimentos verticais subsidentes, ou seja, o ar se desloca em direção à aos baixos níveis da atmosfera (KOUSKY e GAN, 1982).

Para que o VCANs consiga influenciar as chuvas sobre o Maranhão deve-se levar em consideração as bordas desse giro. As regiões em que a borda do giro se encontra são regiões frequentemente afetadas por volumes de chuva. Isso acontece devido o movimento de ar quente e úmido que existe na periferia dos VCANs (KOUSKY e GAN, 1982). Na imagem de satélite a seguir observa-se a influência desse fenômeno sobre o Maranhão, que estava com nuvens carregadas associadas ao VCAN. Nota-se o centro do sistema com pouca nebulosidade, enquanto nas bordas do VCAN observa-se a presença de nuvens carregadas associadas à convergência de umidade, que naquele período avançavam em direção ao Maranhão e a outras áreas do Nordeste.

Figura 3 - Formação de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis sobre o Nordeste Brasileiro.



Fonte: Adaptado de BEZERRA1 (2016).

- **EL NIÑO–OSCILAÇÃO SUL (ENOS):** Esse é um dos fenômenos mais importantes para explicar a variação do clima de um ano para outro em escala global. Ele acontece a partir da interação entre o oceano Pacífico e a atmosfera e se manifesta de duas formas principais.

Na fase quente, chamada de El Niño, ocorre um aquecimento fora do normal das águas superficiais do Pacífico central e leste. Isso modifica os grandes sistemas de circulação do ar e muda o padrão das chuvas em várias partes do mundo, inclusive no Nordeste do Brasil. Já a fase fria, conhecida como La Niña, está associada ao resfriamento dessas águas e ao fortalecimento dos ventos constantes da região, geralmente trazendo efeitos opostos aos do El Niño (Philander, 1990; Grimm, 2009).

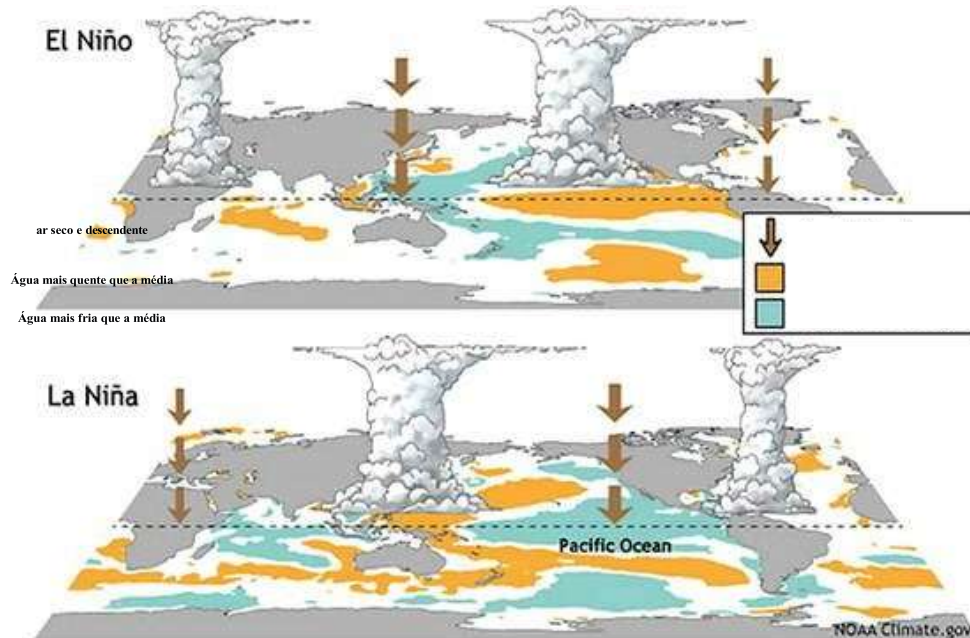
No Nordeste brasileiro, o ENOS tem grande influência sobre a quantidade de chuvas. Em anos de El Niño, há maior chance de ocorrerem secas prolongadas, porque a ZCIT tende a se deslocar mais para o norte, afastando-se da região. Já durante a La Niña, aumentam as chances de chuvas acima da média, principalmente quando o oceano Atlântico também apresenta águas mais aquecidas em sua porção norte. Dessa forma, o ENOS funciona como um regulador natural do regime de chuvas e, conseqüentemente, da disponibilidade de água, da agricultura e da vida das populações do semiárido, que dependem fortemente das chuvas de verão.

No El Niño (Figura 4), ocorre o aquecimento anômalo das águas do Pacífico Equatorial Leste e Central, o que enfraquece os ventos alísios e desloca a convecção (formação de nuvens de chuva) para o centro do oceano. Isso altera os grandes sistemas de circulação do ar e modifica o padrão das chuvas em várias regiões do planeta. No Maranhão, o efeito costuma ser de redução das chuvas, especialmente durante a estação chuvosa, contribuindo para estiagens mais intensas e irregularidade na recarga hídrica dos rios.

Já na fase de La Niña, ocorre o resfriamento anômalo das águas do Pacífico, acompanhado pelo fortalecimento dos ventos alísios e maior convergência de umidade sobre a América do Sul tropical. Esse cenário desloca a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para posições mais favoráveis ao Norte e Nordeste do Brasil, o que geralmente resulta em chuvas mais intensas e bem distribuídas sobre o Maranhão.

Além de modular diretamente as chuvas, o El Niño e a La Niña influenciam outros sistemas, como o Dipolo do Atlântico. Esse fenômeno está ligado às diferenças de aquecimento entre o Atlântico Norte e Sul e, quando combinado ao ENOS, pode potencializar ou amenizar as anomalias de chuvas sobre o Maranhão.

Figura 4 - Fenômenos El Niño e La Niña. Diferenças na temperatura da superfície do Oceano Pacífico e seus efeitos na circulação atmosférica, com aquecimento durante o El Niño e resfriamento durante o La Niña.



Fonte: Adaptado de NOAA

El Niño	La Niña
Aquecimento anômalo do Pacífico Equatorial; enfraquecimento dos ventos alísios	Resfriamento anômalo do Pacífico Equatorial; intensificação dos ventos alísios
Chuva Redução das chuvas, início mais tardio da estação chuvosa Rios Níveis mais baixos dos rios, estiagens prolongadas Agricultura Perdas nas lavouras de milho e soja devido ao déficit hídrico Porto do Itaqui Menos sedimentos no canal de acesso, risco reduzido de assoreamento	Chuva Aumento das chuvas, estação chuvosa mais interse e bem distribuída Rios Cheias mais frequentes, elevação rápida do nível dos rios Agricultura Benefícios para soja e milho, mas excesso de chuva pode prejudicar colheita Porto do Itaqui Maior carga de sedimentos no canal de acesso, risco elevado de assoreamento

Efeitos do
EL Niño e da
La Niña sobre
As chuvas no
Maranhão

REFERÊNCIAS

CATLING, D. C.; ZAHNLE, K. J. The Archean atmosphere. *Science Advances*, v. 6, n. 9, eaax1420, 2020.

FERRETTI, D. F. Unexpected changes to the global methane budget over the past 2000 years. *Science*, v. 309, p. 1714–1717, 2005.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by MASSON-DELMOTTE, V. et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

DOS SANTOS, A. I. M. *Breves considerações sobre o Vale do Mearim*. 1965.

BEZERRA, J. F. dos Santos. Análise do desenvolvimento e atuação do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis em janeiro de 2016 no Agreste Meridional, Pernambuco. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 2, p. 491-499, 2016.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. de O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, n. 1, p. 1–10, 2002.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da Região Nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. de A.; FERREIRA, N. J. (orgs.). *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2009. p. 213–233.

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. *Tellus*, v. 33, n. 6, p. 538–551, 1981.

PHILANDER, S. G. H. *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. San Diego: **Academic Press**, 1990.

GRIMM, A. M. Variabilidade interanual do clima no Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. de A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. da S. (orgs.). *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 233–275.

Capítulo 02

MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DE ONDAS AO LARGO DO MARANHÃO

**Cláudia K. Parise, Sebastián A. G. Loyola, Heitor Perotto,
Leonardo G. de Lima, João Luiz B. de Carvalho, Luis Felipe F.
de Mendonça, Luciano P. Pezzi, Alessandro L. Aguiar.**

DOI: 10.29327/5850749.1-2

view online: [https://publicacoes.even3.com.br/book/
mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495](https://publicacoes.even3.com.br/book/mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495)

MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DE ONDAS AO LARGO DO MARANHÃO

Cláudia K. Parise, Sebastián A. G. Loyola, Heitor Perotto,
Leonardo G. de Lima, João Luiz B. de Carvalho, Luis Felipe F.
de Mendonça, Luciano P. Pezzi, Alessandro L. Aguiar.

Resumo

Neste capítulo, os autores apresentam uma análise abrangente da modelagem hidrodinâmica e de ondas aplicada à região costeira do Maranhão, com foco especial nas áreas oceânicas que influenciam diretamente o Porto do Itaqui. O texto introduz o leitor aos fundamentos da modelagem numérica como ferramenta essencial para compreender o comportamento do oceano e apoiar o planejamento e a gestão portuária em um contexto de mudanças climáticas. Ao longo do capítulo, são discutidos os principais processos físicos que controlam a circulação oceânica e a propagação das ondas ao largo do litoral maranhense. A partir de simulações numéricas e do uso de bases batimétricas de alta resolução, os autores explicam como marés, ventos e características do fundo oceânico interagem para moldar as correntes, a altura das ondas e a dinâmica costeira da região. O capítulo destaca ainda a utilização de modelos acoplados de hidrodinâmica e ondas, capazes de representar com maior realismo a complexidade do sistema oceânico local. Essa abordagem permite analisar padrões sazonais, identificar áreas mais sensíveis a eventos extremos e compreender como variações climáticas podem alterar as condições oceânicas que afetam a navegação e as operações portuárias. Ao conectar resultados científicos a aplicações práticas, o capítulo demonstra como a modelagem ambiental se torna uma ferramenta estratégica para a avaliação de riscos, o planejamento de longo prazo e o fortalecimento da resiliência do Porto do Itaqui. A leitura oferece ao leitor uma base sólida para compreender os capítulos seguintes da obra, que aprofundam os impactos desses processos sobre a dinâmica sedimentar, a infraestrutura portuária e a adaptação às mudanças climáticas.

1. INTRODUÇÃO

O estado do Maranhão, localizado em uma região de transição climática e oceanográfica única no Nordeste brasileiro, possui uma costa complexa e altamente dinâmica. Seu litoral, que inclui as Reentrâncias Maranhenses (setor ocidental), o Golfão Maranhense (setor central) e os Lençóis Maranhenses (setor oriental), está sujeito a uma intrincada interação de processos hidrodinâmicos costeiros e marinhos. A região conta com marés de grande amplitude, podendo chegar a 4 m no setor central e mais interno do Golfão (Carvalho, 2025), correntes costeiras intensas podendo ultrapassar os 3 m s^{-1} (Czizewski *et al.*, 2021; Paschoaleti, 2023) e a ação constante de ondas superficiais de gravidade (Reis *et al.*, 2024) e ondas internas (Rosa *et al.*, 2021). Compreender e quantificar esses processos é de fundamental importância para o gerenciamento costeiro, a previsão de riscos ambientais e o planejamento de atividades econômicas, como transporte marítimo, aquicultura e exploração de recursos naturais.

A modelagem hidrodinâmica e de ondas na região do Maranhão vem se desenvolvendo gradualmente desde a década de 90, trazendo novos aportes para o entendimento das dinâmicas costeiras e marinhas locais. No âmbito estadual, pesquisas iniciais focaram na dinâmica de marés e correntes residuais, essenciais para entender a dispersão de sedimentos e nutrientes. Um dos primeiros trabalhos na região foi o de Rodrigues e Harari (1995) que construíram um modelo tridimensional tipo *Heaps*. O modelo tipo *Heaps* corresponde a uma formulação hidrodinâmica barotrópica baseada nas equações de águas rasas, inicialmente desenvolvida por Heaps (1969) para simular a propagação da maré e as correntes em regiões costeiras e plataformas rasas.

Esse tipo de modelo resolve a conservação da quantidade de movimento e da massa considerando a superfície livre, incorporando explicitamente o efeito da força de Coriolis, o gradiente de pressão hidrostática e termos de forçantes meteorológicas, como o estresse do vento e variações de pressão atmosférica. Ainda que haja a representação dos fundos irregulares no modelo, o fluido é considerado homogêneo, desconsiderando efeitos baroclínicos, ou seja, que envolvem variações de densidade da água do mar. A discretização no domínio do tempo e espaço por diferenças finitas permite simulações estáveis e eficientes da propagação da maré, da elevação média do nível da água devido à quebra das ondas (*set-up*) e das correntes residuais, um aspecto que justifica seu amplo uso em regiões de plataforma rasa, como é o caso do Maranhão. A simulação realizada por Rodrigues e Harari (1995) visou o entendimento da circulação na plataforma continental do Maranhão frente aos efeitos das principais componentes astronômicas

da maré, em especial da principal componente de maré semi-diurna lunar (M2), e de condições meteorológicas específicas, como diferenças entre verão e inverno.

Outros estudos também têm destacado a relevância da dinâmica de marés no litoral do Maranhão. Garcia (2007), Silva (2007) e Ferreira e Estefen (2009) descreveram que a interação entre a maré e a configuração geomorfológica costeira, e neste estado com a presença do Golfão Maranhense (que atua na amplificação da maré na região), resulta em fortes correntes de enchente e vazante, capazes de reorganizar bancos arenosos, canais e planícies de maré. Amaral e Alfredini (2010) e Neto (2012) destacaram que a complexidade morfodinâmica das duas baías maranhenses, a Baía de São Marcos e a Baía de São José, onde propõem que distintos padrões espaciais da circulação oceânica são gerados, os quais influenciam no tempo de residência das massas de água no Golfão. Dalbone (2014), González-Gorbeña (2015) e Bitencourt (2015) evidenciaram que a maré desempenha papel central na renovação hídrica e no controle da estratificação vertical no Golfão Maranhense, especialmente em sistemas estuarinos sujeitos a alta variabilidade da descarga fluvial.

O Projeto Baías do Brasil (2018) e o estudo de Czizewski (2020) demonstraram que correntes superiores a 2 m s^{-1} podem ocorrer em trechos mais estreitos dos canais mareais, intensificando o transporte de sedimentos e modulando os níveis de turbidez, efeito aprofundado posteriormente por Czizewski *et al.* (2021). Mais recentemente, Costa (2022) e Paschoaleti (2023) reforçaram que o entendimento detalhado desses processos é essencial para o planejamento de obras costeiras, expansão portuária, conservação de ecossistemas sensíveis e avaliação de impactos relacionados à variabilidade climática na região.

Ainda que avanços recentes em modelagem numérica tenham ampliado o conhecimento sobre a dinâmica costeira ao largo do Maranhão, a literatura especializada evidencia a necessidade de simulações com maior resolução espacial e temporal, capazes de representar adequadamente as diferentes escalas de variabilidade associadas à mudança climática e ao crescente uso antrópico da zona costeira. Nesse sentido, estudos em escalas regionais mais amplas, particularmente aqueles que abordam o domínio da Margem Equatorial Brasileira (MEB), têm incorporado o litoral maranhense como área-chave para a compreensão das interações costeiro-oceânicas em escala regional. Pesquisas como as de Aguiar *et al.* (2023), focadas na avaliação de recursos energéticos oceânicos na MEB, reforçam esse enquadramento, ao fornecerem o contexto dinâmico e ambiental no qual os processos que atuam na costa do Maranhão estão inseridos.

O Golfão Maranhense apresenta regiões com variações médias de 6 m de altura, sendo superadas apenas pelo Igarapé do Inferno, situado na Ilha de Maracá, no Amapá, onde as variações podem alcançar até 11 m (Vellozo e Alves, 2004). Como uma região com grandes variações de maré, seu potencial energético maremotriz tem sido objeto de muitos estudos. De acordo com Ferreira e Estefen (2009) foi observada uma maré de 7 m no terminal da Ponta da Madeira, cujo local foi apontado como favorável à fixação de uma usina maremotriz. Outro estudo sobre o potencial energético maremotriz no estuário do Bacanga foi realizado por Neto (2012), que utilizou como referência o estudo de Ferreira e Estefen (2009). Czizewski *et al.* (2020) empregaram um modelo hidrodinâmico tridimensional para reproduzir o comportamento das marés no Golfão Maranhense, com o objetivo de avaliar o potencial energético relacionado às marés. A partir das simulações constatou-se que o Golfão Maranhense é uma área adequada para a geração de energia por meio das marés, devido à extensão do estuário e às variações significativas na fase das ondas de maré. Com o objetivo de estimar de forma mais quantitativa o potencial de geração de energia das marés, Aguiar *et al.* (2024) calcularam a produção de energia a partir da energia potencial para barragens de maré hipotéticas situadas ao longo da Plataforma Equatorial Brasileira. Duas áreas do Golfão Maranhense foram listadas com capacidade de produção anual de energia superior a 1500 GWh.

A modelagem hidrodinâmica acoplada à dinâmica de ondas constitui elemento central na caracterização e previsão de processos costeiros, superando abordagens meramente descritivas e assumindo função estratégica no planejamento e gestão ambiental. No litoral maranhense, marcado por macromarés e alta mobilidade sedimentar, esses modelos fornecem parâmetros essenciais para avaliar cenários de uso e transformação da zona costeira. A incorporação da interação onda–corrente em modelos regionais aprimora a representação do estresse de radiação, do *set-up* e das correntes residuais, permitindo diagnósticos mais robustos sobre a variabilidade hidroclimática e a dinâmica sedimentar em diferentes condições oceanográficas. Modelos acoplados oceano-ondas, como ROMS–SWAN e Delft3D–WAVE, têm sido particularmente eficientes na análise desses processos, fornecendo estimativas mais robustas da hidrodinâmica e da morfodinâmica costeira, especialmente em regiões de macromaré e dinâmica sedimentar intensa, como o litoral do Maranhão (Ardhuin *et al.*, 2008; Warner *et al.*, 2010).

Ademais, a modelagem numérica oceano-ondas constitui ferramenta útil na análise da vulnerabilidade costeira à inundação e erosão, especialmente em um contexto de elevação do nível médio do mar e intensificação de eventos extremos em cenários de clima presente e futuro. Nesse sentido, contribui diretamente para o aprimoramento de previsões de risco, estimativas de transporte de sedimentos e simulações de dispersão de poluentes, oferecendo subsídios técnicos à promoção da resiliência socioambiental do litoral maranhense.

Portanto, a modelagem numérica de alta resolução — especialmente aquela baseada em modelos tridimensionais capazes de representar variações zonais, meridionais e verticais da circulação — constitui uma ferramenta essencial para a compreensão dos processos costeiros e oceânicos que atuam no litoral do Maranhão. Além de ampliar o conhecimento científico sobre sistemas dominados por macromarés e elevada dinâmica sedimentar, tais modelos desempenham papel estratégico no planejamento ambiental e na promoção da sustentabilidade da zona costeira da Margem Equatorial Brasileira (MEB). A integração entre diagnósticos locais de alta resolução e projeções climáticas em larga escala revela-se, assim, uma abordagem indispensável para enfrentar os desafios contemporâneos e futuros, consolidando-se como um dos pilares da gestão costeira integrada no estado.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta um estudo de modelagem hidrodinâmica e de ondas de alta resolução na região do Maranhão, abrangendo tanto a plataforma continental quanto as áreas oceânicas sob influência da Corrente Norte do Brasil. O objetivo principal é caracterizar a variabilidade espacial (superficial e vertical) e temporal dos campos hidrodinâmicos e de ondas, com ênfase nas diferenças sazonais e nas tendências das últimas três décadas. A análise é conduzida a partir de pontos representativos localizados na plataforma e em áreas oceânicas adjacentes, permitindo identificar as regiões de maior variabilidade e as zonas de intensificação da dinâmica marinha.

O capítulo seguinte descreve a metodologia adotada, incluindo os modelos hidrodinâmico e de ondas utilizados (ROMS e SWAN), as limitações e desafios associados às bases batimétricas disponíveis para a Plataforma Continental do Maranhão, a configuração dos experimentos numéricos, os dados de entrada e as métricas de validação das simulações. Em seguida, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, culminando nas considerações finais, que sintetizam as principais

contribuições deste estudo para o entendimento da variabilidade oceanográfica na costa maranhense e seu papel no contexto regional da MEB.

2. METODOLOGIA

- **Breve descrição dos modelos hidrodinâmico e de ondas**

O COAWST (*Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport Modeling System*) é um sistema de modelagem numérica sofisticado que integra modelos físicos distintos para simular interações complexas entre os diferentes componentes do sistema terrestre (Warner *et al.*, 2010). O acoplamento entre a circulação oceânica e as ondas de superfície constitui um dos processos centrais na representação numérica de ambientes costeiros. Trata-se de um mecanismo complexo que integra a dinâmica de larga escala do oceano aos processos de geração, propagação, quebra e dissipação das ondas, regulados por gradientes de vento, topo-batimetria e condições hidrodinâmicas locais. A adequada simulação desse acoplamento requer esquemas numéricos capazes de representar as trocas de momento e energia na interface ar-mar, incluindo o estresse de radiação, o *set-up* induzido por ondas e suas repercussões na circulação residual e no transporte sedimentar (Cavaleri *et al.*, 2012; Holthuijsen, 2010). O sistema COAWST é construído em torno de um núcleo de acoplamento MCT (*Model Coupling Toolkit*) que permite a troca eficiente de dados entre os modelos componentes. Para a interação oceano-onda, os dois principais modelos envolvidos são o ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) e o SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*).

O modelo oceânico ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) é um modelo numérico hidrodinâmico que resolve as equações primitivas do oceano, baseadas na aproximação de Boussinesq e na aproximação hidrostática (Shchepetkin e McWilliams, 2005). Ele é amplamente utilizado para simulações regionais devido à sua alta resolução espacial e flexibilidade na escolha de grades horizontais e verticais. Permite representar correntes, marés, circulação costeira e interações oceano-atmosfera, sendo adequado para estudos de dinâmica costeira e oceânica, inclusive no Oceano Atlântico Tropical Oeste (Varona *et al.*, 2017).

O modelo de ondas SWAN é um modelo de terceira geração desenvolvido para simular a geração, propagação e transformação de ondas de vento em águas costeiras e rasas (Booij *et al.*, 1999; Ris *et al.*, 1999). Ele resolve o balanço de energia espectral, considerando processos como refração, difração, dissipação por fricção e quebra de ondas. É amplamente usado para aplicações costeiras e de engenharia oceânica (p.e.,

Matos *et al.*, 2013).

O acoplamento entre o ROMS e o SWAN no COAWST é bidirecional, ou seja, ROMS >> SWAN e SWAN >> ROMS, e ocorre em passos de tempo definidos pelo usuário na etapa de configuração. As principais interações modeladas em uma simulação acoplada incluem:

i) Influência das ondas na circulação do oceano (SWAN >> ROMS):

O SWAN fornece ao ROMS parâmetros como a altura significativa de onda (H_s , em metros), período (T, em segundos) e comprimento (L, em metros) de onda. Essas informações são usadas para calcular o estresse de radiação de ondas, que modifica as correntes superficiais e a mistura turbulenta na camada superficial do oceano, um processo crítico para simular corretamente os processos costeiros. Além disso, a quebra de ondas contribui para pequenas variações no nível médio da água (*set-up* e *set-down*), afetando o transporte de sedimentos e a dinâmica costeira.

ii) Influência da circulação do oceano nas ondas (ROMS >> SWAN):

O ROMS fornece ao SWAN os campos de nível do mar e de correntes, que controlam a distribuição espacial das ondas durante sua propagação. No ambiente costeiro raso, especialmente, a circulação é fortemente modulada pela energia das ondas, cuja incidência oblíqua sobre o litoral gera correntes de deriva e escoamentos associados ao transporte sedimentar longitudinal, conforme descrito pela teoria do esforço de radiação das ondas (Longuet-Higgins e Stewart, 1964). Assim, esse acoplamento permite representar de forma integrada esse mecanismo, no qual a transferência de momento das ondas para a coluna d'água induz gradientes de tensão e intensifica correntes costeiras (Holthuijsen, 2007; Ardhuin *et al.*, 2008). Ademais, a variação do nível da maré modifica continuamente a profundidade efetiva, influenciando a localização da arrebentação, a dissipação da energia por quebra (Battjes e Janssen, 1978) e, portanto, o balanço dinâmico entre ondas, correntes e transporte de sedimentos ao longo da zona costeira.

Em suma, o sistema COAWST, através do acoplamento entre ROMS e SWAN, costuma permitir uma representação mais fiel e realista dos processos costeiros e oceânicos, onde as ondas e as correntes influenciam mutuamente a circulação na região.

- **Dados batimétricos disponíveis para a região**

A primeira etapa da modelagem numérica consistiu no levantamento dos dados batimétricos disponíveis para a região, a qual apresenta uma batimetria bastante irregular. Para isso, exploramos as diferentes bases de dados de reanálises e modelos batimétricos disponíveis (Tabela 1), tanto recentes quanto mais antigos, e realizamos uma comparação visual entre elas (Figura 1). Além disso, conduzimos uma análise comparativa e estatística com as cartas náuticas *raster* da Marinha do Brasil, em particular a *Carta da Série Internacional, Brasil – Costa Norte – Da Ilha Maiaú a Tutóia*, número 21600 INT.2109 (Figura 2), a qual é disponibilizada pelo Centro de Hidrografia da Marinha através do link: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-cartas-raster-72>

Tabela 1 - Bases de dados batimétricos disponíveis para nossa região e respectivos anos de lançamento e resolução horizontal.

Modelo	Ano	Resolução
ETOPO2	2001	2 minutos de arco (~3.7 km)
ETOPO1	2009	1 minuto de arco (~1.85 km)
ETOPO2022	2022	15 segundos de arco (~500 m)
SRTM15+ v2.7	2023 (v2.7)	15 segundos de arco (~500 m)
GEBCO_2024	2024	15 segundos de arco (~500 m)
GEBCO_2025	2025	15 segundos de arco (~500 m)

A batimetria utilizada nas simulações com os modelos ROMS e SWAN foi a GEBCO 2025 (*General Bathymetric Chart of the Oceans - Bathymetric Compilation Group, 2025*), a base de dados batimétricos que melhor representa as profundidades reais na região de estudo, em comparação com as cartas náuticas *raster* (que apresentou a menor diferença RMSD). Essa é a versão mais recente do modelo de terreno (*i.e.*, elevação + batimetria) global contínuo para oceano e terra da série GEBCO, lançada em agosto de 2025. Com resolução espacial de 15 segundos de arco (equivalente a 463,5 m), combina dados de batimetria multifeixe, levantamentos regionais e grades derivadas que incluem por exemplo modelos globais como o SRTM15+ v2.7. Na versão 2025, estima-se que 27,3% do fundo oceânico mundial já esteja mapeado com padrões modernos, representando um avanço em relação à versão anterior (26,1%). Este conjunto de dados é uma fusão da topografia terrestre com a topografia do fundo do mar medida e estimada, sendo a base de dados topográficos mais resoluta para a região até o presente momento.

Os dados estão disponíveis em formatos como netCDF, GeoTIFF e ASCII raster, além de serviços de acesso via OPeNDAP, o que facilita análises comparativas com cartas náuticas tradicionais.

Figura 1 - Batimetria (m) das diferentes bases de dados utilizadas e analisadas neste estudo, destacando as diferenças observadas sobre a Plataforma Continental do Maranhão (PCMA). O intervalo de profundidade considerado varia da superfície até 200 m, com o objetivo de enfatizar as variações na região costeira; a partir do limite da plataforma, as profundidades tornam-se superiores a esse valor.

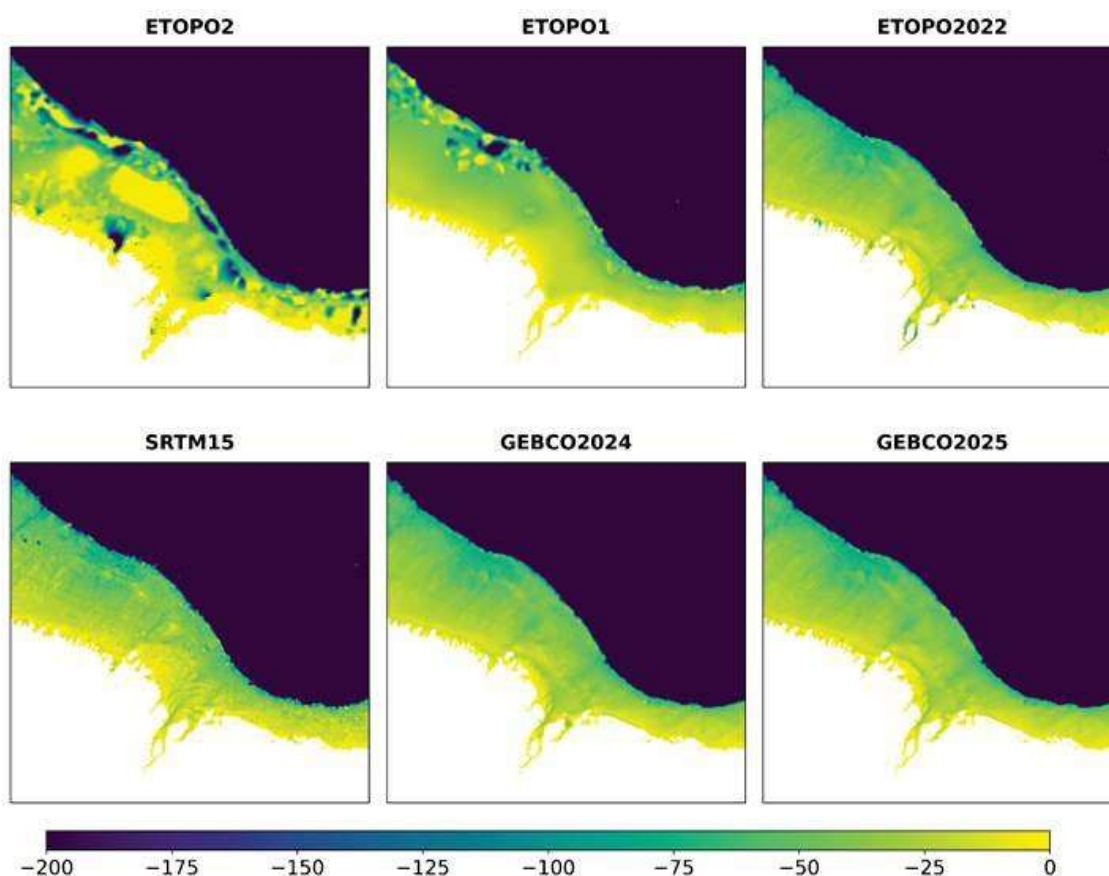
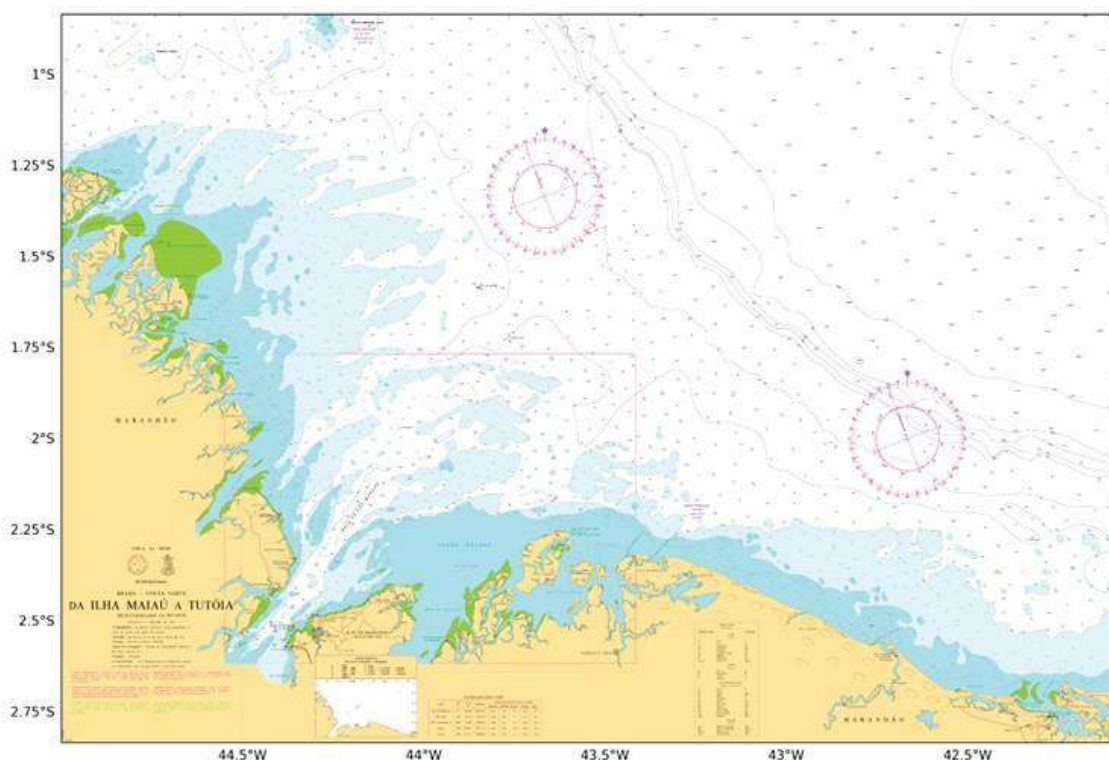


Figura 2 - Carta náutica da Marinha do Brasil nº 21600 (INT.2109), a mais recente disponível para a região de estudo.



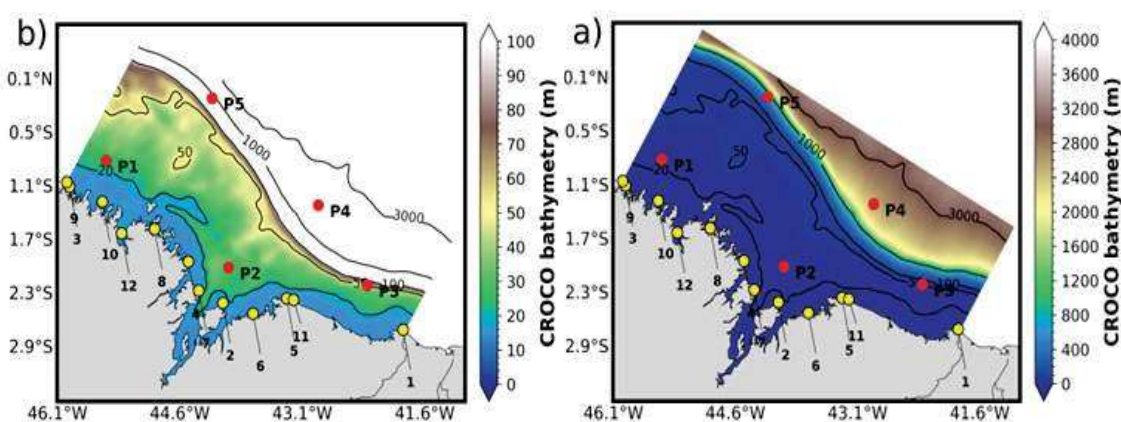
- **Configuração dos experimentos com o ROMS**

A grade oceânica foi rotacionada em 30° (Figura 3) de modo a alinhar o domínio numérico à orientação predominante da plataforma continental maranhense, que se estende ampla e suavemente no sentido NE–SW. Essa configuração otimiza a representação dos processos hidrodinâmicos sobre a plataforma — área de interesse principal — ao mesmo tempo em que reduz a quantidade de células computacionais em águas profundas para além do talude continental. Dessa forma, a resolução espacial é concentrada onde a variabilidade da circulação, das marés e do transporte sedimentar é mais expressiva, resultando em maior eficiência computacional sem comprometer a precisão do modelo. À medida que se delimita a extensão vertical total da grade a áreas mais rasas, ou seja, com as menores profundidades, observa-se um maior detalhamento das feições batimétricas na plataforma continental maranhense (Figura 3b).

Nesse contexto, destaca-se a isóbata fechada de 50 m (Figura 3b), no setor ocidental do domínio, que evidencia a presença do Parcel Manuel Luís, uma estrutura recifal submersa de grande relevância na região (Castro *et al.*, 2001; Cordeiro *et al.*, 2021).

A representação adequada dessa feição é fundamental, uma vez que o Parcel atua como barreira topográfica, influenciando a propagação e a dissipação das ondas, além de modificar os padrões locais de circulação ao induzir gradientes de velocidade e escoamentos residuais sobre a plataforma raso-mareal.

Figura 3 - Batimetria GEBCO 2025 utilizada nos experimentos numéricos realizados ao largo do Maranhão. O mapa (a) mostra uma visão geral com profundidades de 0 até 4000 m, enquanto o mapa (b) fornece detalhes da plataforma continental, limitando a profundidade de 0 a 100 m.



No que tange à resolução vertical, todas as grades empregaram uma configuração uniforme de 32 níveis na coluna d'água. Estes níveis são distribuídos em maior densidade nas proximidades da superfície, a fim de se obter uma representação mais precisa dos processos superficiais.

A Tabela 2 mostra a configuração dos parâmetros físicos utilizados nas simulações numéricas. No modelo ROMS, a configuração vertical da grade é controlada por diversos parâmetros. O número total de níveis na vertical é definido por N , o que significa que a coluna d'água será subdividida em 32 camadas. Os parâmetros θ_s e θ_b controlam a distribuição vertical das camadas, com o primeiro atuando na superfície, e o segundo influenciando a estratificação próxima ao fundo. O parâmetro hc é a profundidade crítica que determina a transição entre as camadas de sigma puras e aquelas influenciadas pela topografia. Além disso, $hmin$ define a profundidade mínima permitida no domínio, garantindo estabilidade numérica, $hmax_coast$ especifica a profundidade máxima próxima à costa, controlando a suavidade da batimetria costeira, e $hmax$ é a máxima profundidade que o modelo pode resolver.

Tabela 2 - Parâmetros de configuração da grade vertical do modelo ROMS.

Parâmetro	Descrição	Valor
N	Número de níveis verticais	32
theta_s	Parâmetro de alongamento vertical na superfície	5.0
theta_b	Parâmetro de alongamento vertical no fundo	0.6
hc	Profundidade crítica (m)	20.0
hmin	Profundidade mínima permitida (m)	15.0
hmax_coast	Profundidade máxima na zona costeira (m)	20.0
hmax	Profundidade máxima (m)	6000.0

As simulações solo com o modelo ROMS foram realizadas com saídas de frequência diária para variáveis escalares (TSM, SSM, SSH, entre outras, Tabela 5), e com frequência horária para variáveis vetoriais (componentes das correntes barotrópica/baroclínica e vento, zonal e meridional) para o período integral de 1993 a 2025 (último mês simulado, maio 2025) numa grade numérica única com resolução espacial de 3 km e vertical de 32 níveis. O experimento ROMS foi configurado com um passo de tempo (dt) de 90 s, o que define o intervalo temporal de integração das equações hidrodinâmicas. Cada simulação cobre um ano completo, com NTIMES = 351360 para anos bissextos (366 dias) e NTIMES = 350400 para anos comuns (365 dias). O parâmetro NDFAST indica que o modelo executa 60 subpassos rápidos para resolver os modos barotrópicos (modos de superfície) dentro de cada passo baroclínico, garantindo estabilidade numérica.

A grade espacial é dividida em 7 partições na direção I (NtileI = 7) e 6 na direção J (NtileJ = 6), totalizando 42 núcleos de processamento (ou *tiles*), que foram distribuídos em um servidor, apelidado de *Stokes*. Cada *tile* calcula uma parte da grade, o que permite simulações paralelas mais eficientes. A resolução horizontal é definida por Lm= 162 e Mm = 126, que representam o número de pontos internos da malha na direção leste-oeste (I) e norte-sul (J), respectivamente.

O arquivo '*h*' define as opções físicas e numéricas do experimento ROMS configurado para a região tropical do Atlântico Oeste. O modelo resolve a dinâmica tridimensional do oceano (SOLVE3D), incluindo temperatura, salinidade e correntes, com equações não lineares de estado (NONLIN_EOS) e coordenada vertical sigma (NEW_S_COORD). São ativados processos como advecção e difusão horizontal e vertical (UV_ADV, TS_U3HADVECTION, TS_C4VADVECTION, TS_DIF2), além

de mistura turbulenta vertical baseada no esquema LMD (Large–Mellor–Dewar) (LMD_MIXING), que inclui convecção, mistura diápica e efeitos não-locais. As condições de contorno e de superfície são realistas, com fluxos de calor, evaporação, precipitação, radiação solar e infravermelha (BULK_FLUXES, SOLAR_SOURCE, LONGWAVE, EMINUSP).

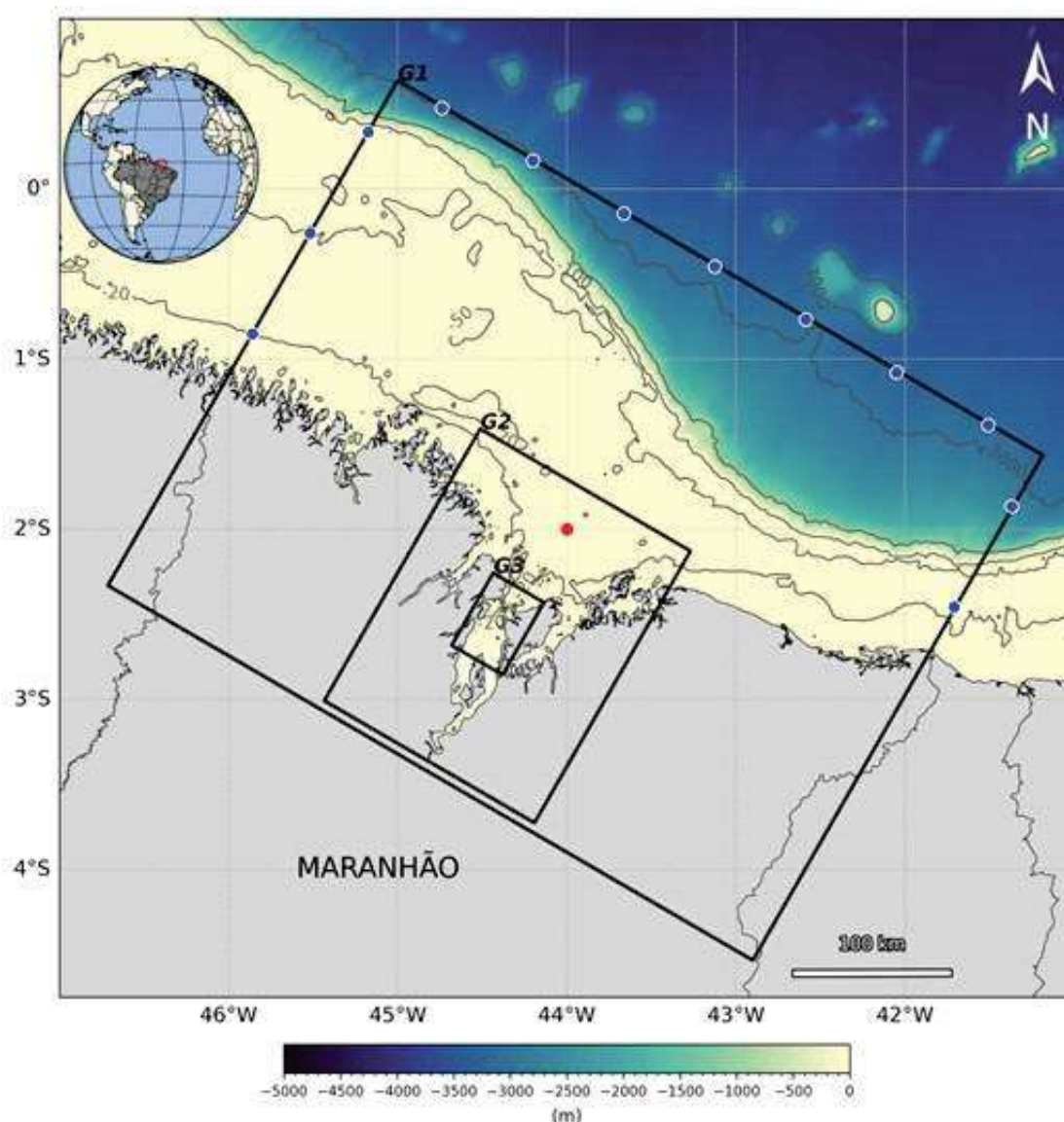
O modelo também considera marés (TIDE_GENERATING_FORCES, SSH_TIDES, UV_TIDES, RAMP_TIDES), o que permite representar as oscilações do nível do mar e as correntes de maré. A opção WET_DRY habilita a inundação e o escoamento em regiões costeiras rasas, enquanto MASKING define as áreas oceânicas e terrestres. A saída é configurada para gerar médias temporais (AVERAGES), incluindo coeficientes de viscosidade e difusividade (AVERAGES_AKV, AVERAGES_AKT, AVERAGES_AKS), úteis para análises climatológicas e diagnósticos de turbulência.

• Configuração dos experimentos com o SWAN

As simulações solo com o modelo SWAN foram realizadas em três grades curvilineares aninhadas nos domínios da Plataforma Continental do Maranhão - Golfão Maranhense - Baía de São Marcos (PCMA-GM-BSM), compreendidos entre as coordenadas de 4,53°S-0,6°N e 46,72°W-42,9°W. A primeira grade (G1) possui resolução de aproximadamente 1 km e inclui a PCMA, a segunda (G2) de aproximadamente 500 m cobrindo o GM e a terceira (G3) de aproximadamente 250 m com o foco na BSM. Estas grades foram geradas pelo *software GridBuilder*, versão v1.3.3, de modo que a grade de menor resolução forneça as condições de contorno (CCs) para as grades mais resolutas e o vértice noroeste da grade G1 inclua toda a extensão da PCMA, onde as ondas passam a ser mais influenciada pelo fundo (Figura 4).

Os experimentos foram rodados para os eventos extremos de onda no GM (ponto vermelho no mapa), selecionados a partir dos picos de H_s nas séries temporais das bases de dados globais.

Figura 4 - Malha batimétrica e grades numéricas para os domínios G1 (1 km), G2 (500 m) e G3 (250 m) da PCMA-GM-BSM, respectivamente. Pontos azuis representam os locais onde foram obtidos os dados de ondas globais (espectro ou integrado) usados como CCs nos experimentos com o SWAN.



O modelo SWAN possui diversos parâmetros físicos e numéricos que podem ser configurados para melhor representação do estado do mar em diferentes regiões e com diferentes condições iniciais. Para as simulações executadas foram selecionados os parâmetros presentes na Tabela 3. Para as simulações de onda são necessários dados batimétricos, dados das componentes zonais e meridionais de vento e dados das condições iniciais de parâmetros de onda nas bordas.

Tabela 3 - Parâmetros físicos e dinâmicos do modelo de ondas SWAN utilizados neste estudo.

Parâmetros do modelo SWAN utilizados neste estudo	
Modo simulado no tempo	Não estacionário
Faixa de frequência	0,05 - 1,0 Hz
Resolução de direção	10°
Esquema de propagação	BSBT (estacionário e não estacionário)
Interações Quádruplas	On
Passo de tempo da simulação	30 min
Número de interações	15
Esquema de fricção de fundo	JONSWAP
Difração	On
Método de geração de ondas	Komen

- **Dados de entrada para o ROMS**

Forçamento oceânico e condições iniciais

Para o forçamento oceânico e condições iniciais foram utilizados dados de frequência diária da reanálise GLORYS, versão 12v1. O GLORYS é uma reanálise global do oceano produzida pelo CMEMS (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*), com alta resolução horizontal (1/12°, ~9 km) considerando sua disponibilidade global e 50 níveis verticais, cobrindo o período desde 1993 até o presente. Baseado no modelo NEMO e forçado pelas reanálises ERA-Interim e ERA5, o sistema assimila dados de satélite e observações *in situ* usando um filtro de Kalman que é um esquema 3D-VAR para corrigir vieses. O produto fornece campos diários e mensais de temperatura, salinidade, correntes, nível do mar e gelo marinho em toda a coluna d'água.

Forçamento atmosférico

Para o forçamento atmosférico do modelo ROMS utilizamos dados horários do reanálise ERA5. O ERA5 é a quinta geração de reanálises atmosféricas globais do ECMWF, cobrindo o período de 1940 até o presente (novembro de 2025). Esse substitui o ERA-Interim e combina modelos numéricos com observações globais por meio de assimilação de dados, oferece estimativas horárias de diversas variáveis atmosféricas, de ondas oceânicas e da superfície terrestre, além de médias mensais. Os dados do ERA5 estão disponíveis em grade regular com resolução de $0,25^\circ$ e incluem estimativas de incerteza baseadas em um conjunto de 10 membros.

Forçamento das marés

Para o forçamento de maré, foi utilizada a solução harmônica do modelo global TPXO v7 (*TOPEX/POSEIDON global tidal model*) (Egbert; Erofeeva, 2002), a partir da qual foram extraídas as amplitudes e fases de 10 constituintes principais: M2, S2, N2, K2 (semidiurnas) e K1, O1, P1, Q1 (diurnas), além das componentes de longo período Mf e Mm. Essas constituintes representam a maior parte da energia do regime de marés da região, garantindo uma adequada representação do comportamento astronômico ao longo da costa maranhense. O TPXO é um conjunto de modelos globais, regionais e locais de maré barotrópica, desenvolvidos com o *software* OTIS (*OSU Tidal Inversion Software*), a partir da assimilação de dados de altimetria por satélite. Os modelos fornecem constantes harmônicas das marés em grade, incluindo batimetria, elevações e transportes lineares. As elevações são referenciadas ao nível médio do mar e os transportes são normalizados pela profundidade para definir as correntes de maré. O TPXO é amplamente utilizado em modelagem oceânica, sendo compatível com diversas ferramentas, como OTPS, TMD e Harmônica.

Forçamento dos rios

Para o forçamento fluvial, utilizou-se a base global de descargas continentais de Dai e Trenberth (2002), identificando 13 rios no domínio de modelagem deste estudo (Tabela 3 e Figura 4). Essa base compila séries mensais de vazão nas estações mais a jusante dos 925 maiores rios do planeta, incluindo climatologias de longo prazo e

estimativas de descarga por bacias hidrográficas, e foi posteriormente refinada em Dai (2020, 2021), com melhorias na interpolação espacial, áreas de drenagem e revisão de dados hidrométricos globais. *Scripts* foram então desenvolvidos e empregados para identificar automaticamente os rios dentro da grade do modelo e aplicar o forçamento na saída de cada rio, considerando sua vazão, temperatura e salinidade características.

Figura 5- Climatologia mensal ou ciclo anual dos 13 rios implementados na grade do modelo ROMS: (a) Vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), (b) temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e (c) salinidade mensal dos rios.

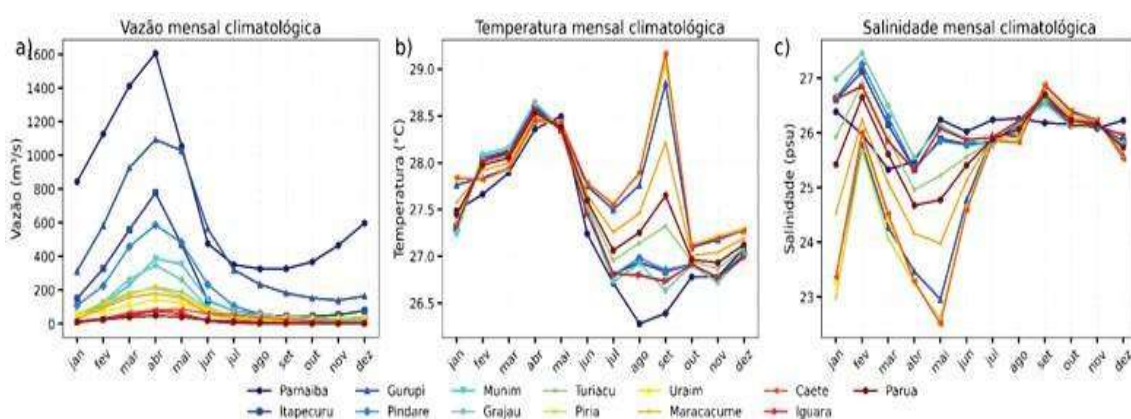


Tabela 4 - Coordenadas geográficas dos rios utilizados no modelo hidrodinâmico

ID	Rio	Longitude ($^{\circ}\text{O}$)	Latitude ($^{\circ}\text{S}$)
1	Parnaíba	41.7838	2.7860
2	Itapecuru	44.2703	2.8939
3	Gurupi	46.3514	1.0573
4	Pindaré	45.4865	1.5166
5	Munim	43.9189	2.6510
6	Grajaú	45.2432	1.7327
7	Turiaçu	45.7027	1.3815
8	Piriá	46.6216	1.0032
9	Uraim	46.8378	0.8411
10	Maracáçumé	46.0000	1.1654
11	Caeté	46.8919	0.8951
12	Iguará	43.8919	2.5970
13	Paruá	45.8108	1.3005

- **Dados de entrada para o SWAN**

Forçamento atmosférico, condições iniciais e de contorno para o clima presente

Para a regionalização dos eventos extremos de ondas no clima presente (41 anos de simulação, de 1983 a 2023), as forçantes foram obtidas da reanálise global ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF; Hersbach *et al.*, 2020), a qual é disponibilizada pelo *Copernicus Climate Change Service*. As componentes zonal e meridional do vento a 10 m do ERA5 possuem grade regular com resolução horizontal de 0,25° de longitude, 0,25° de latitude e temporal de 3 h.

A reanálise ERA5 foi utilizada neste estudo por fornecer um conjunto de dados atmosféricos e de ondas com cobertura espacial contínua e resolução temporal adequada para a caracterização da variabilidade meteo-oceanográfica em escala regional. Para o litoral maranhense, onde a disponibilidade de medições *in situ* é altamente limitada e heterogênea no tempo e espaço, a ERA5 representa uma fonte consistente de informações para a análise das condições de onda em diferentes regimes sazonais. Essa reanálise têm sido amplamente empregada em estudos sobre climatologia das ondas em diversos locais, inclusive no litoral maranhense (Muhammed Naseef *et al.*, 2020; Barbariol *et al.*, 2021; Oderiz *et al.*, 2021; Cotrim *et al.*, 2022; Reis *et al.*, 2024). Reis *et al.* (2024) validaram os campos de altura significativa de onda do ERA5 na costa maranhense através de dados do Programa Nacional de Boias (PNBOIA), demonstrando boa correspondência entre as séries, inclusive na reprodução da amplitude e da sazonalidade do campo de ondas na PCMA. Assim, a utilização do ERA5 neste trabalho se justifica pela confiabilidade demonstrada para a região, além de permitir a representação contínua das condições de onda *offshore* e servindo de condição de contorno para o domínio costeiro, caracterizado por intensa variabilidade hidrodinâmica.

As condições iniciais (CIs) e de contorno (CCs) para os experimentos de eventos extremos de onda com o modelo SWAN para o clima presente foram selecionadas a partir da reanálise oceânica global ERA5, abrangendo o período de janeiro de 1983 a 2023. Dados de espectro total bidimensional de ondas foram utilizados e distribuídos entre as bordas oeste (3), norte (7) e leste (2) da grade G1 totalizando 12 pontos para a inicialização e CCs (Figura 4). O espectro bidimensional descreve como a variação média da elevação da superfície do mar devido às ondas do mar é distribuída em função da frequência e direção de propagação, ou seja, a discretização do espectro de variância é bidimensional

(em frequências e direções). O domínio espectral abrange 30 compartimentos de frequência espaçados logaritmicamente (de 0,03453 a 0,5478 Hz) e 24 compartimentos direcionais de 15° cada (totalizando os 360°). Utilizou-se a biblioteca Python *Wavespectra* (<https://wavespectra.readthedocs.io/en/latest/>) (Guedes et al., 2018) para processar os dados espectrais, que foram salvos em arquivos de texto e lidos pelo modelo SWAN com frequência de 3 h, respeitando o tempo de integração do modelo de 30 min.

Forçamento atmosférico, condições iniciais e de contorno para o clima futuro

Para os eventos do clima futuro, foram usadas forçantes atmosféricas disponibilizadas pelo modelo atmosférico EC-Earth, da Fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 - CMIP6*; Eyring et al., 2016). O EC-Earth é um Modelo do Sistema Terrestre desenvolvido de forma colaborativa pelo consórcio europeu de mesmo nome. Estes dados possuem resolução horizontal de ~ 80 km e temporal de 3 h.

Para os eventos do clima futuro foram usados CIs e CCs da Agência Nacional de Ciência da Austrália (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation-CSIRO*) que, utilizando o modelo de ondas global WaveWatch III (v6.07), projetaram as ondas oceânicas para um período de 140 anos (1961-2100). A criação dessa base de dados de ondas foi possibilitada pelo CMIP6. As simulações provenientes do CSIRO possuem resolução horizontal de 0,5° x 0,5° e temporal de 3 h. Os dados de onda para o clima futuro foram lidos e salvos em um arquivo de texto, no formato TPAR (H_s , T_p ($T_p = 1 / F_p$), D_p), e lidos pelo modelo SWAN a cada 3 h, considerando o tempo de integração do modelo de 30 min. A duração das simulações de cada evento foi de um mês, com um período de 15 dias para estabilização do modelo.

Dados de saída do modelo hidrodinâmico e de ondas

Na Tabela 5 vemos as variáveis de saída do modelo ROMS, que podem ser configuradas de acordo com as necessidades do estudo, permitindo selecionar quais parâmetros serão armazenados e em qual frequência temporal. Essa escolha depende diretamente da capacidade de armazenamento disponível e dos objetivos da simulação.

O modelo foi projetado para atender a diferentes tipos de investigação, como estudos de marés, fluxos de interação oceano-atmosfera, correntes, vorticidade, eventos extremos, redemoinhos, variabilidade vertical da coluna d'água e análises temporais de longo período, sempre buscando maximizar a resolução e a extensão temporal das simulações conforme os dados disponíveis.

Foram definidos dois conjuntos principais de saídas temporais: o arquivo “**.avg**”, que armazena médias diárias de variáveis principalmente escalares, e o arquivo “**.his**”, que armazena médias horárias, voltado para análises com maior resolução temporal e contendo variáveis principalmente vetoriais. Esses arquivos compreendem um conjunto de variáveis oceanográficas associadas à hidrodinâmica superficial e subsuperficial, bem como à interação oceano-atmosfera na região de estudo. Nos resultados apresentados neste trabalho, serão mostradas as principais variáveis simuladas, contrastadas com os respectivos dados de reanálise, como uma primeira etapa de validação do modelo.

Tabela 5 - Variáveis geradas a partir da configuração utilizada nas simulações com o ROMS.

Nome	Variável (CF standard name)	Unidade
Variáveis escalares		
Elevação da superfície (ζ)	sea_surface_elevation_anomaly	m
Temperatura	sea_water_potential_temperature	°C
Salinidade	sea_water_practical_salinity	-
Anomalia da densidade	sea_water_density_anomaly	kg m ⁻³
Espessura da camada limite superficial	ocean_surface_boundary_layer_thickness	m
Espessura da camada limite do fundo	ocean_bottom_boundary_layer_thickness	m
Temperatura do ar	surface_air_temperature	°C
Pressão do ar	surface_air_pressure	mbar
Fluxo de calor superficial	surface_downward_heat_flux_in_sea_water	W m ⁻²
Fluxo de sal superficial	salt_flux_into_sea_water	m s ⁻¹
Fluxo de calor latente	surface_upward_latent_heat_flux	W m ⁻²
Fluxo de calor sensível	surface_upward_sensible_heat_flux	W m ⁻²
Radiação de onda longa	surface_net_downward_longwave_flux	W m ⁻²
Radiação de onda curta	net_downward_shortwave_flux_at_sea_water_surface	W m ⁻²
Taxa de evaporação	water_evaporation_flux_out_of_sea_water	kg m ⁻² s ⁻¹
Taxa de precipitação	precipitation_flux	kg m ⁻² s ⁻¹
Variáveis vetoriais		
Velocidade barotrópica u ($\bar{u}$)	barotropic_sea_water_x_velocity	m s ⁻¹
Velocidade barotrópica v ($\bar{v}$)	barotropic_sea_water_y_velocity	m s ⁻¹
Velocidade barotrópica leste	barotropic_sea_water_eastward_velocity	m s ⁻¹
Velocidade barotrópica norte	barotropic_sea_water_northward_velocity	m s ⁻¹
Velocidade u	sea_water_x_velocity	m s ⁻¹
Velocidade v	sea_water_y_velocity	m s ⁻¹
Velocidade leste	eastward_sea_water_velocity	m s ⁻¹
Velocidade norte	northward_sea_water_velocity	m s ⁻¹
Velocidade vertical (w)	upward_sea_water_velocity	m s ⁻¹
Velocidade vertical S-coordenada (ω)	upward_sea_water_omega_velocity	m ³ s ⁻¹
Componente zonal do vento	surface_eastward_wind	m s ⁻¹
Componente meridional do vento	surface_northward_wind	m s ⁻¹
Tensão do vento zonal	surface_downward_x_stress	N m ⁻²
Tensão do vento meridional	surface_downward_y_stress	N m ⁻²
Tensão do fundo zonal	sea_bottom_upward_x_stress	N m ⁻²
Tensão do fundo meridional	sea_bottom_upward_y_stress	N m ⁻²
Variáveis de transporte		
Transporte de volume zonal	ocean_volume_x_transport	m ³ s ⁻¹
Transporte de volume meridional	ocean_volume_y_transport	m ³ s ⁻¹

Variáveis de saída do modelo SWAN selecionadas e utilizadas nas simulações estão descritas na Tabela 6, sendo as mesmas: componentes de magnitude de vento zonal e meridional, altura significativa, período de pico, período de pico suavizado, período médio, direção de pico e direção média.

Tabela 6 - Variáveis geradas a partir da configuração utilizada nas simulações com o SWAN.

Nome	Variável	Unidade
Magnitude de vento meridional	ywnd	$m \cdot s^{-1}$
Magnitude de vento zonal	xwnd	$m \cdot s^{-1}$
Altura significativa	hs	m
Período de pico	tp	s
Período de pico suavizado	tps	s
Período médio	tm01	s
Direção de pico	thetap	$^{\circ}$
Direção média	theta0	$^{\circ}$

- **Métricas de validação do ROMS e SWAN ao largo do Maranhão**

Com o objetivo de validar o modelo em relação às bases de dados originais (GLORYS12 e ERA5), adotou-se uma abordagem comparativa baseada em médias climatológicas espaciais referentes ao mesmo período, de modo a avaliar as diferenças superficiais entre o modelo e as reanálises. Além disso, como parte de uma análise de caráter euleriano, foram selecionados cinco pontos ao longo da costa do Maranhão (P1–P5), definidos por meio de áreas retangulares com extensão de $\pm 0,3^{\circ}$ em torno das coordenadas centrais (Tabela 7). Os dados contidos em cada área foram promediados e convertidos em séries temporais, com o intuito de reduzir possíveis vieses de representatividade decorrentes de comparações pontuais, assegurando, assim, uma análise mais robusta e confiável.

Tabela 7 - Coordenadas geográficas centrais dos pontos de grade analisados ao longo do Maranhão, conforme localização destacada na Figura 3.

Ponto	Longitude	Latitude
P1	45.5°O	0.8°S
P2	44°O	2°S
P3	42.3°O	2.2°S
P4	42.9°O	1.3°S
P5	44.2°O	0.1°S

Para cada ponto, foi calculado o coeficiente de correlação não paramétrica de Spearman (ρ), o qual quantifica a intensidade e o sentido da relação monotônica (crescente ou decrescente) entre duas séries temporais (Wilks, 2011). Ao contrário de métodos que pressupõem linearidade ou normalidade dos dados, a correlação de Spearman ordena os valores e mede o grau de associação entre seus rankings, sendo, portanto, uma abordagem não-paramétrica. O coeficiente ρ varia de -1 a 1 , onde valores absolutos mais próximos de 1 indicam uma correlação mais forte; valores positivos representam uma associação monotônica direta, enquanto valores negativos indicam uma associação inversa. Além disso, foi calculado o RMSD (*Root Mean Square Deviation*) de forma a quantificar a diferença média absoluta entre as séries simuladas (ROMS e SWAN) e os reanálises ou observadas, onde um valor de RMSD mais baixo indica um melhor ajuste do modelo aos dados de referência. A unidade do RMSD é a mesma das variáveis analisadas (por exemplo, $^{\circ}\text{C}$ para temperatura ou m s^{-1} para velocidade).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

- *Temperatura do oceano*

A Figura 6 mostra a climatologia da Temperatura da Superfície do Mar (TSM, em $^{\circ}\text{C}$) para 1993–2025, com o modelo ROMS (painel a) exibindo boa correlação com as reanálises GLORYS12 (painel b) e ERA5 (painel c); nas áreas costeiras do Maranhão (profundidades < 25 m), a TSM atinge uma média de ~ 28 $^{\circ}\text{C}$ em todos os produtos, com ROMS capturando melhor o gradiente acentuado próximo à costa (vermelho intenso, especialmente no P2 e maiormente na Baía de São Marcos), enquanto GLORYS12 e ERA5 suavizam essa transição; sobre a PCMA, a TSM cai gradualmente para ~ 27 $^{\circ}\text{C}$ (tons amarelo-esverdeados), com ROMS destacando maior realismo na representação da TSM costeira em comparação às reanálises, que sofrem limitação de resolução espacial perto da linha da costa.

A Figura 7 a ilustra a tendência decadal da TSM ($^{\circ}\text{C}/\text{década}$), com valores entre 0 e $0,3$ $^{\circ}\text{C}$ (em tons de vermelho escuro), revelando aquecimento mais intenso próximo à costa — especialmente na região do ponto P2, nas imediações de São Luís, a Baía de São Marcos e o Porto do Itaqui. Já o painel 7b exibe o desvio padrão da TSM ($^{\circ}\text{C}$), destacando maior variabilidade interanual nas áreas costeiras, sobretudo em torno dos pontos P2 e P3.

Os valores mais elevados, próximos a 1,0 °C, concentram-se no interior do Golfão do Maranhão, indicando oscilações térmicas mais acentuadas. Em contraste, as regiões oceânicas (como P5) apresentam menor variabilidade ($\sim 0,6\text{--}0,8$ °C), evidenciando o papel dominante de processos locais na dinâmica térmica da zona costeira. Destaca-se a área das Reentrâncias Maranhenses (setor ocidental, ponto P1), onde se observa uma menor variabilidade.

Figura 6 - Climatologia da TSM (°C) para o período de 1993 a 2025, correspondente às saídas do: a) ROMS, b) reanálise GLORYS12 e c) reanálise ERA5.

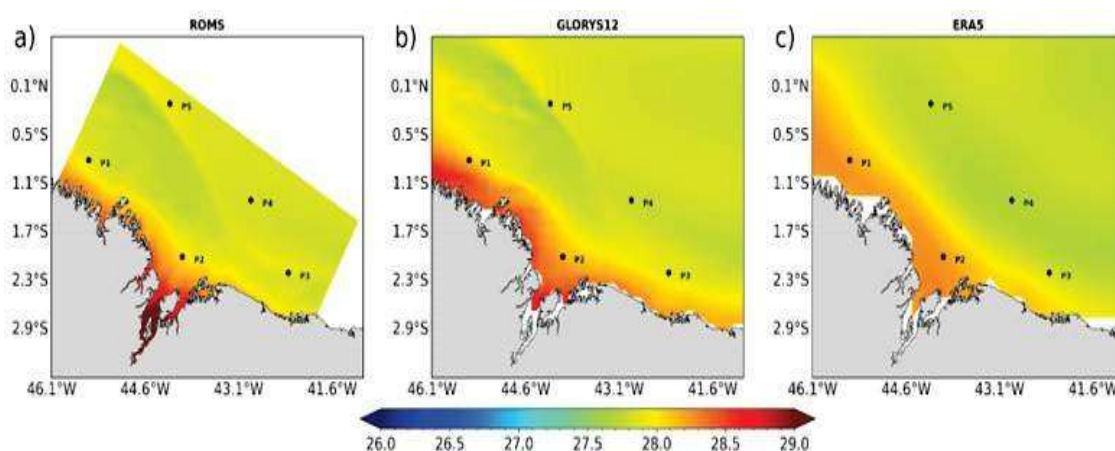
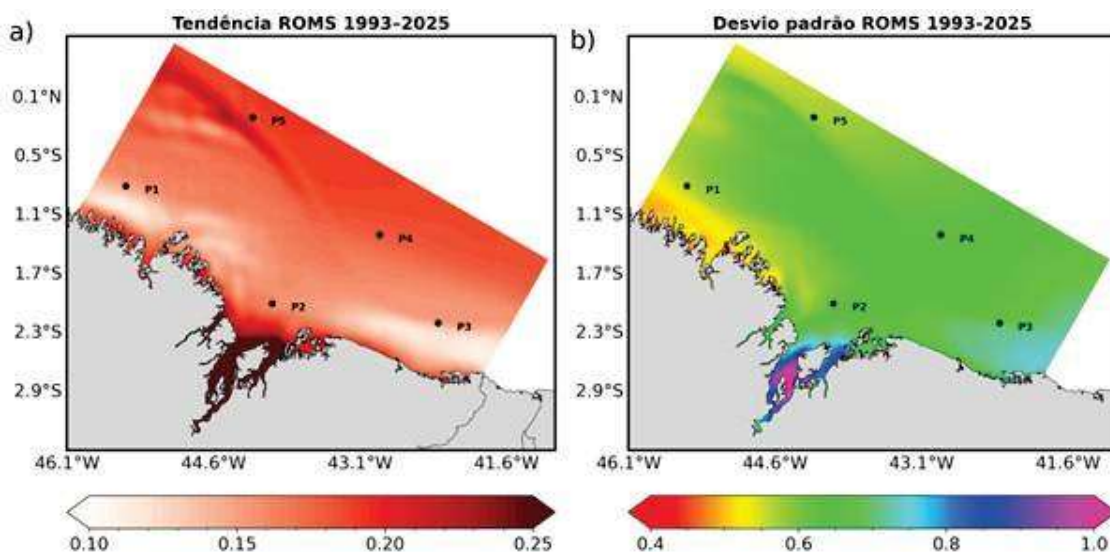


Figura 7 - Tendência decadal (a) e desvio padrão (b) da TSM (°C) simulada pelo modelo ROMS entre o período de 1993 a 2025.



A Figura 8 apresenta as séries temporais e o ciclo anual da temperatura da superfície do mar (TSM) simulada pelo modelo ROMS, em comparação com os dados de reanálise GLORYS12. Observam-se altas correlações de Spearman ($\rho \geq 0,95$) em todos os pontos analisados, com destaque para $\rho = 0,98$ nos pontos P3, P4 e P5, o que evidencia o excelente desempenho do ROMS na reprodução da variabilidade térmica superficial ao longo do litoral maranhense, tanto em regiões costeiras quanto oceânicas. Em relação ao erro quadrático médio (RMSD), o maior valor foi registrado no ponto P1 (0,32 °C), indicando maior discrepância em áreas costeiras rasas. Já nas regiões mais profundas (P3, P4 e P5), os erros foram consistentemente menores (em torno de 0,12°C), confirmando a alta precisão do modelo em condições oceânicas abertas.

Ainda na Figura 8, os painéis das séries temporais destacam com marcadores verdes os dias com maiores alturas de onda significativas, conforme detectado pelo modelo SWAN. Nota-se que esses eventos ocorrem precisamente nos períodos de menor TSM em relação ao ciclo anual em todos os pontos, evidenciando que as maiores ondas na região total coincidem com o final do inverno e início da primavera, ou seja, entre agosto e novembro.

A Figura 9 apresenta a análise da temperatura em todos os níveis verticais da coluna d'água em dois pontos na frente de Maranhão, evidenciando contrastes marcantes entre o ponto costeiro P2 (profundidade máxima de 30,6 m) e o ponto oceânico P4 (profundidade máxima de 2472,5 m). No P2, a seção vertical temporal (Figura 9a) mostra elevada variabilidade mensal, e na vertical com homogeneização quase completa da coluna d'água cada no período observado, cujas temperaturas variam entre 27 e 30°C. O ciclo anual (Figura 9b) revela aquecimento no primeiro semestre — especialmente em abril e maio, quando as temperaturas atingem cerca de 29,97 °C — e resfriamento no segundo semestre (agosto a outubro, em torno de 27 °C). Os perfis médios (Figura 9c) indicam uma coluna d'água termicamente homogênea, sem uma termoclina bem definida, com variação mínima entre a superfície (28,02 °C) e o fundo (27,97 °C), ou seja, um gradiente de apenas 0,05 °C de superfície ao fundo. Em contraste, no P4, mais afastado da costa, logo da talude continental, a seção temporal (Figura 9d) evidencia uma estratificação térmica estável até aproximadamente 1600 m, com gradiente acentuado entre 600 e 1000 m. O ciclo anual (Figura 9e) mostra variações superficiais moderadas (28,0–29,0 °C), com temperaturas máximas em abril e maio.

A termoclina se apresenta ligeiramente mais rasa e difusa nesses meses, tornando-se mais profunda e pronunciada entre agosto e outubro. O perfil médio (Figura 9f) exhibe uma temperatura superficial um pouco mais elevada (28,97°C), seguida de um decréscimo gradual até cerca de 150 m, refletindo a maior influência oceânica, a menor

turbulência costeira e a elevada inércia térmica das águas profundas. Assim, o P2 demonstra alta sensibilidade às forçantes sazonais locais, enquanto o P4 caracteriza-se por maior estabilidade térmica e estratificação vertical bem desenvolvida.

Figura 8 - Séries temporais e ciclo anual da Temperatura da Superfície do Mar (TSM, °C) simuladas pelo modelo ROMS para cada ponto selecionado ao longo da região maranhense, comparadas com a reanálise GLORYS12. Destacam-se, em verde, os pontos que correspondem aos dias com maiores alturas de onda simuladas pelo modelo SWAN.

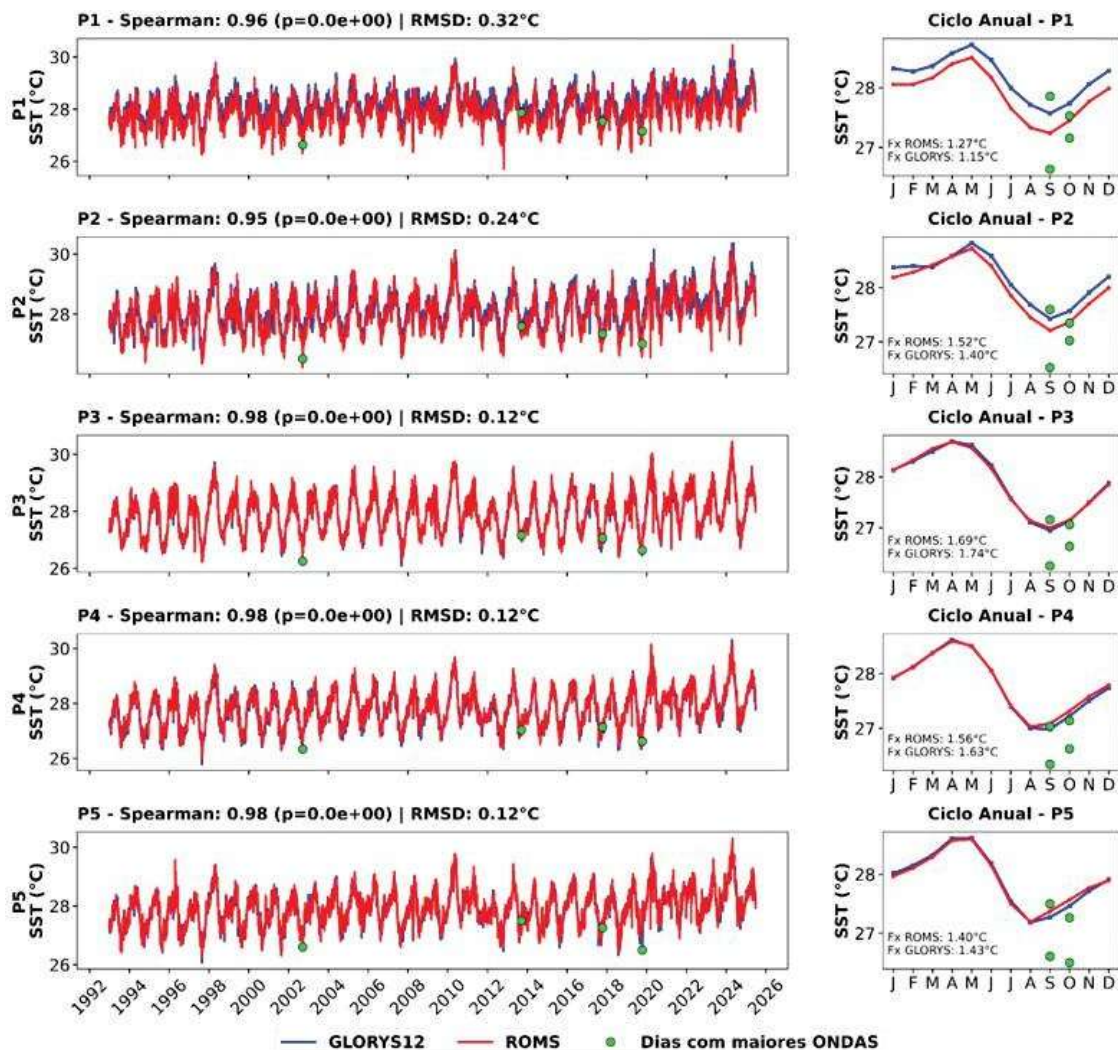
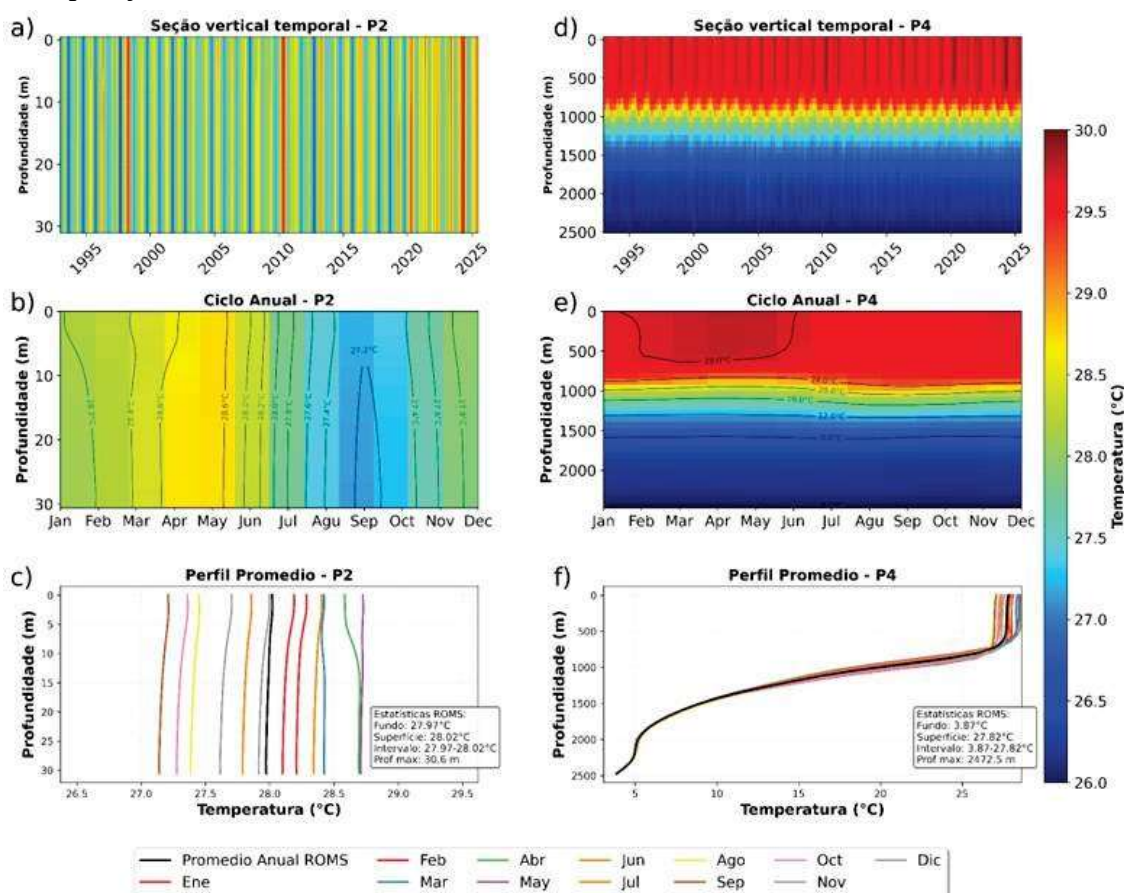


Figura 9 - Análise temporal e vertical da Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) na coluna de água frente ao Maranhão, nos pontos 2 (costeiro) e 4 (oceânico). São apresentados: (a, d) diagramas de seção vertical temporal; (b, e) ciclos anuais das seções verticais; e (c, f) perfis médios do período total (perfil preto) e perfil médio mensal (cores), para os dois pontos em comparação.

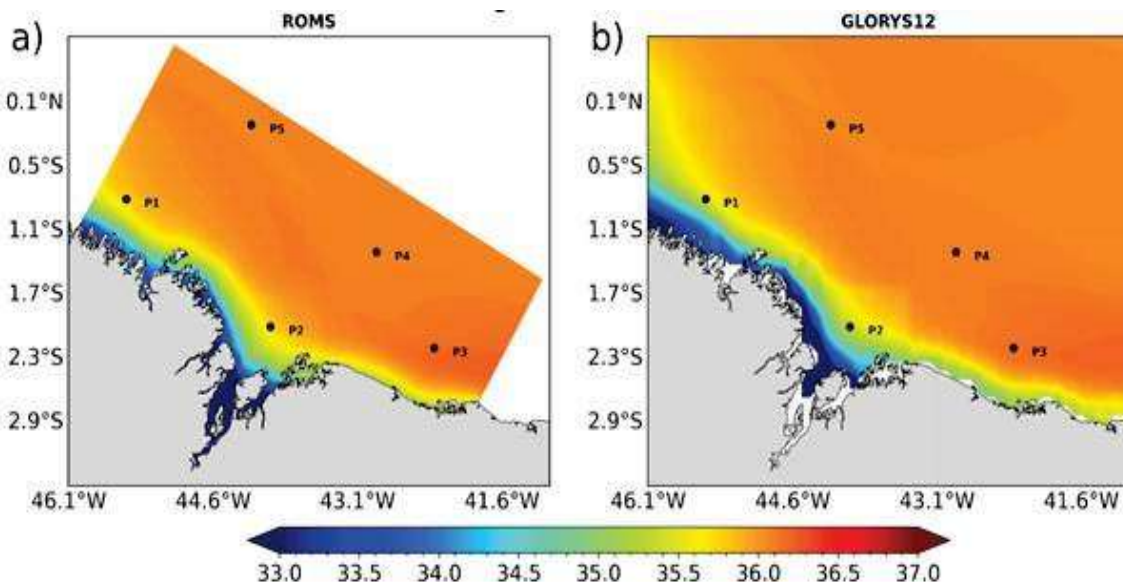


Salinidade do oceano

A Figura 10 apresenta a climatologia da Salinidade da Superfície do Mar (SSM) no período de 1993-2025, comparando dois conjuntos de dados: o modelo ROMS e a reanálise GLORYS12. Ambos exibem uma similar distribuição espacial da SSM (em psu) ao longo da região do Maranhão, com gradientes de cor que variam do azul, valores mais baixos (~ 33 psu), na região de Baía de São Marcos, como também na área de mangues (reentrâncias maranhenses). Nas áreas mais oceânicas observamos valores mais altos (~ 36 - 37 psu) com um destacado gradiente perpendicular à linha de costa. O modelo ROMS (painel a) mostra uma melhor representação da SSM, mais definida e homogênea em áreas oceânicas como também visivelmente em áreas costeiras, já a reanálise GLORYS12 (painel b) captura com menor realismo aqueles gradientes. Essa diferença

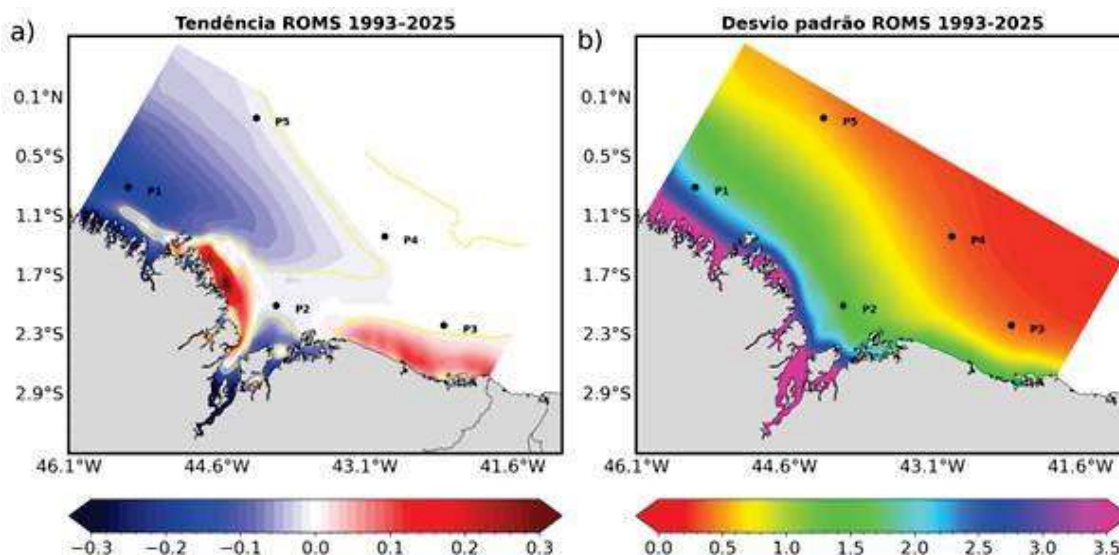
destaca o melhor manejo de dados na região costeira pelo ROMS.

Figura 10- Climatologia da SSM para o período 1993-2025, a) modelo ROMS e b) reanálise GLORYS12.



A Figura 11 apresenta a tendência decadal (a) e o desvio padrão (b) da anomalia de SSM (psu) simulada pelo modelo ROMS para o período de 1993 a 2025. No painel (a), observa-se uma tendência predominantemente negativa na porção mais ocidental (em tons de azul), com decréscimos mais intensos próximos à costa e no ponto P1, atingindo valores inferiores a -0,25 psu/década. Em contrapartida, as áreas mais oceânicas e setentrionais (próximas a 0,1°N) exibem tendências próximas de zero. Nota-se ainda uma ligeira tendência positiva ao longo da costa oriental, indicando um leve aumento de salinidade, bem como valores positivos mais acentuados na região das reentrâncias maranhenses, especialmente na área de Alcântara. No painel (b), o desvio padrão evidencia elevada variabilidade total (aproximadamente entre 2,0-3,5 psu) em regiões sob influência de plumas fluviais e da interação com correntes de contorno, principalmente ao redor dos pontos costeiros P1, P2 e P3, em contraste com a menor variabilidade (em torno de 0,5 psu) observada nas áreas mais oceânicas após a plataforma continental (P4 e P5). Observa-se que a variabilidade na Baía de São Marcos e no Porto de Itaqui atinge valores de 3.5 psu em relação ao desvio padrão.

Figura 11 - Tendência decadal (a) e desvio padrão (b) da SSM (psu) simulada pelo modelo ROMS entre o período de 1993 a 2025.



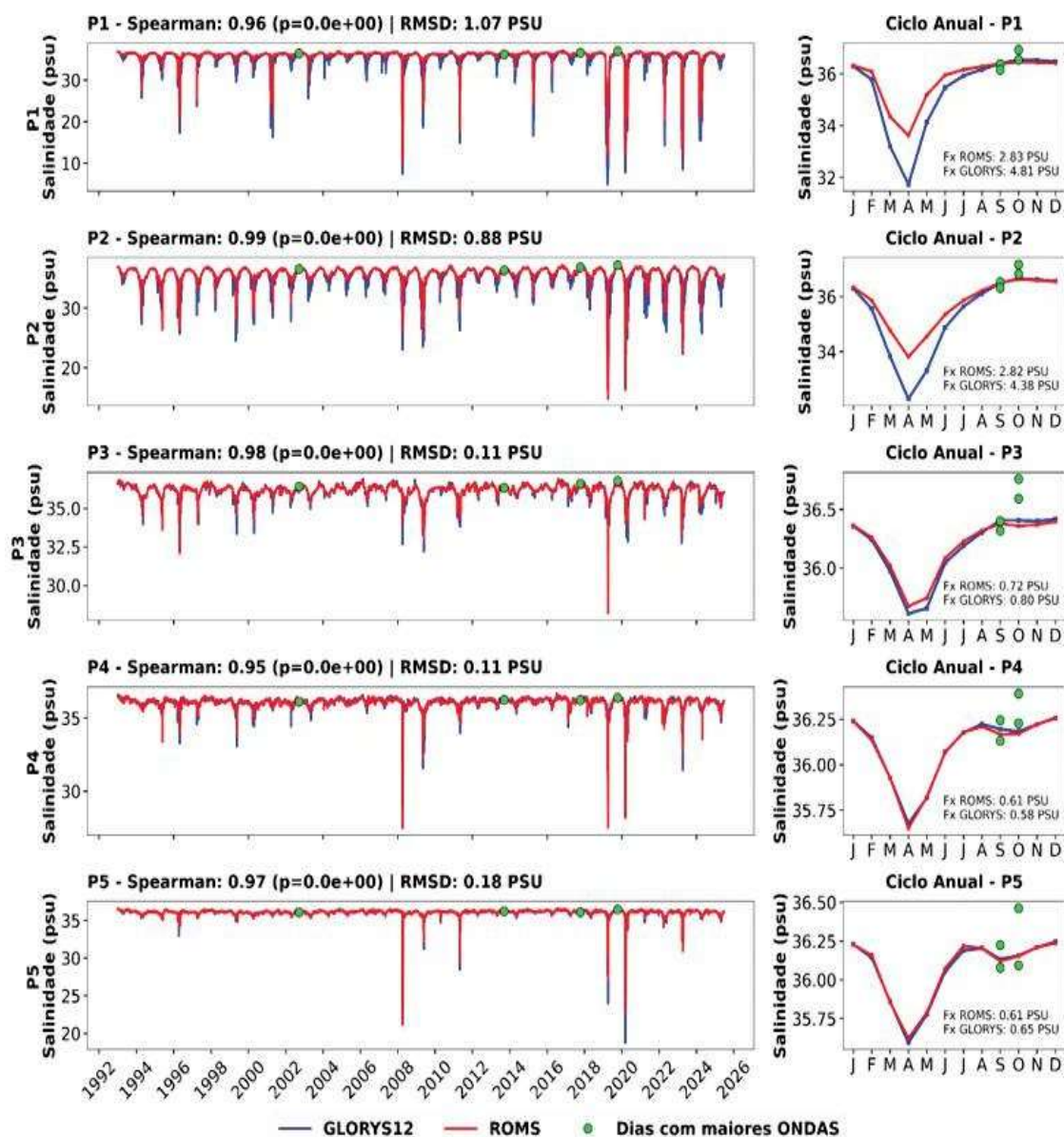
A Figura 12 apresenta as séries temporais e o ciclo anual da Salinidade Superficial do Mar (SSM, em psu) simuladas pelo modelo ROMS (em vermelho) e comparadas com os dados de reanálise GLORYS12 (em azul) para os cinco pontos (P1–P5). Nos gráficos à esquerda, observa-se a variação temporal da salinidade de 1993 a 2025, enquanto os painéis à direita exibem o ciclo anual médio correspondente a cada ponto.

Os valores de correlação de Spearman (ρ) e o RMSD indicam um alto grau de concordância entre as duas bases de dados, com ρ variando entre 0,95 e 0,99 e RMSD entre 0,11 e 1,07 psu. Nota-se que os pontos P1 e P2, localizados em regiões mais costeiras e influenciadas pela descarga fluvial, apresentam maior variabilidade e amplitudes mais acentuadas de SSM, refletindo a forte influência sazonal da pluma dos rios maranhenses. Já os pontos P3, P4 e P5, situados em áreas mais oceânicas, exibem variações menores e maior estabilidade na série temporal.

Nos painéis de ciclo anual, observa-se que a salinidade tende a diminuir entre Março a Maio, coincidindo com o período de maior aporte continental e precipitação, e aumentar entre Julho e Novembro, quando as condições são mais secas e a influência fluvial é reduzida. Os pontos em verde destacam os dias com maiores alturas de onda simuladas pelo modelo SWAN, indicando uma possível relação entre eventos de alta

energia e variações súbitas na salinidade superficial. Em síntese, a figura evidencia a boa correspondência entre ROMS e GLORYS12, com o modelo reproduzindo de forma consistente a variabilidade temporal e sazonal da SSM ao longo da região maranhense.

Figura 12 - Séries temporais e ciclo anual da Salinidade Superficial do Mar (SSM, psu) simuladas pelo modelo ROMS para cada ponto selecionado ao longo da região maranhense (vermelho), comparadas com a reanálise GLORYS12 (azul). Destacam-se, em verde, os pontos que correspondem aos dias com maiores alturas de onda simuladas pelo modelo SWAN.



A Figura 13 apresenta a análise temporal e vertical da salinidade (psu) simulada pelo modelo ROMS em dois pontos representativos da região oceânica adjacente ao Maranhão: P2 (costeiro) e P4 (oceânico). Nos painéis (a) e (d) são exibidas as seções verticais temporais de salinidade para o período de 1993 a 2025. Em P2, observa-se uma coluna d'água rasa (profundidade máxima de aproximadamente 30 m) com estrutura vertical quase homogênea, porém marcada por forte variabilidade temporal, evidenciada pelas oscilações de salinidade ao longo do ano.

Os painéis (b) e (e) ilustram o ciclo anual médio das seções verticais. Em P2, a SSM atinge seus mínimos entre Março e Maio ($\approx 34,8$ psu), coincidindo com o período chuvoso e o máximo aporte fluvial, aumentando gradualmente até cerca de 36 psu em Outubro. Já em P4, o padrão é mais estável, com variações sazonais sutis restritas à camada superficial, enquanto as águas profundas mantêm valores próximos de 34,8 psu durante todo o ano. Os resultados mostram claramente, e de forma inédita em se tratando de análises de longo termo na região, que o Golfão Maranhense (GM; P2) se comporta como um estuário do tipo bem misturado (Junho-Fevereiro) (*sensu* Pritchard (1952, 1955) na maior parte do ano, passando a parcialmente misturado no período chuvoso da região (Março-Maio), onde a circulação baroclínica passa a ter importância, no entanto, não sobrepuja a mistura turbulenta da maré.

Os impactos sobre a temperatura do oceano no P2 se estendem até 20 m de profundidade (Figura 13b). Essa variabilidade está associada principalmente à influência das descargas fluviais e à dinâmica da pluma de água doce, além da intensa mistura vertical promovida pelas correntes de maré no P2 e a influência dos fortes ventos da região no período de Agosto-Setembro-Outubro (ASO). No P4, cuja profundidade ultrapassa 2400 m, a estrutura vertical apresenta-se muito mais estável, com altos valores de salinidade (>36 psu) nas camadas superficiais e um gradiente vertical (haloclina) bem definido até cerca de 1000 m, abaixo do qual predominam valores menores e praticamente constantes ($\sim 34,7$ psu).

Por fim, os painéis (c) e (f) apresentam os perfis médios de salinidade (linha preta) juntamente com os perfis mensais (linhas coloridas). Em P2, observa-se uma estratificação fraca, com salinidade superficial ligeiramente menor ($\sim 35,7$ psu) e aumento suave até o fundo ($\sim 35,9$ psu). Em P4, por outro lado, a estratificação é bem marcada, com um forte gradiente nos primeiros 500 m e estabilização abaixo de 1500m. Essas diferenças evidenciam o contraste dinâmico entre as massas d'água costeiras e oceânicas, refletindo a transição entre a influência continental e as águas de mar aberto. O aumento relativo da salinidade em subsuperfície (entre aproximadamente 500 e 1000 m) observado durante o período chuvoso reflete a intensificação da estratificação vertical causada pela descarga

fluvial. A presença da pluma dos rios maranhenses forma uma camada superficial menos densa e de baixa salinidade, que inibe a mistura vertical com as águas mais profundas. Como resultado, as massas de água intermediárias mais salinas, associadas à Água Central do Atlântico Sul (SACW - *South Atlantic Central Water*) e parcialmente influenciadas pela Água Intermediária do Atlântico Norte (AAIW - *Antarctic Intermediate Water*), permanecem isoladas abaixo da pluma, produzindo um contraste vertical acentuado de salinidade e a aparente intensificação desse núcleo subsuperficial (Coles *et al.*, 2013).

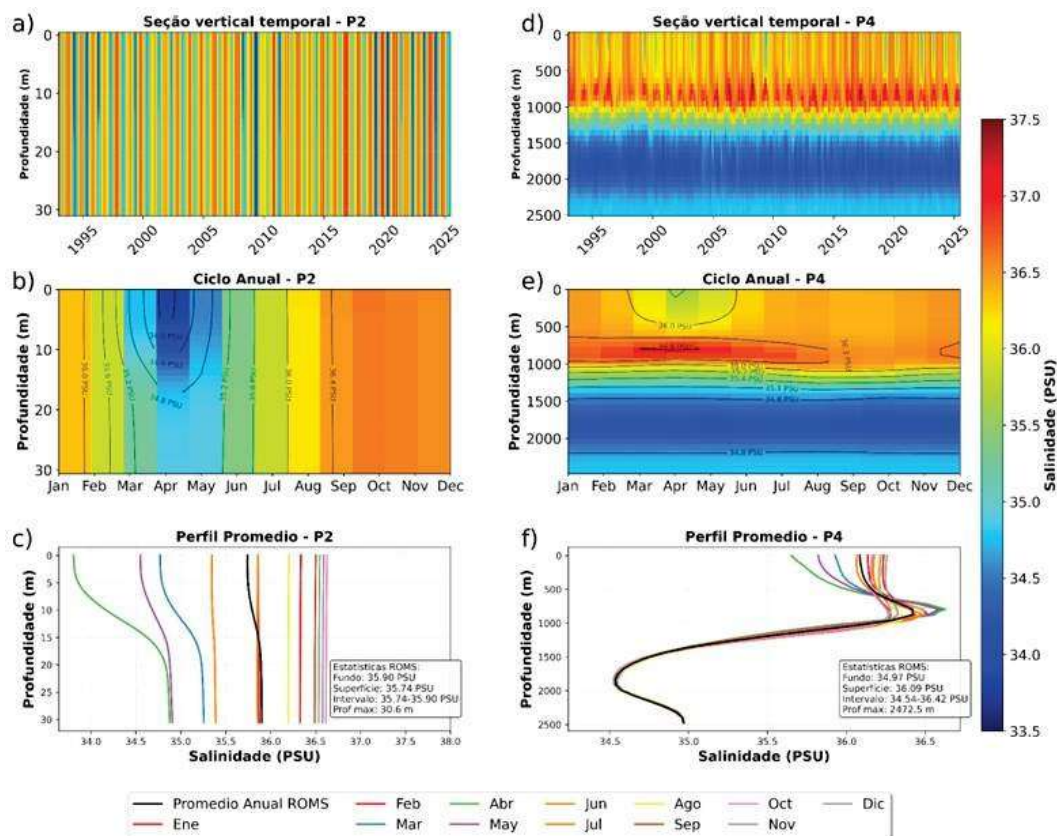
No pico do período seco esse padrão é atenuado em resposta ao fortalecimento dos ventos alísios e ao aumento da ressurgência equatorial. A intensificação dos ventos promove maior mistura vertical e ventilação das camadas subsuperficiais, ao mesmo tempo em que a retração da pluma reduz a estratificação superficial (Stramma *et al.*, 2008; Foltz *et al.*, 2003; Bourlès *et al.*, 1999). Consequentemente, a distribuição vertical da salinidade torna-se mais homogênea, e o núcleo subsuperficial mais salino deixa de ser evidenciado na coluna d'água.

Ventos em superfície

A Figura 14 apresenta a climatologia, a tendência decadal e o desvio padrão da magnitude do vento (WND, m s^{-1}) interpolada pelo modelo ROMS para o período de 1993 a 2025, na região costeira e oceânica do Maranhão. No painel (a), observa-se a climatologia média da magnitude do vento, que varia entre 4 e 8 m s^{-1} , com valores mais baixos próximos à costa e intensificação em direção ao oceano aberto principalmente desde o Este. Essa distribuição reflete o fortalecimento dos ventos alísios sobre o Atlântico equatorial e a atenuação sobre a zona costeira, especialmente nas áreas abrigadas pelas baías e mangues.

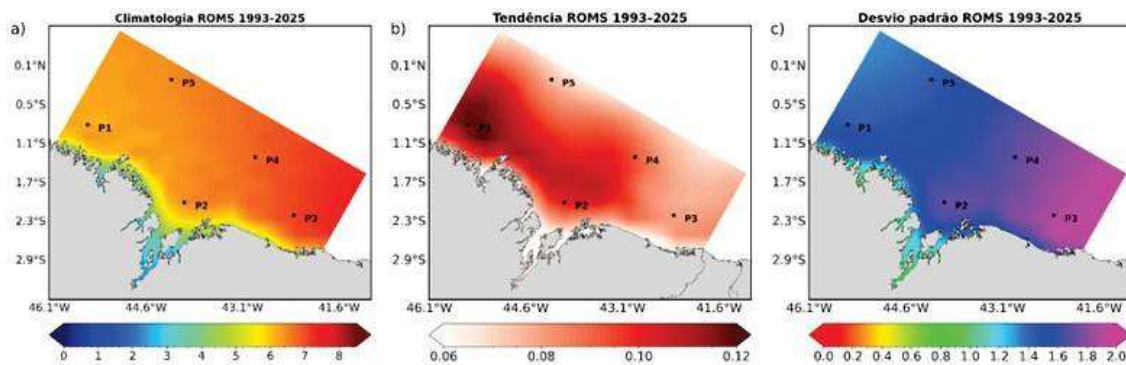
O painel (b) apresenta a tendência decadal da magnitude do vento, evidenciando um aumento gradual ao longo do período, com valores positivos predominando em toda a área de estudo. É importante destacar que não foram identificadas regiões com tendência de enfraquecimento dos ventos — apenas áreas com intensificação estatisticamente significativa e outras com aumento mais discreto, sem significância estatística.

Figura 13 - Análise temporal e vertical da Salinidade (psu) na coluna de água frente ao Maranhão, nos pontos 2 (costeiro) e 4 (oceânico). São apresentados: (a, d) diagramas de seção vertical temporal; (b, e) ciclos anuais das seções verticais; e (c, f) perfis médios do período total (perfil preto) e perfil mensal (cores), para os dois pontos em comparação.



As maiores tendências (atingindo até $+0,20 \text{ m s}^{-1}$ por década) concentram-se nas porções norte e noroeste, próximas aos pontos P1, P2 e P5, indicando um fortalecimento contínuo dos ventos alísios sobre a plataforma continental externa e as regiões oceânicas adjacentes. O painel (c), por sua vez, mostra o desvio padrão total, revelando maior variabilidade interanual (superior a $1,6 \text{ m s}^{-1}$) nas áreas oceânicas, sobretudo ao redor dos pontos P2, P3 e P4, onde há influência combinada de sazonalidade, brisas, efeitos topográficos e da circulação regional do vento. Em contraste, as áreas dentro do golfo e na área de mangues ocidental (reentrâncias), apresentam menor variabilidade (inferior a $1,2 \text{ m s}^{-1}$), refletindo um regime de ventos mais persistente e regular que é protegido pela configuração topográfica e vegetativa local.

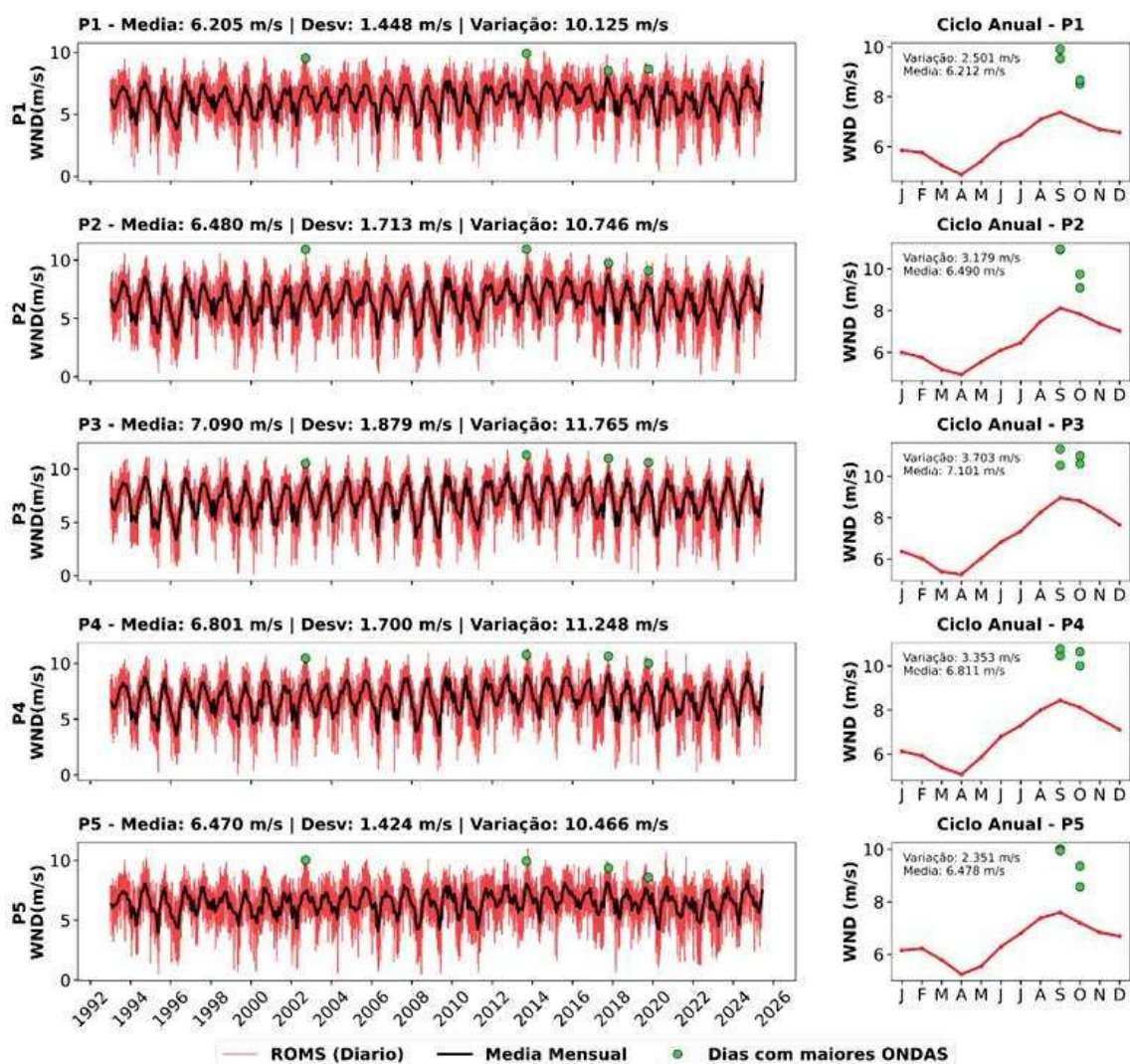
Figura 14 - a) Climatologia total, b) Tendência decadal e c) desvio padrão total da da Magnitude do Vento (WND, m s^{-1}) simulada pelo modelo ROMS para o período 1993-2025.



A Figura 15 apresenta as séries temporais e os ciclos anuais da magnitude do vento (WND, m s^{-1}) fornecidas pelo modelo ROMS para os cinco pontos (P1–P5). Nos painéis à esquerda, são mostradas as séries temporais diárias (vermelho) e as médias mensais (preto) de 1993 a 2025. Observa-se um padrão claramente sazonal, com oscilações anuais bem definidas e intensificação dos ventos nos meses correspondentes ao período seco (Junho a Setembro). As médias anuais variam entre 6,2 e 7,1 m s^{-1} , enquanto o desvio padrão situa-se entre 1,4 e 1,9 m s^{-1} , indicando boa coerência espacial entre os pontos. Nos painéis à direita, o ciclo anual evidencia o comportamento médio da magnitude do vento ao longo do ano. Em todos os pontos, os valores mínimos ocorrem entre Março e Maio, seguidos de um forte aumento a partir de Junho, atingindo o máximo entre Setembro-Outubro, quando os ventos alísios são mais intensos na região equatorial. Após esse pico, a intensidade diminui gradualmente até o final do ano.

As variações sazonais (amplitudes) aumentam de cerca de 2,3 m s^{-1} no P1 para até 3,7 m s^{-1} no P3, refletindo um gradiente costeiro-oceânico, onde os ventos tornam-se mais fortes e constantes em direção de *offshore*. Os pontos destacados em verde indicam os dias com maiores alturas de onda simuladas pelo modelo SWAN, os quais coincidem com períodos de ventos mais intensos, evidenciando a relação direta entre a força dos ventos e a geração de ondas na região (Figura 15).

Figura 15 - Séries temporais e ciclo anual da Magnitude do Vento (WND, m s^{-1}) simuladas pelo modelo ROMS para cada ponto selecionado ao longo da região maranhense. Destacam-se, em verde, os pontos que correspondem aos dias com maiores alturas de onda simuladas pelo modelo SWAN.

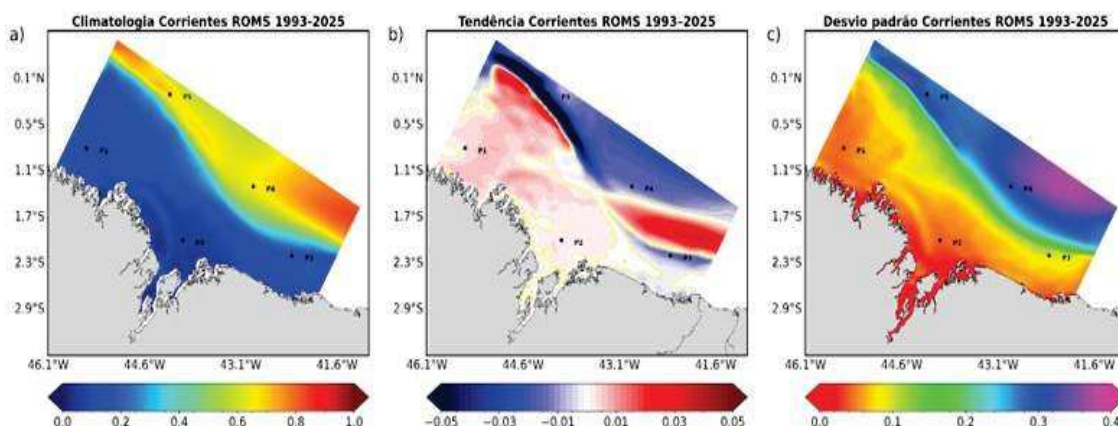


Correntes geostróficas

A Figura 16 apresenta três mapas que ilustram diferentes aspectos da magnitude das correntes (CMAG, em m s^{-1}) simuladas pelo modelo ROMS para o período de 1993 a 2025. O painel (a) exibe a climatologia total das correntes, com intensidades variando de 0,0 a 1,0 m s^{-1} , destacando fluxos mais fortes (em amarelo e vermelho) em águas.

profundas (para além da PCMA), onde flui a Corrente Norte do Brasil, e mais fracos (em azul) nas áreas sobre a plataforma, com pontos de monitoramento (P1 a P5) distribuídos ao longo da plataforma continental ocidental, central e oriental. O painel (b) mostra a tendência decadal das correntes, com valores entre $-0,05$ e $0,05 \text{ m s}^{-1}$, revelando áreas de intensificação (tons vermelhos) e enfraquecimento (tons azuis) ao longo do tempo, especialmente em torno dos pontos P2 e P3. Já o painel (c) representa o desvio padrão total da magnitude das correntes, variando de $0,0$ a $0,4 \text{ m s}^{-1}$, indicando maior variabilidade (tons vermelhos e alaranjados) em regiões costeiras e menor estabilidade em áreas mais oceânicas (tons azuis e roxos), com destaque para a alta variabilidade próxima ao ponto P4.

Figura 16 - a) Climatologia total, b) Tendência decadal e c) desvio padrão total da da Magnitude das Correntes (CMAG, m s^{-1}) simulada pelo modelo ROMS para o período 1993-2025.



A Figura 17 e Figura 18 apresenta as séries temporais diárias (em vermelho) e a média mensal (linha preta) da magnitude das correntes (CMAG, m s^{-1}) e da componente zonal (UV, m s^{-1}) simuladas pelo modelo ROMS entre 1993 e 2025 para os cinco pontos de monitoramento (P1 a P5). Os pontos mais rasos sobre a plataforma continental (P1, P2 e P3) exibem magnitudes médias baixas ($0,137 \text{ m s}^{-1}$, $0,065 \text{ m s}^{-1}$ e $0,154 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente) e variabilidade moderada (variação de $0,592$ a $0,802 \text{ m s}^{-1}$). Já os pontos localizados na borda ou além da plataforma (P4 e P5) mostram magnitudes médias significativamente maiores ($0,641 \text{ m s}^{-1}$ e $0,684 \text{ m s}^{-1}$), com maior variabilidade ($1,790 \text{ m s}^{-1}$ e $1,716 \text{ m s}^{-1}$) e oscilações mais intensas, refletindo a influência direta da Corrente Norte do Brasil. Os gráficos à direita ilustram o ciclo anual médio em cada ponto, com P2 e P3 apresentando picos suaves no fim do verão (MAM),

enquanto P4 e P5 mostram maior intensidade no inverno (JJA), especialmente em P5, onde o ciclo atinge máximos acima de $1,0 \text{ m s}^{-1}$.

Figura 17 - Séries temporais e ciclo anual da Magnitude das Correntes (CMAG, m s^{-1}) simuladas pelo modelo ROMS para cada ponto selecionado ao longo da região maranhense. Destacam-se, em verde, os pontos que correspondem aos dias com maiores alturas de onda simuladas pelo modelo SWAN.

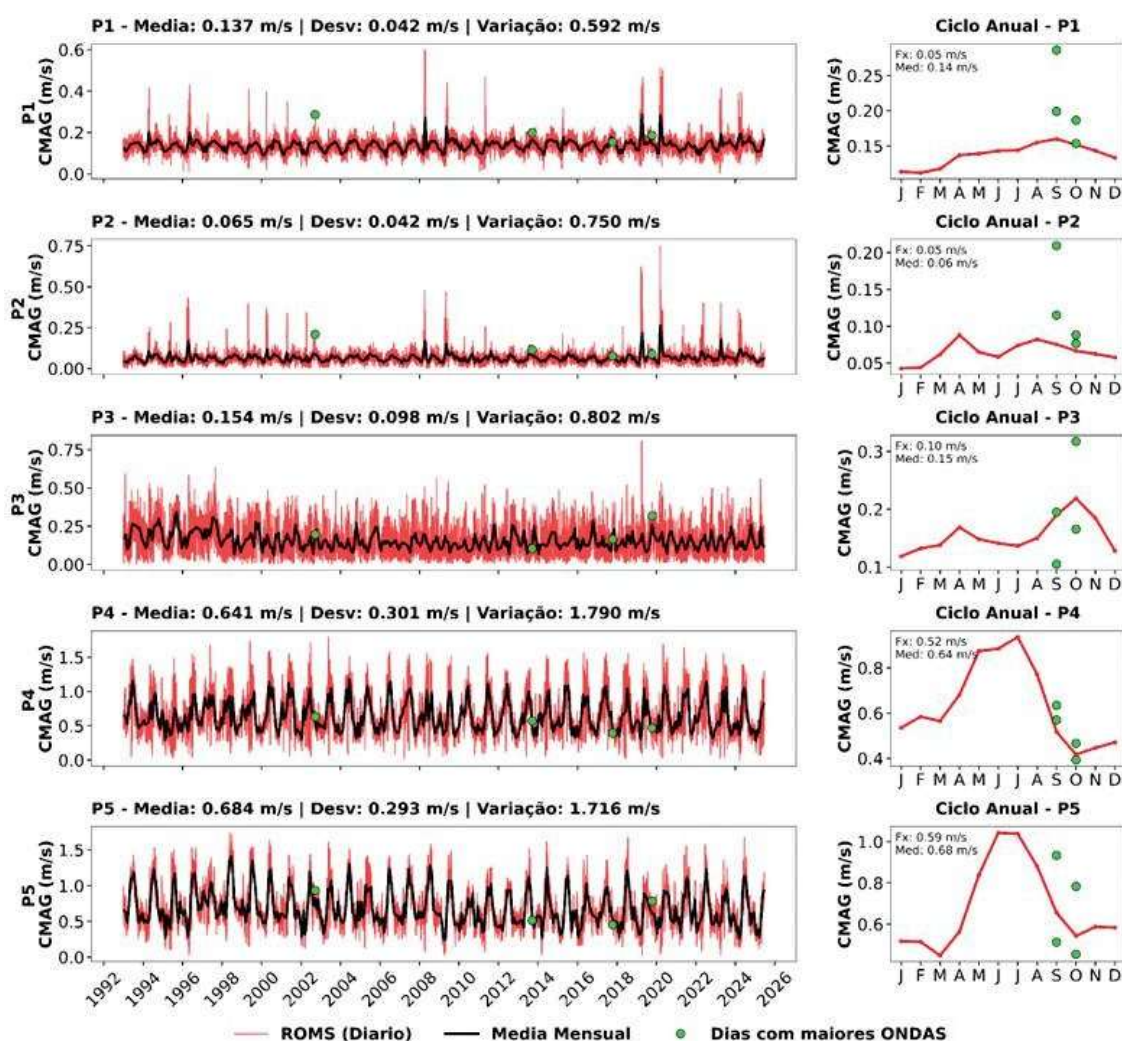
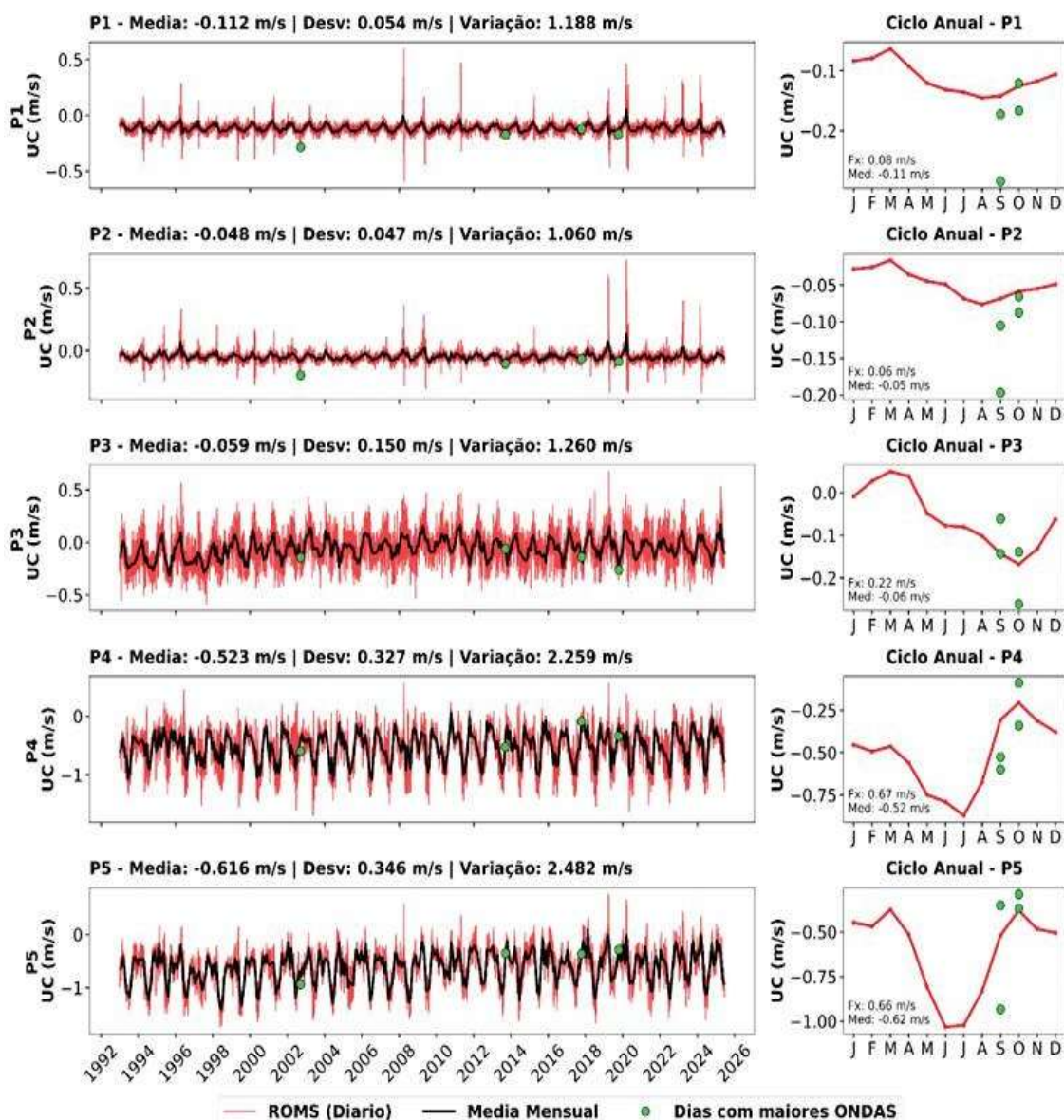


Figura 18 - Séries temporais e ciclo anual da Magnitude da Componente Zonal das correntes (UC, m s^{-1}) simuladas pelo modelo ROMS para cada ponto selecionado ao longo da região maranhense. Destacam-se, em verde, os pontos que correspondem aos dias com maiores alturas de onda simuladas pelo modelo SWAN.

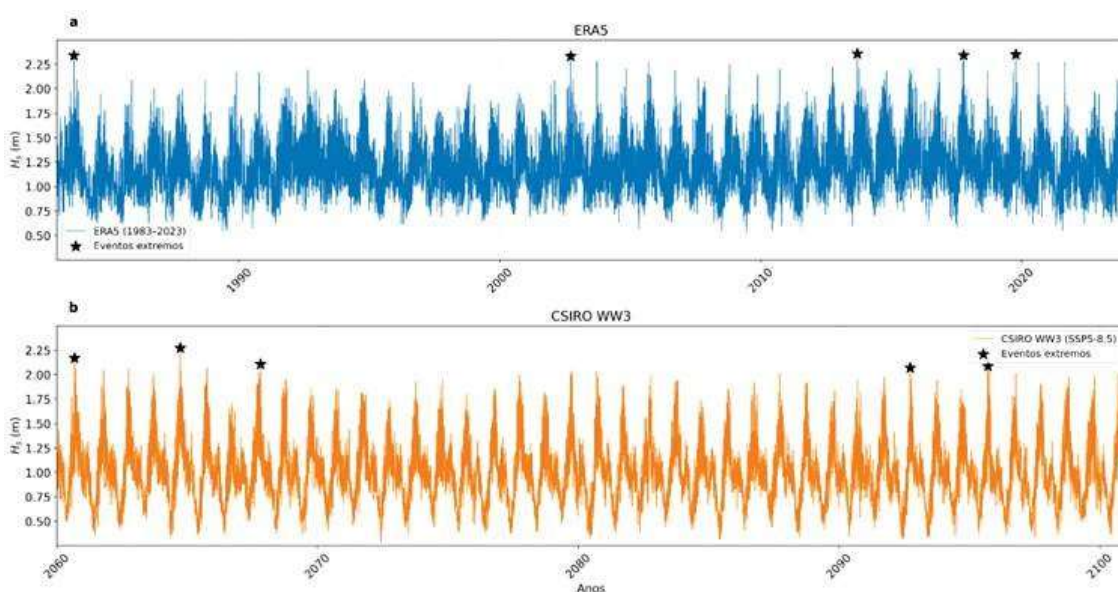


- **Resultados do modelo de ondas SWAN**

Seleção dos eventos extremos de onda no domínio de estudo

A fim de analisar a ocorrência de eventos extremos de ondas no GM (H_s máximas) no clima atual (1983-2023) e projetados pelo CMIP6 para o clima futuro (2060-2100) foram selecionadas as séries temporais históricas de altura significativa de onda (H_s) e velocidade do vento a 10 m da reanálise ERA5/ECMWF e do WaveWatch III/CSIRO no ponto oceânico localizado mais offshore do GM (44°W e 2°S; Figura 4). A escassez de dados de onda medidos in situ para a área de estudo reforça a necessidade de se desenvolver um sistema de modelagem numérica eficaz para a região. A partir das séries históricas de H_s (Figura 19) foram selecionados os 5 maiores picos nas séries de dados (5 eventos extremos de onda em cada clima simulado). Os eventos extremos de ondas apresentaram duração distinta entre os eventos selecionados, sendo considerado além da H_s máxima, o T_p e a direção de propagação das ondas em cada evento extremo. A duração dos eventos foi definida usando um filtro passa baixa com duração de três dias, ou seja, as variações diárias são suavizadas, permitindo que as tendências de longo prazo sejam mais evidentes.

Figura 19 - Série temporal de altura significativa de onda (H_s), com frequência a cada 3 horas, simulada pela (a) reanálise ERA5 (1983-2023) e (b) pelo WaveWatch III/CSIRO (2060-2100) extraída no ponto *offshore* ao GM (Lon = 44°W e Lat = 2°S). Os marcadores em preto representam os eventos extremos de ondas selecionadas.



Eventos extremos de onda no clima presente (1983–2023)

Cinco eventos extremos foram analisados para o clima presente, utilizando dados observados e simulações do modelo SWAN forçado com reanálise ERA5, a análise revelou que os eventos apresentaram alturas significativas de onda observadas muito semelhantes, variando apenas entre 2,33 m e 2,36 m, com média de 2,34 m. Os períodos de pico observados variaram de 6,9 s a 9,4 s, com média de 7,6 s. As durações dos eventos oscilaram entre aproximadamente 7 e 11 dias, com média de 9 dias e 7 horas.

Eventos extremos de onda no clima futuro (2060–2100)

Cinco eventos extremos projetados foram analisados utilizando forçantes do modelo climático EC-Earth3 (IPCC/CMIP6/CSIRO) e simulações com o modelo SWAN (com dados globais de onda do WaveWatch III/CSIRO), o resultado indicou que os eventos apresentam alturas significativas de onda projetadas entre 2,07 m e 2,27 m, com média de 2,14 m, e períodos de pico variando de 6,6 s a 7,1 s, com média de 6,8 s. As durações dos eventos foram mais curtas que no clima presente, variando de 3 dias e 6 horas a 14 dias e 8 horas, com média de 7 dias e 19 horas.

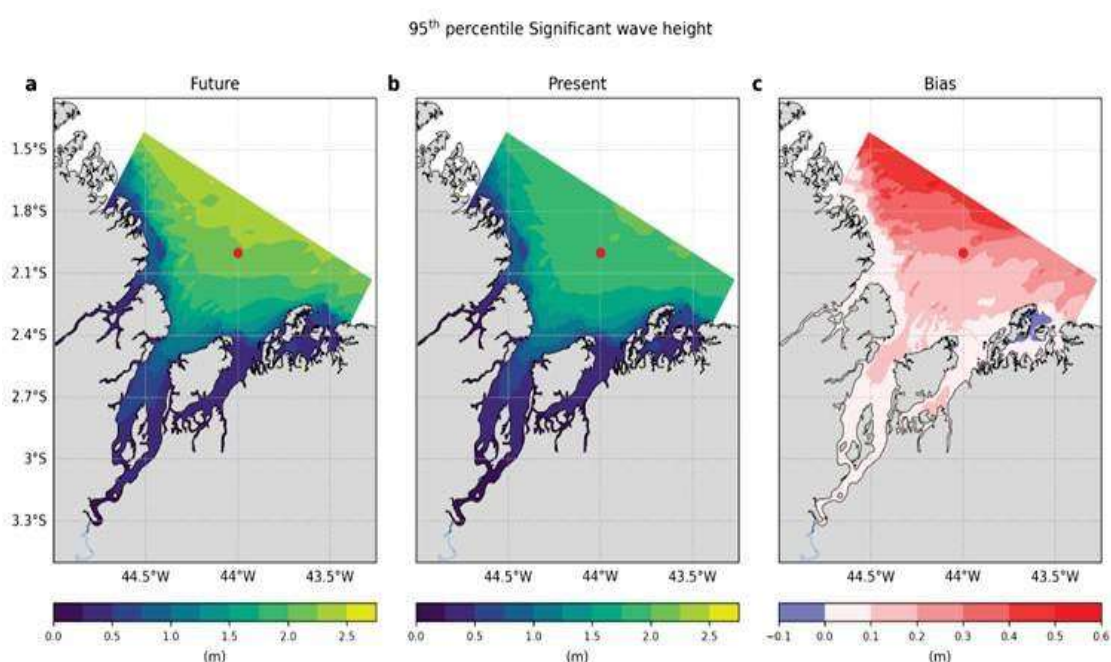
Relação entre o clima presente e clima futuro

Analisando os 10 eventos selecionados observamos que todos ocorreram nos meses de ASO. Os eventos do clima presente ocorreram com uma frequência decrescente, com um evento ocorrendo a cada aproximadamente 20, 10, 4 e 2 anos. Salvo o quarto evento que ocorreu com intervalo de 25 anos em relação ao terceiro (ou seja, entre os anos de 2067 a 2095), os eventos extremos de onda no clima futuro ocorreram em um intervalo de tempo de aproximadamente 3 anos, indicando uma maior frequência de ocorrência.

Para o período de duração de cada um dos 5 eventos, para os climas presente e futuro, foram feitas análises espaciais do percentil 95 dos valores de H_s e também do seu viés. A Figura 20 mostra esta variação espacial para a grade G2 no GM. O percentil 95 para o clima futuro é representado pela Figura 20a com ondas de aproximadamente 2,5 m predominando em todo o setor do oceano aberto e valores de até 1,5 m adentrando a região do GM. Para o clima presente (Figura 20b), valores de até 2 m são observados em oceano

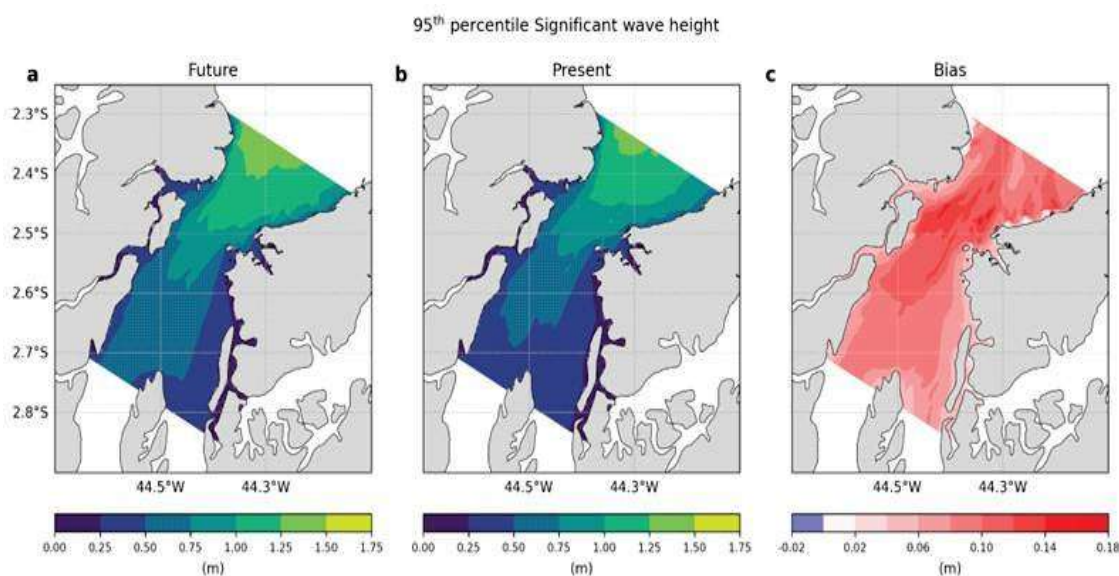
aberto, na região do GM esses valores chegam a 1 m. O cálculo do percentil 95 para os eventos extremos simulados pelo SWAN mostra uma intensificação de H_s na ordem de 1 m no clima futuro no oceano aberto. Essa intensificação, da ordem de 0,5 m, também é observada nas regiões próximas do GM.

Figura 20 - Estatísticas espaciais do percentil 95 para altura significativa, onde (a) p95 do clima futuro, (b) p95 do clima presente e (c) o viés entre eles para os eventos extremos de onda.



No domínio da BSM, as análises do percentil 95 para H_s , e para os climas presente e futuro (período de duração de cada um dos 5 eventos) indicaram valores de H_s (~1,7 m), observados adentrando a BSM, diminuindo conforme avança para o interior do continente (~0,6 m) para ambos os cenários (Figura 21a-b). Os maiores valores de altura significativa acompanham o canal de vazão da BSM, no qual os valores de viés mostram uma intensificação sobre áreas de maior ação dos regimes de enchente e vazante de mar, principalmente no lado oeste da baía (Figura 21c). Valores negativos são encontrados na borda noroeste da grade, próximo a latitude de 2,3°S.

Figura 21 - Percentil 95 de H_s para o clima presente (a), clima futuro (b) e viés (c) englobando todos os eventos extremos simulados com o modelo SWAN. O ponto vermelho mostra o local onde as séries temporais foram retiradas.



Climatologia de ondas ao largo do Maranhão

A Figura 22 mostra a climatologia de H_s para o intervalo de 1940-2024 a partir de dados da reanálise ERA5. Observa-se que as maiores alturas ocorrem no período de Setembro-Outubro-Novembro (SON) (Figura 22c), conciliando com os eventos extremos encontrados. A Figura 22a apresenta a região da PCMA no período de Abril-Maio-Junho (AMJ), período onde a quantidade de chuva diminui no Maranhão, influenciado principalmente pelos ventos alísios. Já na Figura 22b é mostrado o intervalo de SON onde ocorrem os maiores valores de H_s , com ondas advindas predominantemente do quadrante nordeste na região costeira.

A climatologia da magnitude do vento da reanálise ERA5 para o mesmo período (1940-2024) é mostrada na Figura 23. É observado que as maiores magnitudes são encontradas no trimestre de SON (Figura 23b-c), coincidindo com o pico das maiores alturas de onda encontradas, época onde os ventos alísios predominam. Este padrão também é observado na Figura 15 com os resultados do modelo ROMS para a região da PCMA.

Figura 22 - Climatologia para altura significativa da reanálise ERA5 (1940-2024), onde (a) representa Abril-Maio-Junho, (b) Setembro-Outubro-Novembro e (c) a série temporal extraída no ponto *offshore* ao GM (Lon = 44°W e Lat = 2°S).

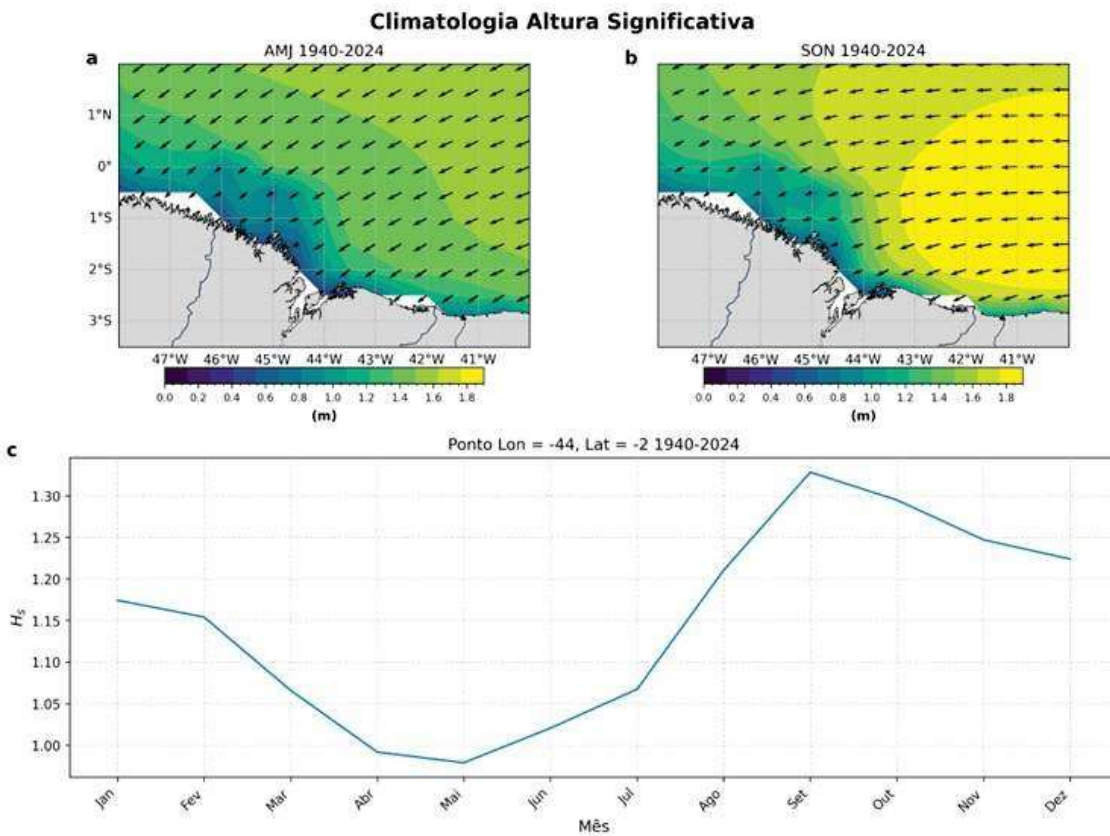
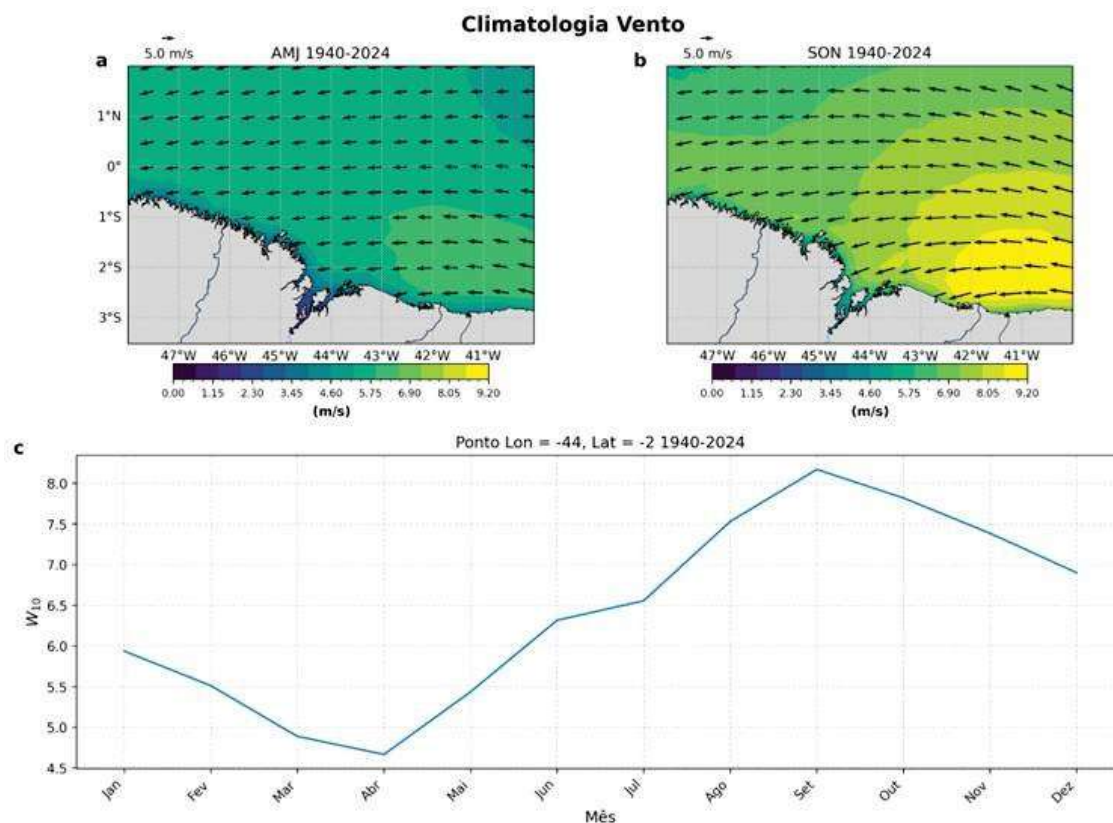


Figura 23 - Climatologia para intensidade do vento em superfície da reanálise ERA5 (1940-2024), onde (a) representa Abril-Maio-Junho, (b) Setembro-Outubro-Novembro e (c) a série temporal extraída no ponto *offshore* ao GM (Lon = 44°W e Lat = 2°S).



O estudo realizado por Reis *et al.* (2024) foi o primeiro a avaliar o clima de ondas oceânicas ao largo do estado do Maranhão como bimodal, ainda que com dados globais. Em geral, os autores mostraram que as ondas mais altas são encontradas nas áreas *offshore*, particularmente na parte norte da região de estudo, enquanto as ondas mais baixas foram encontradas perto da costa, o que coincide com os resultados obtidos com a modelagem regional e de maior resolução aplicada neste estudo. Observou-se um leve aumento de H_s na região *offshore*, principalmente no setor N-NW da grade (G1 e G2). Do ponto de vista espacial, os cenários futuros indicam a possibilidade de aumento em H_s no setor ocidental da PCMA e no interior da Baía de São Marcos, especialmente próximo ao Porto de Itaqui, implicando riscos potenciais à infraestrutura portuária, à navegação e às comunidades costeiras.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostrados neste capítulo são fruto do projeto de pesquisa intitulado “Desenvolvimento de um sistema de modelagem acoplada oceano-atmosfera-onas nos domínios aninhados da Plataforma Continental do Maranhão – Golfão Maranhense – Baía de São Marcos para análise dos impactos às mudanças climáticas e áreas vulneráveis à inundação e agitação marítima no Complexo Portuário do Itaqui” financiado via Edital FAPEMA/EMAP Nº 02/2022, com previsão de término em dezembro de 2025. Este projeto abriu portas para o desenvolvimento de um outro projeto na área de modelagem hidrodinâmica e de ondas na Margem Equatorial Brasileira (MEB), intitulado “PowerMEB - Estimativa do potencial de geração de energia maremotriz e ondomotriz na Margem Equatorial Brasileira”, financiado via Edital CNPq/MCTI/FNDCT Nº 444013/2024-5, também coordenado pela Profa Dra Claudia Klose Parise, Coordenadora do Laboratório de Estudos e Modelagem Climática (LACLIMA) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA). O projeto PowerMEB teve início em janeiro de 2025 e tem duração de 3 anos. Assim, este capítulo representa apenas um recorte dos resultados obtidos até o presente momento no âmbito desses dois projetos, constituindo um estudo pioneiro sobre modelagem hidrodinâmica e de ondas nos domínios da PCMA-GM-BSM ao explorar as escalas de variabilidade interanual, decadal e de cenários climáticos projetados pelo IPCC.

Os resultados mostram, de uma forma geral, que ambos os modelos simulados neste estudo (ROMS e SWAN) apresentaram melhor desempenho na região oceânica do que em águas rasas. Tal comportamento reforça a importância de uma representação acurada da batimetria local, das parametrizações físicas e das interações entre a coluna d’água e o fundo oceânico nos processos de modelagem hidrodinâmica ao largo do Maranhão. Ainda que com muitos desafios, os resultados aqui apresentados correspondem a simulações obtidas com os modelos ROMS e SWAN aplicados separadamente, ou seja, sem o acoplamento. A configuração acoplada dos modelos ROMS+SWAN está atualmente em desenvolvimento no LACLIMA/UFMA, no âmbito do projeto PowerMEB, cujos resultados estão sendo processados e serão posteriormente analisados e comparados aos apresentados neste capítulo (rodadas solo). Espera-se que o acoplamento proporcione uma melhoria significativa na representação dos parâmetros, especialmente nas áreas costeiras, que ainda apresentaram desempenho inferior em comparação às regiões oceânicas.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Alessandro L. et al. Numerical assessment of tidal potential energy in the Brazilian Equatorial Shelf. **Renewable energy**, v. 220, n. 119684, p. 119684, 2024.
- AMARAL, Rogério; ALFREDINI, Paolo. Modelação hidrossedimentológica no Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 5–14, 2010. ISSN 0102-6712. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v15n2.p5-14>.
- ARDHUIN, F., et al. Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves. **Journal of Physical Oceanography**, 38(8), 1450–1467, 2008.
- BARBARIOL, F. et al. Wind waves in the Mediterranean Sea: An ERA5 reanalysis wind-based climatology. **Frontiers in marine science**, v. 8, 2021.
- BATTJES, J. A., & JANSSEN, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. **Coastal Engineering**, 1(1), 15–40.
- BITTENCOURT, D. M. **Descrição pontual de maré, perfil de correntes e suas inter-relações em um ponto do estuário do rio Mearim, São Luís - MA**. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. **Journal of geophysical research**, v. 104, n. C4, p. 7649–7666, 1999.
- BOURLÈS, B. et al. Upper layer currents in the western tropical North Atlantic (1989–1991). **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C1, p. 1361–1375, 1999.
- CASTRO, C. B.; PIRES, D. O.; MEDEIROS, M. S. Corals and calcified hydroids of the Manuel Luiz Marine State Park (State of Maranhão, Northeast Brazil). **Bulletin of Marine Science**, v. 69, n. 3, p. 725–742, 2001.
- CARVALHO, Daniele Oliveira de. **Variação espaço-temporal do nível do mar no Golfão Maranhense: contribuições astronômicas e meteorológicas**. 2025. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Departamento de Oceanografia e Limnologia, São

Luís, 2025.

CAVALERI, L. et al. Wave Modeling – The State of the Art. **Progress in Oceanography**, v. 75, n. 4, p. 603–674, 2012.

COLES, V. J. et al. The pathways and properties of the Amazon River plume in the tropical North Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 118, n. 12, p. 6894–6913, 2013.

CORDEIRO, C. A. M. M. et. al. “Conservation status of the southernmost reef of the Amazon Reef System: the Parcel de Manuel Luís”. **Coral Reefs**, v. 40, p. 165–185, 2021.

COSTA, A. M. S. **Modelagem Computacional para Avaliação Preliminar do Potencial de Correntes de Maré no Canal do Boqueirão**. 2022. 70 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica/CCET) –Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

COTRIM, C. DE S.; SEMEDO, A.; LEMOS, G. Brazil wave climate from a high-resolution wave hindcast. **Climate**, v. 10, n. 4, p. 53, 2022.

CZIZEWESKI, Anthea; PIMENTA, Felipe Mendonça; SAAVEDRA, Osvaldo Ronald. Numerical modeling of Maranhão Gulf tidal circulation and power density distribution. **Ocean dynamics**, v. 70, n. 5, p. 667–682, 2020.

CZIZEWESKI, F. M. et al. Interações hidrodinâmicas em canais de maré no litoral do Maranhão: resultados de modelagem 3D de alta resolução. Revista / Congresso, 2021.

DAI, Aiguo; TRENBERTH, Kevin E. Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations. **Journal of hydrometeorology**, v. 3, n. 6, p. 660–687, 2002.

DAI, A. Hydroclimatic trends during 1950–2018 over global land. **Climate Dynamics**, v. 54, p. 237–259, 2020.

DAI, A. Historical and future changes in global river discharge. **Reviews of Geophysics**, v. 59, n. 3, e2020RG000726, 2021.

DALBONE, R. C. **Análise das Correntes de Maré ao Longo do Canal de Acesso Portuário da Baía de São Marcos: Um Estuário de Macromarés**. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

EGBERT, Gary D.; EROFEEVA, Svetlana Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides **Journal of atmospheric and oceanic technology**, v. 19, n. 2, p. 183–204, 2002.

EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific model development**, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 2016.

FERREIRA, R. M. S. A.; ESTEFEN, S. F. Alternative concept for tidal power plant with reservoir restrictions. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 34, n. 12, p. 2757–2764, 2009.

FOLTZ, G. R. et al. Seasonal mixed layer heat budget of the tropical Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 109, n. C5, 2003.

GARCIA, P. D. **Caracterização hidrossedimentológica das correntes de maré e do transporte de sedimentos associado à Área Portuária do Maranhão**. 2007. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) –Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GEBCO BATHYMETRIC COMPILATION GROUP. **The GEBCO_2023 Grid - a continuous terrain model of the global oceans and land**. NERC EDS British Oceanographic Data Centre NOC, , 2023.

GEBCO BATHYMETRIC COMPILATION GROUP. **The GEBCO_2025 Grid - a continuous terrain model for oceans and land at 15 arc-second intervals**. NERC EDS British Oceanographic Data Centre NOC, , 2025.

GONZÁLEZ-GORBEÑA, E.; ROSMAN, P. C. C.; QASSIM, R. Y. Assessment of the tidal current energy resource in São Marcos Bay, Brazil. **Journal of Ocean Engineering and Marine Energy**, [S.l.], v. 1, n. 4, p. 421–433, 2015.

GUEDES, Rafael; DURRANT, Tom; JOHNSON, David; PEREZ, Jorge. **Wavespectra: Python library for wave spectra**. 2018. Software. Disponível em: <https://wavespectra.readthedocs.io/en/latest/index.html> . Acesso em: 5 abr. 2025.

HEAPS, N. S. A two-dimensional numerical sea model. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A**, v. 265, n. 1160, p. 93–137, 1969.

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly journal of the Royal Meteorological Society. Royal Meteorological Society (Great Britain)**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020.

HOLTHUIJSEN, L. H. **Waves in oceanic and coastal waters**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

LONGUET-HIGGINS, M. S., & STEWART, R. W. (1964). Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. **Deep-Sea Research**, 11, 529–562.

MATOS, M. F. A.; FORTES, C. J. E. M.; AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C. Análise comparativa da agitação obtida com o modelo numérico (SWAN) na modelagem de ondas do litoral setentrional do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 13, n. 3, p. 283-299, 2013.

MUHAMMED NASEEF, T.; SANIL KUMAR, V. Climatology and trends of the Indian Ocean surface waves based on 39-year long ERA5 reanalysis data. **International journal of climatology: a journal of the Royal Meteorological Society**, v. 40, n. 2, p. 979–1006, 2020.

NETO, P. B. L. Modelagem e Análise de geração maremotriz no estuário do Bacanga. **Anais do XIX CBA**, 2012.

ODÉRIZ, I. et al. Natural variability and warming signals in global ocean wave climates. **Geophysical research letters**, v. 48, n. 11, 2021.

PASCHOALETI, D. M. **Modelagem numérica hidrodinâmica para apoio a operações portuárias: estudo de caso da Baía de São Marcos - MA**. 2023. 126 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

PRITCHARD, D. W. Estuarine hydrography and related physical characteristics. In: **Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, 1952.

PRITCHARD, D. W. Estuarine circulation patterns. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, 81(717): 1–11, 1955.

PROJETO BAÍAS DO BRASIL. Baía de São Marcos, Maranhão - Relatório Descritivo. **Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica**, 2018.

REIS, B. L. R. et al. The bimodal regime of ocean waves and winds over the continental shelf of Maranhão. **Regional studies in marine science**, v. 77, n. 103629, p. 103629, 2024.

RODRIGUES, J. E. R.; HARARI, J. Modelo numérico tri-dimensional linear da

plataforma continental do Estado do Maranhão. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, São Paulo, v. 43, n. 1, p. 19–34, 1995. ISSN 0373-4805.

ROSA, M. C. B.; MOURA, P. V.; MENDONÇA, L. F. F.; LENTINI, C. A. D. Mapeamento e caracterização de ondas internas ao largo da foz do rio Amazonas através do sensor MODIS - satélite TERRA (2008 a 2019). **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 3, p. 21164-21179, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n3-024.

RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H.; BOOIJ, N. A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification. **Journal of geophysical research**, v. 104, n. C4, p. 7667–7681, 1999.

SILVA, A. C. da; ARAUJO, M.; PINHEIRO, L. de S. Caracterização hidrográfica da plataforma continental do Maranhão a partir de dados oceanográficos medidos, remotos e modelados. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 281–293, 2007. ISSN 0102-261X. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000300005>.

SILVA, J. M. **Circulação de maré e transporte de sedimentos na Baía de São Marcos**. Dissertação (Mestrado) –Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2007.

SHCHEPETKIN, Alexander F.; MCWILLIAMS, James C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. **Ocean modelling**, v. 9, n. 4, p. 347–404, 2005.

STRAMMA, L.; HÜTTL, S.; SCHAFSTALL, J. Water masses and currents in the upper tropical northeast Atlantic off northwest Africa. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 113, n. C8, 2008.

TOLMAN, H.; ABDOLALI, A.; MICKAEL, A.; ALVES, J.-H.; ARDHUIN, F.; BABANIN, A.; BARBARIOL, F.; BENETAZZO, A.; BIDLOT, J.; BOOIJ, N.; BOUTIN, G.; BUNNEY, C.; CAMPBELL, T.; CHALIKOV, D.; CHAWLA, A.; CHENG, S.; COLLINS, C.; FILIPOT, J.-F.; FLAMPOURIS, S.; LIANG, Z. User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III® Version 6.07. v. 333. **NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note**. College Park, MD: USA, 2019.

VARONA, H. L.; et al. Amazon River plume influence on Western Tropical North Atlantic salinity, temperature and hydrodynamics. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 80, p. 18-36, 2017. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2017.30086.

VELLOZO, T. G.; ALVES, A. R. Características gerais do fenômeno da maré no Brasil. **Anais Hidrográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação**, Tomo LXI, 2004

WARNER, John C. et al. Development of a coupled ocean–atmosphere–wave–sediment transport (COAWST) modeling system. **Ocean modelling**, v. 35, n. 3, p. 230–244, 2010.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 3. ed. Amsterdam: Academic Press, 2011. (International Geophysics Series, v. 100).

Capítulo 03

CENÁRIOS E PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A HIDROSSEDIMENTOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MEARIM

**Jadson Freire da Silva, Elisabeth Regina Cavalcanti Silva,
Rodrigo de Queiroga Miranda, Pedro Paulo Lima Silva, Filipe
Daniel Dutra de Moraes, Yenê Medeiros Paz**

DOI: 10.29327/5850749.1-3

view online: [https://publicacoes.even3.com.br/book/
mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495](https://publicacoes.even3.com.br/book/mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495)

Cenários e Projeções de Mudanças Climáticas sobre a Hidrossedimentologia da Bacia Hidrográfica do Rio Mearim

Jadson Freire da Silva, Elisabeth Regina Cavalcanti Silva, Rodrigo de Queiroga Miranda, Pedro Paulo Lima Silva, Filipe Daniel Dutra de Moraes, Yenê Medeiros Paz

Resumo

Neste capítulo, o leitor é convidado a compreender como as mudanças climáticas podem influenciar, de forma direta, o comportamento hidrológico e o transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Mearim, sistema fundamental para a dinâmica costeira que impacta o Porto do Itaqui. O texto parte da relação entre clima, regime de chuvas e vazão dos rios para analisar como alterações nesses padrões podem modificar a quantidade e a distribuição de sedimentos ao longo da bacia e em sua foz. Ao longo do capítulo, são apresentados cenários climáticos futuros baseados em projeções científicas, que permitem avaliar possíveis mudanças no volume de precipitação, na frequência de eventos extremos e na variabilidade das vazões. A partir dessas projeções, os autores discutem os efeitos esperados sobre os processos hidrossedimentológicos, isto é, sobre a forma como água e sedimentos circulam e interagem dentro da bacia. A análise evidencia que alterações no regime de chuvas podem intensificar processos de erosão, modificar o transporte de materiais sólidos e influenciar diretamente a dinâmica do estuário e do canal de acesso ao Porto do Itaqui. Dessa forma, o capítulo estabelece uma conexão clara entre o que ocorre na bacia hidrográfica e os impactos observados na zona costeira, reforçando a importância de uma visão integrada entre continente e oceano. Ao apresentar cenários prospectivos, o capítulo amplia a discussão para além do diagnóstico atual, convidando o leitor a refletir sobre planejamento de longo prazo, adaptação e gestão baseada em evidências. Mais do que projetar números, o texto demonstra como a antecipação de tendências climáticas pode se tornar um instrumento estratégico para reduzir riscos, aumentar a previsibilidade e fortalecer a resiliência ambiental e operacional do Porto do Itaqui.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Marengo et al. (2011) as mudanças climáticas antropogênicas podem ser entendidas pela ação do homem em modificar o território e como consequência da modificação, outros processos e procedimentos ambientais tendem a ser alterados de diferentes formas, sejam elas em diversas escalas (Marengo, 2008).

Levanta-se como exemplo das mudanças climáticas o aumento da temperatura da terra em escala macro, o que pode acarretar mudanças em períodos de reprodução de animais e plantas, como também o aumento do nível médio dos mares e problemáticas litorâneas no que tange ao avanço dos oceanos sob esses locais (Marengo, 2014; Nobre et al., 2010).

Os eventos extremos como a ampliação de períodos chuvosos, furacões, secas prolongadas como também a redução de períodos chuvosos são outros exemplos das consequências das mudanças climáticas (Marengo, 2018). Essas ações quando atuam em regiões urbanas causam problemas estruturais, sociais e econômicos, uma vez que as dinâmicas sociais estão presentes e a perda destas demandam esforços severos da gestão pública, privada e terceiro setor (Nobre et al., 2010; Tomas et al., 2024)

Desta forma, para estudos climáticos e hidrológicos, mecanismos foram criados para elaboração de previsões mais assertivas como também na redução de incertezas do clima. Os modelos climáticos entram nesse escopo, dando amparo a previsões e a pesquisas que simulam o tempo presente-futuro. A utilização de modelos climáticos não é nova e sempre vem evoluindo para decisões em diferentes escalas (Sampaio; Silva-Dias, 2014).

Neste âmbito, os multimodelos climáticos, que resumidamente pode ser entendido como a junção de diversos modelos climáticos são amplamente usados em sistemas de previsões climáticas de curto prazo para reduzir as incertezas relacionadas às simulações de cada modelo específico. Tais incertezas normalmente decorrem da complexidade dos modelos climáticos, erros nas medições utilizadas para calibração, aleatoriedade e erros sistemáticos específicos de cada modelo (Weigel et al., 2010; Schewe, 2014; Wada et al., 2013).

A utilização do modelo hidrológico SWAT para a bacia do Mearim, sendo esse executado e calibrado para a vazão hídrica como para os sedimentos possibilitou espacializar essas relações como também promover cenários de interesse a região. Os cenários apresentados auxiliam a entender o passado-presente das regiões de interesse, mas também para desenvolver ambientações que respeitam as projeções estipuladas pela

literatura científica no que se refere as mudanças climáticas antropogênicas.

Diante disso, o objetivo do artigo é analisar os cenários e projeções de mudanças climáticas sobre a hidrossedimentologia da Bacia Hidrográfica do Rio Mearim, principal bacia hidrográfica do estado do Maranhão.

2. METODOLOGIA

Nesta pesquisa, para os multimodelos, utilizou-se a técnica *Reliability Ensemble Averaging* (REA), que mensura as incertezas do multimodelos em forma de desempenho de cada modelo climático, e combina esses modelos utilizando média ponderada (Giorgi; Mearns, 2003; Gao et al., 2024). Contudo, existem outras técnicas a serem utilizadas na literatura para reduções de incertezas climáticas como na entrega de modelos climáticos mais robustos.

No que se refere aos cenários, utilizou-se duas proposições, sendo essas uma moderada e uma pessimista, denominada RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente. Esses cenários junto aos multimodelos podem entregar para o ambiente de interesse o presente-futuro da região frente as mudanças climáticas e as modificações que podem ser executadas com as emissões de carbono na atmosfera.

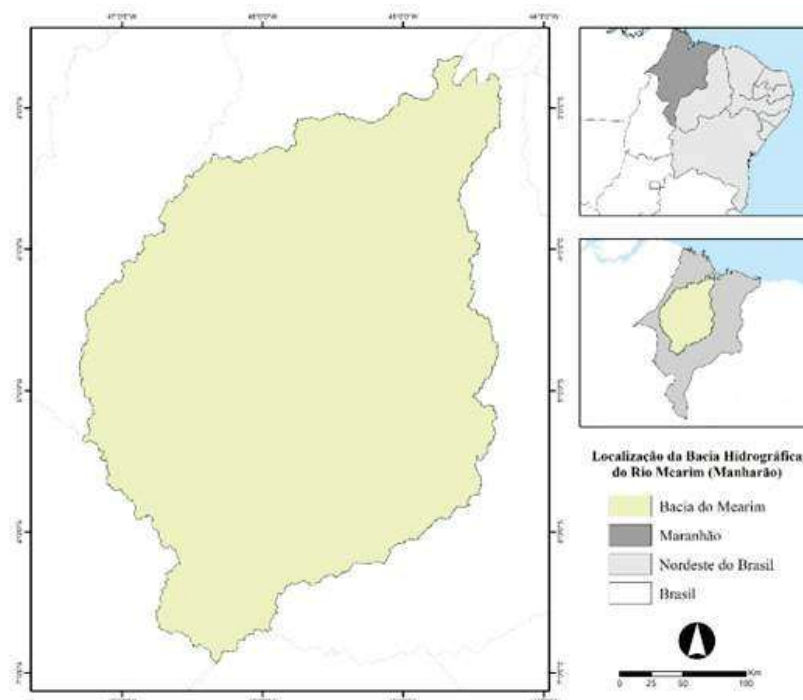
Para desenvolvimento desse estudo, escolheu-se dois cenários de mudanças climáticas sendo estes o RCP 4.5 (moderado) e RCP 8.5 (pessimista). Esses cenários foram criados e implementados a partir de 11 modelos climáticos combinados em um multimodelos para entrada no SWAT (Arnold et al., 2012).

• ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Mearim é a maior do estado do Maranhão, possuindo aproximadamente 99 mil km² e mantendo em média 30% do território maranhense. Pelo seu vasto território, a área da bacia possui diversos tipos de usos de solo, características pedológicas e climatológicas (Figura 1).

Ao longo do tempo as atividades industriais e agrícolas ganharam espaços na bacia, transformando a região em um grande polo agropecuário, além de atividades industriais, uma vez que aproximadamente 20% estão alocadas em solos do Mearim. Devido ao seu tamanho, a área da bacia compreende oitenta e nove municípios (CODEVASF, 2019) incluídos diretamente ou indiretamente e três grandes áreas (trechos) denominados Alto Mearim, Médio Mearim e Baixo Mearim, com suas respectivas particularidades, potencialidades e suscetibilidades ambientais, estruturais e socioeconômicas.

Figura 1 - Representação espacial da bacia hidrográfica do rio Mearim (Maranhão).



Fonte: Autoral

- DOWNLOAD DOS MODELOS CLIMÁTICOS

Utilizou-se como base para desenvolvimento do multimodelo climático 11 (onze) modelos climáticos (NorESM1-M, MPI-ESM-MR, MPI-ESM-LR, HadGEM2-CC, GFDL-ESM2G, GFDL-CM3, CNRM-CM5, bcc-csm1-1-m, bcc-csm1-1, ACCESS1-0, ACCESS1.3).

Os modelos supracitados foram baixados utilizando a API da plataforma de dados climáticos globais *Climate Data Store* (CDS; <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/sis-ecv-cmip5-bias-corrected?tab=overview>). Os dados de precipitação em $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ foram assimilados utilizando linguagem Python, onde foram convertidos para mm multiplicando pelo fator 86400, extraídos para a área de estudo e formatados para entrada no SWAT.

• COMPUTAÇÃO DA PERFORMANCE DE CADA MODELO

Para avaliar a capacidade dos modelos climáticos de corresponder à realidade, cada grid do modelo climático foi pareado com uma estação climática, e foram computados indicadores de desempenho. Os indicadores utilizados neste trabalho foram *Root Mean Square Deviation* (RMSD), *Normalized Root Mean Square Deviation* (NRMSD), *Absolute Normalized Mean Bias Deviation* (ANMBD), Coeficiente de Correlação (CC), e Nash-Sutcliffe (NSE), cujas equações matemáticas para cada indicador, bem como seus valores ideais estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 - As equações matemáticas e valores ideais das métricas de desempenho.

Indicador de performance	Equação	Melhor valor
<i>Root Mean Square Deviation</i> (RMSD)	$\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (X_i - Y_i)^2}$	0
<i>Normalized Root Mean Square Deviation</i> (NRMSD)	$\frac{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (X_i - Y_i)^2}}{\bar{X}}$	0
<i>Absolute Normalized Mean Bias Deviation</i> (ANMBD)	$\frac{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (Y_i - X_i)}{\bar{X}}$	0
Coeficiente de Correlação (CC)	$\frac{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (z_i - \bar{z})(y_i - \bar{y})}}{(T-1)\sigma_{obs}\sigma_{sim}}$	1
Nash-Sutcliffe (NSE)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^T (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^T (x_i - \bar{x})^2}$	1

Para o cálculo dos índices de desempenho, foram utilizados conjuntos de dados médios mensais de precipitação de valores observados (*obs*) e simulados for cada modelo (*sim*) para o período 1970–2005.

Os valores observados e simulados dos respectivos conjuntos de dados são x_i e y_i . A média dos valores observados e simulados é representada por $\bar{x}$ e $\bar{y}$. O número de conjuntos de dados é T . Os desvios padrão dos valores observados e simulados são

• CALCULO DOS VALORES NORMALIZADOS E ENTROPIA

A normalização dos indicadores de cada modelo foi realizada utilizando a equação

$$k_{aj} = \frac{K_j(a)}{\sum_{a=1}^N k_j(a)}$$

Onde $k_j(a)$ é o valor do indicador j para cada modelo a ; e N representa o número total de modelos climáticos. O cálculo da entropia utiliza os valores normalizados k_{aj} como entrada na equação abaixo:

$$r_j = \frac{Dd_j}{\sum_{j=1}^J Dd_j}$$

Onde Dd_j é obtido por:

$$Dd_j = 1 - \left(-\frac{1}{\ln(T)} \sum_{a=1}^T k_{aj} \ln(k_{aj}) \right), \text{ for } j = 1, 2, 3, \dots, J$$

Onde a é cada modelo climático; J é o número total de indicadores; T representa o número total de modelos.

- APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MÉDIA PONDERADA

Nesta etapa, cada modelo climático recebe um peso baseado no índice de entropia. Esse peso (V_a) é utilizado para multiplicar cada valor diário de cada modelo. A soma dessas multiplicações diárias resulta no valor do multimodelos para um determinado dia e cenário tal qual a equação abaixo:

$$V_a = \sum_{j=1}^j r_j k_j$$

Aqui, k_j representa o valor do indicador j para cada modelo, e r_j é o peso atribuído ao indicador j baseado no modelo de entropia. Um valor alto de V_a indica um modelo mais adequado à realidade, e consequentemente terá um peso maior no valor combinado dos multimodelos.

Esse algoritmo leva em consideração os pontos fortes e fracos de cada modelo climático e combina seus valores baseado em sua performance individual.

Todos os 11 modelos foram combinados em multimodelos de dados de precipitação para os cenários RCP 4.5 e 8.5, e carregados no SWAT em quatro períodos distintos utilizando a ferramenta SWAT Editor: (1) histórico-*base line*: 1975-2005; (2) presente: 2006-2035; (3) futuro próximo: 2036-2065 e (4) futuro distante: 2065-2095 (RCP 4.5 e 8.5 separadamente).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os Cenários RCP (Representative Concentration Pathways) podem por conceituação ser levados como as possíveis trajetórias que a terra irá levar se houver continuidade progressiva (ou não) das emissões de carbono e suas consequências ao efeito estufa, tendo como base os relatórios do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). Para o cenário RCP 4.5, denominado por muitas pesquisas como um cenário moderado, pensa-se em uma emissão de gases poluentes com possibilidade de gerenciá-lo.

Esse cenário remete a junção de políticas públicas limpas (tecnologias limpas), como também o controle energético e o entendimento de grandes países poluentes do agravamento climático e sua adesão a programas de redução de gases ao longo dos anos (até 2100) (IPCC, 2023).

O cenário RCP 8.5 é denominado de *pessimista* ou de *contínuo* uma vez que não há controle sobre os combustíveis fósseis na terra e sua utilização ainda é amplamente executada. O RCP 8.5 é mais conhecido pelas suas consequências, já que são as mais severas: (i) aumento do nível médio dos mares e redução das regiões de costas –litorâneas; (ii) riscos na saúde, principalmente nas crianças e idosos; (iii) perda de biodiversidade marinha e terrestre (iv) riscos na segurança alimentar global e (v) aumento dos extremos (IPCC, 2023).

Em ambos os cenários RCP, haverá aumento da temperatura global, seja de cerca de 2,0 a 3,0 °C acima dos níveis pré-industriais (RCP 4.5) ou ultrapassando 4,0 °C, podendo atingir até 5,0 °C acima dos níveis pré-industriais (RCP 8.5) (IPCC, 2023).

Desta forma, os modelos NorESM1-M, MPI-ESM-MR, MPI-ESM-LR, HadGEM2-CC, GFDL-ESM2G, GFDL-CM3, CNRM-CM5, bcc-csm1-1-m, bcc-csm1-1, ACCESS1-0, ACCESS1.3 (Tabela 2) consideram os conceitos RCP promovidos pelo IPCC e entregam para suas regiões referencias uma relação climática projetional.

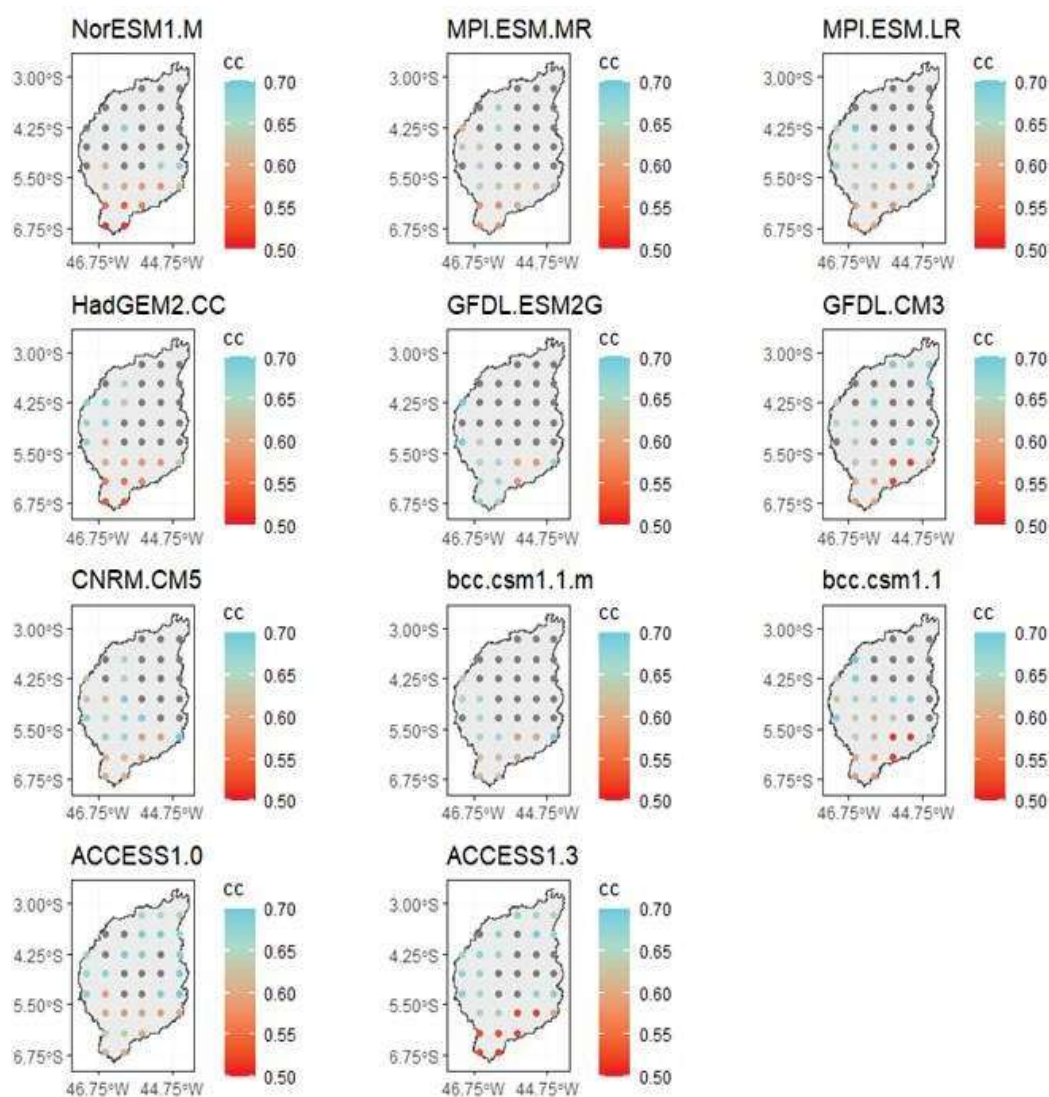
Tabela 2 - Modelos climáticos utilizados na pesquisa

Modelo Climático	Ambiente referência
ACCESS1-0	(BoM-CSIRO, Australia)
ACCESS1.3	(BoM-CSIRO, Australia)
bcc-csm1-1	(BCC, China)
bcc-csm1-1-m	(BCC, China)
CNRM-CM5	(CNRM-CERFACS, France)
GFDL-CM3	(NOAA, USA)
GFDL-ESM2G	(NOAA, USA)
HadGEM2-CC	(UK Met Office, UK)
MPI-ESM-LR	(MPI, Germany)
MPI-ESM-MR	(MPI, Germany)
NorESM1-M	(NCC, Norway)

Observando a Tabela 2 nota-se que os ambientes referencias dos modelos não estão ou não são da América do Sul. Há a existência de modelos para o hemisfério sul terrestre, mas não em especificidade o Brasil. Esse movimento também é observado nas pesquisas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, em que os bancos e as bases de dados mais robustas estão sob base de países do norte global (Landsat, Sentinel).

Por tratar-se de informações que podem tender a não refletir realidades territoriais, os multimodelos vem a entregar a melhor performance dos modelos climáticos, de modo a reduzir incertezas e resultados pertinentes sobre o espaço em estudo. A Figura 2 representa a respeitabilidade e variância dos modelos frente aos dados da região.

Figura 2 - Performance do modelo frente a espacialização da bacia hidrográfica do Mearim

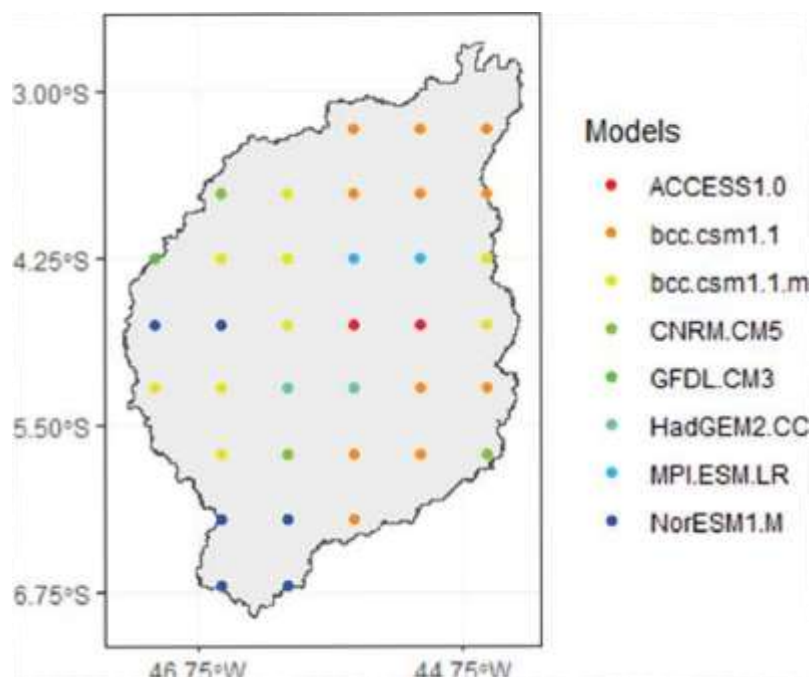


A partir da Figura 2, é notado a variação da performance de cada cenário de mudanças climáticas frente a bacia hidrográfica. Os modelos comumente entregam melhores correlações para regiões em específico, enquanto em outras entregam correlações mais baixas.

Os modelos MPI.ESM.MR e o GFDL.CM3 apresentam correlações acima de 0.7 no baixo Mearim; o ACCESS1.0 possui grandes contribuições tanto no baixo quanto médio. No Médio Mearim, os modelos MPI.ESM.LR, HadGEM2.CC, GFDL.ESM2G e bcc.csm1.1.m possibilitam melhores correlações, contudo, o modelo NorESM1.M é o que entrega maior qualidade das correlações médio Mearim, em quantidade de pontos como em relação as correções. O modelo bcc.csm1.1 não somente tem satisfatoriedade no Alto Mearim como também contribui com alguns pontos no Médio, enquanto o modelo CNRM.CM5 possui pontos no alto e o ACCESS1.3 é bastante completo, contribuindo com pontos satisfatórios no baixo, médio (parte leste) e alto.

Observando a miscelânea de modelos e suas contribuições sobre o espaço geográfico em estudo, que em tempo são positivas e negativas, a criação de um novo modelo, no qual todos os ambientes satisfatórios serão considerados é emergente. Denominado *Multimodelos de Mudanças Climáticas Mearim* (Figura 3).

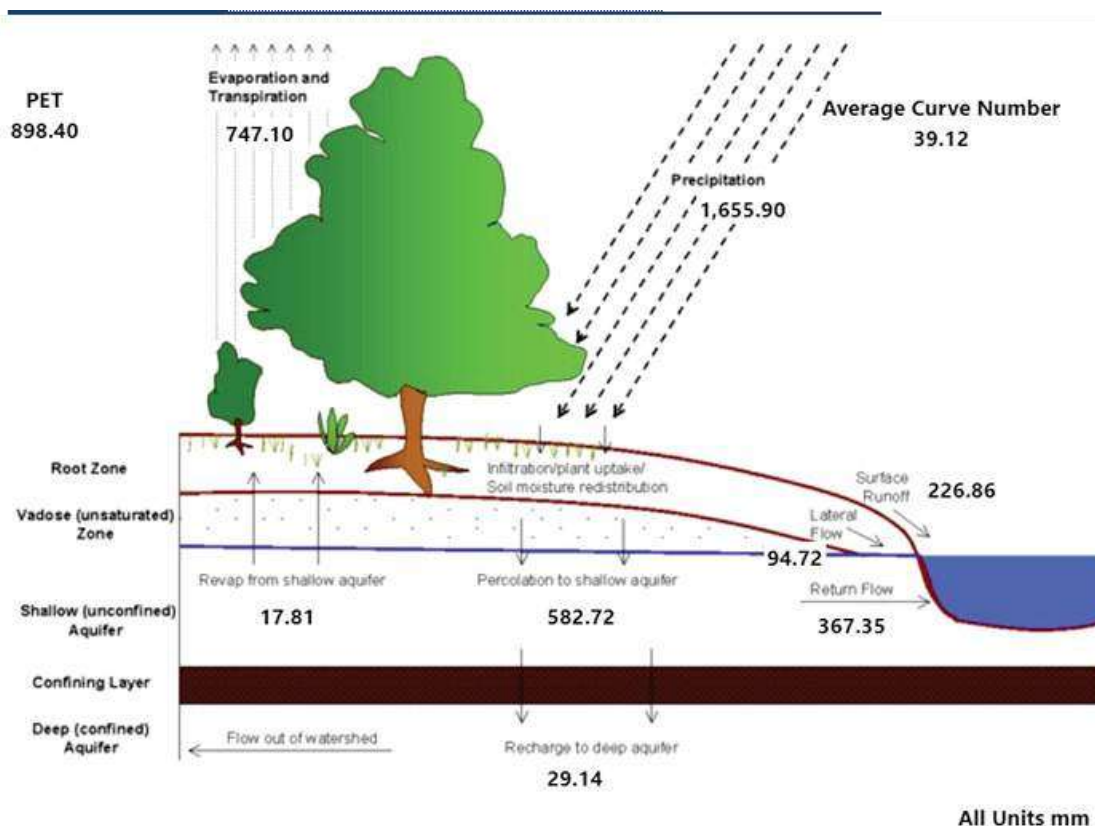
Figura 3 - Multimodelo de Mudanças Climáticas Mearim.



O *Multimodelo de Mudanças Climáticas Mearim* é o resultado da junção e redução possível das incertezas em todo o território hidrológico para que haja uma redução de subestimações ou superestimações, visto que em cenários simulados há uma compilação de incertezas modulares.

Tendo os modelos utilizados em sua melhor performance para a região do Mearim, apresenta-se as informações denominadas histórico-*base line* (1975-2005) que servirão como ambiente referência para análises das projeções (Figura 4).

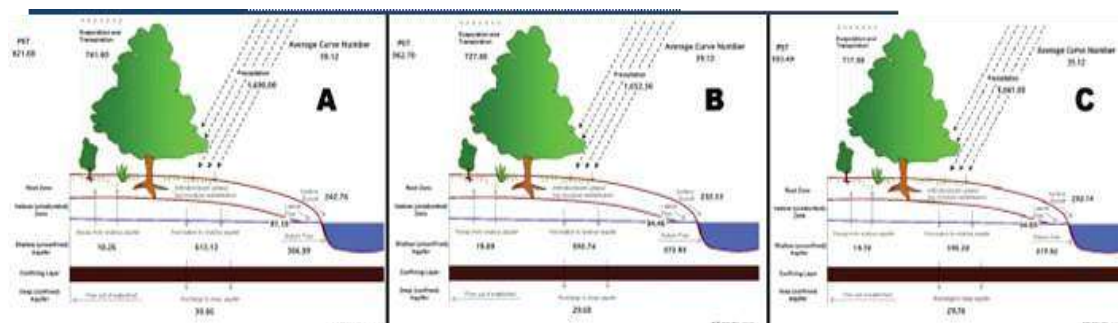
Figura 4 - Cenário *baseline* – histórico (1975-2005) aplicado no modelo SWAT



O primeiro cenário de simulação das mudanças climáticas é denominado *baseline* – histórico. Esse cenário respeita os anos de 1975 a 2005 e será utilizado como referência para os demais cenários. Por tratar-se de um modelo de mudanças climáticas os resultados absolutos podem tender a sobestimação ou superestimação, visto que a existência de incertezas acumuladas em diferentes momentos justifica tal ato.

Desta forma, a Figura 5 apresenta-se com os cenários de tempo presente (2006 a 2035), futuro próximo (2036 – 2065) e futuro distante (2066 a 2095) em A, B e C, respectivamente

Figura 5 - Aplicações dos dados hidrológicos no SWAT do *Multimodelo de Mudanças Climáticas Mearim* para os cenários RCP4.5

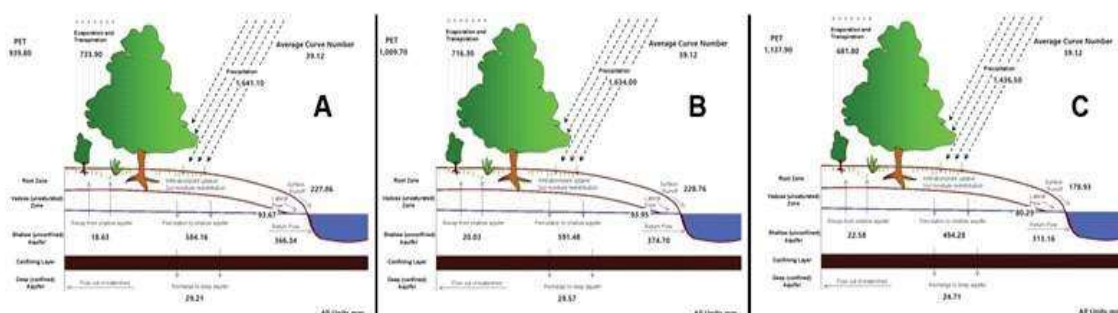


Legenda: A: Cenário *presente* – RCP 4.5 (2006-2035), B: Cenário *futuro próximo* – RCP 4.5 (2036-2065) e C: Cenário *futuro distante* – RCP 4.5 (2066-2095)

Frente as informações, observa-se respeitabilidade com os dados e a literatura sobre as mudanças climáticas, visto que o cenário RCP 4.5 visa a melhoria e o desenvolvimento de políticas públicas energéticas limpas, que mesmo havendo aumento climático em certo ponto, as variações informacionais entregam a gestão a capacidade de planejar-se de modo sistemático.

A Figura 6 por sua vez apresenta os cenários ditos como pessimistas, para as três series de dados climáticos sejam eles o de tempo presente (2006 – 2035), futuro próximo (2036 – 2065) e futuro distante (2066 – 2095) para os modelos RCP 8.5 em A, B e C, respectivamente.

Figura 6 - Aplicações dos dados hidrológicos no SWAT do *Multimodelo de Mudanças Climáticas Mearim* para os cenários RCP8.5

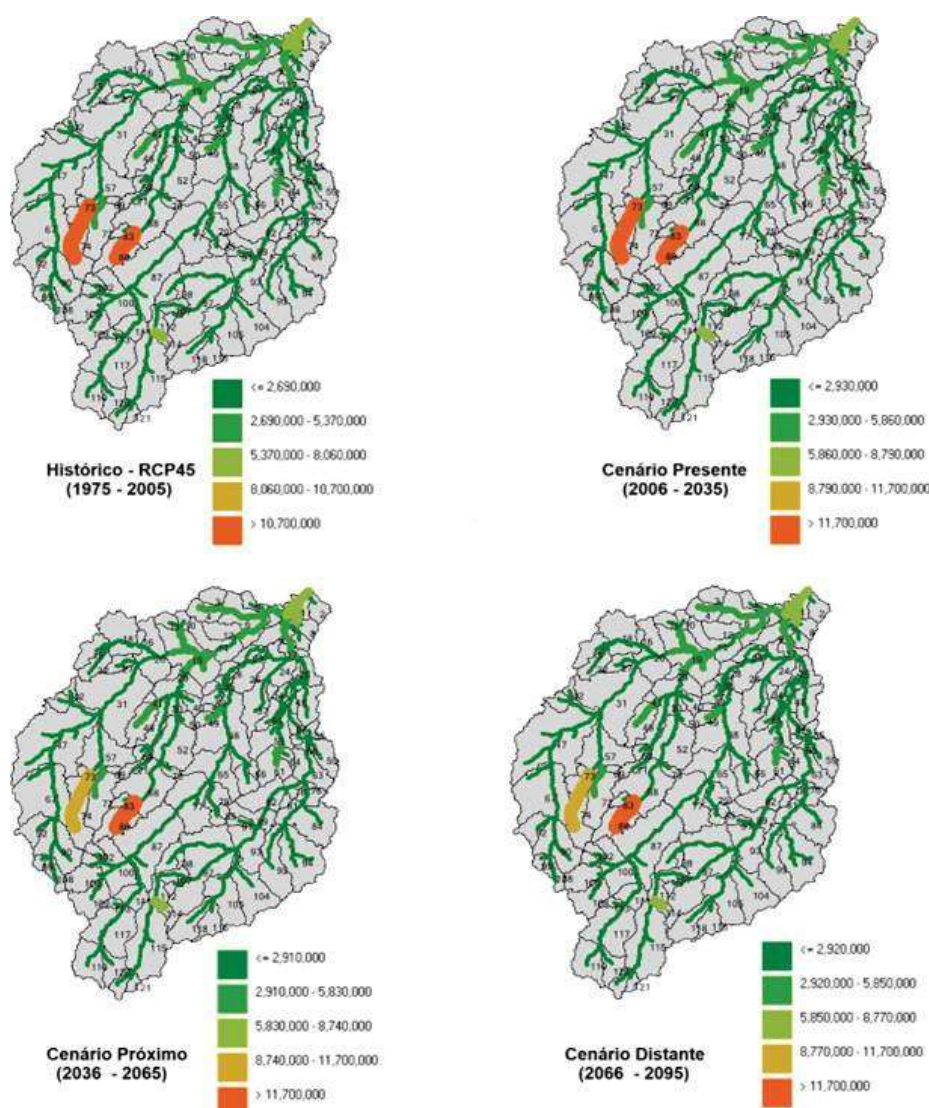


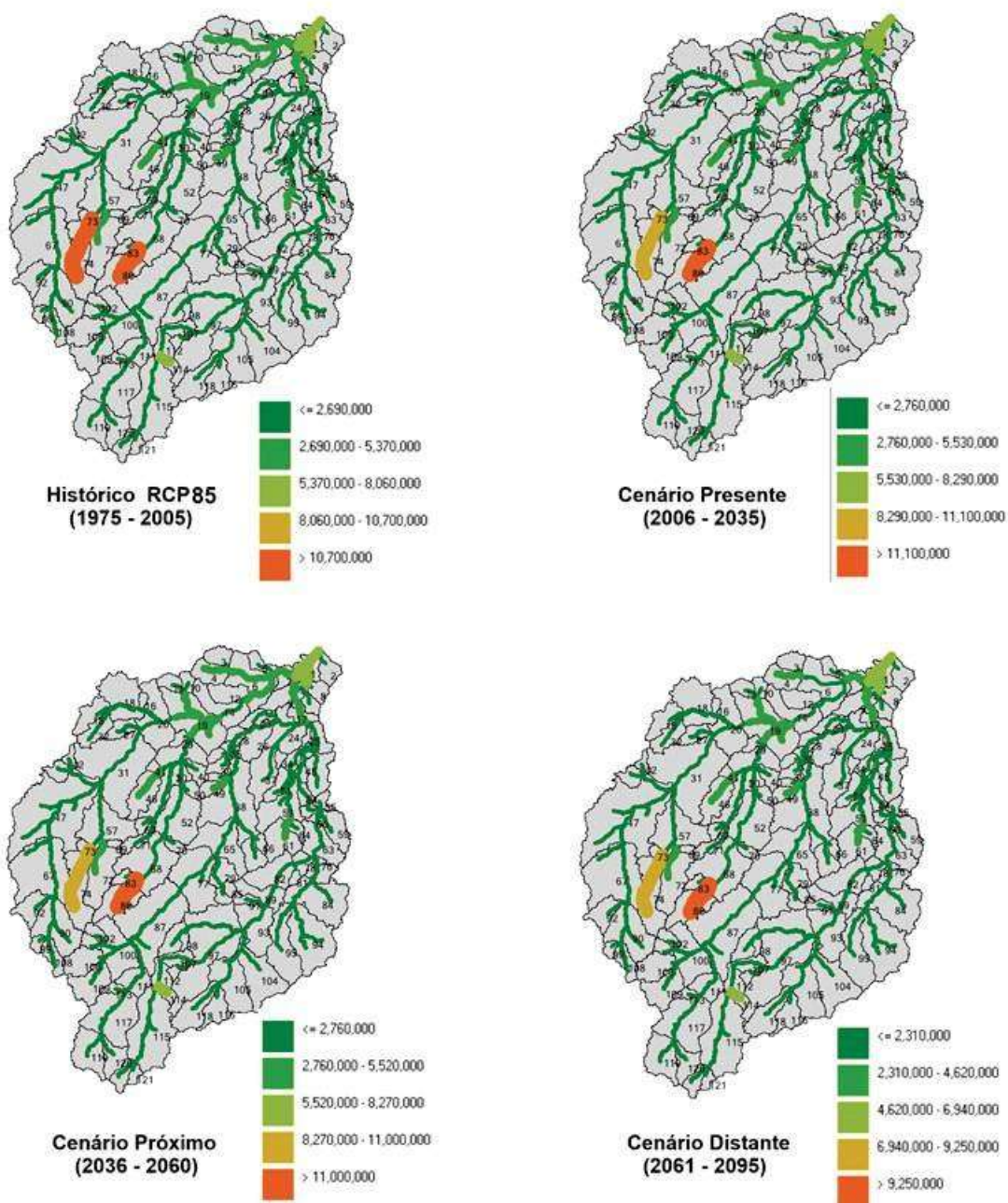
Legenda: A: Cenário *presente* – RCP 8.5 (2006-2035), B: Cenário *futuro próximo* – RCP 8.5 (2036-2065) e C: Cenário *futuro distante* – RCP 8.5 (2065-2095)

Nos cenários RCP 8.5, diferente do RCP 4.5 existe a visual mudança da precipitação e de outras dinâmicas ao longo dos anos e cenários propriamente dito, vale ressaltar que o cenário é o mais pessimista em relação as emissões de gases e mudanças climáticas, no qual os processos e procedimentos com combustíveis fósseis continuarão até o final do século, causando problemas severos em diferentes escalas.

Sobre a distribuição de sedimentos na bacia hidrográfica, tem-se as Figuras 8 e 9 que mostram a evolução espacial do período base (histórico), presente, futuro próximo e futuro distante.

Figura 8 - Cenários sedimentológicos (RCP 4.5) para a bacia hidrográfica do rio Mearim.





Tendo em vista que os resultados das simulações dos sedimentos são relativos, pode-se dividir as Figuras pelas escalas de cores da classificação em “muito baixo” (verde musgo), baixo (verde bandeira), médio (verde claro), alto (amarelo) e muito alto (vermelho) no qual essa denominação ampara somente uma melhor elucidação da imagem e não retrata o espaço absoluto dos sedimentos. Deste modo, em ambas as Figuras (8 e 9), tem duas regiões do médio Mearim possuem características sedimentológicas “alta” e “muito alta”. No geral, as regiões de toda a bacia hidrográfica estão sob classificação “baixo” ou “muito baixo”.

A foz da bacia, ambiente de pesquisa em interesse, está em uma classificação dita como “média” ou mediana, que pode ser interpretada posteriormente a valores absolutos enquanto calibração de sedimentos. Ressalta-se que a foz da bacia mantém sob seus domínios um dos maiores complexos portuários das regiões Norte e Nordeste, contendo o porto do Itaqui e os terminais de Ponta da Madeira, da Vale e ALUMAR.

Sendo assim, as Tabelas 3 e 4 fazem um resumo das Figuras e resultados obtidos em todas as simulações para cada cenário e períodos temporais junto aos seus dados relativos.

Tabela 3 - Resumo de resultados da pesquisa RCP 45*

Parâmetros	Histórico (Base)	Presente RCP 45		Próximo RCP 45		Distante RCP 45	
	Valores	Valores	Diferença %	Valores	Diferença %	Valores	Diferença %
Evapotranspiração	747.1	741.6	-0.74	727.8	-2.58	717.9	-3.91
Precipitação	1655.9	1698	3	1652.3	-0.22	1641.8	-0.85
Escoamento Superficial	226.86	242.76	7	232.53	2.5	232.14	2.33
Fluxo lateral	94.72	97.1	2.51	94.46	-0.27	94.08	-0.68
Subbacia 1 (Cenários)	6642100.905	7218121.92	8.67	6862951.467	3.32	6941083	4.5
Deposições	-22.43	-24.72	10.2	-23.85	6.33	-24.54	9.4

*Por ser simulações e cenários, os valores são relativos.

A Tabela 3 é um quadro resumo dos resultados da simulação sobre o cenário de mudanças climáticas RCP 4.5. Frente ao período histórico ou a referência. Para o cenário “presente”, há um aumento de 3% da precipitação como também um aumento de 7% do escoamento superficial; no entanto, a maior diferença foi notada as deposições na foz, resultando em um aumento de 10% como também um aumento relativo de 8% na quantidade de sedimentos por tonelada.

Os cenários futuros, sejam eles *próximos* ou *distantes* possuem redução de precipitações, redução de evapotranspirações, aumento de deposições (6,33% e 9,4% respectivamente) e de sedimentos escoados (3 e 4,5% respectivamente). A Tabela 4 demonstra os resultados para o cenário mais pessimista de mudanças climáticas.

Tabela 4 - Resumo de resultados da pesquisa RCP 85*

Parâmetro	Histórico (Base)	Presente RCP 85		Próximo RCP 85		Distante RCP 85	
	Valores	Valores	Diferença %	Valores	Diferença %	Valores	Diferença %
Evapotranspiração	747.1	733.9	-1.77	716.3	-4.12	681.8	-8.74
Precipitação	1655.9	1641.1	-0.89	1634	-1.32	1436.5	-13.25
Escoamento Superficial	226.86	227.06	0	228.76	1	178.93	-21.13
Fluxo lateral	94.72	93.67	-1.11	93.95	-0.81	80.29	-15.23
Subbacia 1 (Cenários)	6642101	6656280	0.21	6807778	2.49	5256749	-20.86
Deposições	-22.43	-23.01	2.58	-24.5	9.22	-19.39	-13.56

*Por ser simulações e cenários, os valores são relativos.

A Tabela 4 apresenta valores mais extremos, dada a condição do cenário de mudanças climáticas RCP 8.5. Os valores de base frente aos valores da simulação entre 2006 a 2035 (presente) não se modificaram em significância, no entanto, ainda há um aumento de aproximadamente 3% na deposição de sedimentos.

O cenário “futuro próximo” já demonstra redução de precipitação (relativo a 1,5%), de evapotranspiração (relativo a 4,5%) e aumento na quantidade de sedimentos chegando a foz (2%) e deposições (relativo a 9%). Esses valores ficam mais extremos no cenário “Futuro distante” representado pelos anos de 2065 a 2095, no qual a precipitação tem uma redução com expressividade, relativa a 13,5% como há reduções nos escoamentos superficiais, fluxos laterais e essas junções de reduções acumuladas refletem na quantidade de sedimentos gerados a foz (redução relativa de 20%) como também deposições (redução relativa a 13%).

Os resultados relativos vão de encontro com outros resultados publicados em pesquisas para o Maranhão, no qual Silva et al. (2016) observaram que o estado Maranhão terá um aumento de temperatura, no entanto, a distribuição de precipitação no

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca de informações que consigam retratar um ambiente de interesse é algo a se buscar na pesquisa científica em ato contínuo. É sabido que a região Nordeste, tal como também a Norte mantém uma certa carência de dados quando comparados a outras regiões, no entanto, é necessário apresentar mediante as adversidades da busca de dados no passado-presente novas proposições para que haja assertividade nas decisões como um todo.

Sendo assim, para o cenário “presente”, há um aumento de 3% da precipitação como também um aumento de 7% do escoamento superficial; no entanto, a maior diferença foi notada as deposições na foz, resultando em um aumento de 10% como também um aumento relativo de 8% na quantidade de sedimentos por tonelada.

Os cenários futuros, sejam eles *próximos* ou *distantes* possuem redução de precipitações, redução de evapotranspirações, aumento de deposições (6,33% e 9,4% respectivamente) e de sedimentos escoados (3 e 4,5% respectivamente) ao cenário RCP 4.5. No cenário hipotético RCP 8.5, para o “futuro próximo” observa-se redução de precipitação (relativo a 1,5%), de evapotranspiração (relativo a 4,5%) e aumento na quantidade de sedimentos chegando a foz (2%) e deposições (relativo a 9%).

Esses valores ficam mais extremos no cenário “Futuro distante” representado pelos anos de 2065 a 2095, no qual a precipitação tem uma redução com expressividade, relativa a 13,5% como há reduções nos escoamentos superficiais, fluxos laterais e essas junções de reduções acumuladas refletem na quantidade de sedimentos gerados a foz (redução relativa de 20%) como também deposições (redução relativa a 13%). A partir dos resultados, é possível compreender a realidade não somente do presente da bacia hidrográfica, mas também observar como poderá desenvolver outros aspectos onde a tomada de decisão e as características sociais econômicas e ambientais poderão auxiliar em uma relação de sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ARNOLD, Jeffrey G. et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

CODEVASF. **Área de atuação na bacia hidrográfica do rio Mearim: municípios**. 2019. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/area-de-atuacao/bacia-hidrografica/arquivos/mearim.pdf>. Acesso em 30/04/2023.

FIO CRUZ. **Estudo inédito mapeia mudanças climáticas no Maranhão**. 2016. Disponível em: <https://portal.fiocruz.br/noticia/estudo-inedito-mapeia-mudanca-de-clima-> Acesso em 05/12/2024.

GAO, Yiyang et al. Optimal reliability ensemble averaging approach for robust climate projections over China. **International Journal of Climatology**, v. 44, n. 9, p. 2852-2875, 2024.

GIORGI, Fillippo; MEARNS, Linda O. Probability of regional climate change based on the Reliability Ensemble Averaging (REA) method. **Geophysical research letters**, v. 30, n. 12, 2003.

MARENGO, José A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**, v. 1, p. 385-422, 2011.

MARENGO, José A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 25-32, 2014.

MARENGO, José A.; SOUZA JUNIOR, Carlos. **Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia**. São Paulo: ALANA, 2018.

MARENGO, José Antônio. Água e mudanças climáticas. **Estudos avançados**, v. 22, p. 83-96, 2008.

NOBRE, Carlos A. et al. **Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: Região Metropolitana de São Paulo**. Embaixada Reino Unido, Rede Clima e Programa FAPESP em Mudanças Climáticas, 2010.

SAMPAIO, Gilvan; DA SILVA DIAS, Pedro Leite. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, n. 103, p. 41-54, 2014.

SCHEWE, Jacob et al. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3245-3250, 2014.

SILVA, Fabrício Brito et al. Evidências de mudanças climáticas na região de transição Amazônia-Cerrado no Estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 330-336, 2016.

TOMAS, Walfrido Moraes et al. Desafios na conservação e no manejo de áreas de reserva legal em ecossistemas campestres e savânicos brasileiros frente às mudanças climáticas globais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 59, p. e03491, 2024.

WADA, Yoshihide et al. Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change. **Geophysical research letters**, v. 40, n. 17, p. 4626- 4632, 2013.

WEIGEL, Andreas P. et al. Risks of model weighting in multimodel climate projections. **Journal of Climate**, v. 23, n. 15, p. 4175-4191, 2010.

Capítulo 04

MONITORAMENTO AMBIENTAL EM ECOSSISTEMAS COSTEIROS: UMA ESTRATÉGIA FUNDAMENTAL DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Lorena Karine Santos Sousa, Jordana Adorno Furtado,
Wallacy Borges Teixeira Silva, Hanna Gabriely Pinto Gonçalves,
Ligia Tchaicka

DOI: 10.29327/5850749.1-4

view online: [https://publicacoes.even3.com.br/book/
mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495](https://publicacoes.even3.com.br/book/mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495)

Monitoramento Ambiental em Ecossistemas Costeiros: Uma Estratégia Fundamental diante das Mudanças Climáticas

Lorena Karine Santos Sousa, Jordana Adorno Furtado, Wallacy Borges
Teixeira Silva, Hanna Gabriely Pinto Gonçalves, Ligia Tchaicka

Resumo

Neste capítulo, o leitor é convidado a compreender o papel estratégico do monitoramento ambiental nos ecossistemas costeiros, especialmente em um contexto de intensificação das mudanças climáticas globais. O texto parte da premissa de que conhecer continuamente o ambiente é condição essencial para protegê-lo, manejá-lo de forma sustentável e reduzir riscos associados a transformações ambientais cada vez mais rápidas e complexas. Ao longo do capítulo, são apresentados os principais componentes do monitoramento ambiental costeiro, como parâmetros físicos, químicos e biológicos, e sua importância para acompanhar alterações no nível do mar, na qualidade da água, na dinâmica sedimentar, na biodiversidade e nas condições oceanográficas. O capítulo demonstra que o monitoramento não se resume à coleta de dados, mas constitui um sistema estruturado de geração de informações que subsidiam decisões técnicas e estratégicas. A discussão também evidencia como os ecossistemas costeiros são particularmente sensíveis às mudanças climáticas. Variações na temperatura da água, alterações nos regimes de chuva, eventos extremos mais frequentes e mudanças na circulação oceânica podem impactar diretamente manguezais, estuários e zonas portuárias. Nesse cenário, o acompanhamento sistemático desses ambientes torna-se uma ferramenta indispensável para identificar tendências, antecipar impactos e orientar ações preventivas. O capítulo reforça ainda que o monitoramento ambiental é um instrumento de integração entre ciência, gestão e política pública. Ao produzir dados confiáveis e contínuos, ele fortalece a capacidade institucional de resposta, contribui para a avaliação de riscos e amplia a resiliência de infraestruturas estratégicas como o Porto do Itaquí. Mais do que apresentar métodos e indicadores, este capítulo convida o leitor a reconhecer que a adaptação às mudanças climáticas começa pelo conhecimento. Monitorar é compreender; compreender é planejar; e planejar, nesse contexto, é garantir que desenvolvimento econômico e conservação ambiental caminhem de forma equilibrada e sustentável.

1. INTRODUÇÃO

As zonas costeiras estão entre os ecossistemas mais dinâmicos, produtivos e vulneráveis do planeta. Abrigando uma diversidade biológica singular e sustentando importantes atividades socioeconômicas, como pesca, turismo, aquicultura e transporte marítimo, essas regiões desempenham um papel estratégico na estabilidade ambiental e no bem-estar humano. No entanto, as zonas costeiras vêm sendo cada vez mais pressionadas por fatores antrópicos e, de forma mais abrangente, pelas mudanças climáticas globais (Peres, Neves e Taddei, 2020).

As mudanças climáticas representam uma das maiores ameaças aos ecossistemas costeiros marinhos, afetando diretamente a biodiversidade, a estrutura trófica e os processos ecológicos nesses ambientes altamente produtivos e vulneráveis. A elevação da temperatura da água, a acidificação dos oceanos, o aumento do nível do mar e a maior frequência de eventos extremos, como tempestades e secas, têm alterado profundamente a distribuição, abundância e fisiologia das espécies marinhas (Souza et al., 2021).

As respostas biológicas às mudanças ambientais incluem desde alterações na integridade física dos ecossistemas, como também a sobrevivência e o comportamento de espécies marinhas, alterando cadeias tróficas e comprometendo os serviços ecossistêmicos (Wernberg et al., 2024). Portanto, compreender a magnitude e os mecanismos dessas alterações é crucial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação que promovam a resiliência dos sistemas costeiros frente às mudanças climáticas globais.

Diante desse cenário, o monitoramento ambiental contínuo e sistematizado surge como ferramenta essencial para compreender os processos de degradação, prever impactos futuros e subsidiar políticas públicas e estratégias de adaptação.

Assim, o monitoramento ambiental das zonas costeiras não deve ser visto apenas como uma ferramenta técnica, mas como um componente central das estratégias de enfrentamento às mudanças climáticas. Ele é indispensável para a preservação da biodiversidade, a proteção das populações humanas costeiras e o desenvolvimento de políticas adaptativas que assegurem a resiliência desses ecossistemas frente às transformações globais. Diante da crescente vulnerabilidade das zonas costeiras às mudanças climáticas, este capítulo está estruturado para abordar de forma integrada os principais aspectos ecológicos e indicadores biológicos utilizados no monitoramento desses ambientes, destacando os principais grupos estudados na região e suas relações com as variáveis ambientais.

2. METODOLOGIA

- Área de estudo

O Complexo Portuário de São Luís está localizado na baía de São Marcos (2° 30'0" S 44°37'0"W) a sudoeste da ilha de São Luís. A Baía de São Marcos é um estuário de aproximadamente 100 quilômetros de extensão que recebe as contribuições dos rios Mearim, Pindaré e Grajaú. O padrão de regime de maré é semi-diurna e de macromarés (< 7m), com velocidades de correntes médias que vão de 0.6 a 6.3 nós durante os períodos de maré vazante e enchente, respectivamente (Garcia; Alfredini, 2005).

A região é dominada por manguezais e caracterizada pelo clima quente semi-úmido, com dois períodos estacionais bem distintos, um chuvoso (janeiro a junho) e outro de estiagem (julho a dezembro), com precipitações pluviométricas totais anuais a 2.000 mm (Azevedo; Cutrim, 2007).

Vale ressaltar que a Baía de São Marcos, no Maranhão, destaca-se como um polo de intensa atividade portuária, abrigando o segundo maior complexo portuário da América Latina que desempenha um papel estratégico nos âmbitos internacional, nacional e local, viabilizando o embarque e desembarque de produtos essenciais para a economia global (Carvalho-Neta; Abreu Silva, 2013).

- FITOPLÂNCTON EM TRANSFORMAÇÃO: RESPOSTAS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS (DEFINIÇÕES, IMPORTÂNCIA E CARACTERÍSTICAS)

O fitoplâncton (do grego *phyton* ou planta e *planktos* errante), é um conjunto de organismos microscópicos fotossintetizantes que habitam a zona fótica das massas de água, tanto em ambientes marinhos quanto dulcícolas. Esses organismos flutuam passivamente na coluna d'água, sendo transportados por correntes e movimentos hidrodinâmicos. Embora microscópicos, o fitoplâncton constitui a base das cadeias alimentares aquáticas e desempenha papel fundamental nos ciclos biogeoquímicos globais.

O fitoplâncton, por meio da fotossíntese, é responsável por grande parte da produção de oxigênio dissolvido, fundamental para a respiração dos organismos aquáticos. Estima-se que esse grupo contribua com cerca de 50% da produção primária líquida global, desempenhando papel essencial na fixação de carbono atmosférico. Nos oceanos, o fitoplâncton realiza mais de 90% da produção, enquanto o restante é atribuído às macroalgas, plantas marinhas e organismos quimiossintetizantes.

Além disso, participa ativamente da bomba biológica de carbono, um mecanismo que remove CO₂ da atmosfera e o transfere para as profundezas oceânicas, auxiliando na regulação do clima global. A comunidade fitoplanctônica apresenta grande diversidade morfológica, fisiológica e genética. Suas principais características incluem:

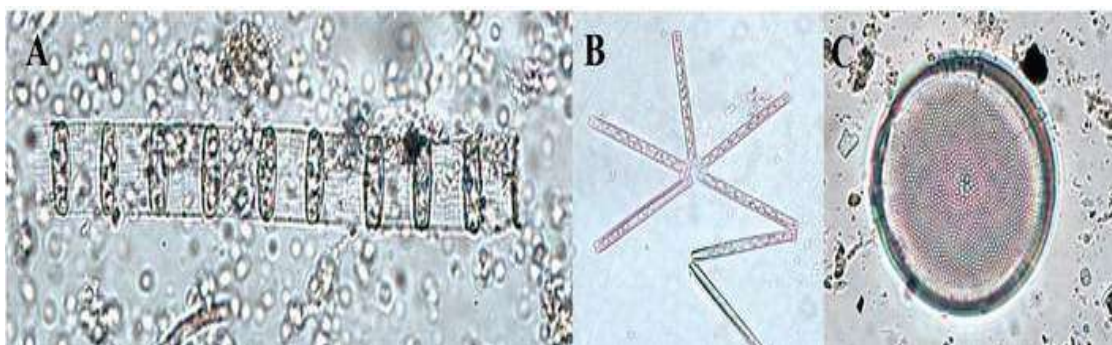
Figura 1 - Esquema com as principais características do fitoplâncton.



O fitoplâncton é composto por diversos grupos taxonômicos, com características distintas. Dentre eles, destacam-se os grupos mais comuns:

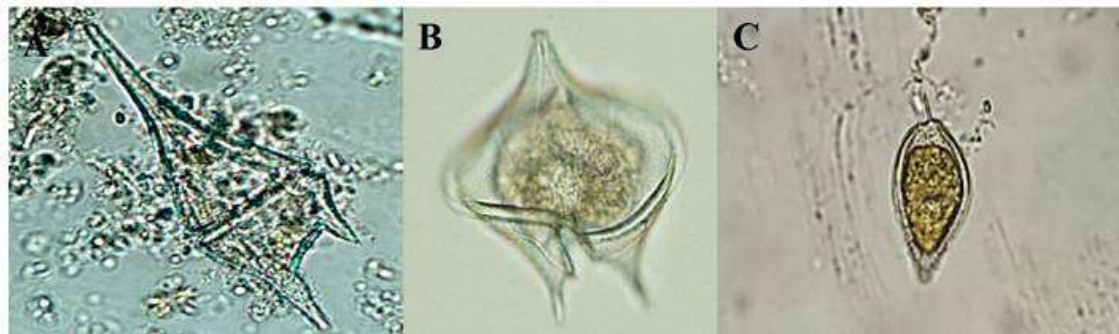
Diatomáceas (Filo Heterokontophyta): Diatomáceas são microalgas com parede celular de sílica (frústula), altamente diversas e amplamente estudadas, predominando nas comunidades fitoplanctônicas de regiões temperadas e de altas latitudes (Figura 2).

Figura 2 - Diferentes espécies de diatomáceas: A) *Skeletonema costatum*; B) *Thalassionema frauenfeldii*; e C) *Coscinodiscus centralis*.



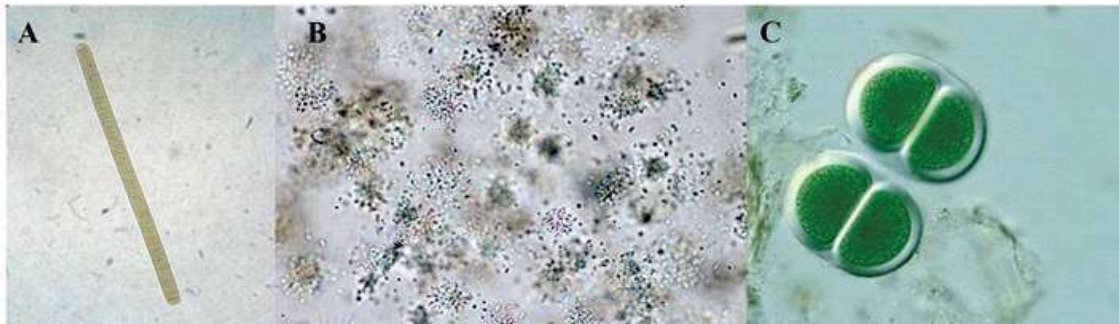
Dinoflagelados (Filo Dinoflagellata): Podem ser autotróficos, mixotróficos ou heterotróficos. Alguns dinoflagelados são bioluminescentes, emitindo luz azul-neon quando estimulados. Certas espécies produzem toxinas potentes, associadas a marés vermelhas, que podem causar a morte de peixes e mariscos (Figura 3).

Figura 3 - Diferentes espécies de dinoflagelados: A) *Triplos lineatum*; B) *Prorocentrum depressum*; e C) *Prorocentrum micans*.



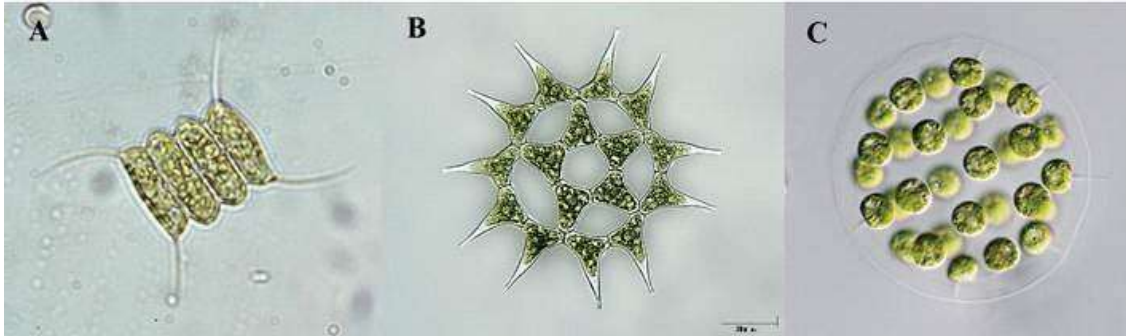
Cianobactérias (Filo Cyanobacteria): As cianobactérias, ou algas azuis, surgiram há mais de 3 bilhões de anos. São procariontes com capacidade fotossintética semelhante à das algas e estão presentes em quase todos os ecossistemas (Figura 4).

Figura 4 - Diferentes espécies de cianobactérias: A) *Oscillatoria limosa*; e B) *Aphanocapsa* sp.; e C) *Chroococcus turgidus* (Fonte: <http://protist.i.hosei.ac.jp/PDB6/PCD0325/htmls/37.html>).



Clorofíceas (Filo Chlorophyta): As algas verdes estão presentes nos ambientes mais diversos. A grande maioria das espécies, aproximadamente 90%, é de água doce. A maioria das formas marinhas ocorre em águas tropicais e subtropicais, integrando principalmente a comunidade bentônica (Figura 5).

Figura 5 - Diferentes espécies de clorófitas: A) *Scenedesmus quadricauda* (Fonte: <https://www.biodiversity4all.org/taxa/1267042-Scenedesmus-quadricauda>); B) *Monactinus simplex* (Fonte: <https://www.biodiversity4all.org/taxa/785819-Monactinus-simplex>); e C) *Eudorina elegans* (Fonte: <https://www.inaturalist.org/photos/451430063>).



Euglenófitas (Filo Euglenophyta): As euglenófitas são microalgas unicelulares, flageladas e fotossintetizantes, que vivem principalmente em ambientes de água doce, embora algumas espécies também ocorram em ambientes marinhos ou salobros (Figura 6).

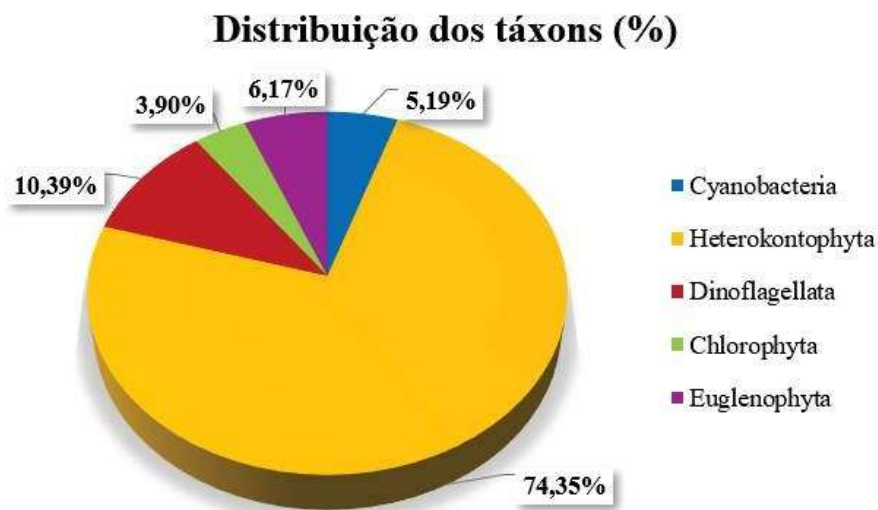
Figura 6 - Diferentes espécies de euglenófitas: A) *Euglena proxima* (Fonte: http://protist.i.hosei.ac.jp/pdb/images/mastigophora/euglena/proxima/sp_02.html); B) *Trachelomonas armata* (Fonte: <https://www.biodiversity4all.org/taxa/203734-Trachelomonas-armata>); e C) *Phacus tortus* (Fonte: <https://www.biodiversity4all.org/>).



- DIVERSIDADE FITOPLANCTÔNICA E FATORES QUE INFLUENCIAM

Na região do Golfão Maranhense, a comunidade fitoplanctônica esteve representada por aproximadamente 308 táxons, conforme levantamento de estudos realizados nos últimos 20 anos (Figura 7). Desses, foram identificadas 239 espécies e 69 morfoespécies, distribuídas entre os filós Heterokontophyta (74,35%), Dinoflagellata (10,39%), Euglenophyta (6,17%), Cyanobacteria (5,19%) e Chlorophyta (3,90%).

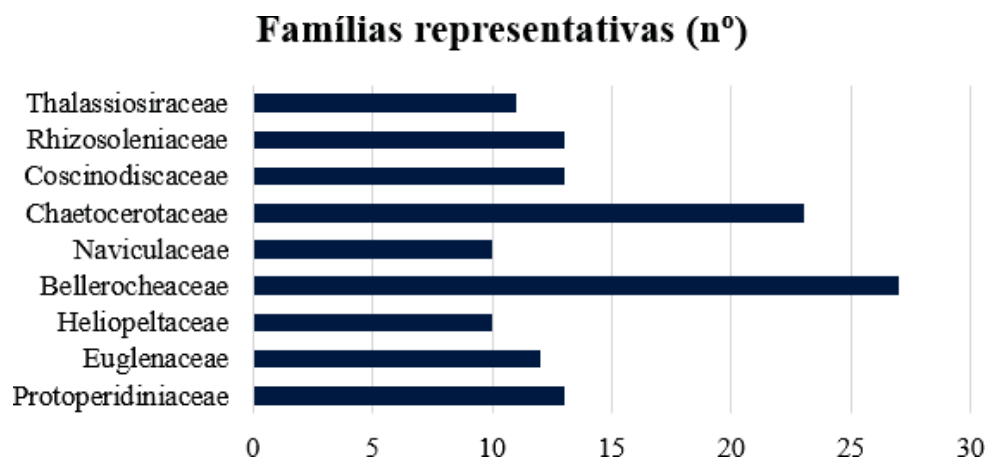
Figura 7 - Distribuição percentual dos táxons identificados no Golfão Maranhense, Brasil.



As diatomáceas (divisão Heterokontophyta) representam o grupo mais expressivo e com maior diversidade de espécies, totalizando 229 táxons da riqueza florística local, distribuídos em 47 famílias. Entre as famílias com maior número de espécies, destacam-se Belleracheaceae, Chaetocerotaceae, Coscinodiscaceae e Rhizosoleniaceae. Em seguida, a divisão Dinoflagellata apresentou 32 táxons distribuídos em 9 famílias, sendo as mais representativas Protoperidiniaceae e Ceratiaceae.

A divisão Cyanobacteria registrou 16 táxons distribuídos em 9 famílias, Chlorophyta apresentou 12 táxons em 7 famílias. Já Euglenophyta (19 táxons), foi representada por apenas 2 famílias.

Figura 8 - Riqueza das famílias mais representativas no Golfão Maranhense, Brasil.



As mudanças climáticas e as variações na disponibilidade de nutrientes são os principais fatores responsáveis pelas alterações nos ecossistemas aquáticos. Estudos têm demonstrado que o aumento das temperaturas influencia significativamente a composição das comunidades, favorecendo a predominância de táxons fitoplanctônicos com temperaturas ótimas de crescimento mais elevadas. Essas mudanças provocam impactos expressivos na diversidade e na estrutura das comunidades aquáticas.

No litoral maranhense, especialmente na região da Baía de São Marcos, predominam elevadas temperaturas ao longo de todo o ano, reflexo do clima tropical característico da área. Além disso, essa região recebe um aporte significativo de nutrientes, resultado tanto das condições naturais, como a grande descarga fluvial e a influência dos ecossistemas de manguezal, quanto das intensas atividades antrópicas ali desenvolvidas. Tais atividades contribuem para o enriquecimento nutricional das águas.

- EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA

O aquecimento global tem provocado impactos significativos sobre o fitoplâncton, alterando a teia alimentar aquática e os ciclos biogeoquímicos. O aumento das temperaturas impacta não apenas os processos biológicos, mas também diminui a densidade da água, interferindo na estratificação e na circulação oceânica. Isso, por sua vez, compromete a dispersão dos organismos e o transporte de nutrientes. Em geral, temperaturas mais elevadas favorecem espécies oportunistas e tolerantes ao calor, como algumas cianobactérias, ao mesmo tempo em que reduzem a abundância de espécies adaptadas a ambientes frios, especialmente em latitudes elevadas.

Outro impacto importante é a intensificação da estratificação térmica da coluna d'água, que dificulta a mistura vertical e, conseqüentemente, a reposição de nutrientes das camadas profundas para a zona fótica. Isso pode levar à diminuição da produtividade primária, especialmente em regiões oceânicas oligotróficas, onde a limitação por nutrientes já é comum. Nesse contexto, observa-se uma vantagem competitiva para organismos pequenos e com alta eficiência no uso de nutrientes, como as picocianobactérias.

Outro reflexo preocupante é o aumento na frequência e intensidade de florações algais nocivas, fenômeno impulsionado pela combinação entre temperaturas mais altas e a disponibilidade excessiva de nutrientes em ambientes costeiros.

Esses eventos, geralmente associados a dinoflagelados e cianobactérias, representam uma ameaça à biodiversidade aquática e à saúde humana, devido à produção de toxinas e à mortalidade de organismos marinhos.

Em resumo, o aquecimento global influencia o fitoplâncton ao alterar a temperatura, a disponibilidade de nutrientes, a estrutura da coluna d'água e a composição química dos oceanos. Essas mudanças afetam diretamente a produtividade primária, a composição das comunidades e a capacidade dos ecossistemas aquáticos de sequestrar carbono, com implicações ecológicas e climáticas de grande escala. Diante desse cenário, fica evidente que o fitoplâncton, apesar de composto por organismos microscópicos, desempenha um papel essencial nos equilíbrios ecológicos e climáticos do planeta. A sensibilidade dessas comunidades às variações ambientais torna o fitoplâncton um indicador-chave das mudanças globais em curso, além de reforçar a urgência de monitoramentos contínuos e políticas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Compreender como essas mudanças afetam os organismos fotossintetizantes aquáticos é essencial não apenas para prever alterações nos ecossistemas aquáticos, mas também para avaliar impactos em processos fundamentais como o sequestro de carbono e a manutenção da biodiversidade marinha e continental.

- **MACROFAUNA BÊNICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: PADRÕES DE DIVERSIDADE E RESPOSTAS ECOLÓGICAS (CONHECENDO A MACROFAUNA BÊNICA E SEU PAPEL NOS ECOSISTEMAS)**

A macrofauna bênica é composta por organismos invertebrados que vivem no fundo de ambientes aquáticos, como oceanos, rios, lagos e estuários, e que são visíveis a olho nu (geralmente com mais de 0,5 mm de tamanho) (Campos, 2021). Exemplos comuns incluem poliquetas, moluscos, crustáceos e equinodermos. Essa fauna desempenha um papel fundamental nos ecossistemas aquáticos, atuando na decomposição da matéria orgânica, na ciclagem de nutrientes e na oxigenação dos sedimentos, além de servir de alimento para diversos peixes e aves aquáticas (Bolam, 2014).

A macrofauna bêntica também é amplamente utilizada como indicadora da qualidade ambiental, pois responde rapidamente a alterações nos ecossistemas, como poluição, mudanças na salinidade e intervenções humanas.

No entanto, as mudanças climáticas têm afetado significativamente essa fauna. A elevação da temperatura da água, a acidificação dos oceanos, a diminuição do oxigênio dissolvido e a alteração dos padrões de correnteza e sedimentação impactam diretamente a distribuição, a diversidade e a abundância desses organismos. Essas alterações podem causar desequilíbrios ecológicos, afetando toda a cadeia alimentar e os serviços ecossistêmicos associados aos ambientes aquáticos.

Portanto, os estudos sobre macroinvertebrados bênticos desempenham um papel fundamental na compreensão e na conservação dos ecossistemas aquáticos, contribuindo para a gestão sustentável dos recursos naturais e a proteção da biodiversidade.

- COMPOSIÇÃO FAUNÍSTICA E VARIÁVEIS AMBIENTAIS ASSOCIADAS

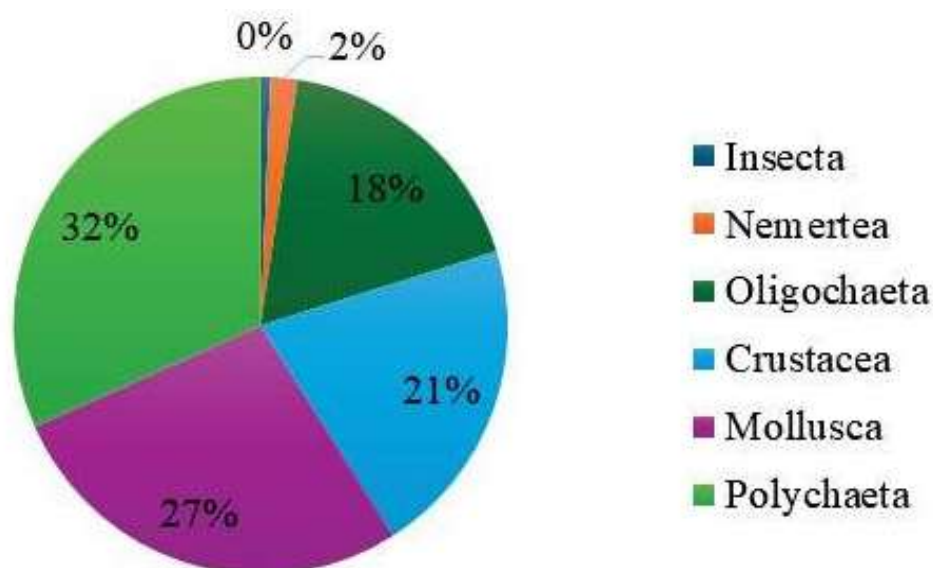
No Brasil, os estudos sobre a macrofauna bêntica estão mais concentrados nas regiões sul e sudeste (Soares et al, 2022). No litoral maranhense, os trabalhos realizados sobre a fauna são relativamente recentes (Cutrim, 2018; Sousa, 2018, 2023; Ferreira, 2020), onde ainda há muitas espécies não descritas para região. Além do mais, as pesquisas realizadas na região são introdutórias, sendo necessários investir em estudos mais avançados, como é o caso de estudos de variabilidade genética (Soares et al, 2022). Portanto, estudos com levantamentos faunísticos são imprescindíveis para o conhecimento e conservação da biodiversidade local.

Em um levantamento realizado no período entre junho de 2023 a março de 2024 na região do entorno do Complexo Portuário de São Luís, Baía de São Marcos, Maranhão, as condições ambientais registradas na área apresentaram relativa estabilidade. A temperatura média da água foi de 29,29 °C ($\pm 0,7$), a salinidade média de 19,42 ppt ($\pm 4,65$), o oxigênio dissolvido teve média de 4,89 mg/L ($\pm 1,1$) e o pH médio foi de 7,42 ($\pm 0,6$). Esses parâmetros físicos e químicos caracterizam um ambiente estuarino típico, com variações influenciadas principalmente pelo regime de marés e sazonalidade pluviométrica.

A análise dos sedimentos indicou o predomínio de frações finas, como silte e argila, típicas de ambientes estuarinos de baixa energia, condições que favorecem a retenção de nutrientes e podem estar associadas à maior abundância de organismos detritívoros.

Com relação a composição faunística, foram encontrados 462 indivíduos, distribuídos em 5 grupos taxonômicos, Crustacea, Mollusca, Nemertea, Oligochaeta e Polychaeta. Polychaeta (32%) e Mollusca (27%) foram os grupos predominantes (Figura 9). Esta taxocenose é comumente encontrada em trabalhos ecológicos com macrofauna bêntica de fundos inconsolidados de regiões tropicais e temperadas (Oliveira; Mochel, 1999; Martins; Almeida, 2014).

Figura 9 - Distribuição percentual dos táxons encontrados no período estudado na Baía de São Marcos, Maranhão.

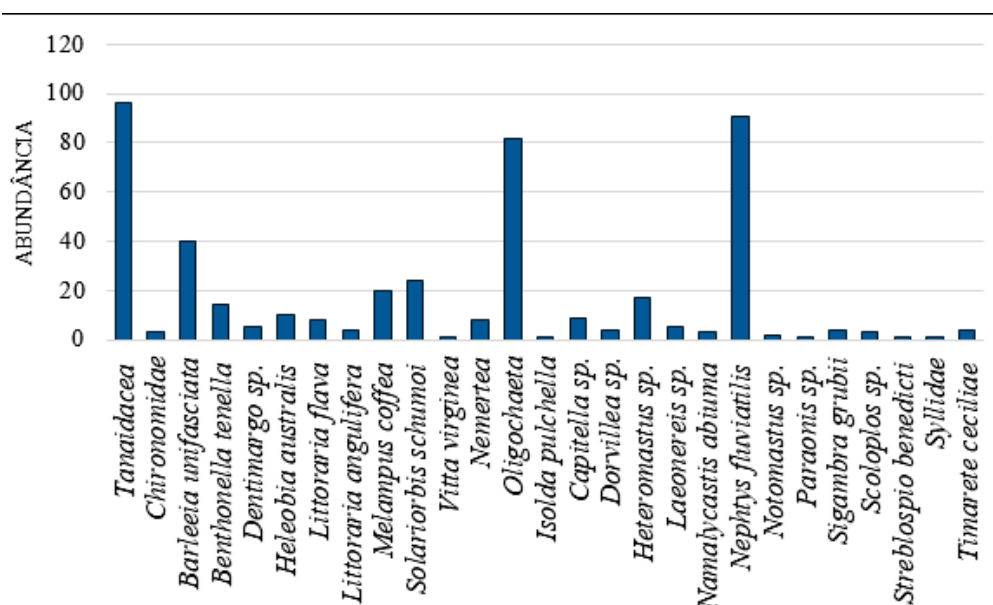


Tanaidacea, Oligochaeta, *Nephtys fluviatilis* e *Barleeia unifasciata* foram os táxons mais abundantes durante o estudo (Figura 10). O poliqueta *N. fluviatilis* é um anelídeo com hábito alimentar carnívora e característico de regiões estuarinas (Sene-Silva; Oliveira; Michels-Souza, 2011).

Tanaidacea são pequenos crustáceos que pode ocorrer em altas densidade em ambientes de fundo não consolidado, desde regiões entremarés até o sublitoral raso (Leite, Requel e Silva, 2011). Contudo, pesquisas que detalham seu nicho ecológico de forma aprofundada são escassas, dificultando a compreensão dos fatores abióticos relacionados a sua incidência em determinados habitats.

Oligochaeta têm sido frequentemente utilizados como indicadores de condições ambientais, uma vez que tais organismos são resistentes a poluentes, especialmente a poluição orgânica (Girolli et al., 2021).

Figura 10 - Abundâncias das espécies encontradas no período estudado na Baía de São Marcos, Maranhão.



Os índices ecológicos calculados para a área amostrada indicam uma comunidade biologicamente bem estruturada. O índice de Shannon ($H' = 2,464$) reflete uma diversidade moderada a alta, enquanto o valor de Margalef (4,239) aponta para uma elevada riqueza de espécies. A equitabilidade de Pielou ($J' = 0,7477$) sugere uma distribuição relativamente uniforme dos indivíduos entre as espécies, com baixa dominância. Esses resultados, em conjunto, indicam que o ambiente apresenta condições favoráveis à manutenção da diversidade biológica.

Apesar da boa estrutura da comunidade observada na região do entorno do Complexo Portuário de São Luís, com índices ecológicos indicando diversidade moderada a alta e distribuição equilibrada entre os táxons, é importante considerar que essa composição pode sofrer alterações significativas diante do avanço das mudanças climáticas. A elevação da temperatura da água, o aumento da frequência de eventos extremos, a redução do oxigênio dissolvido e a acidificação oceânica podem modificar a composição e abundância da macrofauna bêntica, afetando especialmente grupos sensíveis, como certos poliquetas e moluscos. Dessa forma, a análise integrada da estrutura da comunidade e dos efeitos das mudanças climáticas torna-se essencial para a conservação da biodiversidade e a gestão sustentável dos ambientes costeiros maranhenses.

- MACROINVERTEBRADOS INCRUSTANTES: ESTRATÉGIAS PARA EVITAR A BIOINVASÃO

CARACTERIZANDO OS ORGANISMOS INCRUSTANTES

As comunidades de organismos incrustantes ou “*biofouling*” é o resultado do processo de colonização ou do crescimento de bactérias, algas e/ou invertebrados sésseis sobre superfícies consolidadas submersas, sejam elas naturais ou artificiais (Wahl, 1989; Gama *et al.*, 2009; Ochi Agostini *et al.*, 2017), formando verdadeiros ecossistemas de organismos agregados em elevada densidade (Baker *et al.*, 2004; Railkin, 2004). Estas associações de organismos incrustantes juntamente com algumas espécies vegetais e macroalgas, exercem a função de espécies engenheiras e exibem grande complexidade estrutural, disponibilizando diversos microhabitats que favorecem o recrutamento de uma fauna vágil acompanhante, igualmente rica e diversificada (Castilla; Cerda, 2004, Krohling *et al.*, 2006; Gama *et al.*, 2009).

O potencial de colonização e o desenvolvimento de comunidades incrustantes variam com o tempo e em função das flutuações dos gradientes ambientais (Dang; Lovell, 2016). Dessa forma, a diversidade das assembleias incrustantes, tanto de substratos naturais como artificiais, bem como a sua biomassa, varia de acordo com as condições ambientais de cada local, que influem diretamente na composição e diversidade das comunidades incrustantes (Song *et al.*, 2022).

Organismos incrustantes, especialmente invertebrados e algas, são altamente seletivos em suas preferências por certas superfícies, o sinal exercido pela superfície pode iniciar um comportamento característico que promove ou inibe a fixação. O assentamento de larvas de invertebrados sésseis, algas e bactérias que se aderem em superfícies em ambientes aquáticos, são determinados por interações interfaciais dentro dos mais diversificados mecanismos. Há esforços contínuos para investigar métodos para manter as estruturas artificiais limpas durante sua implantação estendida em ambientes marinhos (Dineshram *et al.*, 2009).

PROBLEMÁTICA ADVINDAS DAS INCRUSTAÇÕES

O *biofouling* marinho é um problema global, com penalidades econômicas e ambientais significativas. Do ponto de vista econômico, os bioincrustantes como cracas, mexilhões e algas em cascos subaquáticos de embarcações resultam em danificação de suas estruturas, entupimento de entradas e vasos, o que eleva os custos, devido ao

aumento de peso ou da atividade de escavação dos organismos que provocam corrosão e consequentemente aumentam o consumo de combustível (Baker *et al.*, 2004; Michels, 2020).

O transporte marítimo se destaca por ser um dos vetores mais importantes no processo de invasão biológica mediada, pois atua como veículo de transferência de muitas espécies marinhas invasoras (Farrapeira *et al.*, 2007; Carlton; Ruiz, 2016; Kaluza *et al.*, 2010; Clarke Murray *et al.*, 2014; Gollasch; David, 2019). O grupo dos invertebrados bentônicos (especialmente o *fouling*) se caracteriza por ser um dos mais importantes no que se refere à problemática das bioinvasões, pois inclui espécies (ou propágulos destas) que são amplamente transportadas através dos mares, oceanos e águas continentais (Silva; Barros, 2011; Davidson *et al.*, 2023).

Atualmente a bioinvasão é considerada a segunda maior causa de perda de diversidade biológica do mundo e uma das cinco principais ameaças à biodiversidade marinhas, podendo originar mudanças na estrutura e função dos ecossistemas, aumentando a homogeneização da biota, além de ameaças a economia e saúde humana (Carlton, 2001; Rilov; Galil, 2009).

Devido à intensa movimentação de cargas, os portos estão sujeitos à introdução de espécies exóticas como consequência de constantes atracações de navios vindos de várias regiões do mundo (Farrapeira *et al.*, 2007). De fato, a principal via identificada de rompimento de barreiras naturais para a introdução de organismos marinhos não indígenas tem sido o tráfego de navios para portos ao redor do mundo pela bioincrustação em seus cascos, mas o transporte de organismos em a água de lastro também foi reconhecida como o principal vetor para a transferência inadvertida de muitos organismos bênticos de água não indígenas e nocivos em todo o mundo (Carlton; Geller, 1993; Gollasch, 2010).

A região portuária do Maranhão representa uma área de risco para invasões biológicas, uma vez que recebe navios da China, Egito, Tailândia, Índia, Marrocos, Polônia, Coreia do Sul, Suécia, Emirados Árabes, Espanha, Itália, Holanda, Vietnã, França, Alemanha, EUA entre outros (Porto do Itaqui, 2011).

Casos de bioinvasão, tanto no Brasil quanto no exterior, vêm ocasionando sérios impactos ambientais e econômicos. Espécies como o mexilhão-dourado (*Xenostrobus securis* (Lamarck, 1819)), o mexilhão-zebra (*Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771)) e a estrela-do-mar do Pacífico Norte (*Asterias amurensis* Lutken, 1871), entre outras, têm

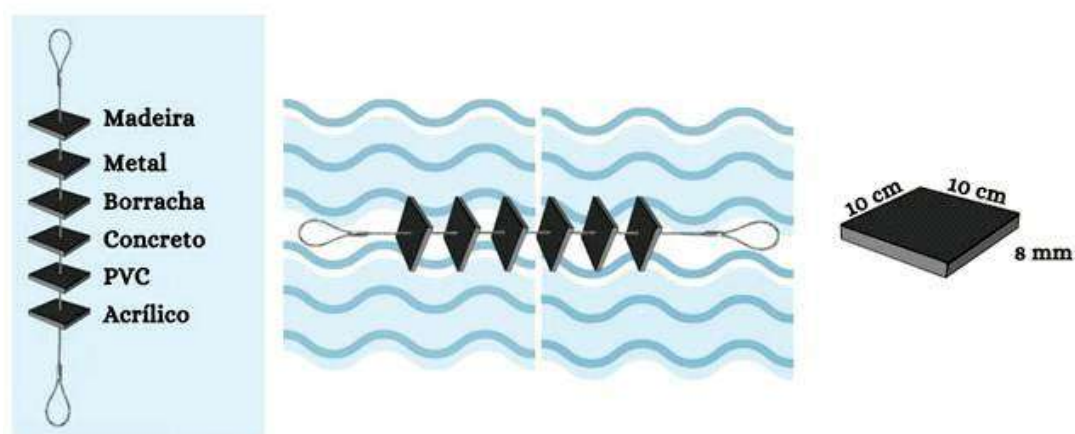
provocado prejuízos significativos à atividade pesqueira e à indústria, como o entupimento de sistemas de refrigeração e o aumento da demanda por manutenção em turbinas de usinas hidrelétricas (Da Rocha Neto; Santos, 2021).

Diante desse cenário, destaca-se a adoção de medidas preventivas em áreas estratégicas, como os portos. Um exemplo é o Porto do Itaqui, que há mais de seis anos realiza o monitoramento de espécies exóticas invasoras por meio de investigação de organismos incrustantes. A seguir, são apresentados alguns dos resultados obtidos nesses monitoramentos.

COMPOSIÇÃO FAUNÍSTICA DA REGIÃO PORTUÁRIA DE SÃO LUÍS

Foram instalados na Área Portuária de São Luís dois painéis de incrustação que serviram de corpos-de-assentamento e recrutamento da biota, sendo cada painel composto por 6 (seis) lâminas (10 cm de comprimento, 10 cm de largura e 8 mm de espessura) representando materiais que compõem as estruturas portuárias e o meio próximo (madeira, metal, borracha, concreto, pvc e acrílico). Essas lâminas ficaram intercaladas horizontalmente na coluna d'água, transpassadas por cabos de aço e fixadas com estacas em cada extremidade do sistema (Figura 11).

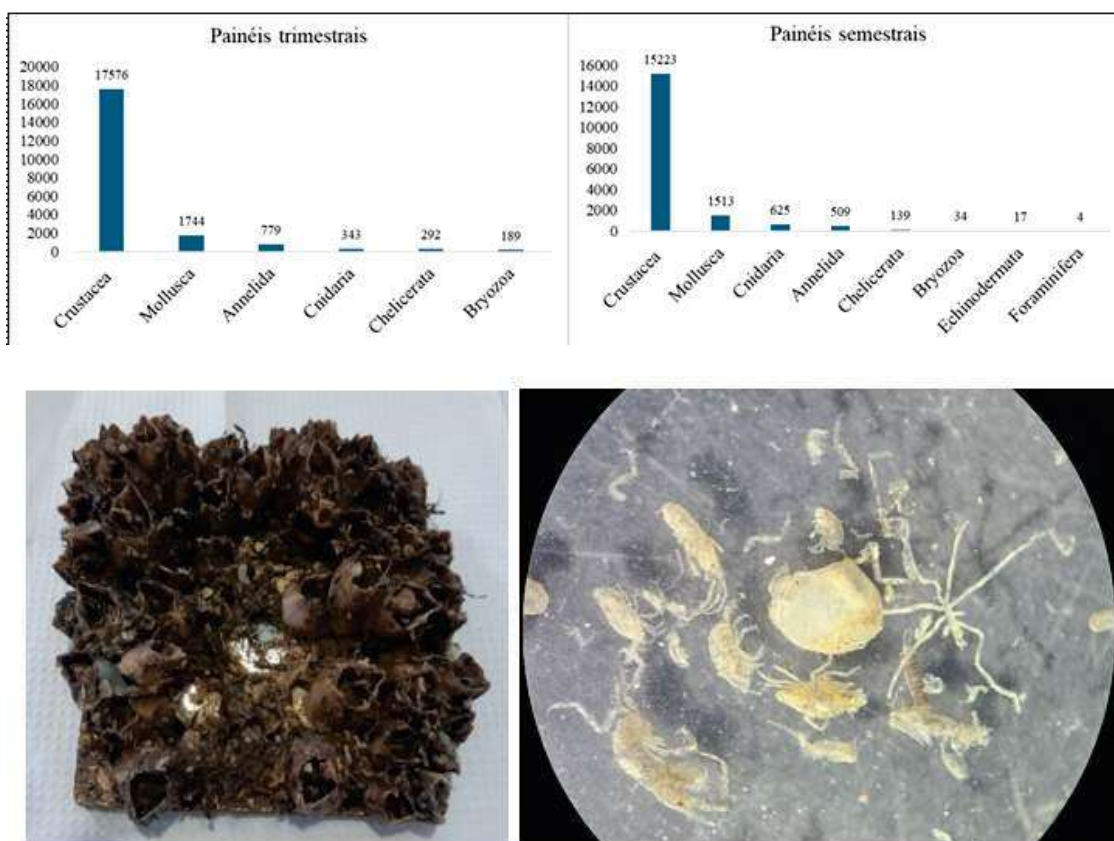
Figura 11 – Metodologia de painéis artificiais utilizada para recrutamento de organismos incrustantes



Os resultados obtidos são referentes a quatro campanhas de amostragem realizadas nos meses de setembro e dezembro de 2023, e março e junho de 2024, sendo quatro coletas trimestrais (experimento 1) e duas semestrais (experimento 2). Foi analisado um total de 108 placas, que equivale a uma área de 21.600 cm² de superfície amostrada. Nas coletas trimestrais foi registrado um total de 20.923 indivíduos (53,66% da amostragem), distribuídos em 6 filos/subfilo, 8 classes, 29 famílias, 32 gêneros e 25

espécies. Já nas coletas semestrais foram inventariados 18.064 indivíduos (46,33% da amostragem) distribuídos em 8 filos/subfilo, 10 classes, 39 famílias, 42 gêneros e 32 espécies (Figura 12).

Figura 12 – Representatividade de táxons em amostragens trimestrais e semestrais.



Os substratos de madeira, concreto e PVC foram os que tiveram maior sucesso de recrutamento da biota incrustante, concentrando as maiores abundâncias de organismos. As características físicas das superfícies de assentamento podem ter influenciado a capacidade de fixação das espécies, principalmente no que se refere à rugosidade dos substratos e consequentemente à energia de superfície. Em contrapartida, superfícies mais lisas, como a de acrílico, foram menos eficientes e acumularam menores cargas incrustantes.

O tempo de exposição dos substratos parece ter sido fator determinante para o sucesso de colonização de organismos incrustantes e da fauna vágil associada. Os substratos submetidos ao período de 6 meses de exposição no ambiente apresentaram

maior representatividade de táxons, possivelmente mais próximo a estruturação de uma comunidade clímax estabelecida. O período de um semestre parece ser suficiente para estudar as espécies do fouling deste estuário, além de apresentar maior potencial de recrutamento de espécies tardias. Acredita-se que o número de substratos, a avaliação de períodos estacionais (sazonalidade), bem como as características ambientais de cada ponto são fatores determinantes para uma amostragem bem-sucedida.

As espécies pertencentes aos grupos chelicerata, amphipoda e annelida tiveram pouco ou nenhum (em alguns casos) sucesso de recrutamento em substratos do ponto localizado no alto curso do estuário (P01), onde predominam características ambientais que intermeiam entre fluvial e estuarina. As poucas espécies com ocorrência nestes pontos foram pouco abundantes. Ao que parece, estes táxons estão perfeitamente limitados espacialmente em função de um gradiente ambiental, o que é comum a muitas espécies estuarinas. Até o momento nenhuma espécie exótica foi detectada.

• **RELAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS COM A OCORRÊNCIA DO ICTIOPLÂNCTON EM AMBIENTES COSTEIRO.**

O ictioplâncton, compreende os estágios iniciais da vida dos peixes e representa um importante elo nos ecossistemas aquáticos, uma vez que desses organismos depende do estoque de peixes adultos (Reynalte-Tataje et al., 2013; Hare e Richardson, 2014). Durante seu desenvolvimento, larvas e juvenis de peixes utilizam uma grande variedade de habitats, desde a plataforma continental (área de desova da maioria das espécies marinhas), até lagoas costeiras, baías, estuários, incluindo a interface com a água doce (Hoss e Thayer, 1993).

O estudo desses organismos, possibilita o conhecimento da biologia e sistemática das diferentes espécies em relação às condições ambientais, em estudos de taxonomia, para o repovoamento, detecção de novos estoques e avaliação daqueles já explorados, para a aquicultura, proporcionando um melhor conhecimento da população adulta e melhor entendimento da ecologia das comunidades (Stratoudakis et al., 2006; Dourado et al., 2017).

A ocorrência e a composição do ictioplâncton em ambientes estuarinos são fortemente influenciadas por fatores ambientais, como temperatura, salinidade, turbidez, redução do oxigênio dissolvido, alterações no regime pluvial, os quais estão sujeitos a alterações em decorrência das mudanças climáticas. É importante enfatizar, que

variações no regime de precipitação e na vazão fluvial, intensificadas por alterações climáticas globais, podem modificar a estrutura hidrográfica de estuários como a Baía de São Marcos, afetando a salinidade e o padrão de circulação das massas de água, elementos cruciais para a dispersão, sobrevivência e recrutamento larval (Perry et al., 2005; Sassa et al., 2022; Brito-Morales et al., 2023).

O aumento da temperatura da água pode influenciar diretamente o metabolismo, o tempo de desenvolvimento embrionário gerando alterações na taxa de eclosão e na duração das fases larvais, além de provocar uma desregulação na sincronia entre o pico de desova e a disponibilidade de alimento (Leis & McCormick, 2002; Peck et al., 2013; Portner et al., 2021). Além disso, evidências recentes indicam mudanças latitudinais na distribuição de espécies larvais, com o deslocamento de ictioplâncton tropical para áreas anteriormente ocupadas por espécies subtropicais e temperadas, em resposta ao aquecimento dos oceanos (Pinsky et al., 2020).

A distribuição desses organismos, também depende das características ambientais da região. No litoral norte brasileiro, especificamente na Baía de São Marcos, a comunidade ictioplanctônica tende a se localizar mais próxima da superfície tendo em vista a pouca produção primária relacionada a baixa penetração da luz na coluna d'água, o que deixa esses organismos mais suscetíveis a alterações climáticas (Soares, 2015).

Desse modo, alterações ambientais podem ocasionar mudanças espaciais e temporais na distribuição de ovos e larvas de peixes, bem como na composição taxonômica do ictioplâncton, refletindo adaptações ou deslocamentos de espécies frente às novas condições ecológicas impostas pelas mudanças climáticas.

- **OCORRÊNCIA DO ICTIOPLÂNCTON NA BAÍA DE SÃO MARCOS**

Foi realizado um estudo que teve como objetivo registrar a ocorrência de organismos ictioplanctônicos na Baía de São Marcos, Maranhão, região de elevada importância ecológica e socioeconômica para a costa amazônica brasileira. As coletas foram realizadas durante 6 anos (2018-2023) abrangendo os diferentes períodos sazonais.

Os parâmetros ambientais aferidos ao longo do período de amostragem apresentaram-se, em geral, dentro dos limites esperados para ambientes estuarinos tropicais. No entanto, foram observadas variações nos valores de salinidade, consistentes com a influência da dinâmica estuarina sazonal, bem como níveis de oxigênio dissolvido

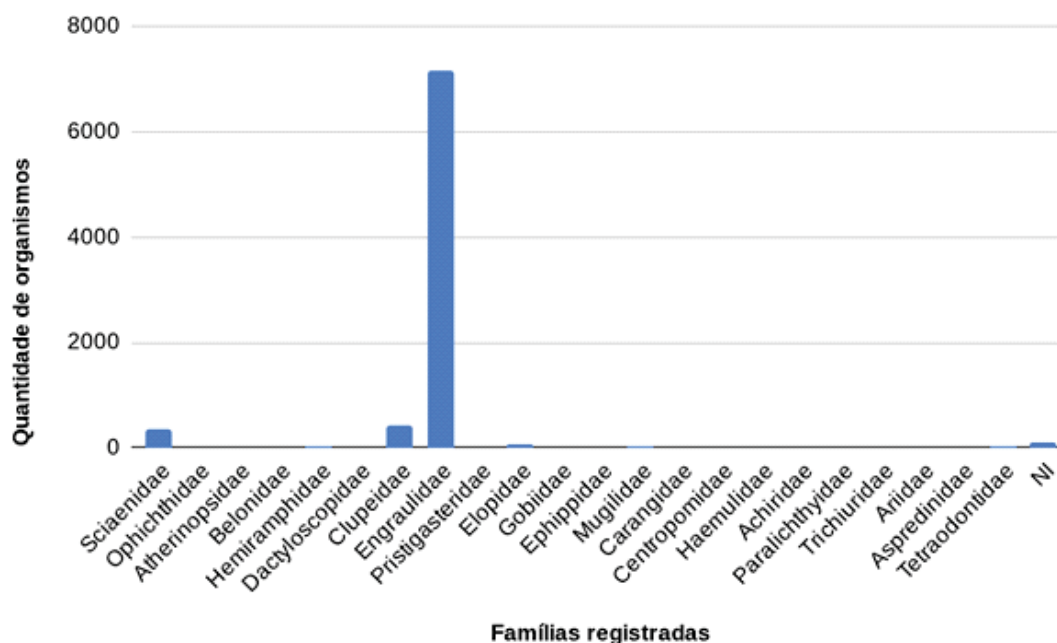
(OD) relativamente baixos, com médias em torno de $4,47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Esse valor encontra-se próximo do limite mínimo estabelecido pela Resolução CONAMA n.º 357/2005, que recomenda concentrações de OD superiores a $5,0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ para águas de classe 2 (Brasil, 2005). A redução nos níveis de oxigênio pode estar associada a fontes antrópicas localizadas, como o intenso tráfego de grandes embarcações e atividades de carga e descarga do complexo portuário instalado na região, que potencialmente contribuem com o lançamento de contaminantes orgânicos e inorgânicos, alterando a qualidade da água e, consequentemente, a disponibilidade de habitat para os estágios iniciais dos peixes.

Durante o estudo, foram encontradas um total de 8.231 larvas de peixes distribuídas em 22 famílias (Figura 13). Dentre as famílias identificadas ao longo do estudo, observou-se a predominância constante de representantes da família Engraulidae (Figura 15) com 7.197 organismos.

Figura 13 - Imagem representativa de exemplares de ictioplâncton capturados durante o estudo.



13.A - *Rhinosardinia amazonica* (Clupeidae);. 13.B - *Anchoviella lepidentostole* (Engraulidae);13.C - *Centropomus* sp. (Centropomidae).

Figura 14 - Famílias de ictioplâncton identificadas durante as coletas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A alta incidência de organismos pertencentes à família Engraulidae é recorrente em estudos conduzidos na Baía de São Marcos e em diversos estuários tropicais da costa norte do Brasil, evidenciando sua elevada abundância e frequência no ictioplâncton regional (Barletta-Bergan et al., 2002; Costa, 2017; Silva et al., 2022; Silveira et al., 2024). Essa dominância pode ser explicada pela ampla tolerância ecológica das espécies engraulídeas às variações ambientais características dos ecossistemas estuarinos, como flutuações na salinidade, temperatura e turbidez (Beltrán-León & Ríos, 2000; Leis & Carson-Ewart, 2000). De acordo com Bonecker (2005), os Engraulidae são particularmente comuns em estuários tropicais, uma vez que os adultos utilizam essas áreas como locais de desova, berçário e crescimento larval. Além disso, apresentam estratégia reprodutiva com desovas contínuas ao longo do ano, o que aumenta significativamente a probabilidade de suas larvas serem capturadas por metodologias de amostragem planctônica.

Estudos recentes indicam que representantes dessa família demonstram elevada resiliência a perturbações antrópicas, como evidenciado por Silveira et al. (2024), que

grande presença de larvas de Engraulidae mesmo após operações de dragagem no entorno do complexo portuário da Baía de São Marcos. Tais resultados sugerem que a família apresenta mecanismos adaptativos que favorecem seu sucesso reprodutivo e sobrevivência larval em ambientes submetidos a estresse ambiental moderado a intenso.

Além disso, muitas espécies de peixes em sua forma adulta também foram registradas na região: *Anchoa spinifer* (Valenciennes, 1848), *Anchovia clupeioides* (Valenciennes, 1848), *Anchoviella leptendostole* (Fowler, 1911), *Cetengraulis edentulus* (Cuvier, 1828), *Lycengrulis grossidendens* (Lowe, 1838), *Pterengrulis atherinoides* (Spix & Agassiz, 1829) (Santana et al., 2025), que enfatiza que espécies pertencentes a esta família se mostram adaptadas durante todo seu ciclo de vida às condições ambientais apresentadas na Baía.

De forma geral, os engraulídeos são frequentemente dominantes no ictioplâncton de estuários tropicais e costeiros brasileiros, tanto em abundância quanto em frequência de ocorrência, e constituem um excelente grupo bioindicador das condições ambientais desses sistemas (Barletta-Bergan et al., 2002; Silva et al., 2022, Silveira et al., 2024). Essa elevada presença e abundância das larvas pode refletir padrões sazonais de pluviosidade, descarga fluvial, salinidade e produtividade do sistema, sendo especialmente útil para avaliar impactos de mudanças climáticas e de atividades antrópicas sobre a ictiofauna reprodutiva.

REFERÊNCIAS

- Ang, H.; Lovell, C. R. Microbial surface colonization and biofilm development in marine environments. **Microbiology and molecular biology reviews**, v. 80, n. 1, p. 91-138, 2016.
- Azevedo, A.C.G.; Cutrim, M. V.J. Fitoplâncton costeiros das porções norte-nordeste da ilha de São Luís, Ma, Brasil. In: A. C. Silva & J.L. O. Fortes (orgs). Diversidade biológica, uso e conservação de recursos naturais do Maranhão. São Luís, Universidade Estadual do Maranhão. pp. 67-92, 2007.
- Baker, P.; Baker, S. M.; Fajans, J. Nonindigenous marine species in the greater Tampa Bay ecosystem. **Tampa Bay Estuary Program Technical Publication**, 2004.
- Barletta-Bergan, A., Barletta, M., & Saint-Paul, U. (2002). Structure and seasonal dynamics of larval fish in the Caeté River estuary in North Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(2), 193–206.

Behrenfeld, M.; O'Malley, R.; Siegel, D.; McClain, C. R.; Sarmiento, J. L.; Feldman, G. C.; Milligan, A. J.; Falkowski, P. G.; Letelier, R. M.; Boss, E. S. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. **Nature** 444, p. 752–755, 2006.

Beltrán-León, B. S., & Ríos, A. R. (2000). *Larvas de peces del Pacífico Colombiano*. INVEMAR.

Bolam, S.G. Macrofaunal recovery following the intertidal recharge of dredged material: A comparison of structural and functional approaches. **Marine Environmental Research**, v. 97, p. 15-29, 2014.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. (2005). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. *Diário Oficial da União*, 18 mar. 2005.

Campos, A.C.L.G. 2021. Avaliação da sustentabilidade ambiental do cultivo de peixe bijupirá (*Rachycentron canadum*) e a relação com a macrofauna bentônica de substrato inconsolidado. 85 f. Dissertação (Universidade do Estado do Rio de Janeiro), Curso de Oceanografia.

Carlton, J. T. Introduced species in US coastal waters: pew oceans commissions report. **Washington, DC: Pew Oceans Commissions**, 2001.

Carlton, J. T.; Ruiz, G. M. Anthropogenic vectors of marine and estuarine invasions: an overview framework. In: CANNING-CLODE, J. (Ed.), *Biological invasions in changing ecosystems: vectors, ecological impacts, management and predictions*, Warsaw, Poland: De Gruyter Open Poland, p. 24-36, 2016.

Carvalho Neta, R. N. F.; Abreu-Silva, A. L. Glutathione s-transferase as biomarker in *Sciades herzbergii* (Siluriformes: Ariidae) for environmental monitoring: the case study of São Marcos Bay, Maranhão, Brazil. **Latin American Journal of Aquatic Research**, v. 41, n. 2, p. 217–225, 2013.

Castilla, J. C.; Cerda, M. Marine ecosystem engineering by the alien ascidian *Pyura praeputialis* on a mid-intertidal rocky. **Marine Ecological Progress Series**, v. 268, p. 119–130, 2004.

Cavicchioli, R., Ripple, W. J., Timmis, K. N., Azam, F., Bakken, L. R., Baylis, M., Behrenfeld, M. J., Boëtius, A., Boyd, P. W., & Classen, A. T. (2019). Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change. **Nature Reviews Microbiology**, 17(9), 569–586, 2019.

Clarke Murray, C.; Gartner, H.; Gregr, E. J.; Chan, K.; Pakhomov, E.; Therriault, T. W. Spatial distribution of marine invasive species: environmental, demographic and vector drivers. **Diversity and Distributions**, v. 20, n. 7, p. 824-836, 2014.

Costa D. S. N. 2017. Diversidade e zonação do Ictioplâncton em um perfil da plataforma Maranhense. Master dissertation, Univ. Federal do Maranhão, 51 pp.

- Cutrim, A. S. T.; Sousa, L. K. S.; Ribeiro, R. P.; Oliveira, V. M.; Almeida, Z. S. Structure of a Polychaete Community in a Mangrove in the Northern Coast Of Brazil. *Acta Biologica Colombiana*, v. 23, p. 286-294, 2018.
- Da Rocha Neto, J. L.; Santos, M. M. Ballast water treatment alternatives on board ships. *Journal of Interdisciplinary Debates*, v. 2, n. 04, 2021.
- Falkowski, P. G. Ocean science: The power of plankton. *Nature*, 483, S17–S20, 2012.
- Falkowski, P. G.; Barber, R. T.; Smetacek, V. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281(5374), 200-206, 1998.
- Farrapeira, C. M. R.; Melo, A. V. O. M.; Barbosa, D. F.; Silva, K. M. E. D. Ship hull fouling in the Port of Recife, Pernambuco. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 55, n. 3, p. 207-221, 2007.
- Ferreira, H. R. S.; castro, A. C. L.; Cutrim, M. V. J; Oliveira, V. M. Composition and spatiotemporal distribution of benthic macrofauna in a macrotidal estuary on the Amazonian Coast of the State of Maranhão, Brazil. *Ocean and Coastal Research*, v. 68, p. 1/e20275, 2020.
- Field, C. B.; Behrenfeld, M. J.; Randerson, J. T.; Falkowski, P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281(5374), 237-240, 1998.
- Gama, B. A. P. Da; Pereira, R. C.; Coutinho, R. A Bioincrustação Marinha. In: PereirA, R. C.; Soares-Gomes, A. (Orgs.). *Biologia Marinha*. 2. ed. Rio de Janeiro: **Interciência**. p. 299-318, 2009.
- Garcia, K. S.; Acacio, L. E. M.; Alves, O. F.; DE Oliviera, O. C.; Maddock, J. L.; Silva, M. B. F. Análise da Macrofauna Bentônica da Porção Nordeste da Baía de Todos os Santos-BA. *Cadernos de Geociências*, v. 11, n. 1-2, p. 121-134, 2014.
- Girolli, D. A.; Lima, M. F.; Sanches, N. A. O.; Colombo-Corbi, V.; Juliano José Corbi, J. J.; & Gorni. G. R. Aquatic oligochaetes (Annelida: Clitellata) in reservoirs in São Paulo State: list of occurrence and ecological observations on the species. *Biota Neotropica* 21(3): e20201152, 2021.
- Gollasch, S. The importance of ship hull fouling as a vector of species introductions into the North Sea. *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, V.18, N. 2, P. 105-121, 2010.
- Gollasch, S.; David, M. Ballast Water: Problems and Management. In: **Sheppard, C. World Seas: An Environmental Evaluation**. Academic Press, New York, p. 237-250, 2019.
- Hallegraeff, G. M. Ocean climate change, phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: a formidable predictive challenge. *Journal of Phycology*, 46, (2), p. 220–235, 2010.

- Hoss D.E., Thayer G.W. The importance of habitat to the early life history of estuarine dependent fishes. **American Fisheries Society Symposium**, 14: 147-158, 1993.
- Kaluza, P.; Kölzsch, A.; Gastner, M. T.; Blasius, B. The complex network of global cargo ship movements. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 7, n. 48, p. 1093-1103, 2010.
- Krohling, W.; Brotto, D. S.; Zalmon, I. R. Functional role of fouling community on an artificial reef at the northern coast of Rio de Janeiro state, Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, 54:183–191, 2006.
- Leis, J. M., & Carson-Ewart, B. M. *The larvae of Indo-Pacific coastal fishes: An identification guide to marine fish larvae*. Brill, 2000.
- Leite, F. P. P.; Requel, A. C. A.; Silva, D. B. Tanaidacea. In: Amaral, A. C. Z.; Nallin, S. A. R. Biodiversidade e ecossistemas bentônicos marinhos do Litoral Norte de São Paulo Sudeste de Brasil. Campinas, SP: Unicamp, 2011.
- Martins, M.O.; Almeida, T.C.M. Distribuição espacial da macrofauna e sua relação com o sedimento no parque aquícola da enseada da Armação do Itapocoroy, Santa Catarina, Brasil. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology** 18(1):45-59, 2014.
- Michels, R. Projeto conceitual de um reservatório para avaliação dos fenômenos da bioincrustação em estruturas navais. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, V. 12, N. 1, p. 1-16, 2020.
- Ochi Agostini, V.; Ritter, M. D. N.; José Macedo, A.; Muxagata, E.; Erthal, F. What determines sclerobiont colonization on marine mollusk shells?. **PLoS One**, v. 12, n. 9, p. e0184745, 2017.
- Oliveira, V. M.; Mochel, F. R. Macroendofauna benthica de substratos móveis de um manguezal sob impacto das atividades humanas no Sudoeste da ilha de São Luís, Maranhão, Brasil. **Boletim do Laboratório de Hidrobiologia**, v. 12, p. 75-93, 1999.
- Peck, M. A., Reglero, P., Takahashi, M., & Catalán, I. A. Life cycle ecophysiology of small pelagic fish and climate-driven changes in populations. **Progress in Oceanography**, 116, 220–245, 2013.
- Peres, A. P., Neves, N. C. R. F.; Taddei, R. Atitudes e percepções de gestores ambientais da Zona Costeira de SP frente às mudanças climáticas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 58(2), e191793, 2020.
- Porto do Itaqui. **Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto do Itaqui**. São Luís: EMAP – Empresa Maranhense de Administração Portuária, 2011.
- Railkin, Alexander I. **Marine biofouling: colonization processes and defenses**. CRC press, 2003.
- Reynolds, C. S. **Ecology of Phytoplankton**. Cambridge University Press, 2006.

- Rilov, G; Galil, B. Marine bioinvasions in the Mediterranean Sea—history, distribution and ecology. In: **Biological invasions in marine ecosystems**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 549-575, 2009.
- Salmaso, N.; Tolotti, M. Phytoplankton and anthropogenic changes in pelagic environments. **Hydrobiologia**, 848 (1), 251–284, 2021.
- Santana, T. C., Sá, J. P., Abreu, J. M. S., Fernandes, J. F. F., Gonçalves, H. G. P., Barros, M.C., Carvalho-Costa, L. F., Tchaicka, L., Fraga, E. C. The marine and estuarine bony fishes (Teleostei) of the Golfão Maranhense on the eastern Amazon coast, northern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, 85: e286625, 2025.
- Sene-Silva, G.; Oliveira, J. S.; Michels Souza, M. A. Occurrence of *Nephtys fluviatilis* (MONRO, 1937) and *Alitta succinea* (FREY & LEUCKART, 1847) (ANNELIDA: POLYCHAETA) in an Oligohaline environment at Faisqueira River, Antonina, Parana. **Biology Health Science**, v.17, n.1, p. 7-11, 2011.
- Silva, E. C.; Barros, F. Macrofauna bentônica introduzida do Brasil: lista de espécies marinhas e dulcícolas e distribuição atual. **Oecologia Australis**, v. 15, n. 2, p. 326-344, 2011.
- Silva, E. R. S. et al. (2022). Environmental influences on the ichthyoplankton in hypersaline estuaries located in a semiarid northeastern Brazilian Coast. **Neotropical Ichthyology**, 20(1), 2022.
- Silveira P. C. A., Costa D. S. N., Eschrique S. A., Lima L. M., Sodré E. S. Dredging in the Itaqui port area, Maranhão-Brazil: Effects on the composition and abundance of ichthyoplankton. **Revista Contemporânea** 4:7: 1-22, 2024.
- Soares R. A., Júnior J. C. M. R., da Silveira P. C. A., Neta R. F. C., Junior, A. R. T. Fish larval distribution in a macrotidal regime: an in situ study in São Marcos Bay (Amazon Coast, Brazil). **Research, Society and Development Journal**, 9:10: 1-17, 2020.
- Soares, H. S.; Pestana, S. S.; Barros, M. F. S.; Sousa, R. R.; Oliveira, V. M.; Carvalho-Neta, R. N. F. A diversidade da macrofauna benthica no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, 2022.
- Song, J.; Beule, L.; Jongmans-Hochschulz, E.; Wichels, A.; Gerds, G. The travelling particles: community dynamics of biofilms on microplastics transferred along a salinity gradient. **ISME communications**, v. 2, n. 1, p. 35, 2022.
- Sousa, L. K. S. Efeito da Atividade de Dragagem sobre a Macrofauna Benthica do Complexo Portuário de São Luís, Maranhão. 81f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia), Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.
- Sousa, L. K. S.; Cutrim, M. V. J.; Nogueira Júnior, M.; Oliveira, V. M. Does dredging activity exert an influence on benthic macrofauna in tropical estuaries? Case study on the northern coast of Brazil. **Iheringia, Série Zoologia**, 113, 2023.

Souza, A. C. M.; Ferreira, L. O.; Souza, M. M. F.; Barbosa, E. F. G. The impacts of the ocean acidification and rising sea temperature of the sea in the marine ecosystem. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v.4, n.1, p. 1418-1423, 2021.

Stratoudakis, Y., Bernal, M., Ganiás, K., Uriarte, A. 2006. The daily egg production method: recent advances, current applications and future challenges. **Fish Fish**. 7:1: 35-57.

Thomas, M. K.; Kremer, C. T.; Klausmeier, C. A.; Litchman, E. A global pattern of thermal adaptation in marine phytoplankton. **Science**, 338(6110), 1085–1088, 2012.

Wahl, M. Epibiosis. I. Fouling and anti-fouling: some basic aspects. **Marine Ecology Progress Series**, v. 58, p. 189, 1989.

Capítulo 05

A SUSTENTABILIDADE NO OCEANO: DESAFIOS E ESTRATÉGIAS PARA PORTOS BRASILEIROS EM RELAÇÃO AO ODS 14

**Darliane Ribeiro Cunha, Clóvis Bôsko Mendonça Oliveira,
Newton Narciso Pereira, Marcelo de Santana Porte,
Renilson José Silva Resende, Natália Viana Diniz, Sérgio Sampaio
Cutrim, Markus Dannylo Carneiro Costa, Shigeaki Leite de Lima,
Antônio Santos Ferreira Neto, Fernanda Sousa de Assunção Vale**

DOI: 10.29327/5850749.1-5

view online: [https://publicacoes.even3.com.br/book/
mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495](https://publicacoes.even3.com.br/book/mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495)

A Sustentabilidade no Oceano: Desafios e Estratégias para Portos Brasileiros em Relação ao ODS 14

Darliane Ribeiro Cunha, Clóvis Bôsko Mendonça Oliveira, Newton Narciso Pereira, Marcelo de Santana Porte, Renilson José Silva Resende, Natália Viana Diniz, Sérgio Sampaio Cutrim, Markus Dannylo Carneiro Costa, Shigeaki Leite de Lima, Antônio Santos Ferreira Neto, Fernanda Sousa de Assunção Vale

Resumo

Este capítulo discute o papel dos portos brasileiros na promoção da sustentabilidade marinha, a partir dos princípios do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 14 (ODS 14), que trata da conservação e do uso sustentável dos oceanos. O texto destaca que, além de sua função logística e econômica, os portos mantêm relação direta com os ecossistemas costeiros e, por isso, assumem responsabilidades ambientais cada vez mais relevantes. Ao longo do capítulo, são apresentados os principais desafios do setor portuário, como a gestão adequada de resíduos, o controle da poluição, a mitigação de impactos sobre a biodiversidade marinha e a adaptação às mudanças climáticas. A análise demonstra que alinhar as operações portuárias às metas do ODS 14 exige planejamento ambiental, inovação tecnológica e fortalecimento da governança institucional. O capítulo também aborda estratégias e boas práticas adotadas no contexto brasileiro, incluindo programas de monitoramento ambiental, iniciativas de eficiência energética e ações voltadas à redução de emissões. Essas experiências mostram que o desenvolvimento portuário pode avançar de forma integrada à proteção dos oceanos. Ao inserir o debate na agenda global de sustentabilidade, o capítulo amplia a reflexão sobre o papel estratégico dos portos na construção de modelos de desenvolvimento mais responsáveis, ressaltando que a saúde dos ecossistemas marinhos é condição essencial para o futuro das atividades portuárias.

1. INTRODUÇÃO

Os portos desempenham um papel extremamente significativo na cadeia de transporte, promovendo o desenvolvimento econômico por meio do fluxo de pessoas, bens e mercadorias. Eles constituem um dos principais sistemas modais para o escoamento de produtos e commodities em nível global. Em 2022, o setor portuário brasileiro movimentou um total de 1.206,8 milhões de toneladas, das quais 712,4 milhões foram granel sólido, seguidas por 304 milhões de granel líquido e 128,4 milhões de carga containerizada (ANTAQ, 2023).

O setor portuário é essencial tanto para as economias globais quanto locais, estabelecendo-se como centros logísticos fundamentais para o transporte de mercadorias e desempenhando um papel crucial na interligação entre países e regiões. Essa relevância aumenta com o conceito de Economia Azul, oriundo da combinação entre a Economia Verde e o Crescimento Azul. Proposto pela Comissão Europeia em 2012, esse conceito posiciona os oceanos como elementos centrais para o desenvolvimento econômico global (Lillebø et al., 2017).

No entanto, é importante observar que o conceito de "Economia Azul" ainda não alcançou consenso, pois a terminologia varia de acordo com a região e pode ser referida como "Economia Marinha," "Economia Marítima," "Economia Oceânica" ou "Economia Costeira."

No Brasil, o grupo de trabalho "PIB do Mar" adota o conceito de uso sustentável dos recursos marinhos para promover o desenvolvimento econômico, melhorar o bem-estar social e gerar empregos, enquanto conserva a saúde dos ecossistemas oceânicos e costeiros (Santos et al., 2022). Nessa perspectiva, os portos assumem uma posição estratégica, atuando como eixos centrais de uma cadeia produtiva que se estende pelos mares e oceanos. Contudo, o rápido crescimento do setor portuário traz desafios significativos, abrangendo esferas ambientais, sociais e econômicas, tornando essencial a busca por soluções sustentáveis como parte da estratégia de crescimento econômico.

Dada a importância econômica dos portos, eles se tornaram alvos de aprimoramentos em sustentabilidade, envolvendo desde mudanças culturais até políticas ambientais e modificações nos processos operacionais (Hossain et al., 2021). Estudos sobre iniciativas de sustentabilidade indicaram um aumento progressivo dessas ações, além de revelar diferenças entre portos em diferentes regiões (Hossain et al., 2019; Oh et al., 2018).

Nesse contexto, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), surgem como uma estrutura ampla e ambiciosa para guiar os esforços globais em direção a um futuro sustentável. Os ODS abrangem uma série de questões, desde a erradicação da pobreza até a ação climática, sendo essenciais para promover um desenvolvimento equitativo e preservar o meio ambiente para gerações futuras. Lançados em 2015, os ODS sucedem os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio, renovando e ampliando os compromissos pela sustentabilidade global, com um horizonte de 2015 a 2030 (Roma, 2019). Os ODS são compostos por 17 objetivos com metas predefinidas, buscando alcançar as dimensões da sustentabilidade ao interconectar ações.

Dada sua importância, é essencial compreender o progresso da implementação dos ODS no setor portuário, bem como identificar as ações e desafios enfrentados pelos portos e terminais brasileiros em relação ao ODS 14. Assim, este artigo teve como objetivo identificar estratégias para adoção e implementação dos ODS, com foco específico no ODS 14 (Vida na Água), no contexto do setor portuário brasileiro. A pesquisa foi conduzida por meio da aplicação de dois questionários estruturados nos vinte principais portos do setor portuário brasileiro, com o objetivo de entender como essas instalações estão incorporando os princípios dos ODS em suas operações e como isso tem contribuído para o desenvolvimento sustentável.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Devido à sua importância como atividade econômica de grande relevância no contexto global e local, os portos desempenham um papel fundamental no alcance das metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Assim, quatro ODS com os quais as atividades portuárias possuem relação estreita foram identificados, permitindo a implementação de ações que influenciam diretamente o cumprimento das metas estabelecidas. Além do ODS 14 (Vida na Água), Wang et al. (2020) identificaram o ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) como os mais relacionados ao setor portuário.

Lee et al. (2020) analisaram a interseção entre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e as operações portuárias, particularmente no contexto da Economia Azul. Este estudo, caracterizado por uma abordagem sistemática, teve como objetivo

principal discernir a relevância e influência dos diversos ODS nas atividades portuárias. A pesquisa destaca a predominância do ODS 14, que se concentra na conservação e uso sustentável dos oceanos, mares e recursos marinhos, sublinhando sua importância crítica no setor portuário.

Um estudo identificou os ODS mencionados nos relatórios de sustentabilidade de 33 portos europeus. O ODS 9 foi mencionado por 32 portos, o ODS 12 por 31 portos, o ODS 13 por 30 portos, e os ODS 11 e 17 por 28 portos, respectivamente. Os ODS menos mencionados nos relatórios foram os ODS 5, 2 e 1. É importante ressaltar a alta ocorrência do ODS 14 nesses relatórios (Caliskan, 2022).

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 14 (ODS 14), intitulado "Vida na Água," busca conservar e usar de forma sustentável os oceanos, mares e recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, o setor portuário pode desempenhar um papel significativo na preservação dos ecossistemas marinhos, devido à sua interação com a vida aquática e à dependência de suas operações em relação à saúde dos oceanos. A adoção de práticas eficientes de gestão ambiental nos portos é essencial para alcançar os objetivos estabelecidos pelo ODS 14, abrangendo gestão adequada de resíduos, mitigação da poluição marinha e promoção da biodiversidade marinha através de programas de conservação, conforme indicado pela Organização Marítima Internacional (IMO, 2017).

Além disso, os oceanos desempenham um papel econômico significativo, abrangendo não apenas o transporte marítimo, mas também áreas como a aquicultura marinha e o turismo. Os serviços adicionais fornecidos pelos oceanos incluem benefícios relacionados ao bem-estar, segurança alimentar, regulação climática e ciclos biogeoquímicos. O ODS 14 foi desenvolvido como uma resposta estratégica às pressões ambientais que afetam atividades econômicas, serviços sociais e ecológicos (Virto, 2018).

No setor portuário, devido à sua conexão direta com o ambiente marinho, os portos têm uma forte ligação com o ODS 14, posicionando-se como agentes-chave na implementação de ações voltadas para o alcance de suas metas. Tais ações incluem o monitoramento da biota aquática local, a avaliação da qualidade da água e dos sedimentos, a minimização dos impactos da dragagem, a redução de ruídos subaquáticos e o apoio a pesquisas focadas em recursos e ambientes marinhos. Essas iniciativas são cruciais para fomentar o desenvolvimento sustentável que respeite e proteja os ecossistemas marinhos (Caliskan, 2022).

O ODS 14 propõe uma série de metas (14.1, 14.2, 14.3, 14.5, 14.6, 14.7, 14.a, 14.b, 14.c) destinadas a garantir a conservação e o uso sustentável dos oceanos, mares e recursos marinhos. Cada meta aborda um aspecto específico dessa ambição global. A meta 14.1 foca na redução da poluição marinha de todas as fontes, incluindo detritos e contaminação por nutrientes. A meta 14.2 visa proteger e gerenciar de forma sustentável os ecossistemas marinhos e costeiros, aumentando sua resiliência e promovendo sua restauração. A meta 14.3 é direcionada para minimizar e enfrentar os impactos da acidificação dos oceanos. No que diz respeito à pesca, a meta 14.4 busca regular as atividades pesqueiras para evitar a sobrepesca e práticas de pesca ilegais, não declaradas e não regulamentadas. A meta 14.5 compromete-se a conservar pelo menos 10% das áreas costeiras e marinhas, com base em critérios científicos sólidos. A meta 14.6 tem como objetivo eliminar subsídios que contribuem para a sobrepesca e a sobrecapacidade, incentivando práticas sustentáveis (Nações Unidas, 2015).

Além disso, a meta 14.7 busca aumentar os benefícios econômicos derivados do uso sustentável dos recursos marinhos, especialmente para Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS) e países menos desenvolvidos. A meta 14.a pretende aprimorar o conhecimento científico, desenvolver capacidades de pesquisa e promover a transferência de tecnologia marinha. Com a meta 14.b, o ODS 14 visa fornecer aos pescadores artesanais de pequena escala acesso aos recursos marinhos e aos mercados. Por fim, a meta 14.c busca garantir a conservação e o uso sustentável dos oceanos e de seus recursos por meio da implementação de leis internacionais, conforme estabelecido pela Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar. Todas essas metas, juntas, formam um plano integrado para preservar a saúde dos oceanos e garantir sua contribuição vital para o planeta e para as futuras gerações (Nações Unidas, 2015).

3. METODOLOGIA

Este estudo caracterizou-se como uma investigação de campo de natureza exploratória e descritiva, adotando uma metodologia qualitativa. A pesquisa foi direcionada a gestores de portos públicos e terminais localizados em território brasileiro. É importante destacar que, na aplicação do questionário, os participantes não foram identificados individualmente, garantindo assim a confidencialidade e o anonimato dos respondentes. O escopo deste estudo abrangeu vinte portos e terminais que registraram os maiores movimentos no ano de 2022.

Para aprofundar a análise no escopo do ODS 14, foram desenvolvidos dois questionários distintos. O primeiro focou em informações específicas relacionadas à

meta em questão. O segundo teve como objetivo explorar as metas associadas ao ODS 14. Essa estratégia metodológica buscou obter uma compreensão mais abrangente e detalhada da contribuição dos portos e terminais para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Os principais temas abordados nos questionários incluíram: política ambiental; agenda ambiental; estudos socioambientais realizados e aqueles planejados; monitoramento ambiental realizado e planejado; avaliação de impacto ambiental, entre outros.

O questionário relacionado a informações específicas sobre o ODS 14 é composto por 16 perguntas, das quais 13 são abertas e 3 são fechadas. O questionário relacionado às metas do ODS inclui 10 perguntas, sendo 7 abertas e 3 fechadas. As principais perguntas estão apresentadas na tabela abaixo (Tabela 1).

Tabela 1 - Principais Perguntas dos Questionários Específico e de Metas do ODS 14

Questões específicas	Questões relacionadas a metas
1. Quais destas atividades de monitoramento o porto/terminal já executou, está executando ou planeja executar em suas áreas de influência? Opções: Biota aquática; Qualidade da água; Qualidade do sedimento marinho; Espécies exóticas; Compensação pela atividade pesqueira; Controle da água de lastro; Linha costeira; DNA ambiental; Ruído subaquático; Manguezal ou Área de Proteção Permanente.	1. O porto/terminal possui uma agenda ambiental voltada para o alcance dos ODS?
2. O porto/terminal possui programas e/ou ações voltados para a preservação da zona costeira, especialmente em Áreas de Proteção Permanente?	2. Existem parcerias ou acordos com outras empresas ou entidades para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável? Se sim, detalhe as iniciativas.
3. Quais ações o porto/terminal realiza para reduzir a poluição marinha e o impacto das operações portuárias na vida marinha local?	3. Quais ações o porto/terminal está implementando para contribuir com o ODS 14?
4. O porto/terminal implementa controles adicionais para monitorar a troca de água de lastro? Em caso afirmativo, detalhe o processo.	4. Quais são os principais desafios enfrentados pelo porto/terminal na implementação do ODS 14?
5. Caso o porto/terminal realize um programa de monitoramento da biota aquática, quais são os grupos amostrados e a frequência do monitoramento?	5. O porto/terminal possui metas claras para alcançar o ODS 14? Em caso afirmativo, quais são essas metas?

6. O porto/terminal monitora para identificação de espécies exóticas invasoras? Em caso afirmativo, detalhe o processo.	6. Se houver metas relacionadas ao ODS 14, qual é o prazo esperado para alcançá-las?
7. O porto/terminal realiza atividades de dragagem? Em caso afirmativo, detalhe o tipo e se os impactos da atividade na biota aquática foram identificados e monitorados.	7. Caso existam ações para alcançar as metas do ODS 14, qual é o nível de implementação/conformidade?
8. O porto/terminal possui programas focados na atividade pesqueira? Em caso afirmativo, detalhe o programa.	8. Indique, em ordem ascendente, as ações ambientais prioritárias para o porto/terminal. Opções: Qualidade do ar; Água de lastro; Relação porto-cidade; Qualidade da água; Eficiência energética; Ruído; Resíduos (porto e navios); Desenvolvimento portuário; Operações de dragagem.
9. Como o porto/terminal está abordando a questão da pesca sustentável e da conservação da vida marinha em suas operações?	9. Comentários para pesquisadores.
10. O porto/terminal possui programas/sistemas para subsidiar pescadores impactados por suas atividades? Em caso afirmativo, detalhe o programa.	
11. O porto/terminal possui um sistema de registro de incidentes e eventos ambientais? Em caso afirmativo, detalhe o processo.	
12. Como são relatados os resultados das ações de monitoramento e/ou gestão ambiental do porto/terminal? Opções: Relatório de conformidade ambiental; Relatório anual de desempenho ambiental; Relatório integrado.	
13. O porto/terminal realiza outros programas ou ações ambientais não vinculadas a uma licença e/ou autorização ambiental? Em caso afirmativo, especifique.	
14. Comentários para pesquisadores.	

A convocação para participação na pesquisa foi realizada por meio do envio de correspondência eletrônica para os contatos disponíveis nos sites das instalações portuárias em questão, complementada por solicitações feitas através da plataforma FalaBR para portos públicos. As respostas ao questionário foram coletadas no período

entre 21 de agosto e 15 de novembro de 2023, resultando em uma amostra composta por oito respondentes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os questionários foram distribuídos para os vinte portos definidos na amostra, e os dados foram coletados de agosto a novembro de 2023, por meio de três contatos por e-mail e pelo menos um contato via o canal oficial do governo. As respostas foram analisadas coletivamente, e os resultados foram agrupados em palavras-chave ou conceitos-chave para garantir o anonimato dos respondentes.

A pesquisa permitiu identificar quais Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são considerados prioritários pelos portos e terminais participantes. Entre as opções apresentadas, que incluíam os ODS 3, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15 e 17, os resultados indicaram que o ODS 14 (Vida na Água) e o ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico) foram classificados como prioridades (Figura 1).

Figura 1 - ODS prioritários de acordo com os respondentes



A Figura 1 apresenta uma pirâmide que representa a categorização ou priorização dos ODS neste terminal portuário brasileiro. A base da pirâmide representa os ODS de menor prioridade, enquanto o topo (ODS 8 e 14) indica os ODS prioritários segundo os respondentes. Esse resultado está parcialmente alinhado com as descobertas de Wang et al. (2020), que identificaram os ODS 8, 9, 11 e 14 como de alta prioridade. Isso pode ser explicado pela significativa interação entre os terminais portuários brasileiros, o oceano e a força de trabalho. Além disso, o estudo realizado por Caliskan (2022) destaca os ODS 11, 12, 13 e 17 como relevantes. Nesse contexto, é essencial considerar o nível de maturidade das práticas de implementação dos ODS no ambiente do terminal portuário. Em relação à agenda ambiental, os resultados obtidos neste estudo revelam que uma expressiva maioria de 83,3% dos respondentes possui uma agenda ambiental voltada para o alcance e/ou contribuição ao ODS 14.

Além disso, metade dos respondentes relatou a existência de parcerias ou convênios com outras instituições para atingir o mesmo objetivo. Essas colaborações incluem parcerias com órgãos ambientais municipais, universidades, secretarias municipais de educação, serviços de abastecimento de água e esgoto, associações de recicladores de resíduos e órgãos de controle, como a Controladoria Geral da União. Um dos respondentes mencionou ser membro do Pacto Global da ONU, participando ativamente da Plataforma de Ação pela Água e Oceano (ODS 6 e 14), além de envolvimento nas Plataformas de Comunicação e Engajamento, Ação Climática, Ação Contra a Corrupção e na Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica.

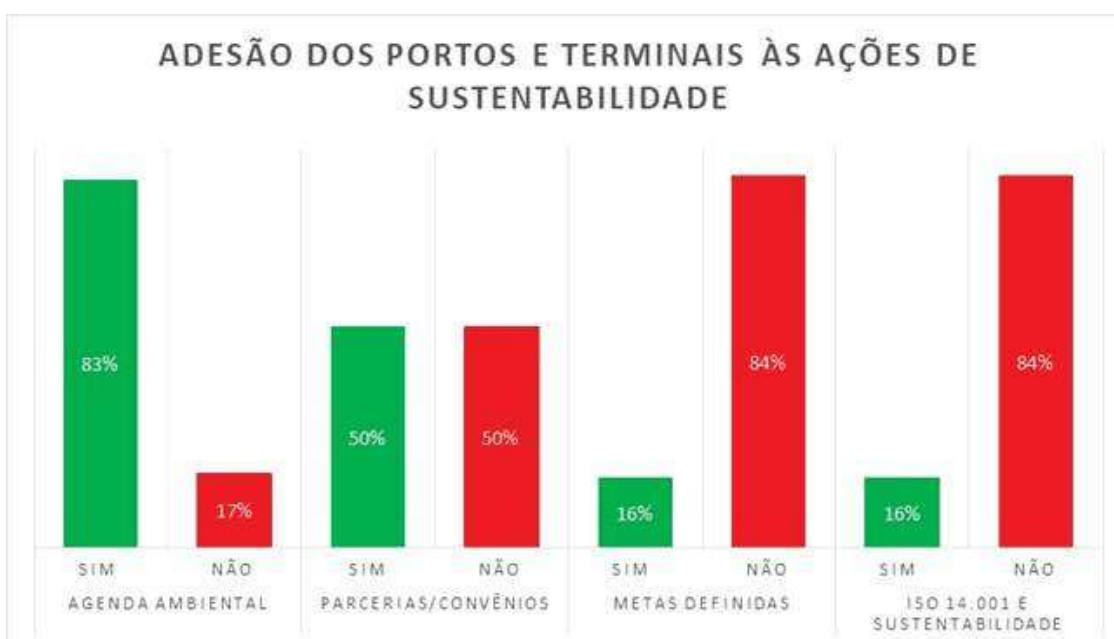
A participação em comitês, grupos de trabalho, programas e plataformas é vista como uma iniciativa fundamental, pois aproxima os portos e terminais de temas atuais e relevantes, como o Pacto Global da ONU e a Plataforma de Ação pela Água e Oceano. No entanto, apenas um respondente indicou participação na Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica, uma rede estabelecida em 2021 sob a liderança do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, composta por diversos atores sociais, visando implementar ações locais alinhadas às metas nacionais e globais da Década do Oceano. Quanto às ações específicas implementadas pelos portos e terminais para contribuir com o ODS 14, as respostas apontaram para atividades de monitoramento ambiental marinho, incluindo monitoramento da biota aquática e dos sedimentos marinhos, gestão ambiental da dragagem, controle de resíduos de embarcações, monitoramento de espécies exóticas e inspeções regulares nas operações portuárias. Além disso, foi mencionada a execução de planos voltados para comunidades pesqueiras. Esses resultados estão alinhados com as análises de Cunha et al. (2023a) sobre os relatórios de

sustentabilidade de portos brasileiros, mas evidenciou-se um aumento nas ações relacionadas ao ODS 14, sugerindo que tais ações podem não estar adequadamente descritas nos relatórios ou não serem reconhecidas como interconectadas com o ODS 14.

Em relação às certificações ISO 14001 e 45001, apenas um respondente relatou possuir tais certificações, além de implementar projetos de eficiência energética, aquisição de estação meteorológica, monitoramento de gases de efeito estufa e valoração de áreas verdes.

A falta de associação explícita entre a ISO 14001 e a sustentabilidade portuária com o ODS 14, observada nos relatórios de sustentabilidade, também foi identificada neste estudo. Curiosamente, a associação com a ISO 45001, focada em gestão de saúde e segurança no trabalho, sugere uma conexão não imediatamente aparente com o ODS 14 (Figura 2).

Figura 2 - Adesão dos portos e terminal às ações de sustentabilidade



Ao analisar os obstáculos inerentes à implementação de iniciativas alinhadas com o ODS 14, é notável que cinco dos seis participantes do estudo destacaram uma série de desafios críticos. Estes incluem: a escassez de recursos financeiros, a necessidade de desenvolvimento e treinamento especializado do pessoal responsável pela execução e supervisão dessas iniciativas, o número insuficiente de profissionais alocados para tais funções, a falta de integração eficaz entre entidades governamentais e o setor econômico, e a ausência de licenciamento ambiental adequado para operadores portuários. Além disso, os respondentes destacaram a complexidade das operações portuárias, as interações com múltiplos stakeholders, as grandes dimensões físicas dos portos, a necessidade de promover mudanças culturais, a alta rotatividade em cargos de liderança e a essencialidade de garantir apoio contínuo desses líderes para iniciativas de sustentabilidade. Esses fatores representam desafios adicionais significativos no contexto da gestão para a implementação eficaz do ODS 14.

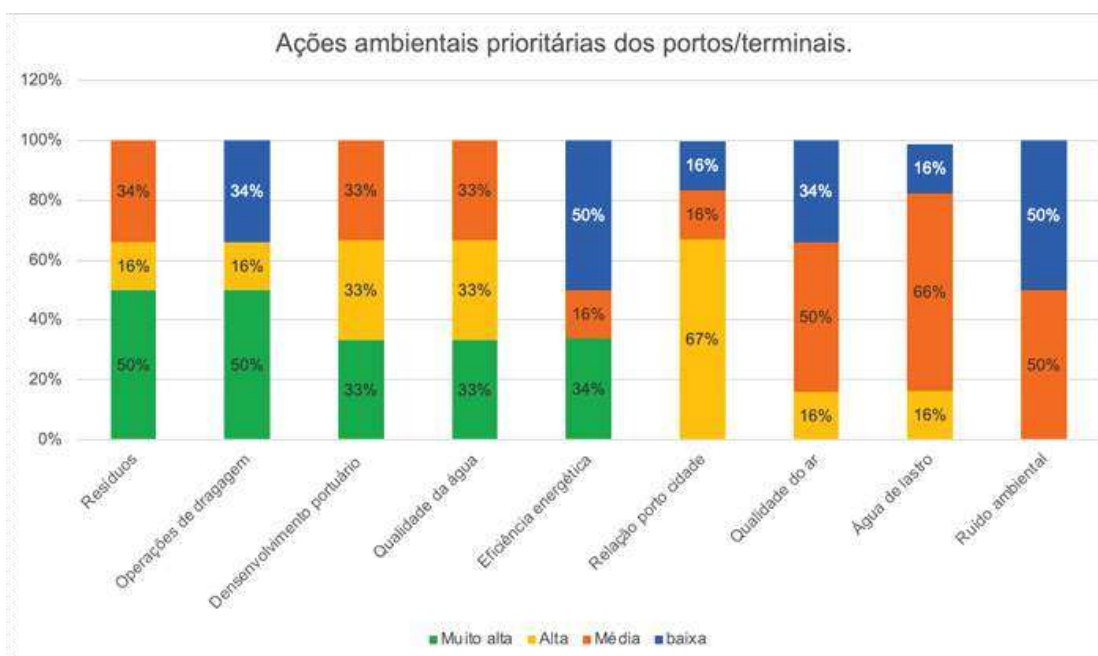
Em relação às metas específicas para a implementação do ODS 14, apenas um respondente afirmou ter metas definidas, que estão incorporadas ao Planejamento Estratégico 2021-2025 e à Agenda Ambiental 2021-2023. Nesta agenda, foram estabelecidas duas metas específicas relacionadas ao ODS 14: a atualização do Plano de Emergência Individual (PEI) para o Porto Organizado, em alinhamento com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) até 2022, e a promoção de iniciativas de apoio à proteção das águas e parcerias para engajamento na Década do Oceano até 2023. Adicionalmente, um respondente mencionou um prazo de cinco a dez anos para a implementação das metas, apesar de indicar a ausência de metas claras relacionadas ao ODS 14. Isso sugere que o respondente pode estar em processo de desenvolvimento de metas específicas para o ODS. A única resposta que mencionou a existência de metas específicas para o ODS indicou um nível de implementação de 80%, projetando seu alcance dentro de um período de cinco anos.

Como sugere Virto (2018), para uma implementação mais eficaz do ODS 14, é necessária a adoção de metas SMART (Específicas, Mensuráveis, Atingíveis, Relevantes e com Prazo Definido). O estudo observa que isso não está ocorrendo para pelo menos 5 das 10 metas do ODS 14 (metas 14.1, 14.2, 14.3, 14.7 e 14.b), que não possuem um cronograma de implementação, nem especificam os níveis a serem alcançados. Um ponto importante em relação às metas e indicadores do ODS 14 é que, embora sejam globais, os países precisam adaptá-los ao nível local/regional. Em relação às ações prioritárias para o porto/terminal, a pesquisa listou nove itens, solicitando aos participantes que identificassem suas prioridades em uma escala de "muito alta" a

"baixa". Nesse sentido, as ações de gestão de resíduos foram consideradas de alta importância. Metade dos respondentes (50%) atribuiu a essas ações uma classificação de "muito alta", enquanto 16% as consideraram de "alta" prioridade e 34% as avaliaram como "média" prioridade. As operações de dragagem também foram destacadas, com 50% dos respondentes classificando-as como prioridade "muito alta", 16% como "alta" e 34% como "baixa". Por outro lado, as iniciativas relacionadas ao ruído ambiental receberam as avaliações mais baixas, com uma distribuição equilibrada entre as classificações "média" (50%) e "baixa" (50%).

A ênfase na gestão de resíduos como uma ação prioritária está alinhada com as observações de Zulfiqar e Butt (2021), que apontam que a gestão eficaz de resíduos contribui diretamente para os ODS 6 e 11. Vale ressaltar que, além de contribuir diretamente para os ODS 6 e 11, as práticas de gestão de resíduos estão intrinsecamente ligadas à preservação de ecossistemas costeiros, conservação de espécies e prevenção da poluição dos oceanos, alinhando-se com pelo menos três metas do ODS 14, especificamente as metas 14.1, 14.2 e 14.5.

Figura 3 - Ações ambientais prioritárias para os portos e terminais

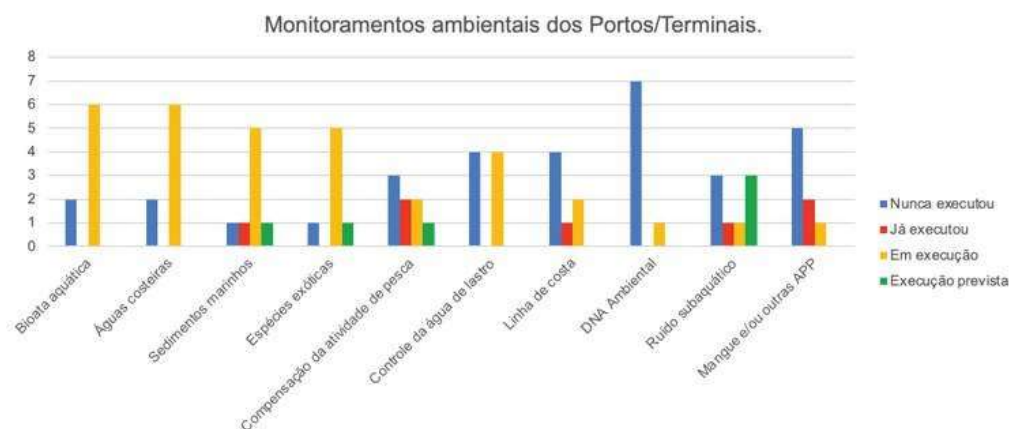


Apesar de a maioria dos respondentes indicar a implementação de medidas para mitigar os impactos da dragagem, os dados revelam uma discrepância em relação ao monitoramento de ruído subaquático: apenas um respondente confirmou realizar esse monitoramento, enquanto outro relatou ter feito anteriormente. Três participantes declararam nunca ter realizado o monitoramento de ruído subaquático, e outros três indicaram que a execução está planejada.

É importante enfatizar que o ruído subaquático, gerado tanto por atividades de dragagem quanto pelo tráfego marítimo, tem um impacto considerável na comunidade biológica marinha, especialmente em regiões portuárias habitadas por cetáceos. Esses impactos incluem mudanças comportamentais, interrupções na comunicação e alterações nas rotas migratórias dessas espécies (Cruz, 2012; Boas, 2015). Da mesma forma, estudos como o de Maroja et al. (2023) destacam que o aumento do ruído subaquático afeta a comunidade de peixes, alterando seus padrões de movimentação.

Quanto ao escopo do monitoramento ambiental, seja já executado, em andamento, planejado ou nunca realizado, a pesquisa abordou dez tipos diferentes de monitoramento. Observou-se que todos estão sendo conduzidos por pelo menos um porto ou terminal portuário. Os monitoramentos que registram a maior frequência de execução entre os portos incluem biota aquática, qualidade da água, qualidade dos sedimentos marinhos e monitoramento de espécies exóticas. Apenas um porto ou terminal relatou realizar monitoramento de Ruído Subaquático, bem como de DNA Ambiental (DNA Barcoding) e de manguezais ou outras Áreas de Preservação Permanente (APPs). Em relação ao DNA ambiental, 87,5% dos respondentes indicaram nunca ter realizado esse tipo de monitoramento, apontando para um potencial área de expansão e desenvolvimento nas práticas de monitoramento ambiental portuário (Figura 4).

Os dados coletados neste estudo indicam que os principais impactos ambientais marinhos estão incorporados aos programas ambientais existentes dentro dos planos de gestão ambiental dos portos. Essa inclusão está alinhada com os requisitos regulatórios impostos pelos órgãos licenciadores ambientais. No entanto, é importante enfatizar que, apesar da obrigatoriedade desses programas nas licenças ambientais, há espaço para a implementação de metodologias atualizadas que poderiam aprimorar os resultados e melhorar a qualidade dos dados coletados. Um exemplo pertinente é o uso de DNA Ambiental, que, nesta pesquisa, foi relatado como utilizado por apenas um dos respondentes.

Figura 4 - Monitoramento ambientais executados pelos portos/terminal.

O DNA Ambiental é a identificação molecular de espécies por meio de sequenciamento de DNA, oferecendo vantagens significativas em termos de qualidade, quantidade e rapidez na obtenção de informações ambientais. Diferente dos métodos tradicionais de coleta e identificação de espécies, essa técnica não requer amplo conhecimento taxonômico e é menos dependente de condições morfológicas e ciclos de vida (Xiao et al., 2022). No entanto, a eficácia da técnica depende da existência de um banco de dados de DNA de referência, cuja criação poderia beneficiar outros setores da sociedade, como instituições acadêmicas e órgãos reguladores. No contexto do ODS 14 para o setor portuário, a integração dessa metodologia com outras práticas existentes poderia contribuir significativamente para a formulação de políticas públicas locais voltadas para a conservação de espécies e a identificação rápida de impactos ambientais. Em relação à preservação da zona costeira, especialmente Áreas de Preservação Permanente (APPs), 50% dos respondentes relataram a existência de ações específicas para esse fim. Comparativamente, as ações existentes parecem estar integradas a programas mais amplos que não estão necessariamente ligados a um programa de monitoramento específico. A ausência de ações especificamente voltadas para a proteção das APPs, como manguezais, e a falta de monitoramento da linha costeira são destacadas como oportunidades de melhoria.

Os manguezais são ecossistemas cruciais para a proteção costeira, sequestro de carbono e suporte à biodiversidade marinha (Souza et al., 2018). Diversos estudos, como o de Barbier et al. (2011), reconhecem amplamente sua importância. No Brasil, que abriga aproximadamente 7% dos manguezais do mundo (FAO, 2007), esses ecossistemas são submonitorados, apesar de sua significativa importância ecológica e socioeconômica. O monitoramento dos ecossistemas costeiros é essencial para uma

gestão ambiental eficaz, especialmente em áreas vulneráveis a impactos naturais e antropogênicos, como mudanças no nível do mar e poluição (Schmidt e Gomes, 2016).

Em relação à redução da poluição marinha e ao impacto das operações portuárias na vida marinha local, as respostas variaram entre educação ambiental para tripulações, monitoramento das operações de abastecimento, gestão de resíduos e investimentos tecnológicos. A educação ambiental foi apontada como uma medida relevante tanto para públicos internos quanto externos, envolvendo parcerias com instituições acadêmicas e programas de resgate de fauna marinha. No contexto da pesca sustentável, os portos relataram iniciativas para engajar as comunidades pesqueiras e monitorar as atividades de pesca, visando apoiar a pesca artesanal, uma prática tradicional de significativa importância socioeconômica (Castro e Almeida, 2012; Lopes, 2013).

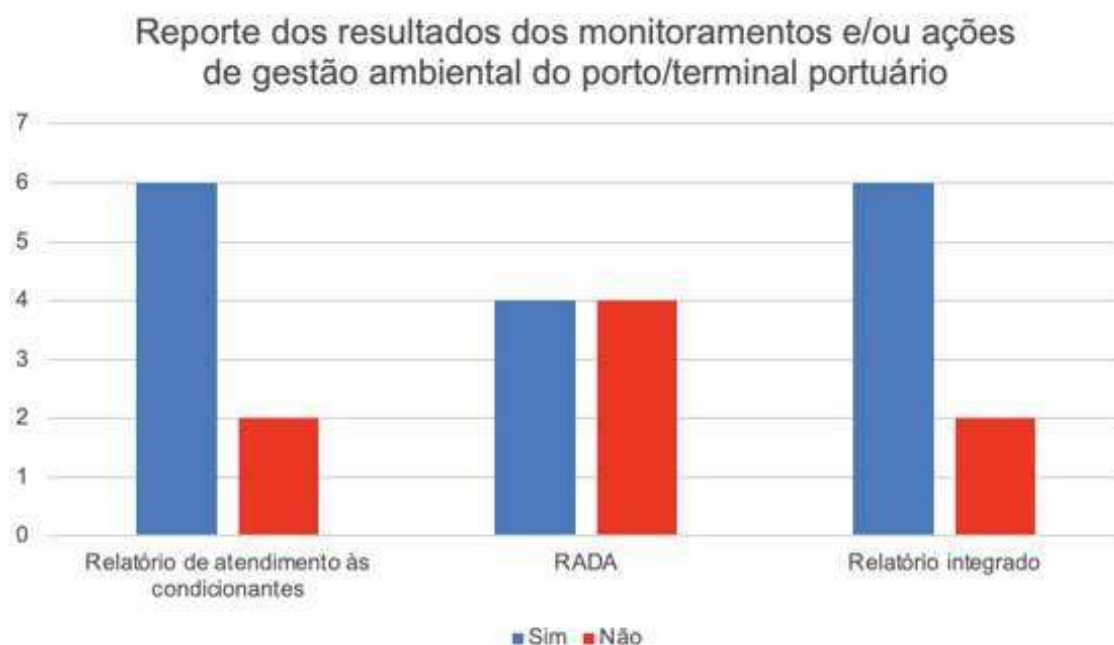
A gestão da água de lastro também foi abordada, com um respondente relatando a implementação de controles adicionais, alinhados às normas da Marinha do Brasil (NORMAM-20). A importância de verificar as informações fornecidas pelos navios é destacada por Pereira et al. (2014), que identificaram fragilidades nos relatórios de água de lastro na Baía do Amazonas.

Por fim, a questão dos relatórios ambientais revelou que a maioria dos portos utiliza Relatórios de Conformidade e Relatórios Integrados, com 50% produzindo um Relatório de Desempenho Ambiental. A variação nos métodos de relatório e integração com novas tecnologias são aspectos importantes para a eficiência e transparência das operações portuárias (Mohd Salleh et al., 2021). Os resultados indicam uma heterogeneidade no nível de adoção de novas tecnologias nos portos brasileiros (Cunha et al., 2023b), sugerindo que a implementação de sistemas informatizados para gestão ambiental pode proporcionar uma análise mais eficiente dos dados e facilitar a tomada de decisões.

Na pesquisa realizada, ao serem questionados sobre a implementação de programas ou ações ambientais que vão além das obrigações estipuladas pela licença de operação, sete dos oito respondentes declararam a execução de pelo menos uma iniciativa ambiental não obrigatória. Essas ações incluem: projetos socioambientais voltados para o empoderamento da comunidade local por meio de cursos e treinamentos; monitoramento do ruído ambiental gerado pelas operações portuárias e nas proximidades do empreendimento; implementação de programas de educação ambiental; oferta de descontos tarifários através do Índice de Eficiência e Sustentabilidade Portuária para terminais que demonstrem iniciativas eficazes relacionadas à redução de emissões de gases de efeito estufa e à diversificação da matriz energética; patrocínio de projetos socioambientais; adesão ao Pacto Global da ONU, incluindo participação ativa em suas

plataformas e grupos de trabalho; programas voltados para o resgate e reabilitação da fauna marinha; e gestão aprimorada de produtos químicos.

Figura 5 - Modalidade de reporte dos monitoramentos e/ou ações executados pelos portos/terminal.



Essas ações refletem um compromisso proativo dos portos e terminais em adotar práticas ambientais que excedem os requisitos legais, demonstrando uma abordagem integrada e responsável em relação ao meio ambiente e à sustentabilidade. A inclusão de tais programas e iniciativas indica uma perspectiva mais abrangente de gestão ambiental, onde aspectos socioambientais e econômicos são considerados de forma equilibrada, alinhando-se aos princípios do desenvolvimento sustentável.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo identificar e analisar as estratégias empregadas na adoção e implementação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com ênfase específica no ODS 14 (Vida na Água), no contexto do setor portuário brasileiro. Os resultados da pesquisa revelaram que as ações atuais estão alinhadas com práticas de sustentabilidade consideradas eficazes em portos, relacionadas diretamente a três metas específicas do ODS 14: 14.1, 14.2 e 14.5. Essas ações variam desde a obtenção da certificação ISO 14001 até o monitoramento efetivo da vida aquática, qualidade da água

e sedimentos, além da gestão de resíduos e implementação de programas de educação ambiental.

No entanto, o estudo destacou a necessidade de melhorias no monitoramento ambiental, sugerindo a adoção de metodologias inovadoras, como o DNA barcoding, e o aprimoramento do monitoramento de ruído subaquático. A atenção à conservação das áreas de proteção permanente (APPs), especialmente os manguezais, também surgiu como um aspecto crítico devido à sua importância ecológica e socioeconômica.

Entre os desafios identificados, destaca-se a participação limitada das autoridades responsáveis pelo licenciamento ambiental na gestão e nas iniciativas de sustentabilidade dos portos e terminais. Além disso, foi reconhecida a necessidade de aprimorar o treinamento de gestores e operadores, bem como de aumentar a participação dos portos e terminais em comitês e grupos técnicos especializados. Outro desafio significativo é a ausência de metas claras e específicas para o alcance dos ODS, assim como a integração dessas metas nas políticas ambientais dos portos e terminais. Enfatiza-se a importância de continuar a melhorar os sistemas de gestão da qualidade portuária, incorporando os princípios da Gestão da Qualidade Total e as inovações da Indústria 4.0.

Uma limitação notável deste estudo reside na baixa adesão dos portos elegíveis à pesquisa. Apesar disso, a estratégia de distribuição do questionário mostrou-se eficaz, proporcionando uma coleta de dados adequada para as análises realizadas.

Este estudo alcançou seu objetivo de avaliar as iniciativas e desafios relacionados ao ODS 14 no setor portuário. No entanto, ressalta a necessidade de investigações futuras focadas nos pontos críticos identificados, especialmente em relação aos programas de monitoramento da vida aquática, conservação da linha costeira e proteção de áreas de manguezal.

REFERÊNCIAS

ANTAQ. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. (2023). *IDA – Índice de Desempenho Ambiental*. [http://web. antaq.gov.br/ResultadosIda/](http://web.antaq.gov.br/ResultadosIda/)

Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169–193. <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>

Boas, L. B. V. (2015). *Influência do ruído sonoro subaquático na variação dos assobios do boto-cinza, Sotalia guianensi* <https://www.bdtu.uerj.br:8443/handle/1/13896>

Caliskan, A. (2022). Seaports participation in enhancing the sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134715>

Castro, S. M. de, & Almeida, J. R. de. (2012). Dragagem e conflitos ambientais em portos clássicos e modernos: uma revisão. *Sociedade & Natureza*, 24, 519–533. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132012000300011>

Cruz, E. M. (2012). *Caracterização do ruído subaquático produzido pelo tráfego marítimo no Estuário do Sado e potenciais impactos sobre a população residente de Tursiops truncatus (Montagu, 1821)* [master's thesis]. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/6609>

Cunha, D. R., Cutrim, S. S., Porte, M. de S., & Diniz, N. V. (2023b). Innovations and smart technologies at Brazilian ports. *Revista de Gestão e Secretariado*, 14(5), 7373–7390. <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i5.2127>

Cunha, D. R., Pereira, N. N., Porte, M. de S., & Campos, C. R. (2023a). Sustainability practices for SDGs: a study of Brazilian ports. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03126-y>

ESPO. European Sea Ports Organisation. (2022). *ESPO – Environmental Report 2022*. [https://www.espo.be/media/ESP-2959%20\(Sustainability%20Report%202022\)_V8.pdf](https://www.espo.be/media/ESP-2959%20(Sustainability%20Report%202022)_V8.pdf)

FAO. Food and Agriculture Organization. (2007). *The world's mangroves 1980-2005*. <https://www.fao.org/4/a1427e/a1427e00.pdf>

Hossain, T., Adams, M., & Walker, T. R. (2019). Sustainability initiatives in Canadian ports. *Marine Policy*, 106, 103519. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103519>

Hossain, T., Adams, M., & Walker, T. R. (2021). Role of sustainability in global seaports. *Ocean & Coastal Management*, 202, 105435. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105435>

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. (2006). *Instrução Normativa 141, de 19 de dezembro de 2006*. <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=112966>

IMO. International Maritime Organization. (2017). *IMO and sustainable development: How international shipping and the maritime community contribute to sustainable development*.

Kronfeld-Goharani, U. (2018). Maritime economy: Insights on corporate visions and strategies towards sustainability. *Ocean & Coastal Management*, 165, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.08.010>

Lee, K.-H., Noh, J., & Khim, J. S. (2020). The Blue Economy and the United Nations' sustainable development goals: Challenges and opportunities. *Environment International*, 137, 105528. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105528>

Lillebø, A. I., Pita, C., Garcia Rodrigues, J., Ramos, S., & Villasante, S. (2017). How can marine ecosystem services support the Blue Growth agenda? *Marine Policy*, 81, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.03.008>

Lopes, A. P. (2013). *Territorialidades em conflitos na Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro, Brasil: estudo de caso dos conflitos entre os pescadores artesanais e o porto da Companhia Siderúrgica do Atlântico (ThyssenKrupp CSA)* [master's thesis]. Universidade de São Paulo.

Maroja, A. de M., Silva, T. M. da Garavelli, S. L., & Zara, L. F. (2023). Reação da ictiofauna da região amazônica a diferentes impulsos sonoros: Reaction of ichthyofauna in the amazon region to different sound impulses. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(3), 2538–2549. <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n3-046>

Mohd Salleh, N. H., Selvaduray, M., Jeevan, J., Ngah, A. H., & Zailani, S. (2021). Adaptation of Industrial Revolution 4.0 in a Seaport System. *Sustainability*, 13(19), 10667. <https://doi.org/10.3390/su131910667>

Oh, H., Lee, S.-W., & Seo, Y.J. (2018). The evaluation of seaport sustainability: The case of South Korea. *Ocean & Coastal Management*, 161, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.04.028>

Pereira, N. N., Botter, R. C., Folena, R. D., Pereira, J. P. F. N., & Cunha, A. C. D. A. (2014). Ballast water: A threat to the Amazon Basin. *Marine Pollution Bulletin*, 84(1), 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.053> Roma, J. C. (2019). Os objetivos de desenvolvimento do milênio e sua transição para os objetivos de desenvolvimento sustentável. *Ciência e Cultura*, 71(1), 33–39. <https://doi.org/10.21800/2317-66602019000100011>

Santos, T., Beirão, A. P., Araújo Filho, M. C., & Carvalho, A. B. (2022). Economia Azul: vetor para o desenvolvimento do Brasil. *Marinha do Brasil*. <https://repositorio.esg.br/handle/123456789/1544>

Schmidt, A. J., & Gomes, T. P. (2016). Diagnóstico de pesquisas realizadas em unidades de conservação: Subsídio ao programa de monitoramento da biodiversidade de manguezais. *Biodiversidade Brasileira*, 6(1), 61–74.

Souza, C. A., Duarte, L. F. A., João, M. C. A., & Pinheiro, M. A. A. (2018). Biodiversidade e conservação dos manguezais: importância bioecológica e econômica.

In M. A. A. Pinheiro & A. C. B. Talamoni (Eds.), ***Educação Ambiental sobre Manguezais***. São Vicente: UNESP, Instituto de Biociências, Câmpus do Litoral Paulista.

United Nations. (2015). *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>

Virto, L. R. (2018). A preliminary assessment of the indicators for Sustainable Development Goal (SDG) 14 “Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources for sustainable development”. ***Marine Policy***, 98, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.08.036>

Wang, X., Yuen, K. F., Wong, Y. D., & Li, K. X. (2020). How can the maritime industry meet Sustainable Development Goals? An analysis of sustainability reports from the social entrepreneurship perspective. ***Transportation Research Part D: Transport and Environment***, 78, 102173. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.002>.

Xiao, Y., Li, C., Wang, T., Lin, L., Guo, J., Quan, Q., & Liu, Y. (2022). DNA Barcoding Revealing the Parrotfish (Perciformes: Scaridae). Diversity of the Coral Reef Ecosystem of the South China Sea. ***Sustainability***, 14(22), 15386. <https://doi.org/10.3390/su142215386>

Zulfiqar, K., & Butt, M. J. (2021). Preserving community’s environmental interests in a meta-ocean governance framework towards Sustainable Development Goal 14: A mechanism of promoting coordination between institutions responsible for curbing marine pollution. ***Sustainability***, 13(17), 9983. <https://doi.org/10.3390/su13179983>.

Capítulo 06

GESTÃO DO CARBONO NA AGRICULTURA BRASILEIRA: A ERA DO SENSORIAMENTO REMOTO E BIG DATA

Gustavo André de Araújo Santos

DOI: 10.29327/5850749.1-6

view online: [https://publicacoes.even3.com.br/book/
mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495](https://publicacoes.even3.com.br/book/mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495)

Gestão do Carbono na Agricultura Brasileira: A Era do Sensoriamento Remoto e Big Data

Gustavo André de Araújo Santos

Resumo

Este capítulo analisa a gestão do carbono na agricultura brasileira no cenário das alterações climáticas globais, baseando-se no registro de aumento de 0,85 °C na temperatura média da Terra e na elevação de 40% nas taxas de dióxido de carbono desde o período industrial, fatores resultantes da queima de combustíveis fósseis e do desmatamento. A obra tem como propósito realizar um levantamento técnico acerca do uso de Big Data e do sensoriamento remoto para o monitoramento dos processos de retroalimentação do carbono, apontando repositórios de dados abertos que colaborem para a redução de impactos na produção agrícola. A discussão contextualiza a importância do Brasil como líder no agronegócio, setor que compõe cerca de 24% do PIB nacional, mas que responde por 70% das emissões de gases de efeito estufa no país, sofrendo ameaças de retração produtiva por conta do estresse térmico. No aspecto técnico, ressalta-se o avanço proporcionado por satélites como o OCO-2 na análise da Fluorescência Induzida pela Luz Solar, variável que viabiliza o acompanhamento direto da produtividade vegetal e supera os índices tradicionais de biomassa. Por fim, nota-se que a convergência de grandes volumes de dados climáticos, previstos para atingir 350 Petabytes até o fim desta década, aliada à exploração de plataformas como MapBiomas e INPE, torna-se indispensável para consolidar uma agricultura de baixa emissão e garantir a sobrevivência do setor frente aos novos desafios do clima.

1. INTRODUÇÃO

A temperatura média do planeta aumentou cerca de 0,85 °C entre 1880 e 2012. O aumento de temperatura observado nas últimas décadas é principalmente devido ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Diffenbaugh et al., 2015; Medhaug et al., 2017). As concentrações de dióxido de carbono (CO₂) aumentaram cerca de 40% desde o início da era industrial. Este aumento exponencial nas emissões de CO₂ deve-se à queima de combustíveis fósseis, desmatamento e mudança no uso da terra (Le Quéré et al., 2015; Schimel et al., 2015). Diante dessa perspectiva, inúmeros estudos têm procurado prospectar as respostas de diferentes regiões do planeta em cenários relacionados ao sistema climático (da Silva Junior et al., 2020; Parazoo et al., 2016; Silva Junior et al., 2020).

O sistema solo-planta-atmosfera está diretamente relacionado a esses cenários, uma vez que os ciclos biogeoquímicos dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa passam pelo solo, plantas e atmosfera, com atenção especial ao carbono e nitrogênio (Finzi et al., 2011). Além disso, a água também faz parte de seu ciclo no solo, tornando-o um sistema fechado, completo e complexo (Seneviratne, 2010). Assim, pesquisadores uniram forças para tentar entender como as mudanças climáticas podem afetar o ecossistema, buscando alternativas que mitiguem seus efeitos, especialmente na agricultura (Araújo Santos et al., 2019; La Scala Jr. et al., 2000; Silva et al., 2019; Xavier et al., 2020).

É importante ressaltar que o carbono desempenha um papel crucial no fornecimento de energia no sistema solo-planta-atmosfera ao longo de seu ciclo (Stuart Chapin et al., 2012). Uma série de mecanismos de *feedback* neste ciclo são responsáveis pela resposta do carbono ao aumento da temperatura do planeta (NCR, 2003). Há evidências de que os *feedbacks* de carbono são sensíveis à temperatura, ao ciclo hidrológico e à mudança no uso da terra (Goodwin et al., 2019; Williams et al., 2019). No entanto, essas sensibilidades ainda são incertas devido a incertezas relacionadas a outros fatores que também influenciam o ciclo do carbono, como a disponibilidade de nutrientes (por exemplo, nitrogênio) (Goodwin, 2019). Além disso, a disponibilidade de dados para estudos significativos aparece como um fator limitante.

Em contraste, uma quantidade massiva de dados relacionados ao ciclo do carbono foi disponibilizada nas últimas décadas com o desenvolvimento de tecnologias voltadas para a observação da Terra, principalmente o sensoriamento remoto via satélites (Chi et al., 2016; Xu et al., 2020), sendo possível aplicá-los em diversas áreas da ciência (da Costa et al., 2022; da Silva Junior et al., 2020; Rossi e Santos, 2020; Silva Junior et al., 2020; Taylor et al., 2021). A alta geração de dados nas mais diversas áreas do conhecimento tem

sido denominada era do big data (Chen et al., 2014). Esta expressão está relacionada ao volume, velocidade e variedade de informações produzidas por diferentes fontes em um curto espaço de tempo (Lioutas, 2020). A grande quantidade de dados atualmente gerada só é possível devido ao surgimento de tecnologias como dispositivos móveis, redes sociais, satélites, sensores portáteis, estações meteorológicas e aplicações de modelos para dados estimados (Kamilaris et al., 2017; Majumdar et al., 2017).

Os avanços na geração de dados contribuíram para descobertas inovadoras em diversas áreas do conhecimento na ciência do clima; por exemplo, a variedade e quantidade de dados têm estado disponíveis de uma forma nunca vista antes (Shannon, 2019). Além disso, espera-se que a ciência do clima seja uma das maiores fontes de dados para pesquisas baseadas em dados (Faghmous e Kumar, 2014). De acordo com esses autores, os dados climáticos disponíveis atingiram o volume de 10 Petabytes (1 PB = 1.000 TB) em 2010. Esse número tende a aumentar exponencialmente para cerca de 350 Petabytes até 2030. Por exemplo, a National Aeronautics and Space Administration (NASA) é considerada uma das instituições mais importantes na geração de dados, sendo capaz de gerar 12,1 TB de dados diariamente por meio de suas missões ativas ao redor da Terra e no espaço. Além disso, a NASA espera que algumas de suas missões possam gerar até 24 TB por dia com os avanços no desenvolvimento de sensores orbitais (Shannon, 2019).

Nesta perspectiva, a NASA lançou em 2014 o Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) (Eldering et al., 2017a; Eldering et al., 2017b). A NASA apresentou ao mundo uma importante ferramenta com o lançamento do satélite OCO-2 para entender processos essenciais que atuam na absorção e emissão de CO₂. No entanto, o OCO-2 não foi o primeiro satélite lançado para medir o CO₂ atmosférico. Muito antes disso, tivemos outros exemplos como o SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY da Agência Espacial Europeia (SCIAMACHY–ESA), lançado para realizar monitoramento semelhante, mas esta missão foi encerrada em 2012 (Pan et al., 2021). A NASA lançou o AURA em julho de 2004 com o Tropospheric Emissions Spectrometer (TES), com melhor resolução espacial que o AIRS e o SCIAMACHY. O Greenhouse Gas Observing Satellite (GOSAT) foi lançado em janeiro de 2009 pela Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA) para detectar CO₂ e CH₄ (Frankenberg et al., 2011; Yokota et al., 2009).

Contudo, o OCO-2 foi o primeiro a fornecer a alta precisão, resolução e cobertura

necessárias para observar fontes e sumidouros regionais de carbono, o que se deve à sua capacidade de realizar cerca de 16 milhões de medições a cada ciclo com trilhas orbitais separadas por menos de 1,5 graus de longitude no Equador (Eldering et al., 2017a; Eldering et al., 2017b; Schwandner et al., 2017).

Duas das variáveis mais importantes medidas pelo OCO-2 são as frações molares de CO₂ em ar seco na coluna atmosférica (XCO₂) e a fluorescência induzida pela luz solar (SIF). XCO₂ é a concentração média de CO₂ em uma coluna que vai da superfície da Terra até o topo da atmosfera (Crisp et al., 2012). A SIF é considerada a variável mais moderna na análise da vegetação via sensoriamento remoto, pois está diretamente relacionada ao mecanismo interno da fotossíntese (Xiao et al., 2019). Nesse sentido, a SIF se destaca por indicar a vegetação fotossinteticamente ativa, ao contrário de outros indicadores de plantas mais tradicionais, como o NDVI, que detecta apenas a presença de folhas verdes (Mohammed et al., 2019).

A compreensão da dinâmica do carbono por meio do sensoriamento remoto, utilizando vários sensores e dados do OCO-2, tem sido ampla em todo o mundo (Gao et al., 2020; He et al., 2020). Siabi et al. (2019) observaram no Irã que as coberturas do solo e da vegetação desempenham papéis essenciais na distribuição espacial do CO₂ e na descoberta de fontes e sumidouros de dióxido de carbono. Chhabra e Gohel (2019) observaram na Índia a importância da vegetação e dos diferentes tipos de cobertura do solo no controle das concentrações atmosféricas de CO₂.

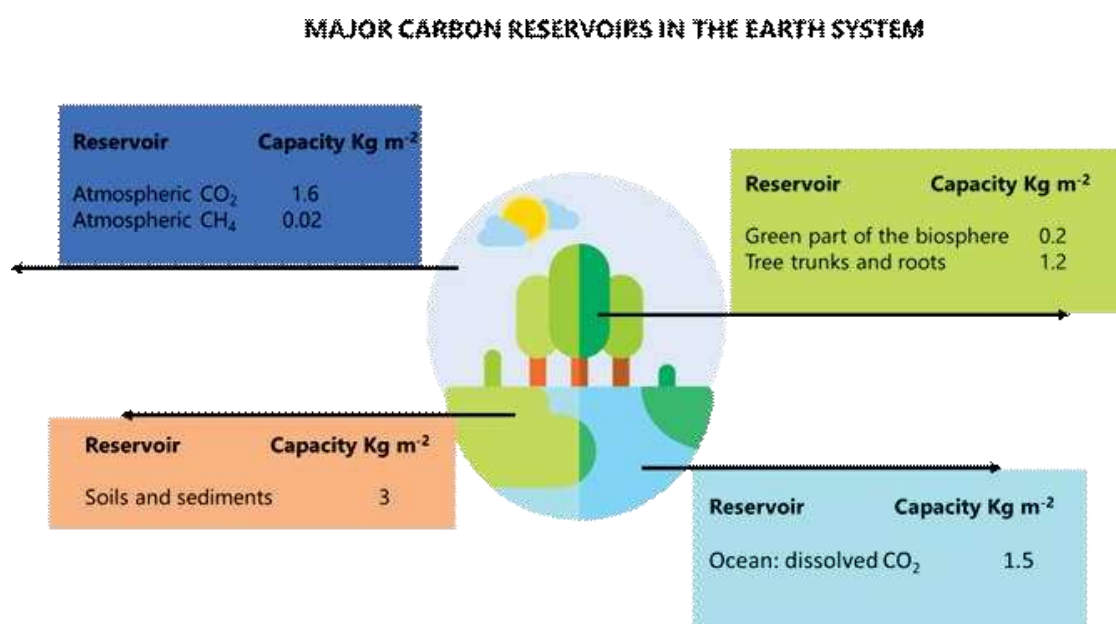
Embora o Brasil seja uma parte fundamental do ciclo global do carbono, o uso de dados do OCO-2 associados a outras fontes de dados é subexplorado. Portanto, este trabalho é uma revisão abrangente do estado da arte do conhecimento sobre os principais avanços no uso de big data e sensoriamento remoto para obter *feedbacks* de carbono. Revisamos materiais e fontes chave para a obtenção de dados de acesso aberto relacionados ao ciclo do carbono que poderiam ser utilizados para o avanço da agricultura de carbono zero no Brasil.

- CICLO DO CARBONO

O carbono corresponde a cerca de 50% do peso seco dos seres vivos, constituindo um dos elementos mais críticos para a vida terrestre devido à sua essencialidade (Ussiri e Lal, 2017). O carbono é responsável pelo fluxo de energia em vários sistemas, como ecossistemas, e sistemas humanos e industriais (Andrén e Kätterer, 2009). Isso só é possível graças à capacidade das plantas de transformar a energia solar em energia química (Ryu et al., 2019).

Um fato importante é que o carbono é um elemento extremamente dinâmico devido à série de processos (biológicos, químicos e físicos) por trás de sua absorção (Stuart Chapin et al., 2012). Nesse sentido, o carbono pode ser armazenado na biosfera, sendo seus principais reservatórios a atmosfera, oceanos, solos, vegetação e litosfera (Lal, 2004; Schimel, 1995). É importante ressaltar que a capacidade de cada reservatório e o tempo de residência variam entre eles (Figura 1) (Wallace e Hobbs, 2006).

Figura 1 - Principais reservatórios de carbono no sistema terrestre e suas capacidades atuais em kg m^{-2} unidades.

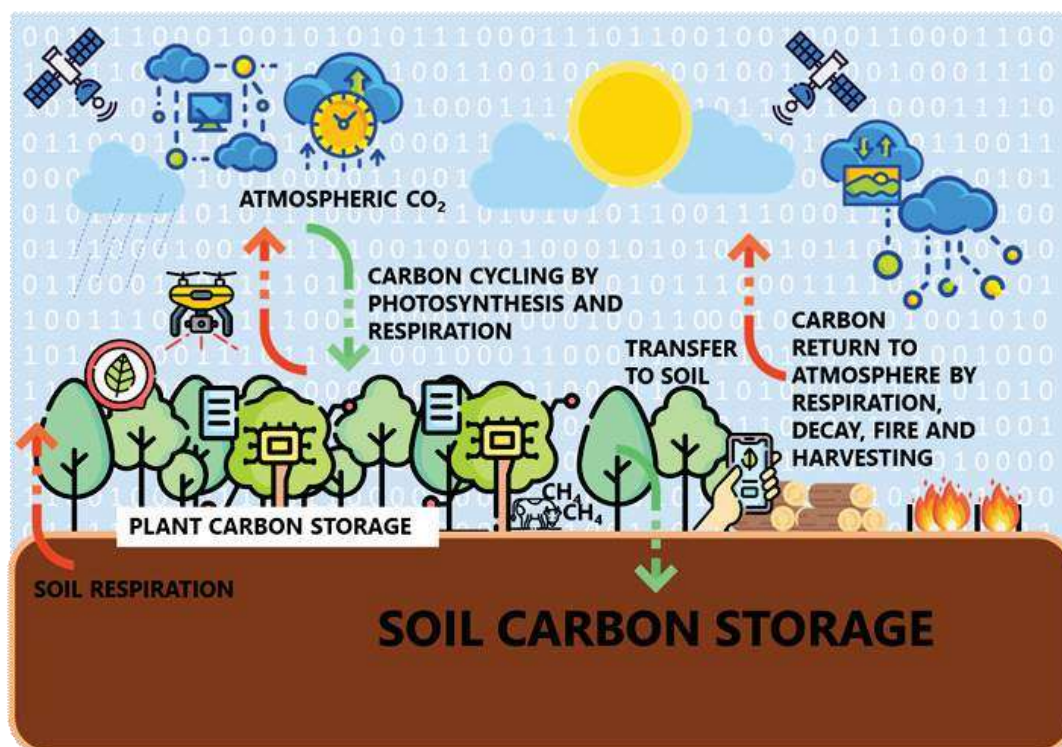


Assumindo a Terra como um sistema, os componentes mencionados desempenham o papel de sumidouros de carbono porque são responsáveis por armazenar quantidades significativas de carbono. Qualquer movimento de carbono entre os reservatórios é denominado fluxo de carbono (Madani et al., 2017; Piao et al., 2020; Qiu et al., 2020). Assim, em sistemas integrados, os fluxos unem os reservatórios, criando ciclos e feedbacks de carbono.

Um ciclo de carbono é caracterizado pelo uso do carbono presente na atmosfera para a fotossíntese (Figura 2). Neste ciclo, as plantas transformam a energia solar em energia química e moléculas de carbono orgânico, que fornecem os mecanismos bioquímicos subjacentes à evolução e ao uso da energia ambiental, um atributo essencial da vida (Stuart Chapin et al, 2012; Ussiri e Lal, 2017). Em escala global, esse processo é responsável pela transferência de quantidades significativas de carbono entre a

atmosfera e as plantas (Frankenberg et al., 2016; Ryu et al., 2019). As plantas completam seu ciclo de vida ao longo dos anos e o carbono pode retornar à atmosfera no processo de decomposição.

Figura 2 - Um subciclo dentro do ciclo do carbono terrestre na era do big data.



A energia fixada por meio da fotossíntese é responsável pelo crescimento das plantas, que posteriormente serão consumidas por animais e microrganismos (Andrén e Kätterer, 2009). Por essa razão, o carbono constitui metade da matéria orgânica presente na Terra (Ussiri e Lal, 2017). No entanto, a fotossíntese pode ser limitada por fatores de controle, que também podem ser chamados de reagentes da fotossíntese, ou seja, energia da luz solar, CO_2 , temperatura e disponibilidade de nitrogênio. Cada um deles desempenha um papel essencial para que a fotossíntese ocorra. O nitrogênio, por exemplo, é responsável pela produção de enzimas fotossintéticas (Stuart Chapin et al., 2012).

A respiração é outro processo importante dentro do ciclo do carbono (Araújo Santos et al., 2020; Schimel, 1995). Em plantas e outros organismos, é a cadeia responsável por retornar o carbono à atmosfera (Gonsamo e Chen, 2017). No entanto, ela ocorre quando as células vegetais utilizam açúcares (carboidratos) resultantes do processo fotossintético para obter energia.

Estima-se que pelo menos metade do carbono absorvido pelas plantas retorne à atmosfera. A respiração do solo ocorre por meio da decomposição da matéria orgânica por microrganismos. Vários estudos apontaram a umidade e a temperatura do solo como fatores de controle importantes (Araújo Santos et al., 2019; Silva et al., 2019; Xavier et al., 2020). Assim, o carbono tem um papel proeminente nos ecossistemas (biosfera), no clima e na sociedade. Neste contexto, compreender os principais fatores responsáveis pela regulação do ciclo do carbono e as trocas entre a biosfera e a atmosfera é de suma importância.

- FEEDBACKS CLIMÁTICOS DE CARBONO

Um feedback é considerado quando as saídas de um sistema são conduzidas de volta como elos em uma cadeia de causa e efeito (Goodwin et al., 2019). Portanto, é um sistema capaz de se autorreciclar. No campo do conhecimento das mudanças climáticas, o feedback é essencial para a compreensão do aquecimento global (Sellers et al., 2018; Williams et al., 2019). Essa compreensão está entre as razões para o aumento ou diminuição causados pelos processos de feedback de cada força climática (Fu et al., 2020). Sabendo que feedback é um processo no qual a alteração da quantidade de um elemento em uma cadeia ou ciclo alterará a quantidade de um segundo elemento e essa mudança, por sua vez, alterará o primeiro. Esse feedback pode ser positivo ou negativo; quando positivo, há uma amplificação na mudança na primeira quantidade, de modo que o feedback negativo atua na redução (Quan et al., 2019).

De acordo com o National Research Council (NRC, 2003), o feedback no sistema climático pode amplificar ou amortecer a resposta do sistema, pois há uma mudança nas forças climáticas. Assim, o termo feedback foi sistematizado como interações do sistema climático entre variáveis que caracterizam a superfície da Terra, o oceano e a atmosfera. Esses autores também reforçaram a necessidade de mais esforços de pesquisa para melhor compreender e modelar os processos de feedback climático e melhorar a interpretação dos feedbacks nas mudanças climáticas. Para que isso seja possível, esses esforços não devem ser apenas reforçados no monitoramento de variáveis climáticas tradicionais (precipitação e temperatura), mas também em variáveis que governam os processos de feedback, como precipitação, vento, temperatura, umidade, balanço de radiação no topo da atmosfera e na superfície, distribuição de nuvens, umidade do solo, vegetação terrestre e CO₂ atmosférico.

- MUDANÇAS CLIMÁTICAS: UMA PERSPECTIVA PARA A AGRICULTURA BRASILEIRA

Entre as décadas de 1960 e 1990, os cientistas começaram a compreender o que estava acontecendo com o clima, pois o planeta estava aquecendo. As discussões sobre as mudanças climáticas ganharam destaque desde então. Relatórios climáticos têm sido divulgados desde a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) para auxiliar na compreensão do que está acontecendo com o clima por meio de estimativas e descobertas científicas. A pesquisa nesta área começou a ser impulsionada em todo o mundo após o lançamento do primeiro relatório do IPCC em 1990.

Isso impulsionou o progresso no desenvolvimento de pesquisas focadas na área, permitindo identificar que as emissões de gases de efeito estufa poderiam ser as principais responsáveis por um aumento na temperatura do planeta relacionado ao uso crescente da queima de combustíveis fósseis, desmatamento de florestas e mudança no uso da terra (Bergamaschi et al., 2018; da Silva Junior et al., 2020; Silva Junior et al., 2020; Rossi e Santos, 2020).

O efeito estufa é um processo natural importante para o planeta, pois é responsável por manter a temperatura do planeta estável. O planeta estaria completamente coberto por gelo sem este processo natural (Rodhe, 1990; Schneider, 1988; Schuur et al., 2015; Xu e Cui et al., 2021). O efeito estufa é a combinação de três gases, chamados gases de efeito estufa (GEE), que são dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), além de vapor d'água e fluorcarbonos (Oertel et al., 2016). Esses gases possuem diferentes potenciais de aquecimento e concentrações na atmosfera. CH₄ e N₂O têm um potencial de aquecimento maior que o CO₂. No entanto, 60% dos gases de efeito estufa emitidos na atmosfera correspondem ao CO₂, tornando-o o principal gás responsável pelo potencial aumento do efeito estufa (IPCC, 2014).

Assim, a comunidade científica trata a adição de gases na atmosfera como um "efeito estufa adicional", que intensificaria o efeito estufa natural (Wang et al., 1976). Devido à natureza complexa desse fenômeno, pesquisadores de todo o mundo têm tentado entender como funciona a troca de gases Terra-atmosfera e as principais causas de um aumento na concentração desses gases e suas possíveis fontes nas mais diversas regiões do mundo (Babbar et al., 2021; Frankenberg et al., 2011; Humphrey et al., 2018; Park et al., 2020).

Cada região possui diferentes atividades antropogênicas, quase sempre relacionadas à economia local, como agricultura, indústria, extração e exploração de petróleo. Acredita-se que isso gere diferentes impactos regionalizados (Seneviratne et al., 2016).

A agricultura se destaca no Brasil como uma das principais atividades econômicas, representando 23 a 24% do PIB nacional, e em tempos de crise, foi o setor que mais cresceu em 2017, atingindo 14,5% (MAPA, 2017).

De acordo com o IPCC, a agricultura é responsável por 20% do total das emissões de GEE no mundo. No Brasil, por exemplo, as atividades antropogênicas estão ligadas à agricultura. Cerri et al. (2007) situaram a agricultura brasileira em um cenário onde as emissões de GEE correspondem a 70% do total nacional. A agricultura brasileira é um fenômeno importante a ser compreendido em termos de mudanças climáticas, pois envolve, além da produção agrícola, problemas relacionados à diversidade biológica e climática, já que o Brasil possui dimensões continentais.

Embora a agricultura seja uma atividade antropogênica que desempenha um papel essencial nas emissões de GEE, ela também será uma das atividades mais afetadas pelas mudanças climáticas. Por exemplo, o aumento da temperatura do planeta pode alterar a distribuição espacial e temporal das chuvas, o que pode aumentar os riscos de veranicos durante a estação de crescimento da maioria das culturas (Assad et al., 2008; Moazzam et al., 2020; Ramanathan et al., 2001). Por outro lado, o excesso de chuvas também é uma realidade, o que pode levar à degradação do solo por erosão (Ciampalini et al., 2020; Nearing et al., 2005; Serpa et al., 2015).

No Brasil, a demanda de produção impulsionou a abertura de novas fronteiras agrícolas, o que resultou em desmatamento e mudanças no uso da terra. De acordo com o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, as emissões totais da agricultura aumentaram 37% de 1990 a 2005, o que equivale a 114 megatoneladas de CO₂.

Projeções indicaram que um aumento de 3 °C na temperatura reduzirá a produção de soja no estado de São Paulo em 50%, e um aumento de 5,8 °C é estimado para reduzir sua área plantada em 70% em todo o país. Por outro lado, o milho sofreria menos com esses impactos devido à característica fisiológica das plantas C₄, que permite maior resistência a altas temperaturas. No entanto, um aumento médio de 5,8 °C na temperatura global causaria uma diminuição de 5,1 para 4,4 milhões de km² na área de produção (Assad et al., 2008).

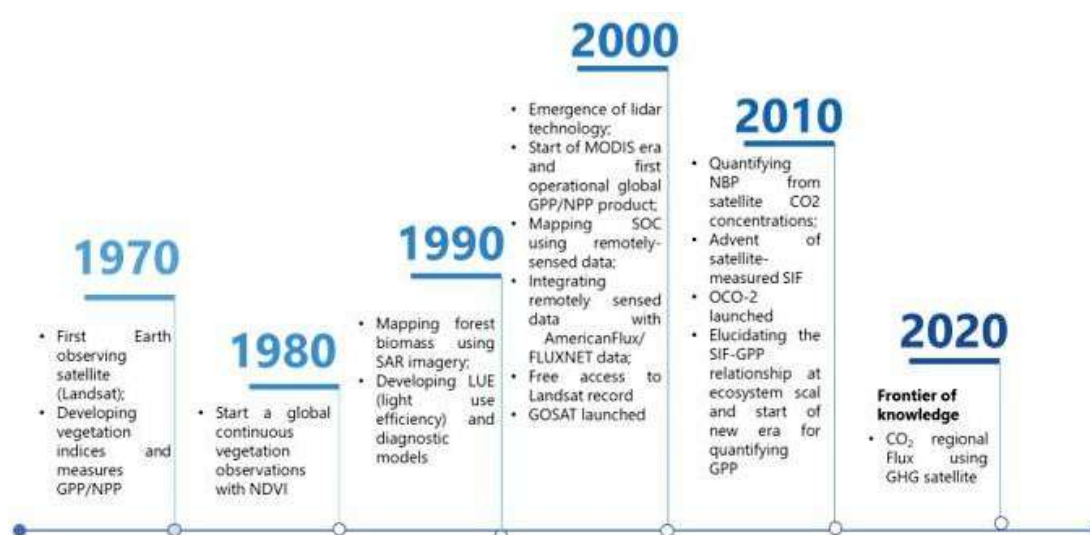
- MEDIÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA A PARTIR DO ESPAÇO

Compreender o ciclo global do carbono é essencial para desenvolver projeções de feedback de carbono. Nesse sentido, o sensoriamento remoto tem desempenhado um papel fundamental nas últimas cinco décadas (Figura 3), devido ao desenvolvimento de

técnicas capazes de quantificar os fluxos e estoques de carbono (Xiao et al., 2019).

O surgimento de observações da superfície da Terra por meio de satélites permitiu o desenvolvimento de pesquisas visando a compreensão dos padrões espaciais e da variabilidade temporal da dinâmica do carbono nos ecossistemas (Liu et al., 2014; Merrick et al., 2019; Qiu et al., 2020). Os fluxos de CO₂ têm sido amplamente quantificados usando tanto o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Rahman et al., 2001) quanto o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) (Silva Junior et al., 2019), enquanto os estoques de carbono têm sido medidos usando a Produção Primária Bruta (GPP) (Rossi e Santos, 2020; Zarco-Tejada et al., 2013).

Figura 3 - Marcos no sensoriamento remoto do ciclo do carbono terrestre (Adaptado de Xiao et al., 2019).



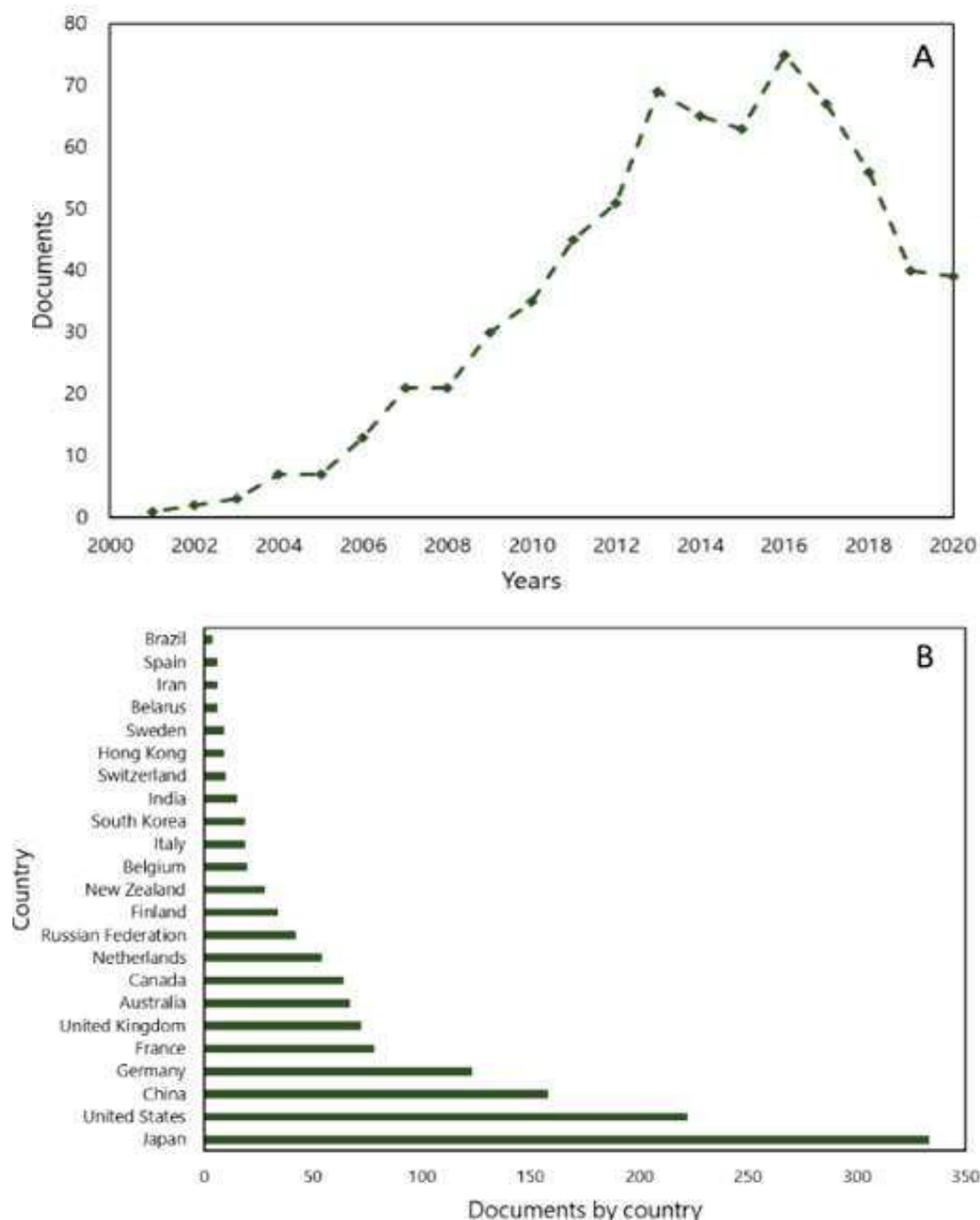
Recentemente, cientistas uniram forças para lançar instrumentos capazes de fornecer medições da concentração de gases de efeito estufa globalmente por meio do sensoriamento remoto (Crisp et al., 2018; Schwandner et al., 2017). Assim, os modelos de fluxo de carbono poderiam ser aprimorados, contribuindo para a busca de respostas relacionadas às fontes e sumidouros de carbono na interação biosfera-atmosfera.

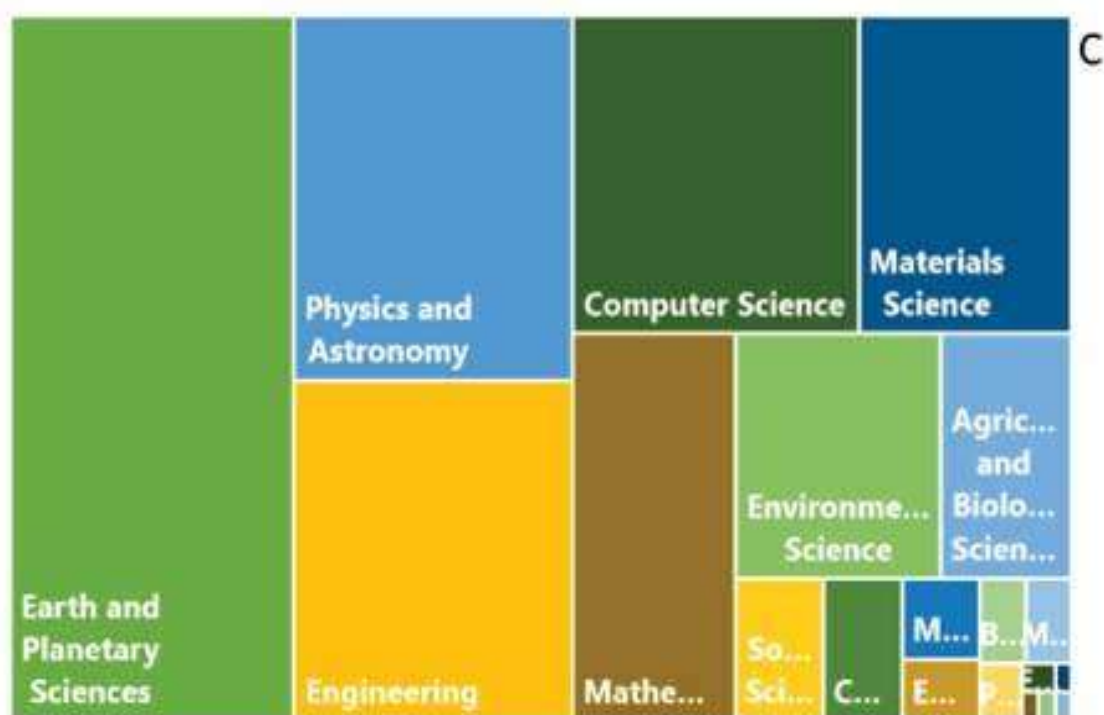
Uma maneira de medir o CO₂ do espaço é através da luz solar refletida da superfície da Terra, permitindo a quantificação das moléculas de CO₂ ao longo do caminho da luz entre a Terra e a atmosfera (Crisp et al., 2012). Esse CO₂ medido é denominado frações molares de CO₂ em ar seco médias na coluna ou XCO₂. O Satélite Japonês de Observação de Gases de Efeito Estufa (GOSAT) e o Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) da NASA usam esse método (Eldering et al., 2017a; Eldering et al., 2017b; Yokota et al., 2009).

Apesar do lançamento recente do OCO-2 em 2014, satélites capazes de medir CO₂ na atmosfera estão disponíveis há quase duas décadas. Em 2002, a NASA lançou o Atmospheric Infrared Sounder (AIRS–NASA), enquanto a ESA lançou o SCIAMACHY, ambos capazes de realizar esse tipo de monitoramento, mas essas missões terminaram em 2012 (Pan et al., 2021). A NASA lançou em julho de 2004 o Tropospheric Emission Spectrometer (TES) a bordo da espaçonave AURA, com uma resolução espacial melhor que o AIRS e o SCIAMACHY. O GOSAT foi lançado em janeiro de 2009 pela JAXA para detectar CO₂ e CH₄ (Frankenberg et al., 2011; Yokota et al., 2009). O GOSAT pode observar CO₂ com uma resolução espacial de 10 x 10 km, com um intervalo de retorno de três dias. A NASA lançou o OCO-2 em julho de 2014, com uma resolução espacial de 1,29 x 2,25 km e um intervalo de retorno de 16 dias (Crisp et al., 2017; Schwandner et al., 2017). Em dezembro de 2016, a China lançou o TanSat para monitorar CO₂ na atmosfera terrestre com uma resolução espacial e temporal muito semelhante à do OCO-2 (Liu et al., 2018; Yang et al., 2018). Em outubro de 2018, a JAXA lançou o GOSAT-2, que possui um desempenho muito mais robusto que o GOSAT (Yoshida et al., 2019). Em 2019, a NASA lançou o OCO-3 para coletar observações mais densas em locais de amostragem (Eldering et al., 2019; Taylor et al., 2021).

Um total de 707 documentos desenvolvidos com dados do GOSAT foram publicados de 2009 a 2021 (Figura 4), de acordo com uma busca na base de dados SCOPUS. O Japão teve o maior número de documentos publicados (país executor do projeto) (Figura 4B), seguido pelos Estados Unidos, China e Alemanha. Infelizmente, o Brasil não aparece entre os dez primeiros países, pois possui apenas quatro documentos publicados. No campo de pesquisa (Figura 4C), as ciências planetárias lideram o ranking, enquanto as ciências ambientais e agrícolas estão em 7º e 8º lugar, representando 6,8% e 4,3% de todos os documentos publicados, respectivamente.

Figura 4 - Documentos indexados em periódicos na base de dados SCOPUS com o termo GOSAT por ano (A), país (B) e área temática (C).



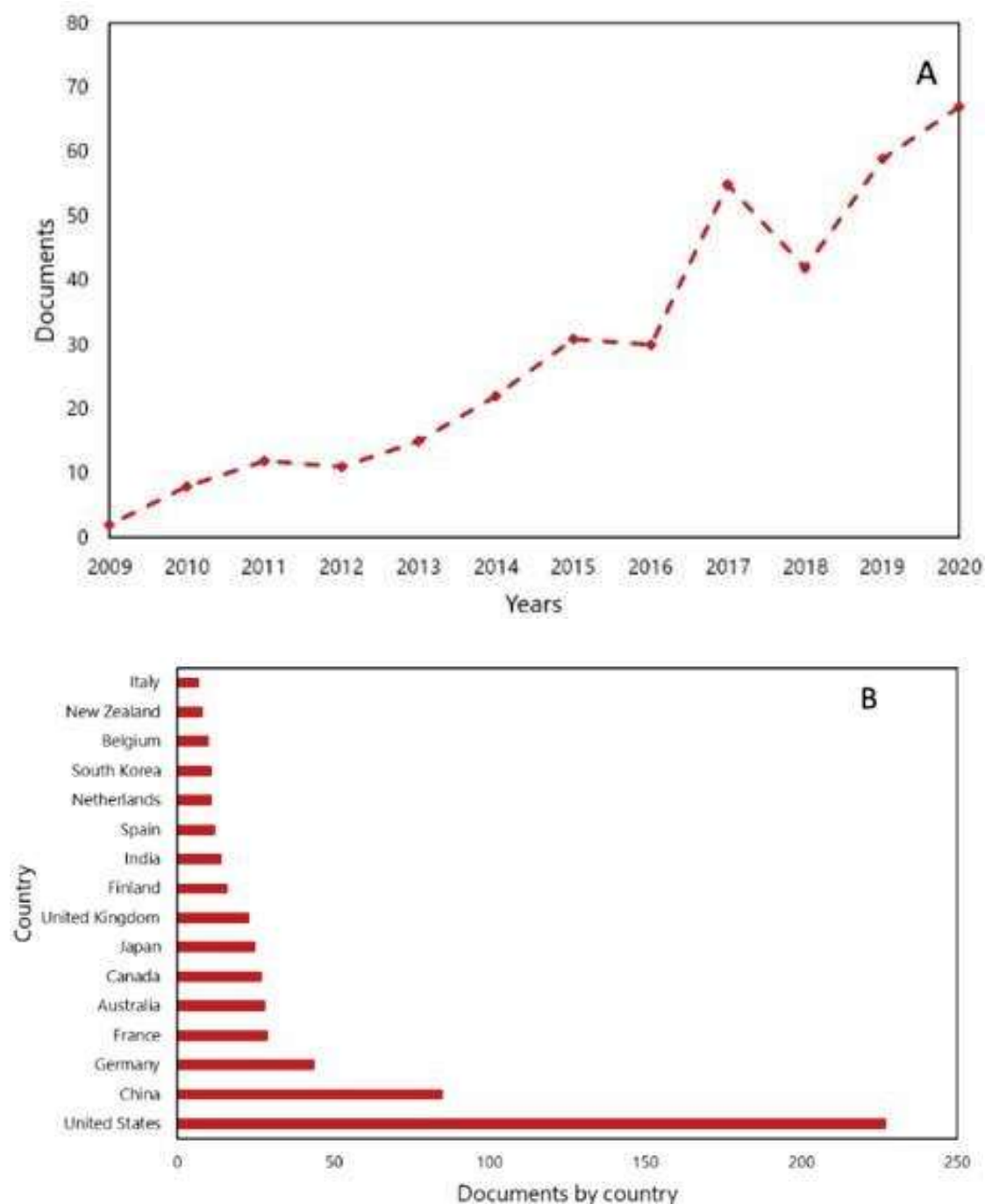


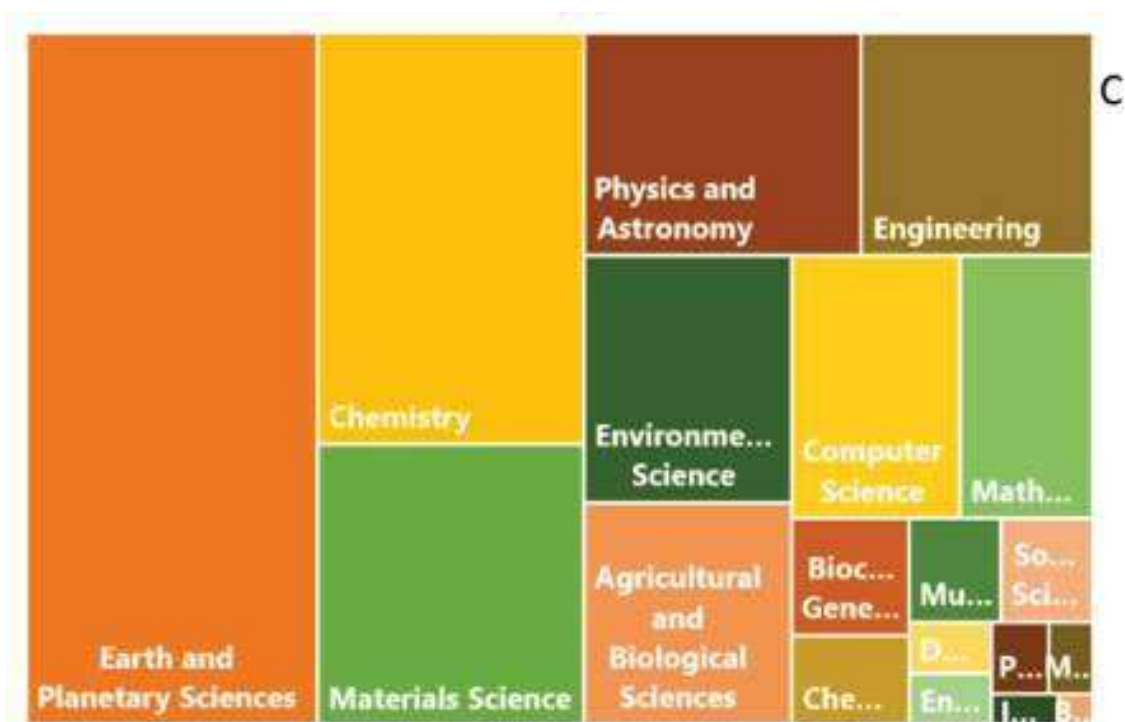
"GOSAT"



O número de documentos publicados para o OCO-2 é ainda menor, ou seja, apenas 353 documentos (Figura 5A), com os EUA como líder (Figura 5B), seguidos pela China, Alemanha e Austrália. O Brasil, novamente, não aparece nesta busca. Semelhante ao GOSAT, as ciências planetárias lideram entre os campos de pesquisa que utilizam o OCO-2 (Figura 5C), e as ciências ambientais e agrícolas estão em 6º e 7º lugar, representando 7,3% e 6,7% do total, respectivamente. Em geral, os dados do OCO-2 têm sido mais aplicados em ciências ambientais e agrícolas em comparação com o GOSAT.

Figura 5 - Documentos indexados em periódicos na base de dados SCOPUS com o termo OCO-2 por ano (A), país (B) e área temática (C).





"OCO-2"



Compreender o ciclo do carbono nos ecossistemas é essencial para realizar melhores previsões sobre futuras mudanças climáticas. Nesse contexto, os dados de satélite surgem como uma alternativa e devem ser utilizados de forma mais ampla nas mais diversas áreas do conhecimento, especialmente nas áreas ambiental e agrícola.

- ERA DO BIG DATA: O PAPEL DO SENSORIAMENTO REMOTO NOS FEEDBACKS DE CARBONO

O avanço tecnológico, o acesso a computadores, à internet e aos sensores disponíveis para a população levaram a um aumento na geração de dados nunca antes visto. Houve um enorme crescimento na coleta de dados nas mais diversas áreas do conhecimento, especialmente nos últimos 20 anos.

Na última década, o setor industrial tem demonstrado interesse no alto potencial do uso de big data, e muitas agências governamentais começaram a anunciar grandes planos para acelerar as aplicações de big data, como a Casa Branca nos Estados Unidos, que investiu mais de US\$ 1 bilhão em "Big Data em todo o Governo Federal" (WH, 2015). Além disso, as revistas científicas Nature e Science lançaram edições especiais para discutir os desafios e impactos do big data (Nature, 2008; Science, 2011). A era do big data chegou para todos e é a nova fronteira da inovação, produtividade e competitividade (Lioutas et al., 2020; Majumdar et al., 2017; Sekhar et al., 2018).

A era do big data já é uma realidade com o monitoramento por satélite, estações meteorológicas, o crescente aumento na publicação de artigos científicos, o surgimento de diversas plataformas com bancos de dados de acesso aberto e a Internet das Coisas (IoT) na área de conhecimento que envolve agricultura e meio ambiente. O investimento em análise de big data aplicada à agricultura é estimado para gerar uma lucratividade de cerca de 20 bilhões de dólares por ano (Bunge et al., 2014).

A definição de big data ainda é um conceito abstrato, mas já pode ser caracterizada por cinco dimensões, que incluem volume, velocidade, variedade, veracidade e valor, conhecidas como 5Vs (Chen et al., 2014). No entanto, uma parte essencial do uso de big data está relacionada ao valor do conhecimento gerado, que auxiliará na tomada de decisões, principalmente aumentando a rentabilidade financeira e ambiental ou mesmo reduzindo o tempo para realizar algumas atividades. Isso só é possível se as fontes do banco de dados forem confiáveis, pois dados confiáveis levam a respostas críveis.

A maioria dos bancos de dados construídos para estudar o clima e as emissões de gases de efeito estufa compreende uma série temporal, especialmente aqueles que utilizam dados de satélite (Huang et al., 2018; Liu, 2015; Ma et al., 2015; Xu et al., 2020).

O uso de bancos de dados de satélite é essencial para estudos que envolvem mudanças climáticas e já resultou em importantes periódicos científicos (da Silva Junior et al., 2020; Huang et al., 2020; Peter et al., 2020; Silva Junior et al., 2020). Conforme mencionado em seções anteriores, o sensoriamento remoto emergiu como uma ferramenta importante para compreender o ciclo do carbono. Atualmente, os satélites

permitem mapear os fluxos de CO₂, detectar mudanças no uso da terra e obter feedback de carbono. A Tabela 1 mostra uma lista de variáveis que ajudam a compreender o ciclo do carbono e podem ser obtidas gratuitamente.

Tabela 1 - Variáveis e fontes para obtenção de dados de acesso aberto relacionados ao ciclo do carbono.

Grupo	Variável	Source	Cobertura
Vegetação	NDVI-EVI	MODIS	Global
	LAI		Global
	GPP		Global
	NPP		Global
	SIF	ECO-1/GOSAT	Global
	Evapotranspiration	MODIS/SMAP	
GEE	X _{CO₂}	ECO-1/GOSAT	Global
	X _{CH₄}		Global
Solo	Soil moisture	SMAP/ESA	Global
	Soil classes		Global
	Soil texture		Global
	Soil pH	SoilGrids	Global
	Organic soil		Global
	Soil nitrogen		Global
Uso da terra	Land-use change	MapBiomass	Brazil
	Land use	LAPIG	Brazil
	Agricultural production	SIDRAS-IBGE	Brazil
	Soybean lands	SOJAMAPS	Brazil
	Land-use change	INPE	Brazil
Clima	Climate variables	POWER-NASA INMET	Global/Brasil

A dinâmica da vegetação tem sido observada há décadas através do cálculo de índices espectrais. Os índices mais famosos são o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Rouse et al., 1973) e o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) (Huete et al., 2002). O NDVI é calculado da seguinte forma: $NDVI = (NIR - VERMELHO) / (NIR + VERMELHO)$, onde VERMELHO e NIR são as refletâncias espectrais nas regiões visíveis vermelha e infravermelho próximo do espectro da radiação fotossinteticamente ativa, respectivamente (Exbrayat et al., 2019).

Outros dados fornecidos pelo MODIS, como o índice de área foliar (LAI), a produção primária bruta (GPP) e a produção primária líquida (NPP), são amplamente utilizados em estudos do ciclo do carbono. Tanto o LAI quanto a fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FAPAR) podem representar formas biofisicamente complementares na descrição da vegetação que cobre a superfície da Terra (Fan et al., 2019). O LAI consiste na área foliar verde de um lado por unidade de área de superfície do solo em dosséis de folhas largas.

O MODIS também fornece o GPP. Em geral, ele representa as entradas de carbono no ecossistema através da fotossíntese. Sua aplicação tem sido realizada em vários estudos para compreender o ciclo do carbono em condições adversas. Um avanço significativo no sensoriamento remoto foi a recuperação da fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF) (Exbrayat et al., 2019; Xiao et al., 2019). Biologicamente, a luz solar é absorvida dentro das folhas das plantas pelos cloroplastos.

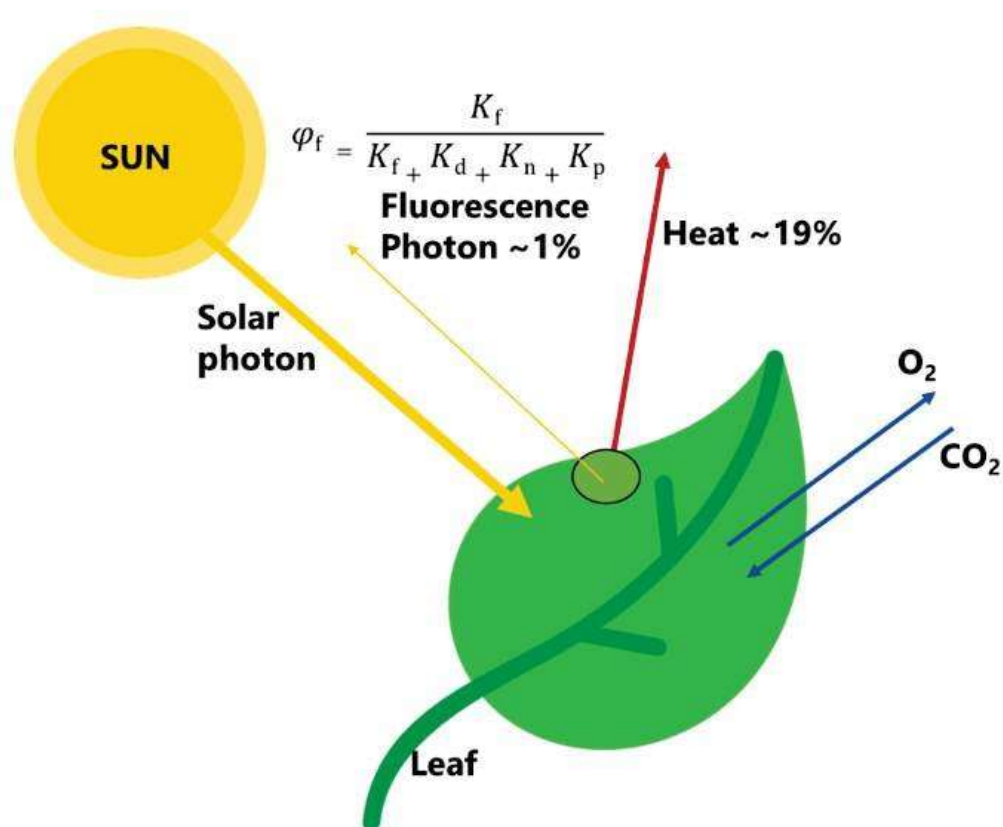
Após esse processo, a energia absorvida pode ser usada para realizar reações que têm a glicose como produto. O excesso de energia deve ser liberado quando a planta não consegue usar toda a energia absorvida na produção de glicose. Isso geralmente é feito pela dissipação de calor ou por meio da fluorescência da luz solar (Frankenberg et al., 2014; Mohammed et al., 2019) (Figura 7).

Ao contrário de outros índices espectrais, a SIF está relacionada a processos internos da fotossíntese. Assim, ela pode indicar vegetação fotossinteticamente ativa, enquanto NDVI e EVI apenas detectam a presença de folhas verdes. A fluorescência emitida sob a influência da luz solar possui picos em 730–740 nm (infravermelho próximo) e outro pico em 685–690 nm (vermelho espectral) (Mohammed et al., 2019). No entanto, apesar dos picos, a SIF pode ser detectada entre as bandas de 650–800 nm. Ambos os fotossistemas I e II são detectados nesta banda espectral.

Posteriormente, o potencial e a variabilidade da aplicação de big data de sensoriamento remoto em estudos ambientais são claros. A comunidade científica deve explorar esse potencial, especialmente em países em desenvolvimento, onde os recursos

para a realização de ciência experimental são limitados. Os feedbacks baseados nesses dados podem auxiliar no desenvolvimento de políticas governamentais para mitigação das mudanças climáticas e modelos regionais de carbono.

Figura 7- Matrizes de moléculas de clorofila ligadas ao absorvedor de proteínas e processam o fóton solar nas folhas das plantas. Uma fração variável (ϕ_f , normalmente ~1%) desses vazamentos volta como fótons fluorescentes. O fóton absorvido pode ser perdido como decaimento sem radiação (K_d), reemitido como um fóton fluorescente (K_f), extinto por NPQs (K_n) ou usado para fotoquímica (K_p) (Frankenberg et al., 2013).



2. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do aumento global da temperatura e das emissões de GEE de origem antrópica, a pesquisa em mitigação e adaptação climática é vital. Nesse contexto, a era do big data, impulsionada pelo sensoriamento remoto de alta resolução, emerge como ferramenta fundamental.

Este capítulo demonstra que a utilização desses dados é essencial para a gestão do carbono na agricultura brasileira. Eles permitem o monitoramento ambiental e atmosférico do CO₂ em larga escala e com detalhes sem precedentes. Conhecer a dinâmica espaço-temporal do CO₂ é suma importância para a tomada de decisões e formulação de políticas públicas eficazes, possibilitando a identificação de hotspots e hot moments para mitigação de emissões em locais e períodos específicos da agricultura.

A intersecção do big data e do sensoriamento remoto oferece ferramentas valiosas para compreender o ciclo do carbono no sistema solo-planta-atmosfera, auxiliando na busca por fontes e sumidouros de carbono. É vital entender como as mudanças climáticas e distúrbios afetam o balanço de carbono, prevenindo feedbacks positivos que agravariam o efeito estufa.

Com o lançamento de novas e complementares missões espaciais, a disponibilidade de dados de GEE só aumentará. Considerando a posição central do Brasil no ciclo global do carbono e as crescentes exigências por produtos agrícolas neutros em carbono, encorajamos a ampla difusão e uso desses dados pela ciência para aprimorar a gestão do carbono na agricultura brasileira, protegendo a sociedade através de estratégias técnicas robustas.

REFERÊNCIAS

- Andrén, O; T. Kätterer. 2009. Agriculture Systems. In: **Ecosystem ecology**, v.1. 2009
- Araújo Santos, G. A., Moitinho, M. R., de Oliveira Silva, B., Xavier, C. V., Teixeira, D. D. B., Corá, J. E., & Júnior, N. L. S. (2019). Effects of long-term no-tillage systems with different succession cropping strategies on the variation of soil CO₂ emission. **Science of The Total Environment**, 686, 413–424. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.05.398>
- Assad, E.D., Pinto, H. S., Zullo, J., Marin, F., & Pellegrino, G. (2008). Climate change and grain production in Brazil: Assessment of possible impacts. **Revista Plenarium**, 5(5), 96-117. (In Portuguese).
- Babbar, D., Areendran, G., Sahana, M., Sarma, K., Raj, K., & Sivadas, A. (2021). Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India. **Journal of Cleaner Production**, 278, 123333. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123333>

- Bergamaschi, P., Danila, A. M., Weiss, R., Ciais, P., Thompson, R. L., Brunner, D., Levin, I., Meijer, Y., Chevallier, F., Janssens-Maenhout, G., Bovensmann, H., Crisp, D., Basu, S., Dlugokencky, E., Engelen, R., Gerbig, C., Günther, D., Hammer, S., Henne, S., ... Vogel, F. (2018). Atmospheric monitoring and inverse modelling for verification of greenhouse gas inventories. 109. <https://doi.org/10.2760/759928>
- Bunge, B. J. 2014. Big Data Comes to the Farm, Sowing Mistrust. Available at: <https://www.wsj.com/articles/SB10001424052702304450904579369283869192124>
- Cerri, C. E. P., Sparovek, G., Bernoux, M., Easterling, W. E., Melillo, J. M., & Cerri, C. C. (2007). Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. *Scientia Agricola*, 64(1), 83–99. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000100013>
- Chen, M., Mao, S., & Liu, Y. (2014). Big data: A survey. *Mobile Networks and Applications*, 19(2), 171–209. <https://doi.org/10.1007/S11036-013-0489-0>
- Chhabra, A., & Gohel, A. (2019). Dynamics of atmospheric carbon dioxide over different land cover types in India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(3), 1–10. <https://doi.org/10.1007/S10661-019-7681-Z>
- Chi, M., Plaza, A., Benediktsson, J. A., Sun, Z., Shen, J., & Zhu, Y. (2016). Big Data for Remote Sensing: Challenges and Opportunities. *Proceedings of the IEEE*, 104(11), 2207–2219. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2598228>
- Ciampalini, R., Constantine, J. A., Walker-Springett, K. J., Hales, T. C., Ormerod, S. J., & Hall, I. R. (2020). Modelling soil erosion responses to climate change in three catchments of Great Britain. *Science of The Total Environment*, 749, 141657. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141657>
- Crisp, D., & Eldering, A. (2018). Precision, Accuracy, Resolution, and Coverage: A few insights from GOSAT and OCO-2.
- Crisp, D., Fisher, B. M., O'Dell, C., Frankenberg, C., Basilio, R., Bösch, H., Brown, L. R., Castano, R., Connor, B., Deutscher, N. M., Eldering, A., Grih, D., Gunson, M., Kuze, A., Mandrake, L., McDunne, J., Messerschmidt, J., Miller, C. E., Morino, I., ... Yung, Y. L. (2012). The ACOS CO₂ retrieval algorithm - Part II: Global X CO₂ data characterization. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(4), 687–707. <https://doi.org/10.5194/AMT-5-687-2012>
- da Costa, L.M., de Araújo Santos, G.A., Panosso, A.R. et al. 2022. An empirical model for estimating daily atmospheric column-averaged CO₂ concentration above São Paulo state, Brazil. *Carbon Balance Manage* 17, 9 <https://doi.org/10.1186/s13021-022-00209-7>
- da Silva Junior, C. A., Teodoro, P. E., Delgado, R. C., Teodoro, L. P. R., Lima, M., de Andréa Pantaleão, A., Baio, F. H. R., de Azevedo, G. B., de Oliveira Sousa Azevedo, G. T., Capristo-Silva, G. F., Arvor, D., & Facco, C. U. (2020). Persistent fire foci in all biomes undermine the Paris Agreement in Brazil. *Scientific Reports* 2020 10:1, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72571-w>
- Diffenbaugh, N. S., Swain, D. L., Touma, D., & Lubchenco, J. (2015). Anthropogenic warming has increased drought risk in California. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(13), 3931–3936. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1422385112>
- Eldering, A., O'Dell, C. W., Wennberg, P. O., Crisp, D., Gunson, M. R., Viatte, C., Avis, C., Braverman, A., Castano, R., Chang, A., Chapsky, L., Cheng, C., Connor, B., Dang, L., Doran, G., Fisher, B., Frankenberg, C., Fu, D., Granat, R., ... Yoshimizu, J. (2017a).

The Orbiting Carbon Observatory-2: First 18 months of science data products. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(2), 549–563. <https://doi.org/10.5194/AMT-10-549-2017>

Eldering, A., Taylor, T. E., O'Dell, C. W., & Pavlick, R. (2019). The OCO-3 mission: Measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(4), 2341–2370. <https://doi.org/10.5194/AMT-12-2341-2019>

Eldering, A., Wennberg, P. O., Crisp, D., Schimel, D. S., Gunson, M. R., Chatterjee, A., Liu, J., Schwandner, F. M., Sun, Y., O'Dell, C. W., Frankenberg, C., Taylor, T., Fisher, B., Osterman, G. B., Wunch, D., Hakkarainen, J., Tamminen, J., & Weir, B. (2017b). The Orbiting Carbon Observatory-2 early science investigations of regional carbon dioxide fluxes. *Science*, 358(6360). <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAM5745>

Exbrayat, J. F., Bloom, A. A., Carvalhais, N., Fischer, R., Huth, A., MacBean, N., & Williams, M. (2019). Understanding the Land Carbon Cycle with Space Data: Current Status and Prospects. *Surveys in Geophysics*, 40(4), 735–755. <https://doi.org/10.1007/S10712-019-09506-2>.

Faghmous, J. H., & Kumar, V. (2014). A Big Data Guide to Understanding Climate Change: The Case for Theory-Guided Data Science. *Big Data*, 2(3), 155–163. <https://doi.org/10.1089/BIG.2014.0026>

Fan, L., Wigneron, J. P., Ciais, P., Chave, J., Brandt, M., Fensholt, R., Saatchi, S. S., Bastos, A., Al-Yaari, A., Hufkens, K., Qin, Y., Xiao, X., Chen, C., Myneni, R. B., Fernandez-Moran, R., Mialon, A., Rodriguez-Fernandez, N. J., Kerr, Y., Tian, F., & Peñuelas, J. (2019). Satellite-observed pantropical carbon dynamics. *Nature Plants* 2019 5:9, 5(9), 944–951. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0478-9>

Finzi, A. C., Austin, A. T., Cleland, E. E., Frey, S. D., Houlton, B. Z., & Wallenstein, M. D. (2011). Responses and feedbacks of coupled biogeochemical cycles to climate change: examples from terrestrial ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(1), 61–67. <https://doi.org/10.1890/100001>

Frankenberg, C., Berry, J., Guanter, L., & Joiner, J. (2013). Remote sensing of terrestrial chlorophyll fluorescence from space. <https://doi.org/10.1117/2.1201302.004725>

Frankenberg, C., Drewry, D., Geier, S., Verma, M., Lawson, P., Stutz, J., & Grossmann, K. (2016). Remote sensing of solar induced Chlorophyll Fluorescence from satellites, airplanes and ground-based stations. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2016-November, 1707–1710. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729436>

Frankenberg, C., Fisher, J. B., Worden, J., Badgley, G., Saatchi, S. S., Lee, J. E., Toon, G. C., Butz, A., Jung, M., Kuze, A., & Yokota, T. (2011). New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *Geophysical Research Letters*, 38(17). <https://doi.org/10.1029/2011GL048738>

Frankenberg, C., O'Dell, C., Berry, J., Guanter, L., Joiner, J., Köhler, P., Pollock, R., & Taylor, T. E. (2014). Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. *Remote Sensing of Environment*, 147, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.02.007>

Fu, B., Gasser, T., Li, B., Tao, S., Ciais, P., Piao, S., Balkanski, Y., Li, W., Yin, T., Han, L., Li, X., Han, Y., An, J., Peng, S., & Xu, J. (2020). Short-lived climate forcers have long-term climate impacts via the carbon-climate feedback. *Nature Climate Change* 2020 10:9, 10(9), 851–855. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0841-x>

Gao, Y., Wang, S., Guan, K., Wolanin, A., You, L., Ju, W., & Zhang, Y. (2020). The Ability of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence From OCO-2 and MODIS-EVI to Monitor Spatial Variations of Soybean and Maize Yields in the Midwestern USA. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 1111, 12(7), 1111. <https://doi.org/10.3390/RS12071111>

Gonsamo, A.; Chen, J.M. 2017. Vegetation primary productivity. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences (2017)

Goodwin, P. (2019). Quantifying the Terrestrial Carbon Feedback to Anthropogenic Carbon Emission. *Earth's Future*, 7(12), 1417–1433. <https://doi.org/10.1029/2019EF001258>

Goodwin, P., Williams, R. G., Roussenov, V. M., & Katavouta, A. (2019). Climate Sensitivity From Both Physical and Carbon Cycle Feedbacks. *Geophysical Research Letters*, 46(13), 7554–7564. <https://doi.org/10.1029/2019GL082887>

He, Z., Lei, L., Zeng, Z. C., Sheng, M., & Welp, L. R. (2020). Evidence of Carbon Uptake

Huang, N., Wang, L., Song, X. P., Andrew Black, T., Jassal, R. S., Myneni, R. B., Wu, C., Wang, L., Song, W., Ji, D., Yu, S., & Niu, Z. (2020). Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover. *Science Advances*, 6(41). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.ABB8508>

Huang, Y.; Zhong-Xin, C.; Tao, Y. U.; Xiang-Zhi, H.; Xing-Fa, G. U. (2018). Agricultural remote sensing big data: Management and applications. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(9), 1915–1931. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61859-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61859-8)

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)

Humphrey, V., Zscheischler, J., Ciais, P., Gudmundsson, L., Sitch, S., & Seneviratne, S. I. (2018). Sensitivity of atmospheric CO₂ growth rate to observed changes in terrestrial water storage. *Nature* 2018 560:7720, 560(7720), 628–631. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0424-4>.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23–37. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2017.09.037>

La Scala, N., Marques, J., Pereira, G. T., & Cora, J. E. (2000). Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(10), 1459–1462. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00051-1)

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2004.01.032>

Le Quéré, C. Le, Moriarty, R., Andrew, R. M., Peters, G. P., Ciais, P., Friedlingstein,

- P., Jones, S. D., Sitch, S., Tans, P., Arneeth, A., Boden, T. A., Bopp, L., Bozec, Y., Canadell, J. G., Chini, L. P., Chevallier, F., Cosca, C. E., Harris, I., Hoppema, M., ... Zeng, N. (2015). Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data*, 7(1), 47–85. <https://doi.org/10.5194/ESSD-7-47-2015>
- Lioutas, E. D., & Charatsari, C. (2020). Big data in agriculture: Does the new oil lead to sustainability? *Geoforum*, 109, 1–3. <https://doi.org/10.1016/J.GEOFORUM.2019.12.019>
- Liu, J., Bowman, K. W., Lee, M., Henze, D. K., Bousseres, N., Brix, H., Collatz, G. J., Menemenlis, D., Ott, L., Pawson, S., Jones, D., & Nassar, R. (2014). Carbon monitoring system flux estimation and attribution: impact of ACOS-GOSAT XCO₂ sampling on the inference of terrestrial biospheric sources and sinks. *Stockholm Uni Press*, 66(1). <https://doi.org/10.3402/TELLUSB.V66.22486>
- Liu, P. (2015). A survey of remote-sensing big data. *Frontiers in Environmental Science*, 3(JUN), 45. <https://doi.org/10.3389/FENV.2015.00045>
- Liu, Y., Wang, J., Yao, L., Chen, X., Cai, Z., Yang, D., Yin, Z., Gu, S., Tian, L., Lu, N., & Lyu, D. (2018). The TanSat mission: preliminary global observations. *Science Bulletin*, 63(18), 1200–1207. <https://doi.org/10.1016/J.SCIB.2018.08.004>
- Ma, Y., Wu, H., Wang, L., Huang, B., Ranjan, R., Zomaya, A., & Jie, W. (2015). Remote sensing big data computing: Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 51, 47–60. <https://doi.org/10.1016/J.FUTURE.2014.10.029>
- Madani, N., Kimball, J. S., Jones, L. A., Parazoo, N. C., & Guan, K. (2017). Global Analysis of Bioclimatic Controls on Ecosystem Productivity Using Satellite Observations of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence. *Remote Sensing 2017*, Vol. 9, Page 530, 9(6), 530. <https://doi.org/10.3390/RS9060530>
- Majumdar, J., Naraseeyappa, S., & Ankalaki, S. (2017). Analysis of agriculture data using data mining techniques: application of big data. *Journal of Big Data*, 4(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/S40537-017-0077-4>
- MAPA- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. AGROSTAT – Estatísticas de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro: indicadores gerais 2017. <<http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>>.
- Medhaug, I., Stolpe, M. B., Fischer, E. M., & Knutti, R. (2017). Reconciling controversies about the ‘global warming hiatus.’ *Nature* 2017 545:7652, 545(7652), 41–47. <https://doi.org/10.1038/nature22315>
- Merrick, T., Pau, S., Jorge, M. L. S. P., Silva, T. S. F., & Bennartz, R. (2019). Spatiotemporal Patterns and Phenology of Tropical Vegetation Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence across Brazilian Biomes Using Satellite Observations. *Remote Sensing 2019*, Vol. 11, Page 1746, 11(15), 1746. <https://doi.org/10.3390/RS11151746>
- Moazzam, M. F. U., Lee, B. G., Rahman, G., & Waqas, T. (2020). Spatial Rainfall Variability and an Increasing Threat of Drought, According to Climate Change in Uttaradit Province, Thailand. *Atmospheric and Climate Sciences*, 10(03), 357–371. <https://doi.org/10.4236/ACS.2020.103020>
- Mohammed, G. H., Colombo, R., Middleton, E. M., Rascher, U., van der Tol, C., Nedbal, L., Goulas, Y., Pérez-Priego, O., Damm, A., Meroni, M., Joiner, J., Cogliati, S., Verhoef, W., Malenovsky, Z., Gastellu-Etchegorry, J. P., Miller, J. R., Guanter, L., Moreno, J., Moya, I., ... Zarco-Tejada, P. J. (2019). Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111177. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.04.030>

Nature. 2008. Special Issue. Big data: Science in the Petabyti era. Available at: <https://www.nature.com/nature/volumes/455/issues/7209>

NCR- National Research Council. (2003). Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 3. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10672>

Nearing, M. A., Jetten, V., Baffaut, C., Cerdan, O., Couturier, A., Hernandez, M., Le Bissonnais, Y., Nichols, M. H., Nunes, J. P., Renschler, C. S., Souchère, V., & Van Oost, K. (2005). Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. CATENA, 61(2–3), 131–154. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2005.03.007>

Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., & Erasmi, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils—A review. Geochemistry, 76(3), 327–352. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMER.2016.04.002>

Pan, G., Xu, Y., & Ma, J. (2021). The potential of CO2 satellite monitoring for climate governance: A review. Journal of Environmental Management, 277, 111423. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.111423>

Parazoo, N. C., Commane, R., Wofsy, S. C., Koven, C. D., Sweeney, C., Lawrence, D. M., Lindaas, J., Chang, R. Y. W., & Miller, C. E. (2016). Detecting regional patterns of changing CO2 flux in Alaska. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 113(28), 7733–7738. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1601085113>

Park, H., Takeuchi, W., & Ichii, K. (2020). Satellite-Based Estimation of Carbon Dioxide Budget in Tropical Peatland Ecosystems. Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 250, 12(2), 250. <https://doi.org/10.3390/RS12020250>

Peter, B. G., Messina, J. P., Lin, Z., & Snapp, S. S. (2020). Crop climate suitability mapping on the cloud: a geovisualization application for sustainable agriculture. Scientific Reports 2020 10:1, 10(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72384-x>

Piao, S., Wang, X., Wang, K., Li, X., Bastos, A., Canadell, J. G., Ciais, P., Friedlingstein, P., & Sitch, S. (2020). Interannual variation of terrestrial carbon cycle: Issues and perspectives. Global Change Biology, 26(1), 300–318. <https://doi.org/10.1111/GCB.14884>

Qiu, R., Han, G., Ma, X., Sha, Z., Shi, T., Xu, H., & Zhang, M. (2020). CO2 Concentration, A Critical Factor Influencing the Relationship between Solar-induced Chlorophyll Fluorescence and Gross Primary Productivity. Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 1377, 12(9), 1377. <https://doi.org/10.3390/RS12091377>

Quan, Q., Tian, D., Luo, Y., Zhang, F., Crowther, T. W., Zhu, K., Chen, H. Y. H., Zhou, Q., & Niu, S. (2019). Water scaling of ecosystem carbon cycle feedback to climate warming. Science Advances, 5(8). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAV1131>

Rahman, A. F., Gamon, J. A., Fuentes, D. A., Roberts, D. A., & Prentiss, D. (2001). Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106(D24), 33579–33591. <https://doi.org/10.1029/2001JD900157>

Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., & Rosenfeld, D. (2001). Atmosphere: Aerosols, climate, and the hydrological cycle. Science, 294(5549), 2119–2124. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1064034>

Rossi, F. S., & Santos, G. A. de A. (2020). Fire dynamics in Mato Grosso State, Brazil: the relative roles of gross primary productivity.4(1), 23–44. <https://doi.org/10.1080/20964471.2019.1706832>

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation

Ryu, Y., Berry, J. A., & Baldocchi, D. D. (2019). What is global photosynthesis? History, uncertainties and opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 223, 95–114. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.01.016>

Schimel, D. S. (1995). Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1(1), 77–91. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.1995.TB00008.X>

Schimel, D., Stephens, B. B., & Fisher, J. B. (2015). Effect of increasing CO₂ on the terrestrial carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(2), 436–441. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1407302112>

Schneider, S. H. (1989). The Greenhouse Effect: Science and Policy. *Science*, 243(4892), 771–781. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.243.4892.771>

Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., Hugelius, G., Koven, C. D., Kuhry, P., Lawrence, D. M., Natali, S. M., Olefeldt, D., Romanovsky, V. E., Schaefer, K., Turetsky, M. R., Treat, C. C., & Vonk, J. E. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 2015 520:7546, 520(7546), 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>

Schwandner, F. M., Gunson, M. R., Miller, C. E., Carn, S. A., Eldering, A., Krings, T., Verhulst, K. R., Schimel, D. S., Nguyen, H. M., Crisp, D., O'Dell, C. W., Osterman, G. B., Iraci, L. T., & Podolske, J. R. (2017). Spaceborne detection of localized carbon dioxide sources. *Science*, 358(6360). <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAM5782>

Science. 2011. Special issue: Dealing with data. Available at: <https://www.science.org/toc/science/331/6018>

Sekhar, C. C., Udaykumar, J., Kumar, B. K., & Sekhar, C. (2018). Effective use of Big Data Analytics in Crop planning to increase Agriculture Production in India. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 113, 31–40. <https://doi.org/10.14257/ijast.2018.113.04>

Sellers, P. J., Schimel, D. S., Moore, B., Liu, J., & Eldering, A. (2018). Observing carbon cycle–climate feedbacks from space. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(31), 7860–7868. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1716613115>

Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3–4), 125–161. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2010.02.004>

Seneviratne, S. I., Donat, M. G., Pitman, A. J., Knutti, R., & Wilby, R. L. (2016). Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets. *Nature* 2016 529:7587, 529(7587), 477–483. <https://doi.org/10.1038/nature16542>

Serpa, D., Nunes, J. P., Santos, J., Sampaio, E., Jacinto, R., Veiga, S., Lima, J. C., Moreira, M., Corte-Real, J., Keizer, J. J., & Abrantes, N. (2015). Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. *Science of The Total Environment*, 538, 64–77. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.08.033>

Schneider, S. H. (1989). The Greenhouse Effect: Science and Policy. *Science*, 243(4892), 771–781. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.243.4892.771>

Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., Hugelius, G., Koven, C. D., Kuhry, P., Lawrence, D. M., Natali, S. M., Olefeldt, D., Romanovsky, V. E., Schaefer, K., Turetsky, M. R., Treat, C. C., & Vonk, J. E. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 2015 520:7546, 520(7546),

171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>

Schwandner, F. M., Gunson, M. R., Miller, C. E., Carn, S. A., Eldering, A., Krings, T., Verhulst, K. R., Schimel, D. S., Nguyen, H. M., Crisp, D., O'Dell, C. W., Osterman, G. B., Iraci, L. T., & Podolske, J. R. (2017). Spaceborne detection of localized carbon dioxide sources. *Science*, 358(6360). <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAM5782>

Science. 2011. Special issue: Dealing with data. Available at: <https://www.science.org/toc/science/331/6018>

Sekhar, C. C., Udaykumar, J., Kumar, B. K., & Sekhar, C. (2018). Effective use of Big Data Analytics in Crop planning to increase Agriculture Production in India. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 113, 31–40. <https://doi.org/10.14257/ijast.2018.113.04>

Sellers, P. J., Schimel, D. S., Moore, B., Liu, J., & Eldering, A. (2018). Observing carbon cycle–climate feedbacks from space. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(31), 7860–7868. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1716613115>

Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3–4), 125–161. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2010.02.004>

Seneviratne, S. I., Donat, M. G., Pitman, A. J., Knutti, R., & Wilby, R. L. (2016). Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets. *Nature* 2016 529:7587, 529(7587), 477–483. <https://doi.org/10.1038/nature16542>

Serpa, D., Nunes, J. P., Santos, J., Sampaio, E., Jacinto, R., Veiga, S., Lima, J. C., Moreira, M., Corte-Real, J., Keizer, J. J., & Abrantes, N. (2015). Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. *Science of The Total Environment*, 538, 64–77. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.08.033>

Shannon, M. 2019. How does NASA use big data?. Available at: <https://www.crayondata.com/how-does-nasa-use-big-data/>

Siabi, Z., Falahatkar, S., & Alavi, S. J. (2019). Spatial distribution of XCO₂ using OCO-2 data in growing seasons. *Journal of Environmental Management*, 244, 110–118. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.05.049>

Silva Junior, C. A. da, Costa, G. de M., Rossi, F. S., Vale, J. C. E. do, Lima, R. B. de, Lima, M., Oliveira-Junior, J. F. de, Teodoro, P. E., & Santos, R. C. (2019). Remote sensing for updating the boundaries between the Brazilian Cerrado–Amazonia biomes. *Environmental Science & Policy*, 101, 383–392. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2019.04.006>

Silva Junior, C. H. L., Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Shimabukuro, Y. E., Vancutsem, C., Achard, F., Beuchle, R., Numata, I., Silva, C. A., Maeda, E. E., Longo, M., & Saatchi, S. S. (2020). Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses. *Science Advances*, 6(40). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAZ8360>

Silva, B. de O., Moitinho, M. R., Santos, G. A. de A., Teixeira, D. D. B., Fernandes, C., & La Scala, N. (2019). Soil CO₂ emission and short-term soil pore class distribution after tillage operations. *Soil and Tillage Research*, 186, 224–232. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2018.10.019>

Stuart Chapin, F., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (2012). Principles of terrestrial ecosystem ecology. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*, 1–529. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9>

Taylor, T. E., Eldering, A., Merrelli, A., Kiel, M., Somkuti, P., Cheng, C., Rosenberg, R., Fisher, B., Crisp, D., Basilio, R., Bennett, M., Cervantes, D., Chang, A., Dang, L., Frankenberg, C., Haemmerle, V. R., Keller, G. R., Kurosu, T., Laughner, J. L., ... Yu, S. (2020). OCO-3 early mission operations and initial (vEarly) XCO₂ and SIF retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112032. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2020.112032>

Ussiri, D. A. N., & Lal, R. (2017). Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation. *Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53845-7>

Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (Vol. 92). Elsevier.

Wang, W. C., Yung, Y. L., Lacis, A. A., Mo, T., & Hansen, J. E. (1976). Greenhouse Effects due to Man-Made Perturbations of Trace Gases. *Science*, 194(4266), 685–690. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.194.4266.685>

WH – White House. 2012. FACT SHEET: Big Data Across the Federal Government. Available at: <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/12/04/fact-sheet-big-data-across-federal-government>

Williams, R. G., Katavouta, A., & Goodwin, P. (2019). Carbon-Cycle Feedbacks Operating in the Climate System. *Current Climate Change Reports*, 5(4), 282–295. <https://doi.org/10.1007/S40641-019-00144-9>

Xavier, C. V., Moitinho, M. R., Teixeira, D. D. B., de Araújo Santos, G. A., Corá, J. E., & La Scala, N. (2020). Crop rotation and sequence effects on temporal variation of CO₂ emissions after long-term no-till application. *Science of The Total Environment*, 709, 136107. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.136107>

Xiao, J., Chevallier, F., Gomez, C., Guanter, L., Hicke, J. A., Huete, A. R., Ichii, K., Ni, W., Pang, Y., Rahman, A. F., Sun, G., Yuan, W., Zhang, L., & Zhang, X. (2019). Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111383. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.111383>

Xu, C., Du, X., Yan, Z., & Fan, X. (2020). ScienceEarth: A Big Data Platform for Remote Sensing Data Processing. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 607, 12(4), 607. <https://doi.org/10.3390/RS12040607>

Xu, Y., & Cui, G. (2021). Influence of spectral characteristics of the Earth's surface radiation on the greenhouse effect: Principles and mechanisms. *Atmospheric Environment*, 244, 117908. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2020.117908>

Yang, D., Liu, Y., Cai, Z., Chen, X., Yao, L., Lu, D., Yang, D. X., Liu, Y., Cai, Z. N., Chen, X., Yao, L., & Lu, D. R. (2018). First Global Carbon Dioxide Maps Produced from TanSat Measurements. *Advances in Atmospheric Sciences* 2018 35:6, 35(6), 621–623. <https://doi.org/10.1007/S00376-018-7312-6>

Yokota, T., Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Tanaka, T., Watanabe, H., & Maksyutov, S. (2009). Global Concentrations of CO₂ and CH₄ Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results. *SOLA*, 5(1), 160–163. <https://doi.org/10.2151/SOLA.2009-041>

Yoshida, Y., Oshio, H., Someya, Y., Ohyama, H., Kamei, A., Morino, I., Uchino, O., Saito, M., Noda, H., & Matsunaga, T. (2019). Atmospheric Carbon Dioxide and Methane Observations by GOSAT and GOSAT-2. *Optical Sensors and Sensing Congress (ES, FTS, HISE, Sensors)* (2019), Paper FTu2B.4, FTu2B.4. <https://doi.org/10.1364/FTS.2019.FTU2B.4>

Capítulo 07

ÁRVORES NATIVAS AMAZÔNICAS E SEQUESTRO DE CARBONO: contribuições científicas para a sustentabilidade do Porto do Itaqui

Fábio Afonso Mazzei Moura de Assis Figueiredo, Anyela Marcela Ríos-Ríos, Carlos Wendell Soares Dias¹, Cinthya Veras de Aguiar, Diego Pereira Santos, Fabrício de Oliveira Reis, Jailma Ribeiro de Andrade, Nahor Daniel Ribeiro Diniz, Sérgio Heitor Sousa Felipe, Thayanna Vieira Costa, Tiago Massi Ferraz, Thais Roseli Corrêa

DOI: 10.29327/5850749.1-7

view online: <https://publicacoes.even3.com.br/book/mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495>

ÁRVORES NATIVAS AMAZÔNICAS E SEQUESTRO DE CARBONO: contribuições científicas para a sustentabilidade do Porto do Itaqui

Fábio Afonso Mazzei Moura de Assis Figueiredo^{1*}, Anyela Marcela Ríos-Ríos¹, Carlos Wendell Soares Dias¹, Cinthya Veras de Aguiar¹, Diego Pereira Santos¹, Fabrício de Oliveira Reis¹, Jailma Ribeiro de Andrade¹, Nahor Daniel Ribeiro Diniz¹, Sérgio Heitor Sousa Felipe¹, Thayanna Vieira Costa¹, Tiago Massi Ferraz¹, Thais Roseli Corrêa¹

Resumo

Neste capítulo, o leitor é convidado a conhecer como a ciência florestal e os estudos sobre árvores nativas amazônicas se conectam à agenda de sustentabilidade e mitigação das mudanças climáticas no contexto do Porto do Itaqui. O texto parte da compreensão de que a vegetação nativa desempenha papel fundamental no sequestro de carbono, contribuindo para a redução da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e para o fortalecimento de estratégias de compensação ambiental. Ao longo do capítulo, são apresentados os fundamentos do sequestro de carbono em ecossistemas florestais, com destaque para espécies amazônicas e seu potencial de armazenamento de biomassa. A discussão evidencia como pesquisas científicas permitem quantificar estoques de carbono, avaliar o crescimento das espécies e estimar sua contribuição para metas de sustentabilidade e neutralização de emissões. O capítulo também explora a relação entre conservação ambiental, restauração de áreas degradadas e responsabilidade institucional. Ao integrar conhecimento científico e planejamento estratégico, demonstra-se que iniciativas voltadas à valorização de espécies nativas podem gerar benefícios ambientais, sociais e institucionais, fortalecendo a imagem e o compromisso do Porto do Itaqui com práticas sustentáveis. Mais do que apresentar dados técnicos, o texto propõe uma reflexão sobre o papel das soluções baseadas na natureza no enfrentamento das mudanças climáticas. Ao destacar o potencial das árvores amazônicas como aliadas na gestão do carbono, o capítulo amplia a perspectiva da sustentabilidade portuária, mostrando que o cuidado com o território e com os ecossistemas regionais é parte essencial de uma estratégia climática consistente e de longo prazo.

1. INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas, impulsionada principalmente pelo aumento das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), exige soluções urgentes e eficazes para mitigar os impactos ambientais globais. As emissões antrópicas decorrentes do uso de combustíveis fósseis, da alteração do uso da terra e da expansão agroindustrial ultrapassaram a capacidade de compensação dos sumidouros naturais, ampliando o desequilíbrio no ciclo global do carbono (Hossain, 2022). Esse descompasso crescente resulta na acumulação crítica de CO₂ na atmosfera, com projeções alarmantes indicando níveis próximos a 1200 ppm nas próximas décadas caso medidas efetivas não sejam implementadas (Hossain, 2022).

Nesse contexto, estratégias integradas de captura, transporte, utilização e armazenamento de carbono (CCTUS) têm ganhado cada vez mais relevância na atualidade. Joarder et al. (2025) destacam que essas tecnologias, quando combinadas com rotas emergentes como o uso de microalgas, biochar, nanomateriais e captura direta do ar, não apenas contribuem para a redução das emissões industriais, mas também possibilitam transformar o CO₂ em produtos de alto valor agregado, como combustíveis, insumos químicos e bioenergia. Essa abordagem impulsiona a transição para uma economia de baixo carbono, e evidencia a sinergia entre mitigação climática, inovação tecnológica e geração de valor.

A captura biológica de carbono pela vegetação terrestre, especialmente em ecossistemas tropicais, também representa uma das estratégias mais promissoras e de baixo custo para conter o aquecimento global. Estudos recentes comprovam o elevado potencial de florestas secundárias (Chazdon et al., 2016), sistemas agroflorestais (Ghale et al., 2022), silvipastoris (Iñamagua-Uyaguari et al., 2023) e reflorestamentos tropicais com bioinsumos (Lefebvre et al., 2021) na remoção de CO₂ atmosférico. Nave et al. (2018) mostram que o reflorestamento de áreas agrícolas contribui de forma significativa para o acúmulo de carbono na biomassa aérea e no solo, o que reforça a necessidade de estratégias adaptadas a cada bioma. A aplicação dessas práticas em regiões tropicais específicas, como a zona de transição Amazônia-Cerrado no Maranhão, é particularmente estratégica por integrar inovação tecnológica, conservação da biodiversidade e valorização dos serviços ecossistêmicos.

No Brasil, o Maranhão ocupa posição estratégica na mitigação climática e na conservação da biodiversidade, por abrigar três importantes biomas: Cerrado, Amazônia e Caatinga, além de zonas de transição ecológica. O Cerrado é o domínio mais extenso, e abrange entre 64,1% e 65,4% do território estadual, com fitofisionomias que variam de campos limpos a cerradões (IMESC; SEMA; SEPE, 2022; Spinelli-Araujo et al., 2016).

A Amazônia, presente em cerca de 35% do estado, concentra-se na porção noroeste maranhense e abriga florestas ombrófilas densas, matas de igapó e várzeas de alta diversidade biológica. A Caatinga, embora menos representativa (cerca de 1,1%), contribui para a heterogeneidade estrutural do território (IMESC; SEMA; SEPE, 2022; Spinelli-Araujo et al., 2016).

Diante desse contexto, o projeto “*Sequestro de carbono com espécies nativas do Bioma Amazônico: ecofisiologia de planta inteira em câmaras de topo aberto e simulação em cultura de tecidos com o incremento de CO₂*” integra ciência básica e aplicada para avaliar o potencial de espécies arbóreas amazônicas na remoção de CO₂ atmosférico. A proposta combina abordagens *in vitro* que simulam cenários de enriquecimento de CO₂, e avaliações ecofisiológicas *ex vitro* em câmaras de topo aberto (CTAs), permitindo uma análise abrangente das respostas funcionais das plantas em condições controladas.

O projeto também se destaca por articular seus resultados com ações de sustentabilidade no Porto do Itaqui, um dos principais corredores logísticos da Brasil. Os dados gerados poderão subsidiar a valoração de serviços ecossistêmicos, a compensação de emissões e o aprimoramento de políticas públicas baseadas na natureza, oferecendo suporte técnico para iniciativas de sustentabilidade portuária e para a conservação das florestas tropicais no Maranhão.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

- DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS IN VITRO PARA SIMULAÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS COM ENRIQUECIMENTO DE CO₂

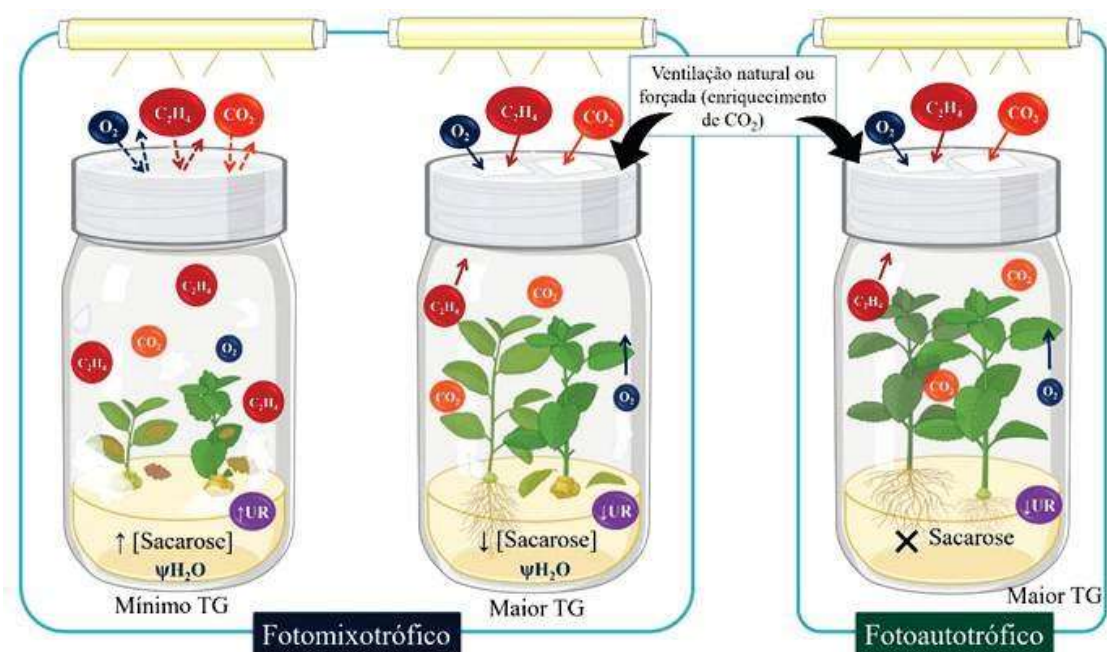
A cultura de tecidos vegetais (CTV) é uma alternativa eficiente para conservar espécies nativas e estudar suas respostas morfofisiológicas e bioquímicas sob diferentes fatores bióticos (quitosana, micélio de fungos, bactérias e leveduras) e abióticos (composição do meio de cultura, qualidade e intensidade de luz, trocas gasosas) em condições *in vitro* (Cioć et al., 2018; Oliveira et al., 2020; Wawrosch & Zotchev, 2021; Bhaskar et al., 2022; Batbat et al., 2025). A CTV permite a simulação de condições relacionadas às mudanças climáticas, como alta salinidade (Zarei & Ehsanpour, 2023; Batbat et al., 2025), déficit hídrico (Ogunnubi et al., 2025) e incremento de CO₂ atmosférico (Tanaka; Giang; Murakami, 2005; Wu & Lin, 2013; Saldanha et al., 2013; Fortini et al., 2021; Louback et al., 2021; Silva et al., 2024). O cultivo *in vitro* tem sido conduzido em diferentes condições, de acordo com a eficiência da troca gasosa entre o espaço aéreo interno dos frascos de cultura (*head space*) e o ambiente externo, além da concentração de sacarose no meio de cultivo. Portanto, protocolos que utilizam o cultivo *in vitro* podem

ser otimizados em sistemas fotomixotróficos e fotoautotróficos, e também para simular cenários de CO₂ elevado.

No sistema fotomixotrófico com tampas vedadas, a troca gasosa é bastante restrita, o que limita a entrada de CO₂ e favorece o acúmulo de etileno e umidade, portanto, exige a adição de sacarose como fonte de carbono. Em contraste, no sistema fotomixotrófico com tampas providas de membranas porosas, mesmo com a presença de sacarose, a troca gasosa torna-se mais eficiente, o que permite maior difusão de CO₂ e redução de gases indesejáveis como o metano e etileno.

No sistema fotoautotrófico não se adiciona sacarose ao meio de cultivo, de modo que o crescimento das plantas é sustentado exclusivamente pela fotossíntese. Nessa condição, o uso de tampas com membranas porosas torna-se essencial para garantir trocas gasosas adequadas e favorecer o desempenho do crescimento vegetal (**Figura 1**).

Figura 1 - Sistemas fotomixotrófico e fotoautotrófico para a propagação *in vitro* de plantas. C₂H₄: etileno; CO₂: dióxido de carbono; O₂: oxigênio; ψ H₂O: potencial hídrico; ↑ e ↓ [Sacarose]: alta e baixa concentração de sacarose, respectivamente; × Sacarose: ausência de sacarose; ↑ e ↓ UR: alta e baixa umidade relativa, respectivamente; TG: troca gasosa. Figura adaptada de Kozai & Kubota (2005).



Os sistemas *in vitro* implementados, baseados no uso de tampas com membranas porosas, têm permitido avaliar de forma controlada os efeitos do enriquecimento de CO₂ sobre a germinação, a indução de brotos, a multiplicação e o enraizamento de espécies arbóreas nativas. A combinação do enriquecimento de CO₂ com sistemas de ventilação controlada viabilizados por essas membranas representa um avanço na superação de limitações fisiológicas típicas do cultivo convencional, e otimiza a multiplicação clonal, além de permitir monitoramento detalhado do comportamento funcional das plantas desde as fases iniciais de desenvolvimento.

Diversas espécies florestais investigadas apresentam baixa taxa de germinação natural e propagação vegetativa limitada, o que evidencia a importância dos protocolos de micropropagação *in vitro* já testados (Apóstolo et al., 2016; Oliveira et al., 2020; Yarte et al., 2023). Apesar disso, desafios como recalcitrância à regeneração, taxa de multiplicação restrita e dificuldades no enraizamento e aclimação são comuns, e estão diretamente relacionados à interação entre genótipo, composição do meio de cultura e condições atmosféricas do frasco, o que inclui a limitação na troca gasosa e acúmulo de etileno (Pinheiro et al., 2013).

Ressalta-se que o uso de membranas porosas desde as etapas iniciais do cultivo favorece a difusão de gases, e permite o ajuste gradual da concentração de CO₂ no ambiente de cultivo, consolida a eficiência de protocolos aplicados a espécies arbóreas, como os desenvolvidos neste projeto. O fluxo metodológico empregado abrange desde os procedimentos de desinfestação e germinação das sementes, indução de brotos e multiplicação de explantes, até o estabelecimento de plântulas em sistemas com ventilação controlada e enriquecimento de CO₂ (Figura 2).

Resultados preliminares obtidos no âmbito do atual projeto indicaram elevada responsividade germinativa das espécies representadas na **Figura 3**, demonstrando a eficiência dos protocolos de assepsia, escarificação e condições de cultivo *in vitro*. Além disso, a aplicação combinada dos reguladores de crescimento vegetal propiciou um crescimento vigoroso e formação de plântulas com desenvolvimento morfofisiológico satisfatório, o que caracteriza de forma consistente a fase de estabelecimento *in vitro*. Esses achados reforçam o potencial do sistema como plataforma experimental para investigações futuras envolvendo o cultivo sob concentrações elevadas de CO₂.

Figura 2 - Etapas de propagação *in vitro* de espécies arbóreas nativas da Amazônia Brasileira visando o estudo do efeito de CO₂ sobre o desenvolvimento das plantas. NaOCl: hipoclorito de sódio; ½ MS: Meio Murashige & Skoog com a metade da concentração dos sais; MS: meio Murashige & Skoog com a concentração normal de sais; WPM: meio McCown's *Woody Plant*; BAP: 6-benzilaminopurina; Kin: cinetina; *m*-TP: meta-topolina; ANA: ácido naftalenoacético; AIB: ácido indol-3-butírico; GA₃: ácido giberélico. A câmara climática para enriquecimento de CO₂ é modelo TE-4002/3 (Tecnal®, Piracicaba - Brasil).

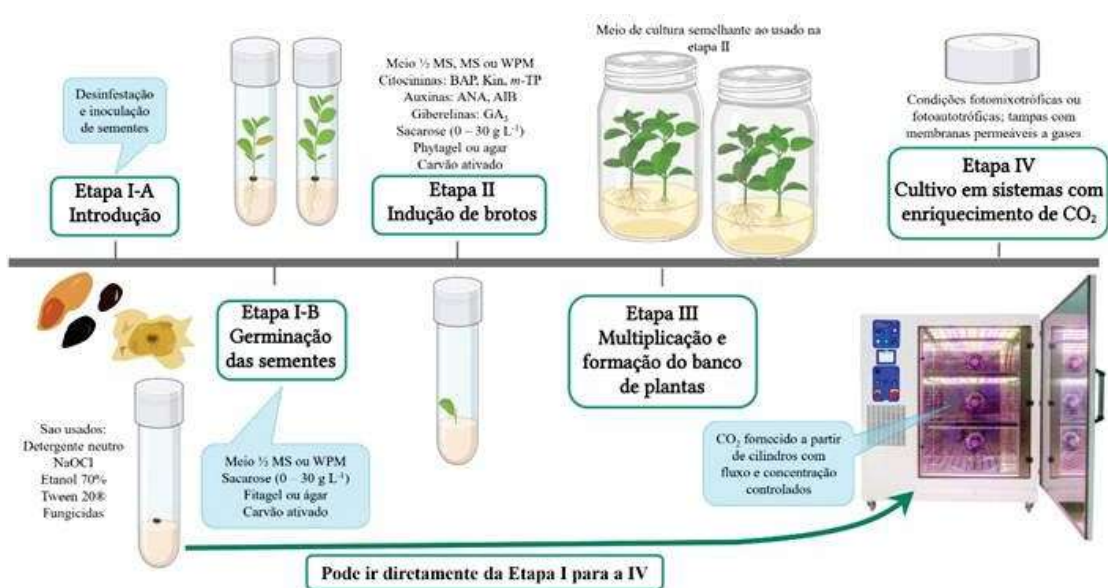
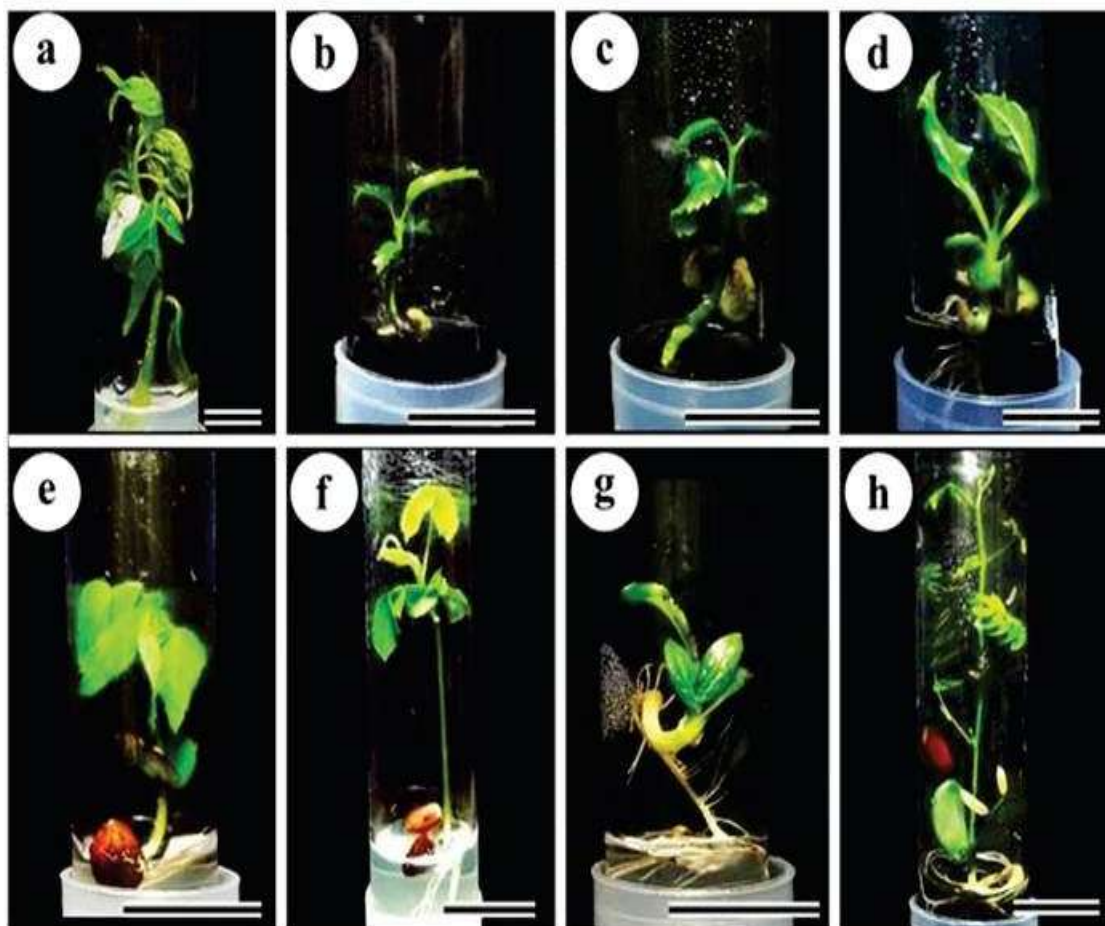
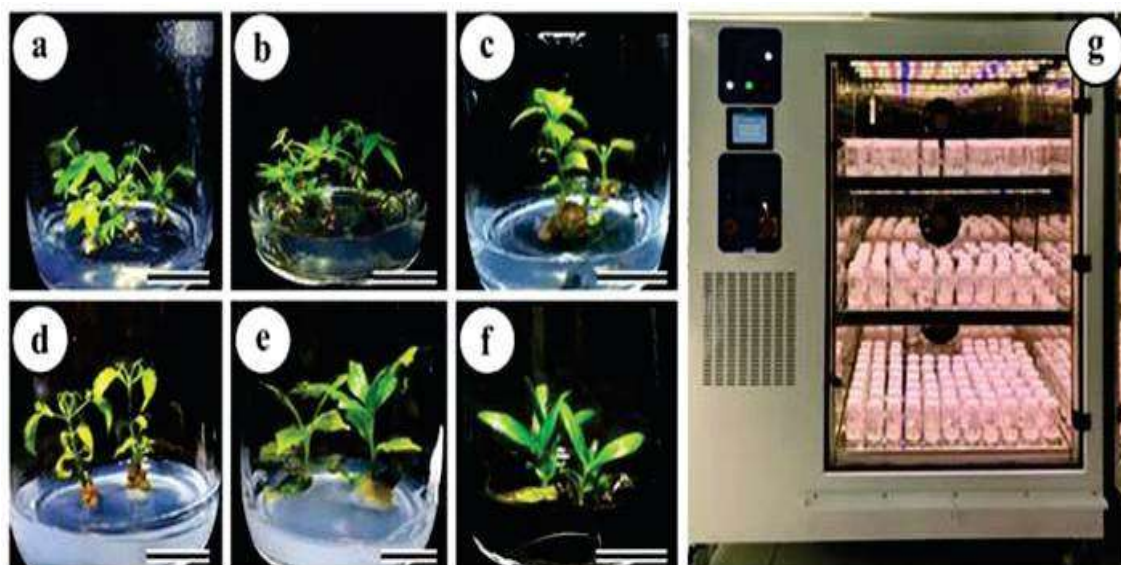


Figura 3 - Espécies arbóreas germinadas em condições *in vitro*. a) *Cedrela fissilis*; b) *Handroanthus albus*; c) *H. impetiginosus*; d) *H. heptaphyllus*; e) *Stryphnodendron adstringens*; f) *Samanea tubulosa*; g) *Byrsonima crassifolia* (murici); h) *Leucaena leucocephala*. Barra = 2 cm.



As fases de multiplicação e enraizamento das plântulas, foram realizadas em sistemas fotomixotróficos e fotoautotróficos, em que foram utilizadas câmaras climáticas de crescimento (modelo TE-4002/3, Tecnal®, Piracicaba – Brasil) configuradas para controle preciso da concentração de CO₂, ventilação, temperatura e umidade relativa. Essa estratégia possibilitou validar o desempenho das espécies em condições de cultivo progressivamente mais autossustentáveis, e sob atmosferas enriquecidas com CO₂, simulando cenários climáticos futuros. A Figura 4 ilustra a aplicação desses sistemas no monitoramento do desenvolvimento morfofisiológico das espécies arbóreas em ambiente controlado, reforçando o aprimoramento de protocolos adaptados à realidade das mudanças climáticas.

Figura 4 - Espécies arbóreas micropropagadas em sistemas fotomixotróficos e fotoautotróficos com ventilação natural e enriquecimento de CO₂. a) *Samanea tubulosa*; b) *Cedrela fissilis*; c) *Handroanthus albus*; d) *H. impetiginosus*; e) *H. heptaphyllus*; f) *Byrsonima crassifolia*; g) plantas *in vitro* cultivadas com enriquecimento de CO₂ em câmaras climáticas (Modelo TE-4002/3, Tecnal®, Piracicaba - Brasil). Barra = 2 cm.



Para as espécies que apresentaram menor taxa de multiplicação, mas germinação *in vitro* satisfatória, os experimentos priorizaram o acompanhamento do desenvolvimento dos embriões zigóticos sob diferentes concentrações de CO₂, que tiveram as sementes como material inicial. Essa abordagem tem viabilizado a produção de mudas mais vigorosas e adaptadas, além de oferecer subsídios importantes para estratégias de reflorestamento funcional, conservação de espécies ameaçadas e mitigação de emissões de gases de efeito estufa em regiões tropicais.

- RESPOSTAS DE ÁRVORES NATIVAS AO CO₂ ELEVADO: CRESCIMENTO E ECOFISIOLOGIA EM CÂMARAS CLIMÁTICAS *EX VITRO*

As florestas do Maranhão, que englobam os biomas Amazônia e Cerrado, são ricas em biodiversidade e desempenham um papel crucial na regulação do clima regional. Nesse contexto, compreender como as espécies nativas respondem ao aumento da concentração de CO₂ é essencial para orientar práticas de reflorestamento, prever impactos ecológicos e desenvolver estratégias de conservação mais eficazes (Leakey et al., 2009).

Pesquisas realizadas com câmaras de crescimento de CO₂ controlado têm gerado informações valiosas sobre as respostas fisiológicas das plantas ao enriquecimento de CO₂. Esses estudos indicam que o aumento da concentração de CO₂ pode influenciar significativamente a fisiologia vegetal, tanto em condições ambientais favoráveis quanto sob estresse. Em espécies de *Eucalyptus*, por exemplo, concentrações elevadas de CO₂ resultaram em maiores taxas fotossintéticas e maior eficiência no uso da água, inclusive em plantas submetidas à restrição hídrica (Lima et al., 2003). De forma similar, em *Ceiba pentandra*, o CO₂ elevado mitigou os efeitos negativos da seca (Silveira & Marengo, 2023).

Estudos conduzidos com espécies lenhosas do Cerrado, como *Hymenaea stigonocarpa*, *Solanum lycocarpum* e *Tabebuia aurea*, cultivadas sob concentrações ambiente e elevadas de CO₂, mostraram incremento na fotossíntese líquida e nos índices de clorofila sob enriquecimento de CO₂. Ainda, foi observada redução na taxa de transpiração, mesmo com irrigação plena, e aumento correspondente na eficiência do uso da água em algumas dessas espécies (Souza et al., 2016). Em adição, uma meta-análise abrangente sobre a resposta de árvores ao CO₂ elevado demonstrou que árvores jovens tendem a alocar o carbono adicional, proveniente do aumento da fotossíntese, para o desenvolvimento de órgãos, ampliando a biomassa de folhas, caules e raízes, além de favorecer maior acúmulo de amido, evidenciando maior eficiência do metabolismo de carboidratos de reserva (Fortirer et al., 2023).

O uso de câmaras climáticas de crescimento controlado, como o modelo TE-4002/3 da TECNAL[®], empregado no atual projeto, proporciona ambiente altamente regulado, permitindo a simulação simultânea de diferentes níveis de CO₂, temperatura e disponibilidade hídrica. Essa abordagem complementa pesquisas que investigam os impactos do CO₂ elevado no crescimento e desenvolvimento de espécies vegetais. Ainda assim, apesar da relevância desse tipo de estudo, experimentos que simulam estresses ambientais combinados com elevação de CO₂ em câmaras climáticas permanecem escassos na literatura (Ghannoum et al., 2010; Fortirer et al., 2023).

Diante desse cenário, ressalta-se a importância de ampliar pesquisas que façam uso de câmaras climáticas controladas, demonstrado no presente estudo. A utilização desse tipo de equipamento contribui para suprir lacunas no entendimento dos efeitos isolados e combinados do CO₂ elevado com outros estresses abióticos, como seca e altas temperaturas, gerando dados mais robustos sobre os impactos das mudanças climáticas. Essa abordagem é essencial para embasar estratégias de adaptação e mitigação, especialmente para espécies de relevância florestal e agrícola.

- CÂMARAS DE TOPO ABERTO: INOVAÇÃO METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DE TROCAS GASOSAS EM PLANTA INTEIRA

A avaliação das trocas gasosas é uma das ferramentas mais importantes da ecofisiologia vegetal, pois permite quantificar a assimilação fotossintética de CO₂, a transpiração e a condutância estomática. Tradicionalmente, essas medições são realizadas com analisadores portáteis de infravermelho (*InfraRed Gas Analyzer*, IRGA) aplicados a pequenas áreas foliares previamente selecionadas. Embora amplamente utilizadas e validadas, essas medições são pontuais e instantâneas, e sua extrapolação para a planta inteira pode gerar erros decorrentes de microclimas internos, heterogeneidade da folhagem e variações na condutância mesofílica (Flexas et al., 2012; Lambers & Oliveira, 2019).

Para superar essas limitações, novas abordagens metodológicas vêm sendo desenvolvidas, como o uso de câmaras de topo aberto (CTA; em inglês: *Open-Top Chambers* – OTCs) e estufas com gradiente térmico, que possibilitam simular cenários climáticos futuros com maior integração das respostas fisiológicas da planta (Morales et al., 2014). Nesse contexto, as CTA destacam-se como uma alternativa metodológica promissora. São estruturas cilíndricas confeccionadas com material transparente de alta transmissividade à radiação fotossinteticamente ativa, envolvendo a parte aérea da planta sem interferir significativamente em seu microclima. O sistema CTA permite estimar as trocas gasosas em planta inteira comparando a concentração de CO₂ entre o ar de entrada (na base da câmara) e o ar de saída (no topo), fornecendo uma estimativa integrada do comportamento fisiológico ao longo do tempo (Corelli-Grappadelli & Magnanini, 1993).

De forma simplificada, no âmbito do atual projeto, as CTA consistem em um modelo cilíndrico de “balão” com 1 m de diâmetro e 1 m de altura, confeccionado em filme de poliéster (Mylar®), com abertura superior de 10 cm para saída do ar e instalação de sensores (**Figura 5**). A base possui abertura lateral com zíper para inserção apenas da parte aérea da planta, mantendo o vaso externo. A ventilação forçada é feita por um ventilador lateral, a 10 cm da base, ligado a uma tubulação sanfonada de 12 cm de diâmetro que conduz o ar de referência. O ar circula pela câmara e sai pelo topo, a diferença na concentração de CO₂ e vapor d’água entre entrada e saída permite estimar a assimilação líquida.

Essa técnica tem sido aplicada com sucesso na avaliação de espécies perenes em contextos agrícolas e florestais, como em estudos com *Coffea sp.* submetido a estresse

térmico e distribuição desigual de luz (Rodrigues et al., 2016), e com *Ormosia hosiei*, onde concentrações elevadas de CO₂ resultaram em ganhos significativos de biomassa e aprimoramento do metabolismo de carbono e nitrogênio (Wei et al., 2024). Tais evidências reforçam a aplicabilidade das CTA em condições reais de cultivo, destacando sua utilidade para o monitoramento ecofisiológico de espécies florestais tropicais de grande porte.

Embora algumas modificações microclimáticas internas possam ocorrer, diversos estudos demonstram a eficácia das CTA na simulação de cenários ambientais futuros, preservando a entrada de luz e precipitação natural em experimentos de campo (Wang et al., 2019; Hollister et al., 2023). Essa combinação de controle experimental e realismo ecológico torna as CTA ferramentas valiosas para avaliar plantas sob estresses climáticos. Assim, o uso de CTA representa uma estratégia eficiente para integrar mensurações mais realistas das trocas gasosas em planta inteira, ampliando o entendimento das respostas ecofisiológicas de espécies tropicais a cenários climáticos futuros. Essa abordagem complementa métodos tradicionais e reforça a geração de dados aplicáveis ao manejo sustentável e à adaptação florestal frente às mudanças globais.

Figura 5 - Câmaras de topo aberto instaladas para monitorar as trocas gasosas de espécies florestais submetidas a estresse hídrico.



- IMPLICAÇÕES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS E SUSTENTABILIDADE PORTUÁRIA

Os resultados a serem obtidos neste projeto, por meio da simulação de enriquecimento de CO₂ *in vitro*, da avaliação ecofisiológica *ex vitro* e da mensuração de trocas gasosas em planta inteira, aplicadas a espécies arbóreas amazônicas, possuem implicações diretas para políticas públicas ambientais e ações de sustentabilidade no entorno do Porto do Itaquí. A quantificação do potencial de sequestro de carbono por espécies nativas em ambientes tropicais úmidos pode subsidiar mecanismos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). A integração entre metodologias *in vitro* e *ex vitro* torna possível o refinamento de critérios técnicos em projetos de restauração ecológica com base funcional, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e o ODS 15 (Vida Terrestre).

Os achados também são compatíveis com os princípios do REDD+ (Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa Provenientes do Desmatamento e da Degradação Florestal, Conservação dos Estoques de Carbono Florestal, Manejo Sustentável de Florestas e Aumento de Estoques de Carbono Florestal), promovendo a conservação florestal e a regeneração natural como estratégias para contenção das emissões líquidas de gases de efeito estufa. Ao mapear respostas morfofisiológicas ao CO₂ elevado, o projeto contribui para a base científica de programas regionais de compensação climática, reforçando o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) ao incentivar práticas tecnológicas aplicadas ao manejo florestal.

Estudos recentes demonstram, por exemplo, que ecossistemas costeiros tropicais como os manguezais amazônicos possuem estoques de carbono substancialmente elevados, podendo superar muitos biomas terrestres, e que sua conversão para usos como pastagens ou carcinicultura libera grandes volumes de CO₂ equivalente. A proteção desses ambientes não apenas evita emissões significativas, como também possibilita a geração de créditos de carbono e a inclusão efetiva em mecanismos internacionais de mitigação, como os programas REDD+ e *Intended Nationally Determined Contributions* – INDC, evidenciando a relevância de estratégias de conservação aliadas ao sequestro de carbono em escala nacional.

Além disso, a abordagem experimental permite identificar espécies com maior plasticidade fisiológica ao enriquecimento de CO₂, capazes de ajustar seu metabolismo e eficiência fotossintética. Essa triagem é estratégica para orientar ações de reflorestamento, implantação de barreiras verdes e compensações em zonas industriais e portuárias

contribuindo para tornar as cidades e comunidades mais sustentáveis (ODS 11). No caso do Porto do Itaqui, os dados gerados podem apoiar estratégias de compensação ambiental vinculadas ao licenciamento de empreendimentos, e ao uso de áreas de preservação funcional.

A adoção de espécies com alto potencial de sequestro pode contribuir para a neutralização de emissões de escopo 1 e 2. O escopo 1 refere-se às emissões diretas da própria operação, como queima de combustíveis fósseis; o escopo 2 inclui as emissões indiretas relacionadas ao consumo de energia elétrica adquirida. A compensação por meio de reflorestamentos pode ser registrada em plataformas como o *GHG Protocol*, fortalecendo a responsabilidade climática institucional, em consonância com o ODS 17 (Parcerias e Meios de Implementação), que incentiva a cooperação entre diferentes atores para atingir metas globais.

Ressalta-se que futuras pesquisas devem considerar a interação entre o enriquecimento de CO₂ e estresses abióticos, como temperatura elevada, salinidade e déficit hídrico. Esses fatores interagem de forma complexa com o CO₂ elevado, podendo atenuar ou até reverter os efeitos fisiológicos positivos observados em condições ideais. Temperaturas altas tendem a intensificar a fotorrespiração e reduzir a eficiência do uso da energia luminosa; a salinidade interfere na absorção de água e nutrientes; e o déficit hídrico compromete a abertura estomática e limita as trocas gasosas. Diante disso, a realização de simulações multifatoriais torna-se essencial para prever, com maior realismo, o desempenho ecofisiológico e adaptativo das espécies em cenários futuros de campo.

Portanto, os desdobramentos do projeto vão além da ciência básica, oferecendo suporte técnico à formulação de políticas ambientais, estratégias de reflorestamento funcional e mecanismos de compensação, alinhando conservação da biodiversidade e mitigação climática em territórios estratégicos como o entorno do Porto do Itaqui, com plena aderência aos ODS identificados como prioritários neste contexto.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O atual projeto representa um avanço significativo no fortalecimento de estratégias baseadas na natureza para mitigação das emissões de gases de efeito estufa, especialmente em regiões tropicais de elevada relevância ecológica e econômica. A integração entre ciência, inovação tecnológica e sustentabilidade operacional destaca-se como um diferencial, sobretudo no contexto do Porto do Itaqui, um dos principais polos

logísticos do país e uma área de significativo impacto antrópico.

A identificação de espécies amazônicas com elevado potencial de sequestro de carbono amplia as possibilidades de aplicação prática em ações de reflorestamento funcional, restauração de paisagens e implantação de barreiras verdes, promovendo não apenas a remoção de CO₂ da atmosfera, mas também a recomposição de processos ecossistêmicos essenciais. A quantificação empírica do sequestro de carbono viabiliza sua inserção em plataformas internacionais de contabilização e compensação, como o GHG *Protocol*, e oferece subsídios concretos para políticas públicas, como o pagamento por serviços ambientais e planos de mitigação climática.

A perspectiva de realizar experimentos multifatoriais, que associam enriquecimento de CO₂ a variáveis ambientais críticas, como estresse hídrico, salinidade e aumento de temperatura, é promissora para aprofundar a compreensão sobre a resiliência funcional das espécies nativas em cenários futuros. Além disso, a integração dos dados obtidos com modelagens ecológicas e climáticas em larga escala poderá subsidiar decisões estratégicas em planejamento territorial, reflorestamento e geração de créditos de carbono, sempre fundamentadas em evidências científicas locais.

Ao consolidar metodologias replicáveis e promover a valorização da ciência regional, o projeto reforça o papel do conhecimento técnico-científico como instrumento de transformação socioambiental. Em um contexto de emergência climática, iniciativas como esta são essenciais para garantir soluções sustentáveis, ancoradas na biodiversidade local e orientadas por um compromisso ético com as gerações presentes e futuras.

REFERÊNCIAS

APÓSTOLO, N. M.; LARRABURU, E. E.; GIL, M. N.; ZAPATER, M. A.; & LLORENTE, B. E. *In vitro* and *ex vitro* germination of three *Handroanthus* species (Bignoniaceae). **Bonplandia**, v. 25, p. 5-16, 2016. DOI: <https://doi.org/10.30972/bon.2511267>

BATBAT, A.; HABBADI, K.; EL HACHLAFI, N.; EL ALLAOUI, N.; YAHYAOU, H.; FERIOUN, M.; EL GHDAICH, C.; BENBOUAZZA, A.; BOUDKHILI, M.; & GRECHE, H. Unveiling germination conditions for *Origanum elongatum*: strategic insights into temperature, salinity, and pH for agricultural propagation and conservation management. **Ecological Frontiers**, v. 45, n. 2, p. 352–361, Apr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2024.10.015>

BHASKAR, R.; XAVIER, L. S. E.; UDAYAKUMARAN, G.; KUMAR, D. S.; VENKATESH, R.; & NAGELLA, P. Biotic elicitors: a boon for the *in-vitro* production of plant secondary metabolites. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 149, p. 7–24, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-021-02131-1>

CHAZDON, R. L.; BROADBENT, E. N.; ROZENDAAL, D. M.; BONGERS, F.; ZAMBRANO, A. M. A.; AIDE, T.

M.; BALVANERA, P.; BECKNELL, J. M.; BOUKILI, V.; BRANCALION, P. H. S.; ... & POORTER, L. Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. **Science Advances**, v. 2, n. 5, e1501639, 13 maio 2016. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501639>

CIOĆ, M.; SZEWCZYK, A.; ŻUPNIK, M.; KALISZ, A.; & PAWŁOWSKA, B. LED lighting affects plant growth, morphogenesis and phytochemical contents of *Myrtus communis* L. *in vitro*. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 132, p. 433–447, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1340-2>

CORELLI-GRAPPADELLI, L.; & MAGNANINI, E. A whole-tree system for gas-exchange studies. **HortScience**, v.28, n.1, p.41–45, 1993. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.28.1.41>

FLEXAS, J.; BARBOUR, M. M.; BRENDDEL, O.; CABRERA, H. M.; CARRIQUÍ, M.; DÍAZ-ESPEJO, A.;

DOUTHE, C.; DREYER, E.; FERRIO, J. P.; GAGO, J.; ... & WARREN, C. R. Mesophyll diffusion conductance to CO₂: an unappreciated central player in

photosynthesis. **Plant Science**, v. 193–194, p. 70–84, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.05.009>

FORTINI, E. A.; BATISTA, D. S.; MAMEDES-RODRIGUES, T. C., FELIPE, S. H. S., CORREIA, L. N. F.;

CHAGAS, K.; SILVA, P. O.; ROCHA, D. I.; & OTONI, W. C. Gas exchange rates and sucrose concentrations affect plant growth and production of flavonoids in *Vernonia condensata* grown *in vitro*. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 144, p. 593–605, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-020-01981-5>

FORTIRER, J. S.; GRANDIS, A.; PAGLIUSO, D.; CASTANHO, C. T.; & BUCKERIDGE, M. S. Meta-analysis of

the responses of tree and herb to elevated CO₂ in Brazil. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 15832, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40783-5>

GHALE, B.; MITRA, E.; SODHI, H. S.; VERMA, A. K.; & KUMAR, S. Carbon sequestration potential of agroforestry systems and its potential in climate change mitigation. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 233, article number 228, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05689-4>

GHANNOUM, O.; PHILLIPS, N. G.; SEARS, M. A.; LOGAN, B. A.; LEWIS, J. D.; CONROY, J. P.; & TISSUE, D.

T. Photosynthetic responses of two eucalypts to industrial-age changes in atmospheric [CO₂] and temperature. **Plant, Cell & Environment**, v. 33, n. 10, p. 1671-1681, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02172.x>

HOLLISTER, R. D.; ELPHINSTONE, C.; HENRY, G. H.; BJORKMAN, A. D.; KLANDERUD, K.; BJÖRK, R. G.; BJÖRKMA, M. P.; BOKHORST, S.; CARBOGNANI, M.; COOPER, E. J.; ... & WOOKEY, P. A. A review of open top chamber (OTC) performance across the ITEX network. **Arctic Science**, v. 9, n. 2, p. 331–344, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1139/as-2022-0030>

HOSSAIN, Md. F. Extreme level of CO₂ accumulation into the atmosphere due to the unequal global carbon emission and sequestration. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 233, article number 105, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05581-1>

IMESC; SEMA; & SEPE. **Zoneamento ecológico-econômico do Maranhão: diagnóstico geoambiental**. São Luís: Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos, 2022. Disponível em: <https://imesc.ma.gov.br>. Acesso em: 4 maio 2025.

IÑAMAGUA–UYAGUARI, J. P.; FITTON, N.; & SMITH, P. Planting trees in livestock landscapes to protect soil and water also delivers carbon sequestration. **Agroforestry Systems**, v. 97, p. 1199–1214, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00857-9>

JOARDER, Md. S. A.; ISLAM, Md. S.; HASAN, Md. H.; KUTUB, A.; KABIR, Md. F.; RASHID, F.; & JOARDER,

T. A. A comprehensive review of carbon dioxide capture, transportation, utilization, and storage: a source of future energy. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, p. 9299–9332, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36284-9>

KOZAI, T.; & KUBOTA, C. **Concepts, Definitions, Ventilation Methods, Advantages and Disadvantages.** p. 19-

30. 2005. *In*: KOZAI, T.; AFREEN, F.; & ZOBAYED, S. (Eds). Photoautotrophic (sugar-free medium) micropropagation as a new micropropagation and transplant production system. Dordrecht: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-3126-2_3

LAMBERS, H.; & OLIVEIRA, R. S. **Scaling-up gas exchange and energy balance from the leaf to the canopy level.** p. 291-300. 2019. *In*: LAMBERS, H.; OLIVEIRA, R. S (orgs). Plant physiological ecology. 3. ed. New York: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-29639-1_8

LEAKEY, A. D.; AINSWORTH, E. A.; BERNACCHI, C. J.; ROGERS, A.; LONG, S. P.; & ORT, D. R. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 10, p. 2859-2876, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erp096>

LEFEBVRE, D.; WILLIAMS, A. G.; KIRK, G. J. D.; BURGESS, P.; MEERSMANS, J.; SILMAN, M. R.; ROMÁN-DAÑOBEYTIA, F.; FARFAN, J.; & SMITH, P. Assessing the carbon capture potential of a reforestation project.

Scientific Reports, v. 11, article number 19907, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99395-6>

LIMA, W. D. P.; JARVIS, P.; & RHIZOPOULOU, S. Stomatal responses of Eucalyptus species to elevated CO₂ concentration and drought stress. **Scientia Agricola**, v.60, n.2, p.231-238, Abr./Jun. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000200005>

LOUBACK, E.; BATISTA, D. S.; PEREIRA, T. A. R.; MAMEDES-RODRIGUES, T. C.; SILVA, T. D.; FELIPE, S.

H. S.; ROCHA, D. I.; STEINMACHER, D. A.; & OTONI, W. C. CO₂ enrichment leads to altered cell wall composition in plants of *Pfa a glomerat(a* Spreng.) Pedersen (Amaranthaceae). **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 145, p. 603–613, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-021-02031-4>

MORALES, F.; PASCUAL, I.; SÁNCHEZ-DÍAZ, M.; AGUIRREOLEA, J.; IRIGOYEN, J. J.; GOICOECHEA, N.;

ANTOLÍN, M.C.; OYARZUN, M.; & URDIAIN, A. Methodological advances: Using greenhouses to simulate climate change scenarios. **Plant Science**, v. 226, p. 30-40, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.03.018> NAVE, L. E.; WALTERS, B. F.; HOFMEISTER, K. L.; PERRY, C. H.; MISHRA, U.; DOMKE, G. M.; & SWANSTON, C. W. The role of reforestation in carbon sequestration. **New Forests**, v. 50, p. 115–137, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9655-3>

OGUNNUBI, O. O.; OWONUBI, S. J.; MALIMA, N. M.; & OJUEDERIE, O. B. Titanium dioxide nanoparticle (TiO₂) mitigation of water-deficit stress in micropropagated sweet potato (*Ipomoea batatas*) plantlets. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v. 28, p. 239–249, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12892-025-00275-6>

OLIVEIRA, T. R.; ARAGÃO, V. P. M.; MOHARANA, K. C.; FEDOSEJEVS, E.; AMARAL, F. P.; SOUSA, K. R.; THELEN, J. J.; VENÂNCIO, T. M.; SILVEIRA, V.; & SANTA-CATARINA, C. Light spectra affect the *in vitro* shoot development of *Cedrela fissilis* Vell. (Meliaceae) by changing the protein profile and polyamine contents. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics**, v. 1868, n. 12, 140529, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2020.140529>

PINHEIRO, M. V. M.; MARTINS, F. B.; XAVIER, A.; & OTONI, W. C. Trocas gasosas influenciam na morfogênese in vitro de duas cultivares de oliveira (*Olea europaea* L.) **Revista Árvore**, v. 37, n. 1, p. 19-29, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000100003>

RODRIGUES, W. P.; MACHADO FILHO, J. A.; DA SILVA, J. R.; FIGUEIREDO, F. A. M. M. A.; FERRAZ, T. M.; FERREIRA, L. S.; BEZERRA, L. B. S.; DE ABREU, D. P.; BERNADO, W. P.; ... & CAMPOSTRINI, E. Whole-canopy gas exchanges in *Coffea* sp. is affected by supra-optimal temperature and light distribution within the canopy: the insights from an improved multi-chamber system. **Scientia Horticulturae**, v. 211, p. 194–202, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.08.022>

SALDANHA, C. W.; OTONI, C. G.; NOTINI, M. M.; KUKI, K. N.; CRUZ, A. C. F.; RUBIO NETO, A.; DIAS, L.

L. C.; & OTONI, W. C. A CO₂-enriched atmosphere improves *in vitro* growth of Brazilian ginseng [*Pfa a glomerata* (Spreng.) Pedersen]. **In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant**, v. 49, p. 433–444, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11627-013-9529-5>

SILVA, D. R.; SOARES, M. N. B.; SILVA, M. C. R.; LIMA, M. C.; SILVA-MORAES, V. K. O.; ALVES, G. L.;

RÍOS-RÍOS, A. M.; DA SILVA, A.; PINHEIRO, M. V. M.; ... & FELIPE, S. H. S. Unlocking the potential of *in vitro* photoautotrophy for *Eryngium foetidum*: biomass, morphophysiology, and acclimatization. **Horticulturae**, v. 10, n. 1, p. 107, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010107>

SILVEIRA, A. M. F.; & MARENCO, R. A. Elevated CO₂ induces down-regulation of photosynthesis and alleviates the effect of water deficit in *Ceiba pentandra* (Malvaceae). **Revista Árvore**, v. 47, p. e4721, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-908820230000021>

SOUZA, J. P.; MELO, N. M.; PEREIRA, E. G.; HALFELD, A. D.; GOMES, I. N.; & PRADO, C. H. B. Responses of woody Cerrado species to rising atmospheric CO₂ concentration and water stress: gains and losses. **Functional Plant Biology**, v. 43, n. 12, p. 1183-1193, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1071/FP16138>

SPINELLI-ARAUJO, L.; BAYMA-SILVA, G.; TORRESAN, F. E.; VICTORIA, D.; VICENTE, L. E.; BOLFE, E. L.;

MANZATTO, C. **Conservação da biodiversidade do Estado do Maranhão: cenário atual em dados geoespaciais**. Documentos, 108. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/meio-ambiente>. Acesso em: 4 maio 2025.

TANAKA, M.; GIANG, D. T. T.; & MURAKAMI, A. Application of a novel disposable film culture system to photoautotrophic micropropagation of *Eucalyptus uro-grandis* (*Urophylla x grandis*). **In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant**, v. 41, p. 173–180, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1079/IVP2004622>

WANG, B.; LI, J.; WAN, Y.; CAI, W.; GUO, C.; YOU, S.; LI, R.; QIN, X.; GAO, Q.;

ZHOU, S.; ... & LI, Y. Variable

effects of 2 °C air warming on yield formation under elevated [CO₂] in a Chinese double rice cropping system. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 278, 107662, 2019.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107662> WAWROSCH, C.; & ZOTCHEV, S. B. Production of bioactive plant secondary metabolites through *in vitro* technologies — status and outlook. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 105, p. 6649–6668, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11539-w>

WEI, Y.; WANG, Mingbin, WANG, Man, YU, D., & WEI, X. Elevated CO₂ concentration enhance carbon and nitrogen metabolism and biomass accumulation of *Ormosia hosiei*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 204, p. 107195, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108725>

WU, H. C.; & LIN, C. C. Carbon dioxide enrichment during photoautotrophic micropropagation of *Protea cynaroides*

L. plantlets improves *in vitro* growth, net photosynthetic rate, and acclimatization.

HortScience, v. 48, n. 10, p. 1293–1297, Oct. 2013. Disponível em:

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.10.1293>

YARTE, M.E.; SANTOS, M. P.; GISMONDI, M. I.; LLORENTE, B. E.; & LARRABURU, E. E. Evaluation of native

plant growth-promoting rhizobacteria in *Handroanthus impetiginosus* micropropagation. **Trees**, v. 37, n.3, p. 641-652, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02372-3>

ZAREI, S.; & EHSANPOUR, A. A. Ethylene inhibition with silver nitrate (AgNO₃) and pyrazinamide (PZA) ameliorates *in vitro* salt tolerance of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) plantlets. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 154, p. 239–247, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02511-9>

Capítulo 08

CONEXÃO VERDE: HUB DE ENERGIA ON-SHORE PARA NAVIOS EM ITAQUI

Clôvis Bôsko Mendonça, Darliane Ribeiro Cunha, Prof. José Gomes de Matos, Prof. Shigeaki Leite de Lima, Hercules Araújo Oliveira, Vitor Renato Pereira Santos

DOI: 10.29327/5850749.1-8

view online: <https://publicacoes.even3.com.br/book/mudancas-climaticas-globais-riscos-e-perspectivas-no-porto-do-itaqui-8507495>

Conexão Verde: Hub de energia on-shore para navios em Itaqui

Clôvis Bôsko Mendonça, Darliane Ribeiro Cunha, Prof. José Gomes de Matos, Prof. Shigeaki Leite de Lima, Hercules Araújo Oliveira, Vitor Renato Pereira Santos

Resumo

Este capítulo apresenta o desenvolvimento de uma solução inovadora para o fornecimento de energia elétrica a navios atracados no Porto do Itaqui, no âmbito do projeto “Conexão Verde: Hub de Energia On-Shore e Autônoma para Navios em Itaqui-MA”. A iniciativa, tem como foco a modernização das operações portuárias por meio da adoção de tecnologias mais limpas e eficientes. O objetivo central do estudo foi estruturar a parametrização técnica de um sistema onshore, isto é, um modelo que permita o fornecimento de energia elétrica a partir de terra para navios durante o período em que permanecem atracados, reduzindo a necessidade do uso de geradores a bordo. Essa abordagem está diretamente associada à diminuição de emissões atmosféricas, ruídos e impactos ambientais no entorno portuário. Ao longo do capítulo, são descritos os principais elementos que compõem um projeto de engenharia dessa natureza, incluindo requisitos técnicos, dimensionamento do sistema, integração com a infraestrutura portuária existente e aspectos operacionais. O estudo também evidencia a complexidade envolvida na implementação desse tipo de solução, que exige alinhamento entre engenharia, regulação, logística e gestão energética. Como resultado, o projeto apresenta uma base técnica consistente para viabilizar a implantação de sistemas de fornecimento de energia on-shore no Porto do Itaqui, contribuindo para a transição energética no setor portuário. O capítulo reforça que iniciativas como essa representam um avanço importante na busca por operações mais sustentáveis, alinhadas às agendas globais de redução de emissões e inovação tecnológica. Mais do que um estudo técnico, o capítulo evidencia como a integração entre pesquisa aplicada e gestão portuária pode gerar soluções concretas para desafios ambientais contemporâneos, posicionando o Porto do Itaqui na vanguarda da sustentabilidade e da modernização do setor.

1. INTRODUÇÃO

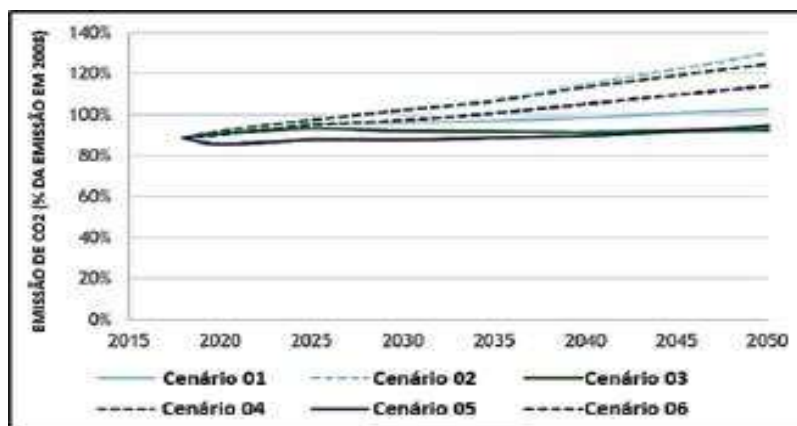
Imagine os portos do mundo como grandes portas de entrada e saída da economia global. Por elas passam alimentos, combustíveis, minérios, produtos industrializados e praticamente tudo aquilo que usamos no dia a dia. Mais de 80% do comércio internacional depende de navios.

No entanto, assim como um carro que queima combustível para se movimentar, os navios também utilizam combustíveis fósseis. Isso significa que liberam gases na atmosfera. Entre eles está o dióxido de carbono (CO_2), um dos principais responsáveis pelo aquecimento global.

Durante muito tempo, não havia regras claras sobre quanto um navio poderia poluir. Era como se cada embarcação navegasse em um oceano sem leis ambientais definidas. Com o crescimento da atividade marítima e a ocorrência de acidentes ambientais graves, a comunidade internacional percebeu que era necessário estabelecer limites.

Atualmente cerca de 3% das emissões antropogênicas de Dióxido de carbono (CO_2) correspondem a transporte marítimo. Esse percentual parece pequeno, no entanto ao se aprofundar nesses valores os pesquisadores da área constataram a possibilidade de causarem impactos irreversíveis (International Maritime Organization, 2020). Ainda segundo o estudo de gases de efeito estufa da International Maritime Organization (IMO), ao analisar seis cenários diferentes, foi estipulada a liberação de CO_2 na atmosfera até 2050, constatando, assim, que haverá o acréscimo entre 90% e 130% em comparação aos valores de 2008(Figura 1).

Figura 1 – Projeção da Emissão de CO_2 pelo transporte marítimo de 2008 até 2050.



Fonte: International Maritime Organization (2020)

No contexto brasileiro, o Relatório de Impactos e Riscos da Mudança do Clima nos Portos Públicos Costeiros Brasileiros, elaborado pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), aponta que as mudanças climáticas podem causar danos significativos à infraestrutura portuária, impactar a cadeia de suprimentos do país e gerar perdas econômicas substanciais.

No que se refere especificamente ao Porto do Itaquí, Carvalho e Rodrigues (2024) apresentam cinco diferentes cenários projetados com base nos níveis de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE). De acordo com essas projeções, até o ano de 2100, o aumento do nível do mar pode variar entre 0,3 m e 1,1 m, dependendo do cenário analisado. Mesmo no cenário mais otimista, que apresenta menores riscos em comparação aos demais, prevê-se a ocorrência de inundações temporárias durante as marés mais elevadas, o que poderá comprometer o acesso ao porto e suas operações. Além dos impactos operacionais, este cenário também sugere o aumento da salinidade nos manguezais, afetando diretamente a biodiversidade local. Como consequência, comunidades que dependem da pesca e do extrativismo do mangue poderão sofrer impactos socioeconômicos consideráveis.

Observa-se também que a corrente de ar, em algumas situações, desloca as emissões provenientes das operações portuárias em direção à cidade. Essa dinâmica é ilustrada na REF _Ref209509917 \h * MERGEFORMAT Figura 24, extraída do Software Mentor, que utiliza modelagens matemáticas para representar a dinâmica meteorológica da região portuária de São Luís. No modelo apresentado, as linhas azuis indicam a direção dos ventos e a trajetória das massas de ar, evidenciando o transporte dos poluentes da área portuária para os centros urbanos, demonstrando a necessidade de estratégias de adaptação e mitigação para a região.

Figura 2 – Representação da dinâmica meteorológica na região portuária.



Fonte: Vale (2024).

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) endossou a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, uma iniciativa estratégica que estabelece 17 objetivos e 169 metas voltados para a promoção de práticas sustentáveis em diversos setores da sociedade. A adoção desta agenda marcou um ponto de inflexão, resultando em um crescimento notável no número de corporações que passaram a divulgar proativamente dados sobre suas iniciativas de Responsabilidade Social Corporativa (Cutrim; Robles, 2022).

Este fenômeno observado em múltiplos setores econômicos também se manifesta no âmbito portuário. As discussões acerca da interação entre portos e o contexto urbano circundante têm evidenciado a influência substancial que os portos exercem sobre o desenvolvimento econômico, social e ambiental local.

Dessa forma, observa-se um maior enfoque na gestão ambiental portuária por meio da implementação de um conjunto de práticas, ações e políticas voltadas à sustentabilidade. Inicialmente, as iniciativas sustentáveis eram adotadas predominantemente em função das exigências legais. No entanto, verificou-se que investimentos em eficiência energética, gestão de resíduos e otimização do uso de recursos naturais não apenas contribuem para a redução dos impactos ambientais, mas também resultam em ganhos operacionais e redução de custos, tornando-se um diferencial estratégico para os portos (Lemos, 2024).

No contexto da descarbonização portuária, é possível estimar a quantidade de CO₂ emitida pelos navios enquanto atracados no Porto do Itaqui. A quantificação da pegada de carbono representa o primeiro passo para o desenvolvimento de um plano de descarbonização, sendo essencial para a definição de estratégias eficazes de mitigação.

Um aspecto fundamental para a instalação portuária é a estimativa das emissões de GEE geradas pelas operações de embarcações atracadas. Nesse contexto, o 3º e o 4º Greenhouse Gas Study da IMO desempenharam um papel essencial ao estabelecer a relação entre a geração de energia elétrica dos motores à combustão e o seu consumo específico de combustível (Specific Fuel Oil Consumption – SFOC).

O Anexo VI da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL) desempenha um papel fundamental na definição das diretrizes adotadas pelo mercado internacional para o controle das emissões de GEE. As regulamentações estabelecidas pela IMO abrangem, entre outros aspectos, a limitação do teor máximo de enxofre nos combustíveis marítimos, além de outras medidas

voltadas à mitigação dos impactos ambientais no setor de transporte marítimo. Essas diretrizes têm impulsionado a adoção de práticas mais sustentáveis e incentivado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à eficiência energética e à redução das emissões no setor, como o Onshore Power Supply – OPS.

- Dióxido de Carbono: MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

A. **Medidas para controle de CO₂ por navios**

De acordo com Freire (2020), durante o Protocolo de Quioto, em 1997, a IMO foi instada a estabelecer limites para as emissões de GEE, considerando que também é sua responsabilidade controlar e reduzir essas emissões provenientes do setor marítimo. Em resposta, em 2003, entrou em vigor a Resolução A.963, intitulada Políticas e Práticas da IMO em Matéria de Redução de Gases de Efeito Estufa.

Seguindo a estratégia delineada pela resolução, em 2005, a IMO incentivou os armadores a adotarem diretrizes voluntárias, promovendo a colaboração dessas empresas na coleta de dados essenciais, como a distância percorrida, carga transportada, tipo e quantidade de combustível consumido durante as viagens, e a estimativa das emissões de carbono.

Posteriormente, tornou-se obrigatório para os navios manterem o Oil Record Book, um registro sistemático dessas informações. Inicialmente esses dados permitiram que os armadores estabelecessem objetivos e estratégias para otimizar a eficiência energética de suas embarcações, considerando as particularidades de suas operações. Além disso, tais informações foram fundamentais para a IMO na formulação do Índice de Gases de Efeito Estufa (Harrison, 2012).

Conforme Freire (2020), em 2006 a IMO lança o “Plano de Trabalho para Identificar e Desenvolver os Mecanismos Necessários para Alcançar Limitação ou Reduzir as Emissões de CO₂ do Transporte Marítimo Internacional”. Como fruto desse plano é criado o Índice e Eficiência Energética voltado para o CO₂.

De acordo com Freire (2020), em 2006 a IMO lançou o Plano de Trabalho para Identificar e Desenvolver os Mecanismos Necessários para Alcançar a Limitação ou Redução das Emissões de CO₂ do Transporte Marítimo Internacional. Como resultado dessa iniciativa, foi desenvolvido o Índice de Eficiência Energética, voltado especificamente para a mitigação das emissões de CO₂ no setor marítimo.

Em 2011, a Resolução MEPC 203(62) introduziu o Capítulo de Regras sobre Eficiência Energética para Navios, estabelecendo como meta a redução de 30% no consumo de energia dos navios até 2025. Essa regulamentação aplica-se a embarcações com porte bruto superior a 400 toneladas, construídas a partir de 2013. Entre as principais iniciativas dessa regulamentação, destacam-se a criação do Índice de Eficiência Energética do Projeto (Energy Efficiency Design Index – EEDI) e do Plano de Gestão de Eficiência Energética do Navio (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP) (International Maritime Organization, 2011).

O Índice de Eficiência Energética do Projeto (EEDI) concentra-se exclusivamente em novos projetos de embarcações, com o objetivo de otimizar o desempenho global desde a fase de concepção. Essa otimização abrange aspectos como a eficiência do motor, o desempenho das hélices e a hidrodinâmica da embarcação, promovendo a redução do consumo de combustível e, conseqüentemente, das emissões de gases de efeito estufa.

O Plano de Gestão de Eficiência Energética do Navio (SEEMP) atua como um guia estratégico de boas práticas operacionais e de manutenção, com o objetivo de aprimorar o monitoramento e a redução das emissões de CO₂. Entre as estratégias recomendadas pelo SEEMP estão o planejamento eficiente de rotas, a análise da velocidade de navegação, a limpeza regular dos cascos, o cumprimento rigoroso dos planos de manutenção dos motores e a adoção de combustíveis alternativos mais limpos.

B. Descarbonização portuária

No tange ao processo de descarbonização portuária, nota-se maior enfoque em ações para redução das emissões em relação ao transporte marítimo e pouco foco no que diz a respeito à parte portuária, cuja responsabilidade se restringe a suportar o transporte aquaviário.

Segundo o Global Warming Potential (GWP), há outros gases com maior potencial para o aquecimento global, porém o CO₂ corresponde a aproximadamente 76% do GEE emitido em nível global, já no setor portuário essa relação sobe para 99% (The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2019). Considerando estes dados, entende-se a necessidade de atenção no processo de descarbonização portuária.

A partir de então passou-se a questionar qual seria a parcela das operações portuárias na emissão de GEE. Dentro desse contexto, as empresas de logística despontaram no comprometimento em medir e reduzir as emissões. Em paralelo, houve também o movimento de união entre a indústria e os varejistas para apoiar pesquisas acerca da possibilidade para o emprego de combustíveis menos poluentes, como etanol, hidrogênio e Gás Natural Liquefeito (GNL).

Os portos, em sua pluralidade, são compostos por uma cadeia multimodal, dessa forma tornam-se responsáveis por diversas formas de emitir GEE, diretamente ou indiretamente. Pode-se elencar emissões provenientes da superestrutura utilizada para a movimentação de carga, máquinas da linha amarela, trens, caminhões que transportam carga nos pátios e os próprios navios através dos motores de combustão auxiliar e das caldeiras.

Além dos maquinários, a infraestrutura portuária também contribui para a emissão de GEE, tornando sua matriz energética um aspecto fundamental na gestão ambiental. Em alguns casos, edifícios e estruturas operacionais passaram a utilizar gás natural em geradores e a adotar energia elétrica de origem solar, visando a redução do impacto ambiental.

Os portos têm buscado implementar o uso de energia proveniente de fontes renováveis, como eólica, solar e maremotriz. Paralelamente, investimentos estão sendo realizados na gestão energética por meio de smart grids e microgrids, sistemas que permitem o ajuste automático da distribuição de energia, promovendo maior eficiência e sustentabilidade. Assim, nota-se que os portos têm papel crucial no processo de descarbonização da indústria marítima. Pois, com a hibridização das embarcações e adoção de combustíveis alternativos, os portos terão que oferecer condições para o reabastecimento ou recarga das embarcações (EIT Innoenergy, 2022).

Conforme a Environmental Protection Agency, dentro da operação portuária como um todo, são cinco as principais fontes de emissão: navio, embarcações de apoio portuário, equipamentos de movimentação de carga, ferrovia e veículos terrestres (Agência Nacional de Transportes Aquaviários, 2024).

Relacionada aos navios, são observadas duas maneiras de mitigar esse processo, uma é a utilização do OPS, Figura 3, a qual estima-se uma redução entre 22% e 37% quando aplicados em terminais voltados para navios de cruzeiros ou container. E a outra opção consiste na otimização da operação, a qual se avalia que a eficiência no

carregamento pode gerar uma redução de 7,8% (The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2019).

Figura 3 – Ilustração conceitual do OPS.



No que diz respeito ao Brasil, atualmente temos a Aliança Brasileira para Descarbonização de Portos (ABDP), criada em março de 2024 e encabeçada pelo Porto do Itaqui, cujo objetivo pretende acelerar a descarbonização dos setores portuário e aquaviário no Brasil, promovendo a troca de experiências, informações e tecnologias entre diversos atores nacionais e internacionais. A iniciativa visa compartilhar conhecimentos e implementar ações estratégicas para reduzir as emissões de GEE nas operações portuárias, alinhando o setor às exigências globais de práticas sustentáveis. Para isso, são realizados encontros on-line periódicos, para favorecer a troca de informações (Aliança Brasileira para Descarbonização de Portos, 2024).

Em novembro de 2024 no Porto de Suape, Pernambuco, a Aliança promoveu o 1º Encontro ABDP, que reuniu especialistas e representantes do setor para debater soluções inovadoras para a sustentabilidade portuária. Dessa forma, a ABDP desempenha um papel fundamental na transição energética do setor portuário brasileiro, fortalecendo seu posicionamento no cenário global e garantindo que o país aproveite plenamente as

oportunidades emergentes no campo da sustentabilidade (Aliança Brasileira para Descarbonização de Portos, 2024).

C. Onshore Power Supply - OPS

Uma das alternativas para mitigar os problemas das emissões atmosféricas em portos e terminais é o uso do OPS. Sabe-se que ao atracar nos portos para realizar as operações de carga e descarga, os navios desligam o motor principal e ativam os motores auxiliares para gerar energia elétrica e suprir as necessidades da embarcação.

Apesar de os motores auxiliares utilizarem combustível menos poluente que o óleo pesado, ainda assim emitem significativa quantidade de dióxido de carbono na atmosfera. Como alternativa para esse problema tem-se o OPS, sistema que se caracteriza pela possibilidade de fornecer energia elétrica de terra via cabo para o navio, este sistema permite que o navio, após sua atracação, desligue seus motores auxiliares (Motor de Combustão Auxiliar – MCA) e se alimente com energia elétrica proveniente de terra.

Segundo a International Maritime Organization (2012), o OPS é uma medida eficaz para a redução da emissão de dióxido de carbono e outros poluentes atmosféricos, contribuindo diretamente para a melhoria da qualidade do ar. Além disso, a adoção dessa tecnologia também resulta na diminuição de vibrações e ruídos, promovendo um ambiente portuário mais sustentável e menos impactante para as comunidades adjacentes.

Este sistema é uma das soluções pensadas para auxiliar no processo de descarbonização portuária, e, tem sua eficácia comprovada, ainda que seja parcialmente utilizado em uma operação. Observa-se este fato na pesquisa de Reusser e Perez (2021) que propuseram um sistema de controle bidimensional que combina o uso simultâneo do OPS com o MCA, o qual levaram ao mínimo o consumo específico de combustível do MCA. A simulação, realizada ao longo de 10 horas de operação em um navio-tanque, demonstrou que o modelo proposto reduz as emissões de CO₂ em 20%, SO_x em 30% e NO_x em 34%, evidenciando a eficácia da abordagem na mitigação dos impactos ambientais do setor marítimo.

No entanto, esta ferramenta é acompanhada de alguns entraves, pois o custo representa um dos principais desafios para a sua implementação, uma vez que diversos fatores devem ser considerados, tais como qual tipo de tecnologia a ser empregada no

OPS, se haverá necessidade de conversores de frequência, a distância entre as fontes de energia, o dimensionamento do cabeamento, os requisitos de manutenção, se há capacidade estrutural do píer para suportar os equipamentos, entre outros aspectos (Bulloc et al., 2023).

Segundo o The Port of Bremen (2023), os custos para a instalação de um sistema de OPS podem variar entre US\$ 1,05 milhão e US\$ 37 milhões, a depender das especificidades do terminal portuário. Considerando as necessidades operacionais do Porto de Bremen, que inclui terminais para navios de cruzeiro, transporte de frutas, embarcações Roll-on/Roll-off (Ro-Ro), contêineres e carga geral, o investimento estimado para a implementação do sistema foi de aproximadamente US\$ 36,4 milhões.

Conforme apontado por Kizielewicz (2024), outro desafio para a implementação do OPS é a falta de informações econômicas disponibilizadas pelos armadores sobre os benefícios dessa tecnologia. Além disso, o autor destaca a escassez de publicações que abordem a adaptação de navios em operação tanto para o uso do OPS quanto para a transição para combustíveis menos poluentes.

Uma das publicações que existem nesse contexto é a documentação desenvolvida pela International Association of Ports and Harbors (2010) e pela World Port Climate Initiative, que tem como objetivo orientar os Estados na adoção do OPS. Há também, o manual elaborado pela High Voltage Shore Connection que apresenta padrões técnicos para a instalação dessa tecnologia, auxiliando na padronização e viabilidade de sua implementação (Kizielewicz, 2024).

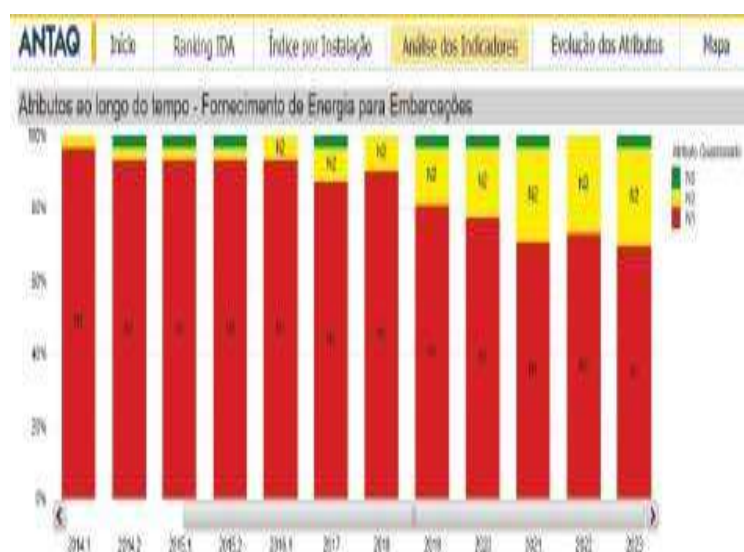
A nível mundial, o OPS tem sido utilizado com uma das ferramentas no processo de descarbonização portuária. Segundo Vital (2021), a Europa lidera no quantitativo de instalações portuárias com esta tecnologia, em seguida tem-se a América do Norte, visto que os Estados Unidos adotam esta tecnologia há décadas no âmbito militar, devido ao programa de “Conservação de Energia a Bordo de Navio Incentivado da Marinha” e, por fim encontra-se esta tecnologia também na Ásia. Porém não há registros do seu emprego com grande expressividade na América do Sul e nem no Brasil.

Atualmente, as iniciativas relacionadas ao OPS no Brasil são mapeadas pela ANTAQ, por meio do Índice de Desempenho Ambiental (IDA), o qual há o indicador “Fornecimento de Energia para Navios”. Este indicador aponta três níveis de desenvolvimento: N1 – Não possui OPS, N2 – Realizou estudo de viabilidade para

implementação do OPS e N3 – Dispõem de Sistema OPS (Agência Nacional de Transportes Aquaviários, 2023).

Como é possível ver no relatório extraído da página da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2023) entre 2014 e 2023 houve uma crescente no estudo para a implantação do OPS, tal fato vai ao encontro do movimento feito pela comunidade científica. A Figura 4 aponta também que em alguns anos parecem registros de instalações portuárias que dispõem do sistema, no entanto, esta informação deve ser revista, pois em contrapartida, segundo o Diagnóstico de Descarbonização, Infraestrutura e aplicações do Hidrogênio nos Portos (2023) feito pela Deutsche GIZ, o qual foi encomendado pelo ANTAQ, aponta que a tecnologia ainda não foi implementada em nenhum TUP ou Porto Público.

Figura 4– Fornecimento de energia para embarcações em Portos Brasileiros.



Fonte: Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2023).

Recentemente foi instituída a Portaria Nº 58, de 24 de janeiro, que consiste na Política de Sustentabilidade do Ministério de Portos e Aeroportos em que formaliza diretrizes, objetivos, pilares e instrumentos para sustentabilidade e a boa governança ambiental, climática e social nos setores portuário, aquaviário, aeroviário e aeroportuário.

A portaria visa institucionalizar o compromisso do ministério com as práticas sustentáveis e se alinhar aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ODS, da agenda de 2030. No que concerne o OPS não há nenhuma citação direta, porém elenca a necessidade de promover a agenda de descarbonização no setor portuário e institui o

programa “Pacto pela Sustentabilidade” o qual premia corporações que adotam práticas ambientais, sendo um dos eixos voltado para a descarbonização, transição energética e emprego de novas tecnologias.

2. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa de engenharia aponta que há pouca inovação tecnológica daquilo que é necessário para a execução um projeto básico de OPS voltado ao atendimento da demanda de energia das embarcações de carga, tendo atualmente normas técnicas consolidadas e diversificação de fornecedores de produtos e serviços. Por um lado, este cenário aponta para soluções de “prateleiras” disponíveis no mercado que mitigam os riscos do investimento, porém, por outro lado, constitui um obstáculo na busca por fontes destes financiamentos uma vez que comumente editais e normas exigem pesquisa, desenvolvimento e inovação.

Uma possibilidade de convergência entre a necessidade de inovar com a buscar por suporte financeiro é a integração do OPS com mecanismos presentes em microrrede inteligentes, também conhecidas como SmartGrid. A partir desta integração se poderia melhorar a performance de confiabilidade, eficiência e sustentabilidade inovando a partir do Sistema de Gerenciamento de Energia – EMS que comandaria o complexo da rede de distribuição com OPS de forma automatizada.

REFERÊNCIAS

ABU BAKAR, Nur Najihah *et al.* Electrification of onshore power systems in maritime transportation towards decarbonization of ports: A review of the cold ironing technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 178, p. 113243, maio 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **IDA**. Brasília, DF: Antaq, 2023. Disponível em: <http://web.antaq.gov.br/ResultadosIda/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **Revisão da experiência internacional sobre redução das emissões no transporte marítimo e nos portos**. Brasília, DF: Antaq, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antaq-1/RelatrioEixo1diagramado.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2025.

ALIANÇA BRASILEIRA PARA DESCARBONIZAÇÃO DE PORTOS. **Encontro 2024 da Aliança Brasileira para Descarbonização de Portos**. Cabo de Santo Agostinho, 2024. Disponível em: <https://www.descarbonizacaoportos.com.br/event-details/encontro-2024-da-alianca-brasileira-para-descarbonizacao-de-portos>. Acesso em: 15 dez. 2024.

ALIANÇA BRASILEIRA PARA DESCARBONIZAÇÃO DE PORTOS. **Sobre**. Sumaré: ABDP, 2024. Disponível em: <https://www.descarbonizacaoportos.com.br/about>. Acesso em: 18 mar. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 99.165, de 12 de março de 1990**. Promulga a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar. Brasília, DF: Presidência da República, 1990. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1990/decreto-99165-12-marco-1990-328535-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 10 dez. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010; nº 470, de 13 de dezembro de 2011; nº 901, de 8 de dezembro de 2020 e dá outras providências. Brasília, DF: Aneel, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acesso em: 15 jan. 2025.

BRASIL. Ministério dos Transportes; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Plano mestre do complexo portuário do Itaqui**: objeto 1 – suporte no planejamento do setor portuário nacional: fase 1 – atualização dos planos mestres. [S. l.], 2018. Disponível em: https://www.portodoitaqui.com/_files/arquivos/plano-mestre.pdf. Acesso em: 10 mar. 2024.

BULLOCK, Simon *et al.* Improving shore power project economics at the port of aberdeen. **Marine Policy**, Netherlands, v. 152, p. 2-9, 2023.

CARVALHO, Ana Carolina Coutinho; RODRIGUES, Taíssa Caroline Silva. Impactos das mudanças climáticas na bacia hidrográfica do itaqui: avaliação do aumento do nível do mar. **IOSR Journal of Business and Management**, New York, v. 26, n. 10, p. 36-43, 2024. Disponível em: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jbm/papers/Vol26-issue10/Ser-11/F2610113643.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2025.

CASSERES, Eduardo Miranda Müller Drumond. **Potencial de mitigação das emissões de CO2 do transporte marítimo internacional**: uma análise baseada em cenários para o caso dos navios-tanque de petróleo bruto. 2018. 185 f. Dissertação (Mestrado em

Planejamento Estratégico) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/12263/1/EduardoMirandaMullerDrumondCasseres-min.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

CHEN, Shukai *et al.* An operational-mode-based method for estimating ship emissions in port waters. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S. l.], v. 101, p. 103080, Dez. 2021.

CLEAN ARCTIC ALLIANCE. **Infographic**: emission control areas – reducing air pollution from shipping. [S. l.], 28 jun. 2023. Disponível em: <https://cleanarctic.org/2023/06/28/infographic-emission-control-areas-reducing-air-pollution-from-shipping/>. Acesso em: 13 jan. 2025.

CONVENÇÃO Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios. [S. l.], 2005. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/ccaimo/marpol#:~:text=A%20Convenção%20Internacional%20para%20a,daquelas%20substâncias%20no%20ar%20e>. Acesso em: 12 nov. 2024.

CUTRIM, Sérgio Sampaio; ROBLES, Leo Tadeu (org.). **Manifesto**: ESG portuário. São Luís: Editora da UFMA, 2022. *E-book*.

DAVID, Pierre A. **Logística internacional**. São Paulo: Cengage Learning, 2017.

DESCARTES DATAMYNE DO BRASIL. **Unidade equivalente a vinte pés**: o que é um TEU no transporte marítimo? Vinhedo, 2023. Disponível em: <https://www.datamyne.com.br/nossos-produtos/dados-comerciais-globais/what-is-a-teu-in-shipping/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

EIT INNOENERGY. **A practical guide to decarbonising ports**: catalogue of innovative solutions. Eindhoven: Eit Innoenergy, 2022. Disponível em: https://eit.europa.eu/sites/default/files/decarbonising_ports-catalogue_of_innovative_solutions_f.pdf. Acesso em: 10 mar. 2024.

EMAP entrega berço 102 do Porto do Itaqui. **Imirante**, São Luís, 27 mar. 2022. Disponível em: <https://imirante.com/noticias/maranhao/2010/08/31/emap-entrega-berco-102-do-porto-do-itaqui>. Acesso em: 17 dez. 2024.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA. Porto do Itaqui. **Histórico**. São Luís, 2023a. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/porto-do-itaqui/historico>. Acesso em: 17 dez. 2024.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA. Porto do Itaqui. **Infraestrutura**. São Luís, 2023b. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/porto-do-itaqui/infraestrutura>. Acesso em: 10 mar. 2024.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA. Porto do Itaqui.

Painel de carga. São Luís, 2025. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/porto-do-itaqui/operacoes-portuarias/painel-de-carga>. Acesso em: 10 mar. 2025.

EMPRESA MARANHENSE DE ADMINISTRAÇÃO PORTUÁRIA. Porto do Itaqui.

Porto do Itaqui realiza 1º teste de ship to ship para combustíveis. São Luís, 13 jul. 2023c. Disponível em: <https://www.portodoitaqui.com/imprensa/noticia/porto-do-itaqui-realiza-1-teste-de-ship-to-ship-para-combustiveis>. Acesso em: 10 set. 2024.

ENTEC. **UK Ship Emission Inventory:** final report. [S. l.], 2010. Disponível em:

https://uk-air.defra.gov.uk/reports/cat15/1012131459_21897_Final_Report_291110.pdf. Acesso em: 15 mar. 2024.

ERICSSON, Patrik. **Shore-side power supply:** a feasibility study and a technical solution for an on-shore electrical infrastructure to supply vessels with electric power while in port. 2008. 180 f. Thesis (Master of Science) – Chalmers University of Technology, Göteborg, 2008. Disponível em: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/174062/174062.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

EUROPEAN SEA PORTS ORGANISATION. **ESPO green guide 2021:** a manual for

European ports towards a green future. Brussel: ESPO, 2021. Disponível em: <https://www.espo.be/media/ESPO%20Green%20Guide%202021%20-%20FINAL.pdf>.

Acesso em: 15 nov. 2024.

FERREIRA, Laís Raysa Lopes. **Gestão ambiental sustentável do modal marítimo:**

uma análise das emissões de dióxido de carbono de navios porta-contêineres. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

FONSECA, Maurílio Magalhães. **Arte naval.** 8. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2019.

FREIRE, Tânia Sofia Martinho. **Emissões gasosas de navios de cruzeiro:** impactes das águas de lavagem dos scrubbers no meio marinho. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Qualidade e Ambiente) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2020.

GOVERNO ressalta posição estratégica do Porto do Itaqui para exportação de grãos no Brasil durante 5º Diálogo Brasil-Japão. **O Imparcial**, São Luís, 10 set. 2024.

Disponível em: <https://oimparcial.com.br/noticias/2024/09/governo-ressalta-posicao-estrategica-do-porto-do-itaqui-para-exportacao-de-graos-no-brasil-durante-5o-dialogo-brasil-japao/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

HARRISON, James. Recent developments and continuing challenges in the regulation of greenhouse gas emissions from international shipping. **Edinburgh School of Law Research Paper**. [S. l.], n. 12, p. 1-28, 2012. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2037038. Acesso em: 10 mar. 2024.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF PORTS AND HARBORS. **Onshore power supply**. [S. l.], 2010. Disponível em: <https://sustainableworldports.org/project/iaph-onshore-power-supply>. Acesso em: 10 dez. 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Fourth Greenhouse Gas Study 2020**. London: IMO, 2020. Disponível em: <https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>. Acesso em: 10 set. 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Resolution MEPC.203(62), on 15 July 2011**. Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution From Ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto. [S. l.], 2011. Disponível em: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.203\(62\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.203(62).pdf). Acesso em: 10 set. 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Second IMO GHG study 2009**. London: IMO, 2009. Disponível em: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/SecondIMOGHGStudy2009.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **On-shore power supply**. Albert Embankment: IMO, 9 Oct. 2012. Disponível em: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Circ.794.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Third IMO greenhouse gas study 2014**: executive summary and final report. London: IMO, 2015. Disponível em: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2024.

KIZIELEWICZ, Joanna. Onshore power supply: trends in research studies. **Frontiers Energy Research**, Lausanne, v. 12, 12 mar. 2024. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2024.1383142/full>. Acesso em: 10 dez. 2024.

LEMOS, Luane. **Manual de gestão ambiental portuária**. 2. ed. Curitiba: Editora Appris, 2024.

MARANHÃO. Governo do Estado. **Porto do Itaqui comemora o melhor ano de sua história**. São Luís, 14 jan. 2024. Disponível em: <https://www.ma.gov.br/noticias/porto-do-itaqui-comemora-o-melhor-ano-de-sua-historia>. Acesso em: 17 dez. 2024.

MORENO-GUTIÉRREZ, Juan *et al.* Methodologies for estimating shipping emissions and energy consumption: a comparative analysis of current methods. **Energy**, [S. l.], v. 86, p. 603-616, 2015.

MORENO-GUTIÉRREZ, Juan; DURÁN-GRADOS, Vanessa. Calculating ships' real emissions of pollutants and greenhouse gases: towards zero uncertainties. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 750, p. 141471, Jan. 2021.

PETROBRAS. **Combustíveis marítimos**: informações técnicas. [Rio de Janeiro]: Petrobras, 2021.

PRODIST Módulo 5 – Requisitos de sistemas de medição para faturamento por postos horários (TOU).

REN ANEEL nº 1.000/2021 – Regras de prestação do serviço de distribuição: conexão em ≥ 69 kV; modalidades Azul/Verde; faturamento de demanda do Grupo A; cobrança de reativo excedente.

REN ANEEL nº 1.059/2023 – Requisitos de medição/telemetria (registros intervalares de 5–60 min; disponibilização das grandezas).

REUSSER, Carlos A.; PÉREZ, Joel R. Evaluation of the emission impact of cold-ironing power systems, using a bi-directional power flow control strategy. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 1, p. 334, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/1/334>. Acesso em: 10 dez. 2024.

ROJAS, Pablo. **Introdução à logística portuária e noções de comércio exterior**. Porto Alegre: Bookman, 2014.

SOUSA Cláudia *et al.* Distribuição de combustíveis marítimos no brasil, em conformidade com o imo 2020: oportunidades e desafios para o brasil. **FGV Energia**, Rio de Janeiro, p. 1-18, 2020. Disponível em <https://repositorio.fgv.br/bitstreams/b59393f7-5388-4e72-a168-9c36defe5055/download>. Acesso em: 10 abr. 2024.

TERMINAL de fertilizantes começa a operar no Porto do Itaqui. **Portos e Navios**, Rio de Janeiro, 22 nov. 2023. Disponível em: <https://www.portosenavios.com.br/noticias/>

portos-e-logistica/terminal-de-fertilizantes-comeca-a-operar-no-porto-do-itaqui.

Acesso em: 17 dez. 2024.

THE PORT OF BREMEN. **Cruise Terminal, modern, secure, purpose-built.**

Bremerhaven, 2023. Disponível em: <https://www.bremenports.de/en/ports/bremerhaven>. Acesso em: 10 dez. 2024.

THE WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT

INFRASTRUCTURE. **Carbon Management for Port and Navigation Infrastructure.** Simon Bolivarlaan: PIANC, 2019. (EnviCom WG Report, 188). Disponível em: <https://www.pianc.org/publication/carbon-management-for-port-and-navigation-infrastructure/>. Acesso em: 10 mar. 2024.

URDAHL, Kristin. **Watch out for new emission control areas.** [S. l.]: Gard, 24 Jan. 2024. Disponível em: <https://gard.no/insights/watch-out-for-new-emission-control-areas/>. Acesso em: 13 jan. 2025.

VALE. **Tenha o tempo como seu aliado:** Mentor eficiência com o tempo. São Luís, 2024. Disponível em: <https://mentorporto.attotechnology.com.br/user/sign-in?next=/map>. Acesso em: 10 nov. 2024.

VIDAL, Leonardo de Carvalho. **Análise de viabilidade econômica e ambiental da utilização de energia elétrica com sistema Shore Power em um contexto para instalações portuárias Brasileiras.** 2021. 119 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/3330/1/Tese_2022026.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024.

ZANELLA, Tiago Vinicius. Navios e poluição do ar: um estudo sobre a regulação das emissões atmosféricas por embarcações. **Revista da Escola de Guerra Naval**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 1-15, 2018.

GOVERNO DO
MARANHÃO
TRABALHANDO PARA TODOS

EMAP
Empresa Maranhense
de Administração Portuária



**PORTO DO
ITAQUI**