



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
CURSO BACHARELADO EM OCEANOGRAFIA

LUCIA OLIVEIRA ALENCAR

IMPACTO DAS ONDAS DE CALOR MARINHAS EM ECOSISTEMA RECIFAL
NO LITORAL DO CEARÁ (NE, BRASIL)

FORTALEZA

2022

LUCIA OLIVEIRA ALENCAR

IMPACTO DAS ONDAS DE CALOR MARINHAS EM ECOSSISTEMA RECIFAL NO
LITORAL DO CEARÁ (NE, BRASIL)

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Oceanografia do Instituto de Ciências do
Mar da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção título
de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Geraldo
Ferreira

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A354i Alencar, Lucia.
IMPACTO DAS ONDAS DE CALOR MARINHAS EM ECOSSISTEMA
RECIFAL NO LITORAL DO CEARÁ (NE, BRASIL) / Lucia Alencar. – 2022.
71 f. : il. color.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do
Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira.
1. Ondas de Calor Marinhas (OCMs). 2. Sensoriamento remoto. 3.
Branqueamento de corais. 4. Temperatura da superfície do mar (TSM); 5.
Mudanças climáticas. I. Título.

CDD 551.46

LUCIA OLIVEIRA ALENCAR

IMPACTO DAS ONDAS DE CALOR MARINHAS EM ECOSSISTEMA RECIFAL NO
LITORAL DO CEARÁ (NE, BRASIL)

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Oceanografia do Instituto de Ciências do
Mar da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção título
de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Geraldo
Ferreira

Aprovada em

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Natália Rudorff Oliveira
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE

Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha Mãe e Sabrina.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha mãe que é meu maior exemplo de mulher que batalhou para conquistar tudo. Minha família, Bina e irmã de coração Sis, que me apoiaram e fizeram tudo que podia para que eu conseguisse chegar até aqui.

Um imenso agradecimento ao Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira, pela excelente orientação, amizade e por sempre me tranquilizar. Tenho muito a agradecer a ele pelos conselhos, apoio, reflexões, críticas, sugestões recebidas e agradeço também à Universidade Federal do Ceará pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora pela disponibilidade de tempo para analisar este documento, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A meus amigos Letícia, Marília, Amanda e especialmente André e Lorena que estiveram sempre ao meu lado apesar dos constantes dramas, nos melhores e piores momentos, que nunca me deixaram desistir e que me deram forças para acreditar no meu potencial e a Alaska que apesar dos perrengues me ajudou a vencer essa etapa.

Ao Professor Aubains, Natália Rudorff, Rogério, e a todo o pessoal do Laboratório de Observação da Terra, em especial Lais Monte, Tiffany, Ocione e Rafael pelo apoio, torcida e ajuda no desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos os meus amigos de curso e integrantes do grupo do Whatsapp do veneno solto pela grande amizade e momentos bons na Oceanografia.

E aos meus colegas e amigos de trabalho Raimundo José, Antonio Ernani e os cachacinhas Saulo Furtado e Dalila Ferreira pelo apoio e por me fazerem rir, tomar umas e tornar meus dias de trabalho menos cansativos. Muito Obrigada!

“Se o mar estiver doente,
sentiremos isso. Se morre,
morremos. Nosso futuro e o
estado dos oceanos são um.”

(Sylvia Earle)

RESUMO

O recife de coral é o ecossistema mais ameaçado pelo aumento da temperatura do mar, além de ser suscetível às mudanças climáticas. O aquecimento dos oceanos e a forte exposição solar são fatores estressantes para as comunidades de corais levando a um estresse térmico, ocasionando a expulsão das zooxantelas e por fim o branqueamento. Várias condições sazonais locais influenciam o branqueamento, como a temperatura e turbidez, por isso são fatores relevantes durante o estresse térmico. Assim, recifes sob condições estressantes possuem menor capacidade de recuperação. Além disso, a combinação desses fatores com eventos climáticos extremos, como as Ondas de Calor Marinhas (OCMs), reduz a capacidade dos recifes de coral de se recuperarem de distúrbios. Eventos extremos quentes de temperatura do oceano acima do 90 percentil com duração de 5 ou mais dias têm sido denominados ondas de calor marinhas (OCM). Desse modo, o monitoramento de sua situação em escala regional torna-se relevante e o sensoriamento remoto fornece uma ferramenta eficaz na identificação desses eventos. No entanto, no Atlântico Equatorial, são escassos os estudos sobre sua relação com o branqueamento. Foi investigado as condições oceanográficas de 2002 a 2022 e baseado nisto, quatro pontos foram selecionados para determinar a frequência, duração e intensidade das OCMs em dois recifes costeiros e dois recifes offshore. As OCMs ocorridas na área estudada tiveram suas propriedades acentuadas desde 2010. A intensidade máxima tende a ocorrer no verão e outono na área de estudo. O foco do trabalho foi principalmente em três períodos, que são o verão/outono de 2020, o inverno/primavera 2021 e outono de 2010, períodos de OCM e consequente branqueamento de corais. As OCMs mais intensas ocorreram no recife costeiro da área B e a maior intensidade cumulativa foi na região offshore da área C. Estima-se que a turbidez no recife costeiro da área B, aliado a outros estressores pode ter provocado o branqueamento no período reportado. Nos recifes offshore, a alta temperatura e turbidez podem ter provocado branqueamento no período reportado. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo determinar os eventos de OCMs e relacioná-los às variáveis ambientais para correlacionar a eventos de branqueamento de coral reportados na literatura.

Palavras-chave:

Mudanças climáticas; Estresse térmico; Branqueamento de corais, Temperatura da superfície do mar (TSM); Sensoriamento Remoto; Ondas de Calor Marinhas (OCMs);

ABSTRACT

The coral reef is the ecosystem most threatened by rising sea temperatures, in addition to being susceptible to climate change. Ocean warming and strong sunlight exposure are stressors for coral communities leading to thermal stress, causing the expulsion of zooxanthellae and ultimately bleaching. Several seasonal conditions locally affect bleaching, such as temperature and turbidity, so they are relevant factors during thermal stress. Thus, reefs under stressful conditions have less recovery capacity. Furthermore, the combination of these factors with extreme weather events such as Marine Heat Waves (MHWs) reduces the ability of coral reefs to recover from disturbances. Extreme ocean temperature events above the 90th percentile lasting 5 or more days are termed marine heat waves (MHWs). Thus, monitoring its situation on a regional scale becomes relevant and remote sensing provides an effective tool in identifying these events. However, in the Equatorial Atlantic, there are few studies on its relationship with bleaching. The oceanographic conditions from 2002 to 2022 were investigated and based on this, four points were selected to determine the frequency, duration and intensity of MHWs in two coastal reefs and two offshore reefs. The MHWs that occurred in the studied area had their properties accentuated since 2010. The maximum intensity tends to occur in the summer and autumn in the study area. The focus of the work was mainly on three periods, which are the summer/autumn of 2020, the winter/spring of 2021 and autumn of 2010, periods of MHWs and consequent coral bleaching. The most intense MHWs occurred in the coastal reef of area B and the highest cumulative intensity was in the offshore region of area C. It is estimated that turbidity in the coastal reef of area B, combined with other stressors, may have influenced the bleaching in the reported period. On offshore reefs, high temperature and turbidity may have caused bleaching in the reporting period. Given the above, this study aimed to determine MHWs events and relate them to environmental variables to correlate with coral bleaching events reported in the literature.

Keywords:

Climate changes; Thermal stress; Coral bleaching, Sea surface temperature (SST); Remote sensing; Marine Heat Waves(MHWs);

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da área de estudo na costa brasileira, noroeste do Oceano Atlântico Norte Equatorial entre as latitudes 2-36°S e longitude 4-40°W, os pontos A, B, C e D indicam a localização de onde foram extraídas as séries temporais diárias. A hidrografia da área de estudo também está indicada. Os pontos selecionados foram representados por um retângulo vermelho; Ponto A (03°33'80"S e 38°21' 60"O), Ponto B, Ponto C (3°32'07.51"Se 38°47'48.62"S) e Ponto D (3°23'56.17"S e 39° 00' 43.11").	20
Figura 2 - Representação Esquemática da Sucessão da Dissolução de Coral após Ondas de Calor Marinhas. Fonte: Adaptado do inglês de Leggat, w. et al, (2019).	23
Figura 3 - Fluxograma da metodologia adaptada de Hobday <i>et al</i> (2016) para a caracterização das OCM.	27
Figura 4 - Gráficos representando em a) a intensidade máxima, b) duração, c) intensidade média e d) intensidade acumulada das OCMs na área A.	29
Figura 5 - Gráficos representando em a) o número de OCMs por ano e em b) a intensidade máxima média da série de 20 anos na área A.	29
Figura 6 - Gráficos representando em a) duração, b) intensidade máxima, c) intensidade acumulada e em d) a intensidade média da OCM na área B.	30
Figura 7 - Gráficos representando em a) o número de OCMs por ano e b) a intensidade máxima média da série de 20 anos na área B.	30
Figura 8 - Gráficos representando a) duração, b) intensidade máxima, c) intensidade acumulada e d) intensidade média da OCM na área C.	31
Figura 9 - Gráficos representando em a) número de OCMs por ano e b) a intensidade máxima média da série de 20 anos na área C.	31
Figura 10 - Gráficos representando em a) a duração, b) intensidade máxima, c) intensidade acumulada e d) intensidade média da OCM na área D.	32
Figura 11 - Gráficos representando em a) número de OCMs por ano e b) intensidade máxima média da série de 20 anos na área D.	33
Figura 12 - Série dos maiores eventos de OCMs identificados (sombreamento vermelho escuro) para as quatro áreas.	34
Figura 13 - Série Temporal das anomalias de clorofila-a (mg/m^3) e $\text{Kd}_{490\text{-a}}$ (m^{-1}) para a área A. 1.a) Clorofila-a em 2020. 1.b) Clorofila-a em 2010. 2.a) $\text{Kd}_{490\text{-a}}$ em 2020. 2.b) $\text{Kd}_{490\text{-a}}$ em 2010.	35

Figura 14 - Série Temporal das anomalias de clorofila-a (mg^{-3}) e Kd490-a (m^{-1}) dos anos de 2010 e 2020 para a área B. 1.a) Clorofila-a em 2020. 1.b) Clorofila-a em 2010. 2.a) KD490-a em 2020. 2.b) KD490-a em 2010.....	36
Figura 15 - Série Temporal das anomalias de clorofila-a (mg/m^3) e Kd490-a (m^{-1}) dos anos de 2010 e 2020 para a área C. 1.a) Clorofila-a em 2021. 1.b) Clorofila-a em 2010. 2.a) KD490-a em 2020. 2.b) KD490-a em 2010.....	37
Figura 16 - Série Temporal das anomalias de clorofila-a (mg/m^3) e Kd490-a (m^{-1}) dos anos de 2010 e 2020 para a área D. 1.a) Clorofila-a em 2020. 1.b) Clorofila-a em 2010. 2.a) KD490-a em 2020. 2.b) KD490-a em 2010.....	38
Figura 17 - Série Temporal de Clorofila (mg m^{-3}) de dados MODIS-Aqua de 20 anos nas quatro áreas.....	40
Figura 18 - Climatologia mensal de Kd490 (m^{-1}) de dados MODIS-Aqua de 20 anos.....	40
Figura 19- Série Temporal de Kd490 (m^{-1}) de dados MODIS-Aqua de 20 anos nas quatro áreas.....	42
Figura 20 - Climatologia da Temperatura da Superfície do Mar de dados AVHRR de 20 anos.....	43
Figura 21 - Imagens diárias de TSM de vários dias em março/2020.....	45
Figura 22 - Série climatológica de TSM de 20 anos (2002-2022) de dados AVHRR contendo o limite do percentil 90 (verde) e os eventos de OCM detectados (sombreado) na área A.....	46
Figura 23 - Série climatológica de TSM de 20 anos (2002-2022) de dados AVHRR contendo o limite do percentil 90 (verde) e os eventos de OCM detectados(sombreado) na Área B.....	46
Figura 24 - Série climatológica de TSM de 20 anos (2002-2022) de dados AVHRR contendo o limite do percentil 90 (verde) e os eventos de OCM detectados(sombreado) na Área C.....	46
Figura 25 - Série climatológica de TSM de 20 anos (2002-2022) de dados AVHRR contendo o limite do percentil 90 (verde) e os eventos de OCM detectados(sombreado) na Área D.....	47
Figura 26 - Série Temporal das anomalias da TSM ($^{\circ}\text{C}$) para a área de estudo. a) TSM-a em 2020 na área A. b) TSMa-a em 2010 na área A. c) TSMa-a em 2020 na área B. d)TSMa-a em 2010 na área B. e) TSMa-a em 2021 na área C. f) TSMa-a em 2010 na área C. g) TSMa-a em 2020 na área D. h) TSMa-a em 2010 na área D.....	48

Figura 27 - Série Temporal de 20 anos (2002-2022) das anomalias da TSM (°C) para a área de estudo, a seta preta indica o período no qual episódios de branqueamento foram relatados na literatura. a)TSMa na área A. b) TSMa na área B. c) TSMa na área C. d)TSMa na Área D.....	51
Figura 28 - Série Temporal de 20 anos (2002-2022) das anomalias de KD490-a e Clorofila-a para a área C, a seta preta indica o período em que os episódios de branqueamento foram relatados na literatura. a) KD490-a b) Clorofila-a.....	54
Figura 29 - Série Temporal de 20 anos (2002-2022) das anomalias de KD490-a e Clorofila-a para a área B, a seta preta indica o período em que o episódio de branqueamento foi relatado na literatura. a) KD490-a b) Clorofila-a.....	56
Figura 30 - Série Temporal de 20 anos (2002-2022) das anomalias de KD490-a e Clorofila-a para a área A, a seta preta indica o período em que os episódios de branqueamento foram relatados na literatura. a) KD490-a b) Clorofila-a.....	57

TABELAS

Tabela 1 - Fonte dos dados históricos e resolução das variáveis ambientais obtidas dos bancos de dados desde julho de 2002 até julho de 2022.....	24
Tabela 2 - Definição das métricas de cálculo das Ondas de calor marinhas.....	26
Tabela 3 - Eventos baseados na (I_{max}) das maiores OCMs identificados com a duração total do evento, intensidade máxima (I_{max}), intensidade média (I_{me}), intensidade acumulada (I_{cum}) e época de ocorrência.....	28
Tabela 4 - Alguns eventos no litoral brasileiro de branqueamento nas espécies do gênero <i>Siderastrea</i> , porcentagem região e períodos de ocorrência reportados na literatura.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OCM	Onda de Calor Marinha
OCMs	Ondas de Calor Marinhas
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
TSM-a	Anomalia da Temperatura do Mar
KD490	Coefficiente de Atenuação Difusa em 490 nm
KD490-a	Anomalia do Coeficiente de Atenuação Difusa em 490 nm
CLOROFILA-A	Anomalia de Clorofila
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
CNB	Corrente Norte Brasileira
AVHRR	The Advanced Very High Resolution Radiometer
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
PEPRIM	Parque Estadual Marinho da Pedra da Risca do Meio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
3.1 A Localização Geográfica	19
3.2 Os Parâmetros Meteoceanográficos	20
3.3 O Sistema Recifal	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 Conjunto de Dados	23
<i>4.1.1 Temperatura da Superfície do Mar</i>	<i>23</i>
<i>4.1.2 Turbidez e Concentração de Clorofila-a</i>	<i>24</i>
<i>4.1.3 Ondas de Calor Marinhas</i>	<i>24</i>
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1 Ocorrência das OCMs nas Diferentes Áreas de Monitoramento	27
<i>5.2.1 Área A</i>	<i>27</i>
<i>5.2.2 Área B</i>	<i>28</i>
<i>5.2.3 Área C</i>	<i>29</i>
<i>5.2.4 Área D</i>	<i>31</i>
5.2 Impactos das OCMs nos Parâmetros físico-químicos.	34
<i>5.2.1 Área A</i>	<i>34</i>
<i>5.2.2 Área B</i>	<i>35</i>
<i>5.2.3 Área C</i>	<i>36</i>
<i>5.2.4 Área D</i>	<i>37</i>
5.3 Impactos das OCMs no ecossistema recifal	41
<i>5.3.1 Anomalias relacionadas ao Branqueamento</i>	<i>45</i>
6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
7. REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

Os recifes brasileiros se concentram na costa tropical nordestina, sendo o ecossistema de maior extensão e mais rico de todo sudoeste do Atlântico. Estendem-se por 4.000 km desde o litoral oeste do Amapá até o litoral de São Paulo (LEÃO et al., 2016).

A alta turbidez, sedimentação e temperatura, são importantes fatores limitantes na costa semiárida, sendo esta constituída basicamente de comunidades de corais e organismos bentônicos sobre ambientes recifais, como os recifes de arenito (FECHINE, 2007; LEÃO et al., 2016; SOARES et al., 2017).

A predominância de areia ao longo da costa cearense é eventualmente interrompida por afloramentos rochosos (beachrocks) compostos por areia cimentada por carbonato de cálcio e óxido ferroso, na região entre marés (SOARES e RABELO, 2011). Tais feições são responsáveis pela formação de ambientes de poças de marés que atuam como microcosmos marinhos, facilmente acessíveis na maré baixa e com profundidades que não passam de 1 m (SOARES e RABELO, 2011).

Os fatores climáticos e oceanográficos que se encontram nos recifes da margem equatorial brasileira, como escassez de chuvas, elevados valores de temperatura da superfície do mar, salinidade, longos períodos de exposição à radiação solar e águas turvas (LEÃO et al., 2016; SOARES et al., 2019), proporcionam a prevalência de espécies de corais mais resistentes a condições extremas, como, por exemplo, *Siderastrea stellata*.

Os recifes de coral são um dos ecossistemas do mundo mais sensíveis ao aquecimento global. Os recifes de coral estão entre os ecossistemas da Terra mais ameaçados pelo aumento da temperatura do mar. É crescente o número de estudos que vem demonstrando a susceptibilidade destas comunidades às mudanças climáticas globais (SABADINI, 2017; ROCHA, 2011; LIMA, 2015; MCCLANAHAN et al., 2007).

Assim, para Leão et al.(2016), a maioria dos episódios de branqueamento de corais registrados demonstraram que os efeitos do estresse térmico são uma ameaça à biodiversidade e abundância dos recifes de corais (WILKINSON, 2004; CARPENTER et al., 2008), causando também uma diminuição da proteção da costa (REGUERO et al., 2018). Os recifes de coral são um exemplo de uma característica geológica que pode afetar as ondas que chegam e são frequentemente responsáveis pelo serviço ecossistêmico de proteção da linha de costa (ELLIF, et al., 2019).

Os recifes de coral, em particular, constituem uma primeira linha de defesa contra a erosão e inundações através da atenuação das ondas e da produção e retenção de areia

(ELLIFF; SILVA, 2017). A erosão costeira e as inundações são grandes problemas globais, mas se tornam mais agudos à medida que as mudanças climáticas convergem com o desenvolvimento costeiro (REGUERO *et al.*, 2018).

Segundo Leão *et al.* (2016) as oscilações do nível do mar exercem efeitos profundos na evolução dos recifes de coral. O rebaixamento do nível do mar expôs os topos dos recifes à erosão marinha, dissolução e extensa bioerosão. Além disso, as comunidades recifais que habitam esses topos sofreram estresse, principalmente devido à forte radiação solar e altos níveis de sedimentação e turbidez da água.

De acordo com Adams (2011), para mitigar os efeitos das mudanças climáticas nas comunidades costeiras, é necessário avaliar as mudanças oceanográficas e geomórficas esperadas na zona costeira.

Nessas piscinas de maré, as variações na temperatura e salinidade da água, juntamente com longas exposições à forte radiação solar, são fatores de estresse para a maioria das espécies de corais. Assim, condições ambientais, como forte radiação solar, baixos níveis de luz e alto influxo de sedimentos, devem ultrapassar os níveis de tolerância da maioria das espécies de corais brasileiras (LEÃO *et al.*, 2016).

O efeito combinado do branqueamento de corais induzido pelo clima e a redução da calcificação, com o aumento da poluição, nutrientes e entrada de sedimentos, reduziram a capacidade dos recifes de coral de se recuperarem de distúrbios (BRUNO, 2007). O aumento da frequência e intensidade das anomalias da TSM decorrente do aquecimento global é capaz de alterar o resultado das reações de fotossíntese que ocorrem no tecido dos corais, favorecendo a produção de espécies oxidativas (ROCHA, 2011).

As temperaturas extremas desses eventos causam impactos negativos na ecologia local das regiões em que ocorrem. Individualmente, esses eventos extremos podem ter impactos significativos nos ecossistemas marinhos (OLIVER *et al.*, 2019). Em decorrência do aumento da frequência de ocorrência dos eventos de anomalias térmicas positivas em conjunto com as ações antropogênicas de degradação do ecossistema marinho, observa-se um cenário de aumento na condição degradante destes recifes.

As temperaturas da superfície do mar aumentaram a uma taxa de quase 0,6 ° C por século desde 1880 (IPCC AR5). Este aquecimento, por sua vez, aumenta a probabilidade de ocorrência de ondas de calor marinhas.

A biodiversidade pode ser drasticamente afetada pelas ondas de calor marinhas. (OLIVER, E. *et al.*, 2019). Segundo Jacox, (2019) entender as OCMs é fundamental para avaliar seu impacto nas espécies marinhas que reagem às mudanças ambientais de diferentes

maneiras. Espécies imóveis, como os corais, podem se recuperar da exposição aguda a temperaturas mais quentes, mas não da exposição crônica (CONNEL et al, 1997).

Para Smale et al. (2019) as populações marinhas são mais suscetíveis às OCMs quando vivem em regiões próximas ao seu limite térmico máximo, uma vez que as anomalias de temperatura podem vir a exceder os limiares fisiológicos de organismos vivos e, portanto, aumentar as taxas de mortalidade.

Estima-se que esses eventos tendem a ser mais frequentes e intensos conforme o clima esquenta, impactando severamente a vida marinha. Dessa forma, os impactos que esse aumento da temperatura somado aos demais estressores tem causado aos recifes precisa ser avaliado. Neste sentido, neste trabalho utilizando dados estimados por satélites e dados pretéritos, obtidos na literatura especializada, pretende-se estudar o comportamento de parâmetros biofísicos (TSM, Clorofila-a e Turbidez), na região costeira adjacente à costa do litoral do Ceará, e seus possíveis impactos para os recifes de coral na área em estudo.

2. OBJETIVOS

A fim de melhorar a compreensão sobre o branqueamento de corais na região equatorial brasileira associado a parâmetros biofísicos, apresentaremos a seguir os objetivos geral e específicos.

2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo principal caracterizar as OCMs na área de estudo e conectar dados oceanográficos obtidos a partir de dados de sensoriamento remoto com eventos de branqueamento de coral reportados na literatura.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os comportamentos da TSM em quatro áreas no Atlântico Equatorial para identificar e calcular as OCMs no período de 01/07/2002 a 31/07/2022;
- Relacionar as OCMs com branqueamento de corais;
- Verificar se as áreas amostradas têm potencial de estresse térmico;
- Analisar os dados de parâmetros físico-químicos de turbidez e clorofila;
- Caracterizar a variabilidade temporal da transparência da água e diferenças significativas durante os eventos de OCMs entre diferentes recifes onshore (Áreas 2 e 4) e offshore (Áreas 1 e 3).

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A seleção da região de estudo baseou-se em eventos de branqueamento em massa reportados na literatura (SOARES e RABELO, 2014; SOARES, et al 2019; BARROS, 2019). Além de ser a região menos estudada da costa brasileira (SOARES, 2019), segundo Soares *et al* (2021) há uma tendência de aumento da temperatura da água do mar de 0,2 °C por década em recifes equatoriais de baixa latitude. O litoral do Estado do Ceará é caracterizado por apresentar grandes extensões de praias arenosas e planícies de acumulação de sedimentos. A predominância arenosa da faixa litorânea é ocasionalmente interrompida por dois tipos de formações de material consolidado: os afloramentos rochosos e os recifes de praia, ou “beach rocks” (Smith & Morais, 1984).

3.1 A localização geográfica

Delimitaram-se quatro áreas que correspondem à ocorrência de construções recifais do Estado do Ceará: A) Parque Estadual Marinho Pedra da Risca do Meio, B) Volta da Jurema, C) Terminal Portuário do Pecém e D) Praia da Pedra Rachada. A seleção dos pontos foi feita sistematicamente, dentro da região de recifes de corais do litoral cearense, na qual as ondas de calor marinhas foram mais intensas, com o objetivo de representar o comportamento das TSM tanto em locais mais próximos à costa, quanto em locais mais distantes.

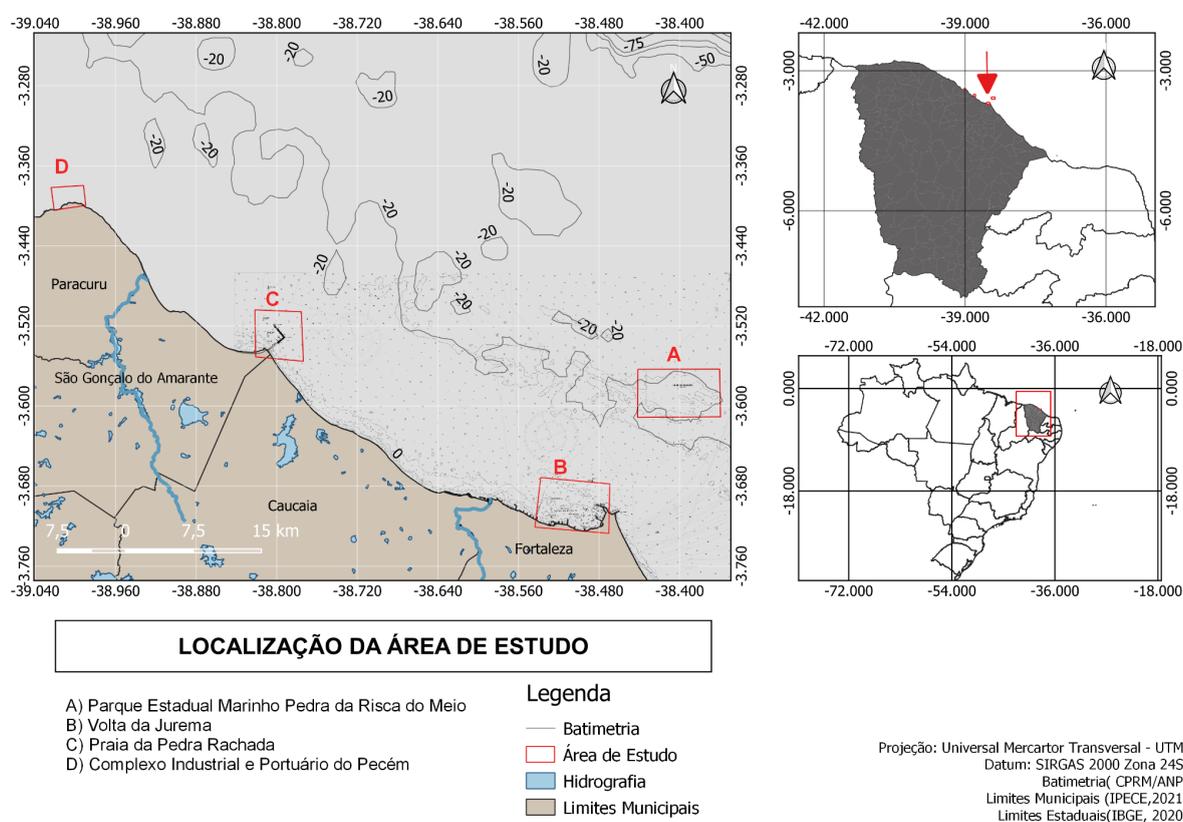


Figura 1 – Localização da área de estudo na costa brasileira, noroeste do Oceano Atlântico Norte Equatorial entre as latitudes 2-36° S e longitude 4-40° W. Os pontos A, B, C e D indicam a localização de onde foram extraídas as séries temporais diárias. A hidrografia da área de estudo também está indicada. Os pontos selecionados foram representados por um retângulo vermelho; Ponto A (03°33'80" S e 38°21' 60" O), Ponto B, Ponto C (3°32'07.51" S e 38°47'48.62" O) e Ponto D (3°23'56.17" S e 39° 00' 43.11" O) .Fonte: A autora (2022).

Dessa forma, os quatro pontos representados na Figura 1 foram determinados, sendo o primeiro mais distante da costa, localizada a 23 km da cidade de Fortaleza e se estendendo por uma área de 33,20 km abrangendo recifes tropicais submersos entre 18 e 25 m de profundidade (SOARES, et al , 2019), no Parque Marinho da Pedra da Risca do Meio (03°33'80" S e 38°21'60" O) de substrato responsável por areia e cascalho com grande agregação de algas calcárias e afloramentos rochosos e temperatura da água em torno de 27°C durante todo o ano (SOARES et al 2011).

O segundo ponto, mais próximo à costa, está localizado no município de Fortaleza, no recife de arenito da Volta da Jurema. A região se encontra na faixa praias do mesolitoral e caracteriza-se como um ambiente de beach rock que permanece exposto na baixamar de quadratura, formando diversas poças de maré (BARROS, 2019).

O terceiro ponto localizado no município de São Gonçalo do Amarante, no recife artificial do off-shore formado por estruturas de granito que formam os pilares de sustentação do Complexo industrial e portuário do Pecém (3°32'07.51" S e 38°47'48.62" O). Nesta área do quebra-mar ocorre uma biodiversidade significativa de espécies bentônicas (LIMA, 2015).

O quarto ponto está localizado em um ambiente recifal de arenito entre marés situado na praia da Pedra Rachada em Paracuru (3°23'56.17" S e 39° 00'43.11" O) onde se encontra um terminal petrolífero da Petrobrás com tubulação para abastecimento de óleo diesel e água potável. (VIANA et al., 2005).

3.2 Os parâmetros meteoceanográficos

A plataforma continental cearense está sob influência da corrente norte brasileira (CNB). A CNB constitui uma corrente de contorno oeste no oceano atlântico importante no transporte de água e calor através do equador para o hemisfério norte (FREITAS,2015).

O regime de ventos e climático da região é marcado pela ação dos alísios, cuja velocidade varia sazonalmente ao longo do ano, com velocidades mais baixas no primeiro semestre, e um incremento no terceiro trimestre, além da atuação da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical). O regime de chuvas e nebulosidade na região é distribuído sazonalmente em dois períodos. Um chuvoso (1º semestre), quando ocorre mais de 80% do total anual, e outro seco (2º semestre) que se estende de agosto a dezembro. A temperatura da

superfície do mar em termos anuais é considerada alta e com baixa oscilação, variando de 27 a 29 °C (IRION; MORAIS; BUNGENSTOCK, 2012).

Fernandino *et al.* (2018), em seu estudo, sugere que os recifes, bem como o afloramento de beachrock na região, produziu uma zona de sombra que protegeu parcialmente as praias adjacentes da ação direta das ondas, especialmente em condições de ondas médias. Por outro lado, a presença de canais e aberturas entre e dentro desses recifes permite a entrada de ondas difratadas, que atingem a costa com maior potencial erosivo devido à profundidade relativamente maior de seu caminho.

As variações nas taxas de sedimentação e aumentos na concentração de nutrientes podem levar a mudanças na estrutura da comunidade biológica e são reconhecidas como uma forte ameaça para os ecossistemas de recifes de coral (Rogers, 1990; McCook, 1999).

Embora entendamos que a TSM da camada de mistura superior é influenciada por processos oceânicos e atmosféricos, estudos mais aprofundados precisam ser realizados, para entender melhor como esses processos são modulados por influências locais *vs.* larga escala, resultando assim em OCMs. (Robert W. *et al.*, 2017). As teleconexões em larga escala também podem afetar as propriedades térmicas e a dinâmica dos sistemas costeiros (Robert W. *et al.*, 2017).

3.3 O sistema Recifal

Recifes de praia que ocorrem predominantemente na região localizada entre a preamar e a baixa-mar, possuem formato tabular, ligeiramente inclinado em direção ao mar e são formados por areia cimentada por carbonato de cálcio e óxido de ferro (MORAIS, 1967). Os corais são organismos biofiltrantes que obtêm carbono e outros nutrientes da fase particulada para sustentar sua própria produção e, conseqüentemente, a biodiversidade dos recifes (Rogers, 1990).

Os fatores climáticos e oceanográficos que se encontram nos recifes da margem equatorial brasileira, como escassez de chuvas, elevados valores de temperatura da superfície do mar, salinidade, longos períodos de exposição à radiação solar e águas turvas (LEÃO *et al.*, 2016; SOARES *et al.*, 2019), proporcionam a prevalência de espécies de corais mais resistentes a condições extremas, como a *Siderastrea stellata*.

Uma alta cobertura de macroalgas (incluindo algas filamentosas) e esponjas já foi relatada a partir dessas assembleias de corais em rocha arenítica (Soares *et al.*, 2017).

Oliver *et al.* (2019) estabeleceu alguns cenários em que, com o aumento das OCMs, as espécies "se adaptarão, se moverão ou morrerão" podendo mudar o comportamento,

aclimatar, experimentar efeitos epigenéticos através de gerações, ou experimentar adaptações "verdadeiras" através da seleção natural.

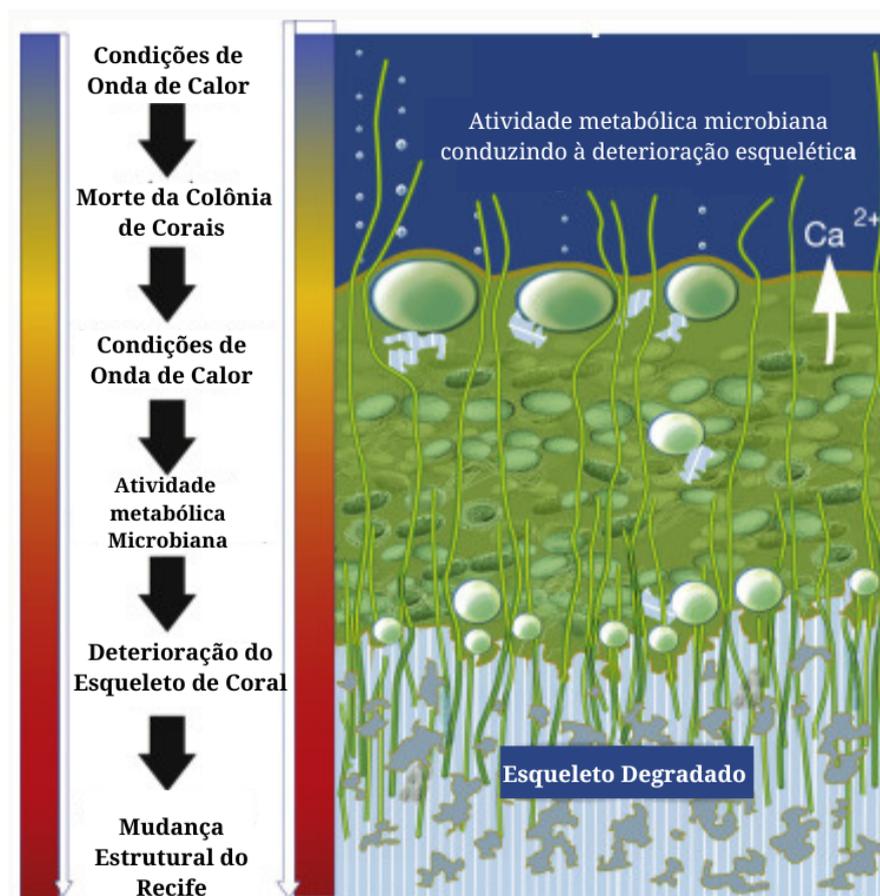


Figura 2 - Representação Esquemática da Sucessão da Dissolução de Coral após Ondas de Calor Marinhas.

Fonte: Adaptado do inglês de Leggat, w. et al, (2019).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em duas partes. A primeira parte consistiu em analisar os dados de parâmetros físico-químicos de turbidez e clorofila, obtidos a partir de imagens de satélites e a segunda parte na identificação de ocorrência e descrição das OCMs e posteriormente relacioná-las ao branqueamento de corais reportados na literatura.

4.1 Conjuntos de dados

As variáveis biofísicas e suas frequências, indicadas na Tabela 1, foram obtidas via FTP (File Transfer Protocol), do repositório de imagens da NASA (National Aeronautics and Space Administration).

Variável	Fonte	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Página da Web
Temperatura (°C)	GHRSSST	1 Km	Diária (2002-2022)	GHRSSST Level 4 G1SST Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis PO.DAAC / JPL / NASA
Kd490 (m-1)	Aqua MODIS	1 Km	Diária (2002-2022)	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/
Clorofila	Aqua MODIS	4 Km	Mensal (2002-2022)	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/

Tabela 1 - Fonte dos dados históricos e resolução das imagens de satélite a partir das quais as variáveis biofísicas foram estimadas. Período: julho de 2002 à julho de 2022. Fonte: A autora (2022).

4.1.1 Temperatura da Superfície do Mar

Para o presente estudo, foram selecionados dois conjuntos de base de dados. Sendo o primeiro dados globais de estimativas diárias da temperatura da superfície do oceano do produto de dados combinados de nível 4 do Grupo para Temperatura da Superfície do Mar de Alta Resolução (GHRSSST) versão 4.1 (PO.DAAC, 2015).

Os dados do GHRSSST com resolução de 1 km são baseados em observações noturnas da temperatura de pele e sub-pele da água do mar, estimadas através das imagens dos seguintes sensores: 1) Radiômetro de Varredura de Microondas Avançado da NASA-EOS (AMSRE); 2) Espectroradiômetro de Imagem de Resolução Moderada (MODIS) nas plataformas Aqua e Terra da NASA; 3) EUA Radiômetro WindSat de micro-ondas da

Marinha; 4) Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), presente em vários satélites da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e 5) Observações SST *in situ* da NOAA. (PO.DAAC, 2015).

4.1.2 Turbidez e Concentração de Clorofila-a

Foi utilizado o conjunto de dados da cor da água do mar, do satélite Aqua, da National Aeronautics and Space Administration (NASA), responsável pelo sensor MODIS. As imagens foram adquiridas com baixa cobertura de nuvens e cobrindo a área de interesse. O coeficiente de atenuação difusa em 490 nm (KD490) é um produto padrão incluído nos dados de nível 2 com imagens de nível 2 obtidas com resolução espacial de 1km. As imagens, médias mensais, de clorofila foram baixadas com resolução de 4 km e unidade $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

O coeficiente de atenuação KD490 e a clorofila-a foram analisadas a fim de estudar a variabilidade temporal da visibilidade da água, uma vez que os substratos nesta área são mais rasos que 20m, e eles podem ter contribuição no sinal de sensoriamento remoto dependendo dos constituintes opticamente ativos presentes na coluna d'água. Além de identificar se houve um aumento ou diminuição de suas concentrações durante os eventos de OCMs nas áreas monitoradas.

Para o conjunto de dados, a climatologia mensal e anomalia foram calculadas para o período de 20 anos entre julho/2002 e julho/2022 e as análises foram feitas a partir das anomalias de clorofila-a e KD490 para os dias de OCM.

Em todas as imagens, nuvens e terra foram mascarados como não-número (NaN). KD490 maiores que 1m^{-1} foram considerados valores espúrios e mascarados como NaN. As médias mensais e a climatologia mensal foram calculadas para Kd490 pixel a pixel. A climatologia mensal dos valores de KD490 foi plotada, para descrever o padrão espacial de sua distribuição. Quatro séries temporais de dados mensais KD490 e de clorofila foram extraídas de áreas localizadas na zona costeira (ponto 2 e 4 na Figura 1) e oceânica (ponto 1 e 3 na Figura 1).

4.1.3 Ondas de Calor Marinhas

Os dados de OCM foram gerados a partir da definição de OCM (Hobday *et al*, 2016), e que foi implementada como módulos de software em linguagem de programação Python. O algoritmo de detecção de OCM foi escrito por Eric C. J. Oliver e está disponível em <https://github.com/ecjoliver/marineHeatWaves>.

Essa pesquisa usou 20 anos de dados diários, de julho de 2002 a julho de 2022 uma vez que dados diários ocupam uma intensa carga computacional para o processamento dos dados deste trabalho, sendo utilizada uma linha de base móvel (20 anos de dados).

As definições das métricas utilizadas neste trabalho podem ser encontradas na Tabela 2. Para Oliver et al. (2019) as OCMs são fortes agentes de perturbação aos ecossistemas marinhos e essas métricas são proxies para exposição de ecossistemas marinhos ao estresse térmico crônico e estresse térmico agudo.

Nome [unidade]	Definição
Contagem [N ° eventos por ano]	n : número de OCMs por ano
Duração [dias]	D : Período de tempo consecutivo em que a temperatura excede o limiar
Intensidade máxima [°C]	I_{max} : maior valor de anomalia de temperatura durante a OCM
Intensidade média [°C]	I_{me} : anomalia de temperatura média durante a OCM
Intensidade acumulada [°C·dias]	I_{cum} : soma das anomalias de intensidade diária ao longo da duração do evento

Tabela 2: Definição das métricas de cálculo das Ondas de calor marinhas e suas descrições propostas por Hobday *et al.* (2016) e adaptado para o português de Schlegel et al. (2017).

De acordo com Wernberg *et al.* (2011) para calcular uma OCM é necessário fornecer uma climatologia com a qual os valores diários podem ser comparados. Após o registro dos eventos individuais, são calculados os valores médios anuais para as métricas para cada ano de cada série temporal. Isso fornece dois conjuntos diferentes de medições para os eventos extremos.

O cálculo consiste em duas métricas de interesse: a média climatológica diária e o limite diário. A primeira foi calculada como a média diária dos 20 anos para cada um dos dias, considerando que existem anos bissextos no conjunto de dados, e o segundo como percentil 90 da variação da TSM no período. Com isso, considerou-se um pico de calor quando as temperaturas observadas excederam os valores do percentil 90. Se o pico de calor apresentou duração de 5 ou mais dias, foi então identificada como uma OCM, seguindo a metodologia de Hobday, 2018.

Assim que a climatologia e o limite foram definidos, calculou-se, para cada ponto selecionado, a frequência, definida pelo número de eventos de OCM durante o período considerado. A partir deste cálculo obtiveram-se as seguintes variáveis de importância: 1) um vetor contendo o número de eventos; 2) dois vetores de datas (dia/mês/ano), sendo um com a

data de início do evento e outro com a data final e 3) um vetor de duração dos eventos, representada pelo número de dias entre a data de início e a data final da OCM.

Com os dados estruturados, foi possível elaborar uma rotina Python para calcular as seguintes métricas: 1) intensidade máxima dos eventos detectados, dada pelo módulo da subtração da TSM pela climatologia, 2) a intensidade acumulada, produto da duração pela intensidade, e 3) a intensidade média, anomalia de temperatura média durante a OCM. Na Figura 3 é possível visualizar a metodologia utilizada, que foi baseada no estudo de Hobday *et al.* (2016), suas métricas e definições.

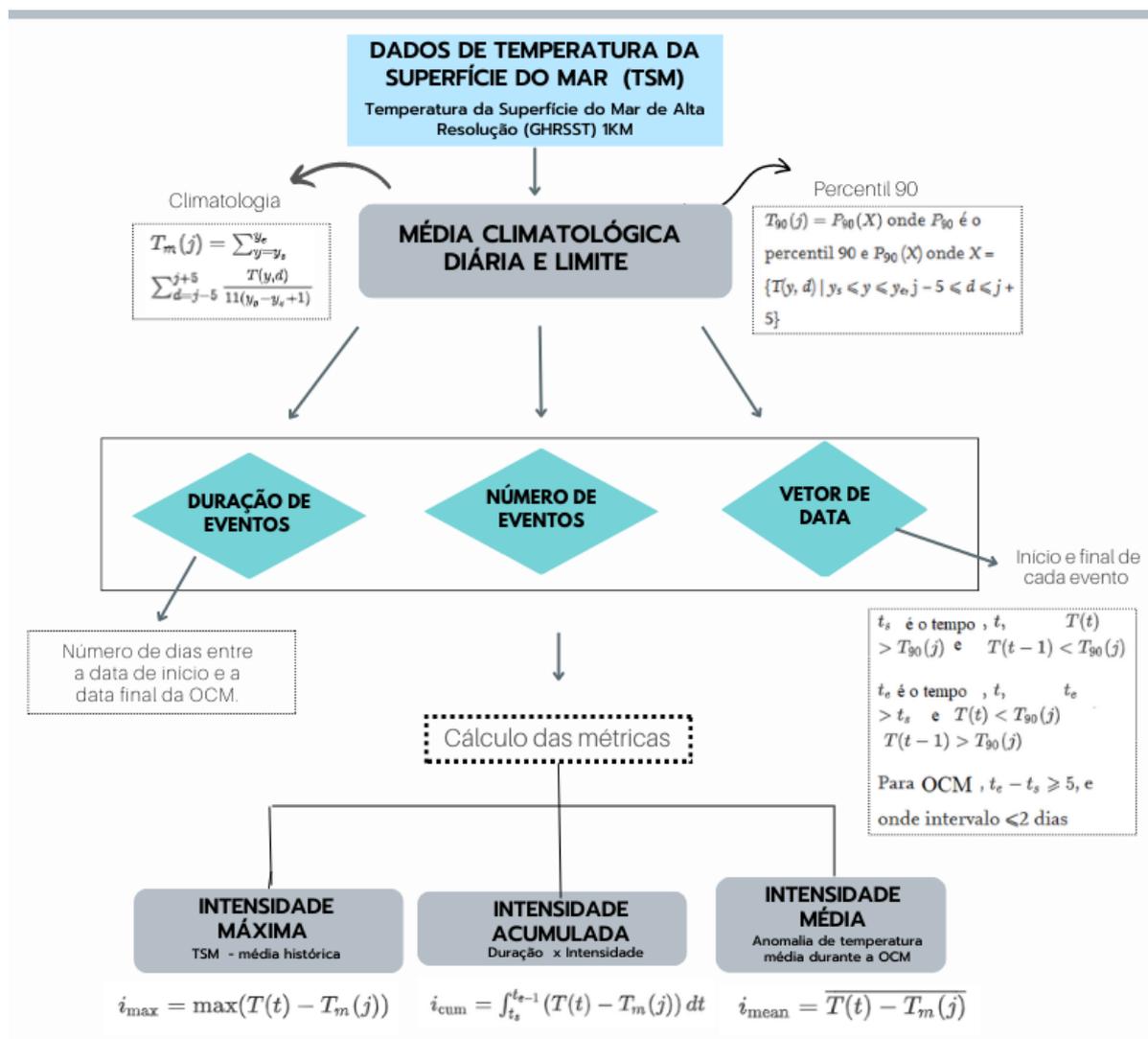


Figura 3 - Fluxograma da metodologia adaptada de Hobday *et al* (2016) para a caracterização das OCMs na área de estudos. Fonte: A autora (2022).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos tópicos seguintes, serão apresentados os resultados obtidos relativos à ocorrência das OCMs. Os parâmetros físico-químicos de turbidez e concentração de clorofila-a, além das anomalias térmicas registrados nas áreas estudadas, também serão discutidos como, por exemplo, os estressores do ecossistema recifal.

5.1 Ocorrência das OCMs nas Diferentes Áreas de estudo

A análise coletiva das quatro regiões do estudo demonstra a necessidade de uma diversidade de métricas para descrever diferentes características das OCMs.

Áreas	Duração	Imax	Ime	Icum	Estação
A	25 dias	1,81 °C	1,22 °C	30,45 °C/dias	Verão/Outono
B	32 dias	1,87°C	1,12 °C	35,94 °C/dias	Verão/ Outono
C	21 dias	1,61°C	0,70 °C	14,81 °C/dias	Inverno/ Primavera
D	14 dias	1,84 °C	1,14 °C	15,95 °C/dias	Outono

Tabela 3 - Eventos baseados na (Imax) das maiores OCMs identificados com a duração total do evento, intensidade máxima (Imax), intensidade média (Ime), intensidade acumulada (Icum) e época de ocorrência. Fonte: A autora (2022).

5.1.1 Área A

Na área A, foram identificados um total de 47 eventos de OCMs no total. Os diferentes eventos de OCM atingiram a maior intensidade máxima de 1,81° C (Tabela 3) no período compreendido entre 07 e 31 de março de 2020 (Figura 4a) e a maior intensidade média de 1,23° C, entre 19 e 27 de janeiro de 2020 (Figura 4c). A intensidade acumulada para esta OCM foi de 30,45°C/dia (Figura 4d). A OCM de março de 2020 foi a de maior duração e maior intensidade baseada na Imax de 1,81° C e durou 25 dias conforme indicado, nas figuras 4b e a, respectivamente. As barras em vermelho identificam os eventos de maior duração em a, maior intensidade acumulada em c, maior intensidade média em d e maior intensidade máxima em b. A barra contornada de vermelho mostra a duração, intensidade, acumulada e intensidade média da OCM de maior intensidade máxima.

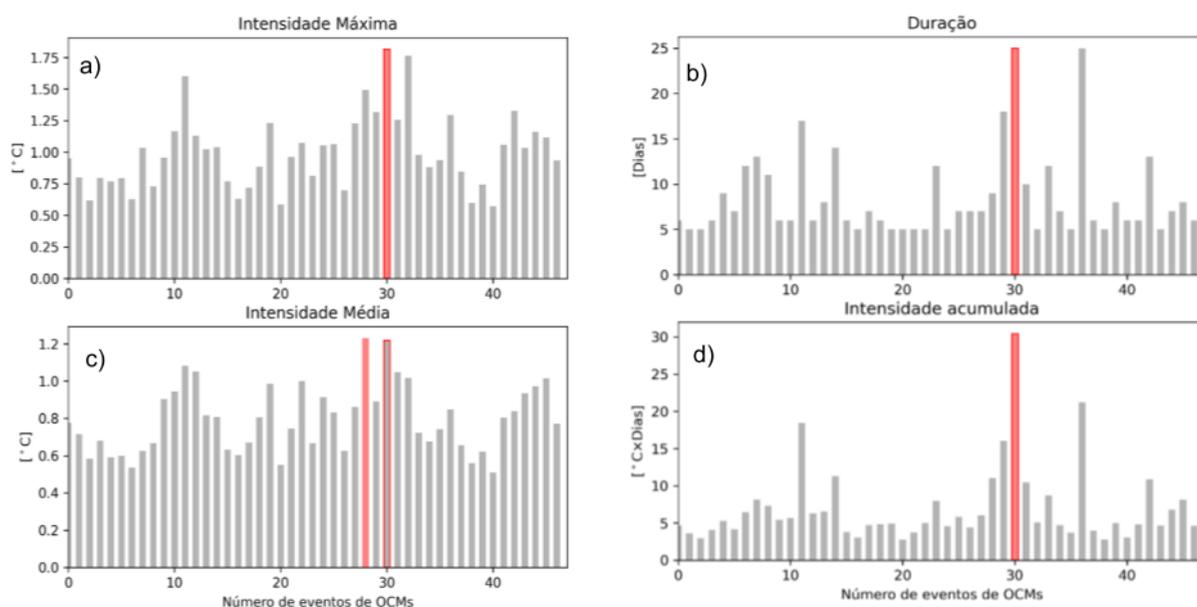


Figura 4 - Gráficos representando em a) a intensidade máxima, b) duração, c) intensidade média e d) intensidade acumulada das OCMs na área A. Fonte: A autora (2022).

Além disso, foi possível observar uma maior intensidade de OCMs nos eventos de 2010 e 2020, tendo cerca de 10 OCMs apenas em 2020 e por volta de 7 em 2010 (Figura 5a). Existem em média 2,23 OCMs em cada ano e com uma tendência linear de 1,81 eventos de OCMs por década. A intensidade máxima média é de $0,9^{\circ}\text{C}$ (Figura 5b) e analisando a tendência linear estatisticamente significativa ($p < 0.05$) foi obtido um valor de $0,16^{\circ}\text{C}$ por década.

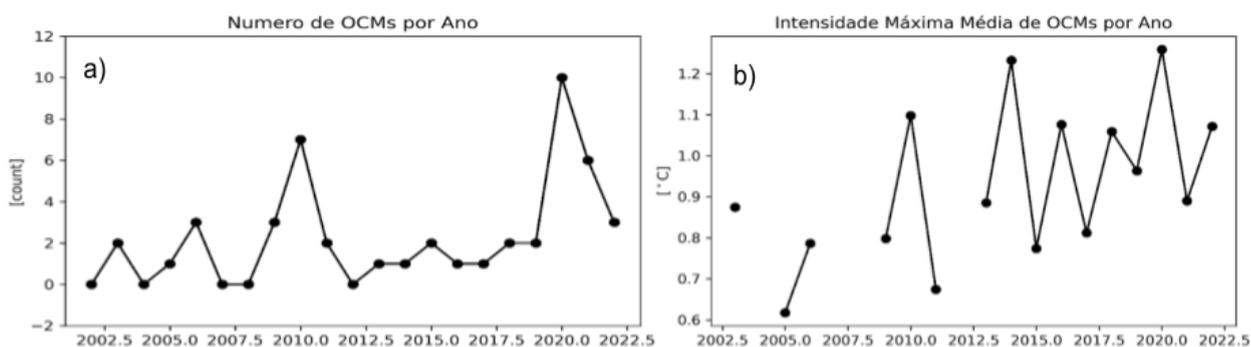


Figura 5 - Gráficos representando em a) o número de OCMs por ano e em b) a intensidade máxima média da série de 20 anos na área A. Fonte: A autora (2022).

5.1.2 Área B

A partir da análise dos dados da área B, foram identificados um total de 33 eventos. A OCM de 2020 foi a maior, mais intensa e com maior duração (Tabela 3), baseado no I_{max} de $1,87^{\circ}\text{C}$ (Figura 6b - barra na cor vermelha), e durou 32 dias de 01 de março a 01 de abril de 2020 (Figura 6a) com um Intensidade média de $1,12^{\circ}\text{C}$ (Figura 6d) e intensidade acumulada

para esta OCM foi de $35,94^{\circ}\text{C}/\text{dia}$ (Figura 6 c). As barras em vermelho identificam os eventos de maior duração em a, maior intensidade acumulada em c, maior intensidade média em d e maior intensidade máxima em b. A barra contornada de vermelho mostra a duração, intensidade, acumulada e intensidade média da OCM de maior intensidade máxima.

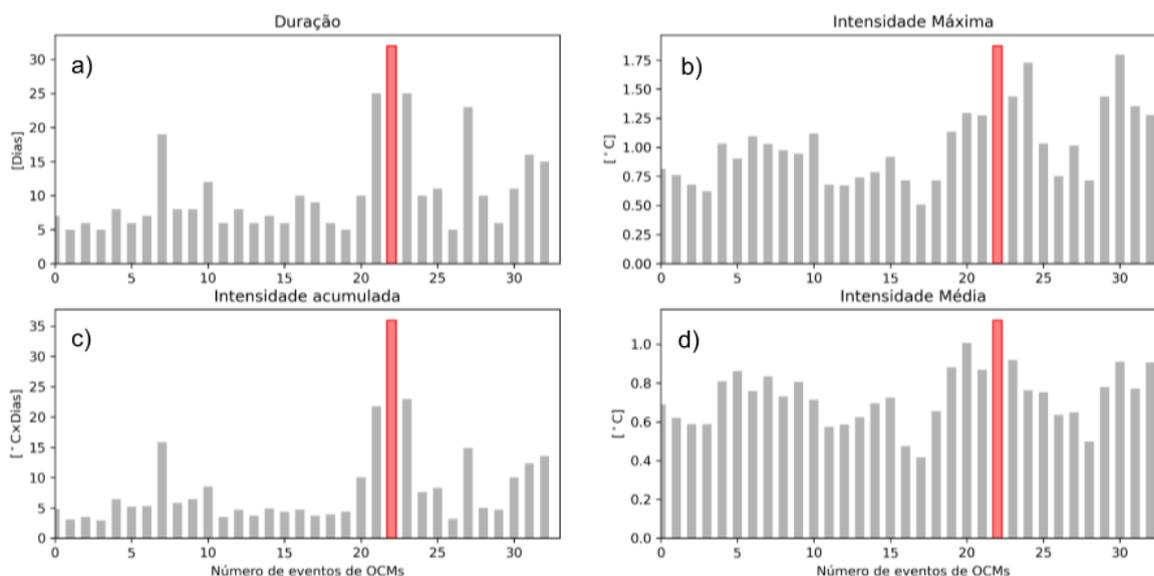


Figura 6 - Gráficos representando em a) duração, b) intensidade máxima, c) intensidade acumulada e em d) a intensidade média da OCM na área B. Fonte: A autora (2022).

Além disso, foi possível observar uma maior uma maior intensidade de OCMs nos eventos de 2010 e 2021, tendo cerca de 10 OCMs apenas em 2010 e por volta de 8 em 2020 (Figura 7a). A intensidade máxima média é de $0,87^{\circ}\text{C}$ (Figura 7b) e analisando a tendência linear estatisticamente significativa ($p < 0,05$) foi obtido um valor de de $0,34^{\circ}\text{C}$ por década.

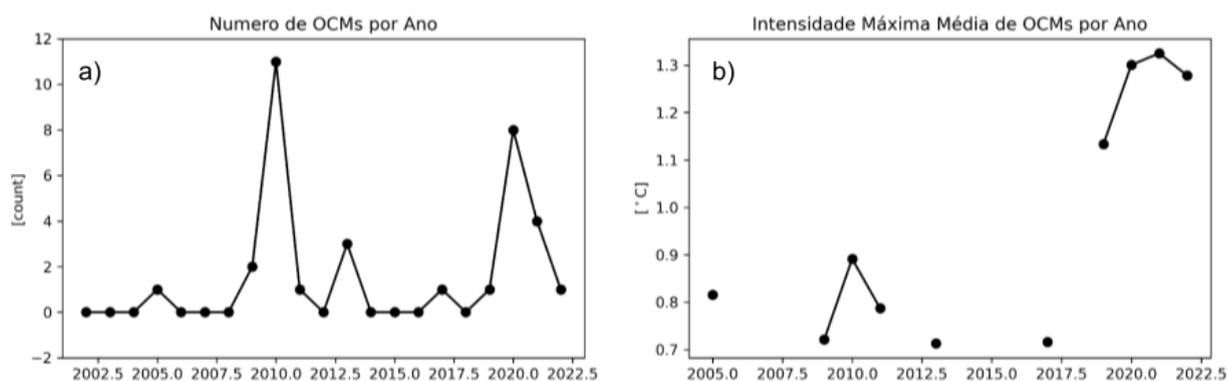


Figura 7 - Gráficos representando em a) o número de OCMs por ano e b) a intensidade máxima média da série de 20 anos na área B. Fonte: A autora (2022).

5.1.3 Área C

Na área C, foram identificados 37 eventos no total, com a mais intensa OCM de duração de 21 dias (29 de agosto de 2021 a 8 de dezembro de 2021) com um I_{max} de $1,61^{\circ}\text{C}$ e I_{cum} para esta OCM de $14,81^{\circ}\text{C dias}$ (Tabela 3). Um evento anterior, teve a maior

duração com 51 dias (8 de março de 2020 a 27 de abril de 2020), teve a maior intensidade acumulada de 49.92 °C/dia (Figura 8c) no período considerado, mas uma intensidade máxima menor de 1,55 °C (Figura 8b) do que um evento de 21 dias em 2021 e o Ime para este evento foi de 0,97 °C. O evento de OCM com maior Intensidade média (21 de janeiro a 27 de janeiro de 2020) foi de 1,18°C (Figura 8d). As barras em vermelho identificam os eventos de maior duração em a, maior intensidade acumulada em c, maior intensidade média em d e maior intensidade máxima em b. A barra contornada de vermelho mostra a duração, intensidade, acumulada e intensidade média da OCM de maior intensidade máxima.

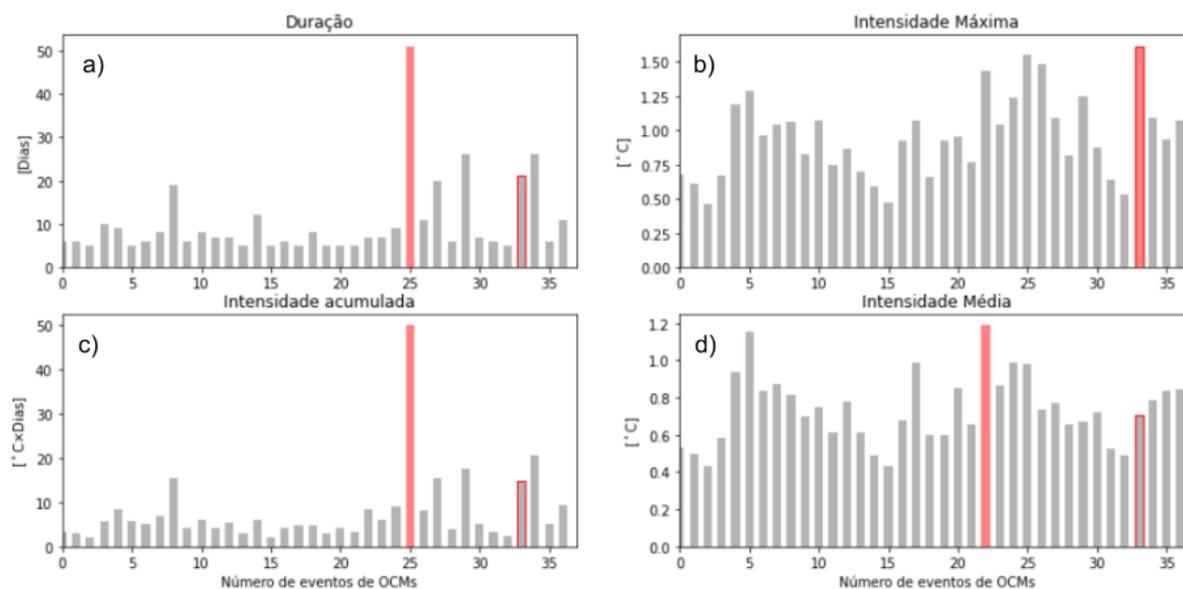


Figura 8 - Gráficos representando a) duração, b) intensidade máxima, c) intensidade acumulada e d) intensidade média da OCM na área C. Fonte: A autora (2022).

Além disso, foi possível observar uma maior intensidade de OCMs nos eventos de 2010 e 2020 (Figura 9a) tendo cerca de 9 OCMs apenas em 2021 e por volta de 9 em 2010. A intensidade máxima média é de 0,78° C (Figura 9b) e analisando a tendência linear estatisticamente significativa ($p < 0.05$) foi obtido um valor de 0,24° C por década.

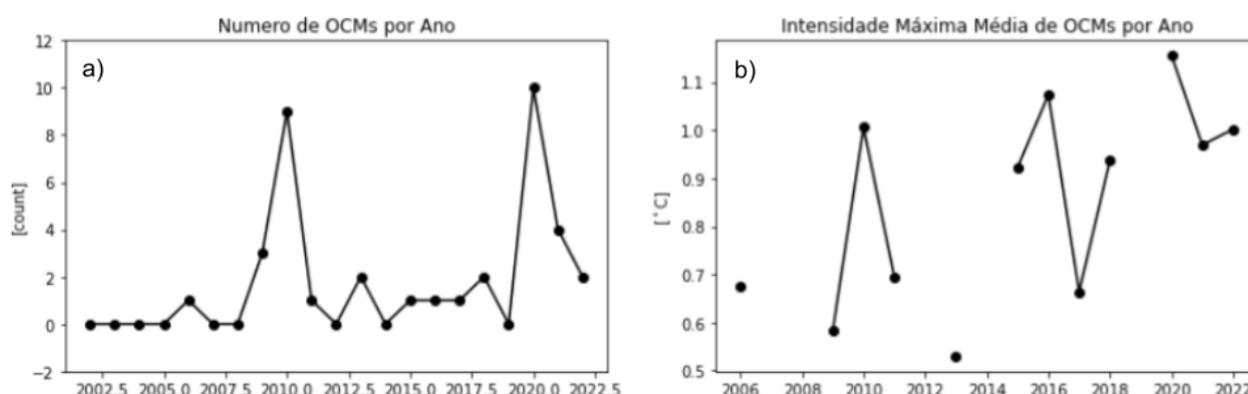


Figura 9 - Gráficos representando em a) número de OCMs por ano e b) a intensidade máxima média da série de 20 anos na área C. Fonte: A autora (2022).

5.1.4 Área D

Para a localização selecionada da área D, foram identificados um total de 37 eventos, com a maior e mais intensa OCM de duração de 14 dias de 09 de março a 22 de março de 2020 (Figura 10a) com um I_{max} de $1,84\text{ }^{\circ}\text{C}$ e I_{cum} para esta OCM de $15,95^{\circ}\text{C}/\text{dia}$ (Tabela 3). Um evento anterior, teve a maior duração com 22 dias (04 de abril a 25 de abril de 2010), teve a maior intensidade acumulada de $23,13^{\circ}\text{C}/\text{dia}$ (Figura 10c) no período considerado, mas uma intensidade máxima menor de $1,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 10b) e o I_{me} para este evento foi de $1,05^{\circ}\text{C}$. O evento de OCM com maior Intensidade média (26 de março a 31 de março de 2020) com $1,41^{\circ}\text{C}$ (Figura 10d). As barras em vermelho identificam os eventos de maior duração em a, maior intensidade acumulada em c, maior intensidade média em d e maior intensidade máxima em b. A barra contornada de vermelho mostra a duração, intensidade, acumulada e intensidade média da OCM de maior intensidade máxima.

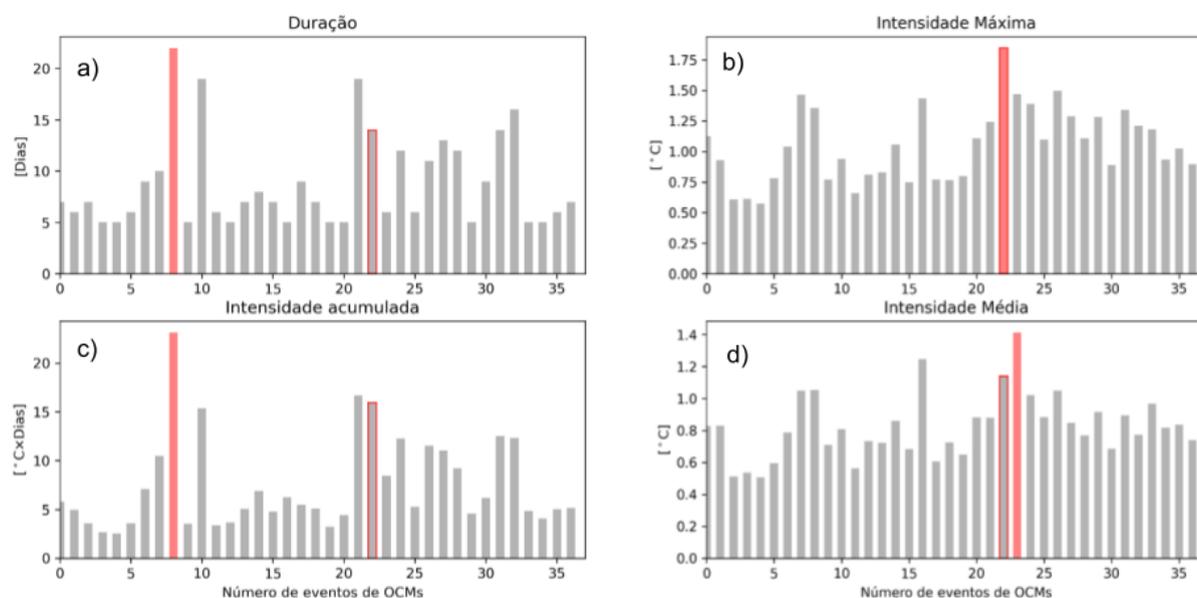


Figura 10 - Gráficos representando em a) a duração, b) intensidade máxima, c) intensidade acumulada e d) intensidade média da OCM na área D. Fonte: A autora (2022).

Além disso, foi possível observar uma maior intensidade de OCMs nos eventos de 2010 e 2020 (Figura 11b) tendo cerca de 10 OCMs apenas em 2020 e em torno de 9 em 2010 (Figura 11a).

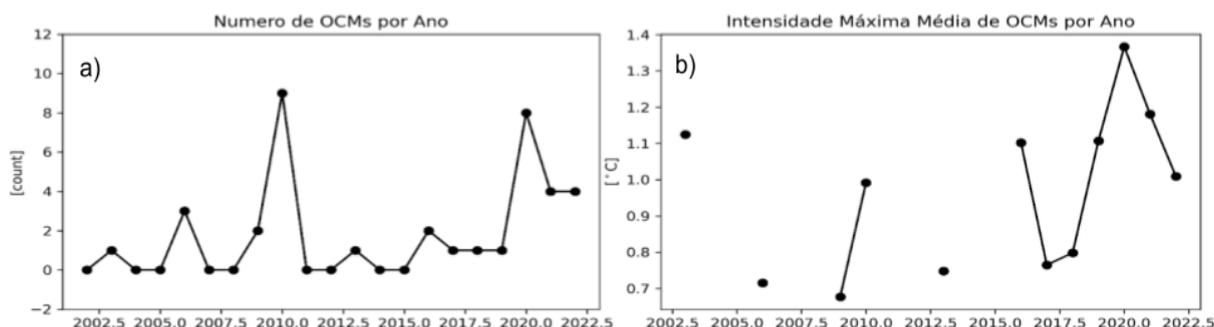


Figura 11 - Gráficos representando em a) número de OCMs por ano e b) intensidade máxima média da série de 20 anos na área D. Fonte: A autora (2022).

Em relação às métricas propostas por HOBDDAY *et al.* (2016) para caracterização de OCMs, as medidas das intensidades máximas variaram de 0,50°C a 1,87°C, sendo o evento de maior intensidade (I_{max}) encontrado na área B, com 1,87°C, em 2020 (Tabela 3). O máximo de OCMs foi identificado no outono e verão austral, com exceção das OCMs na área C que chegou no final da primavera.

Na área A, o período de março a abril de 2020, outono no hemisfério sul, foi o que teve a TSM acima do limite do percentil 90 (Figura 12.a). Na área B, no período de março a abril de 2020, a TSM observada foi acima do limite do percentil 90 (verão/outono no hemisfério sul (Figura 12.b)). Na área C, o período de setembro a novembro de 2021 apresentou TSMs acima do limite do percentil 90 abrangendo a temporada de inverno e primavera no hemisfério sul (Figura 12.c). Na área D, no mês de março de 2020 (outono no hemisfério sul), também foram registradas TSMs acima do limite do percentil 90 (Figura 12.d).

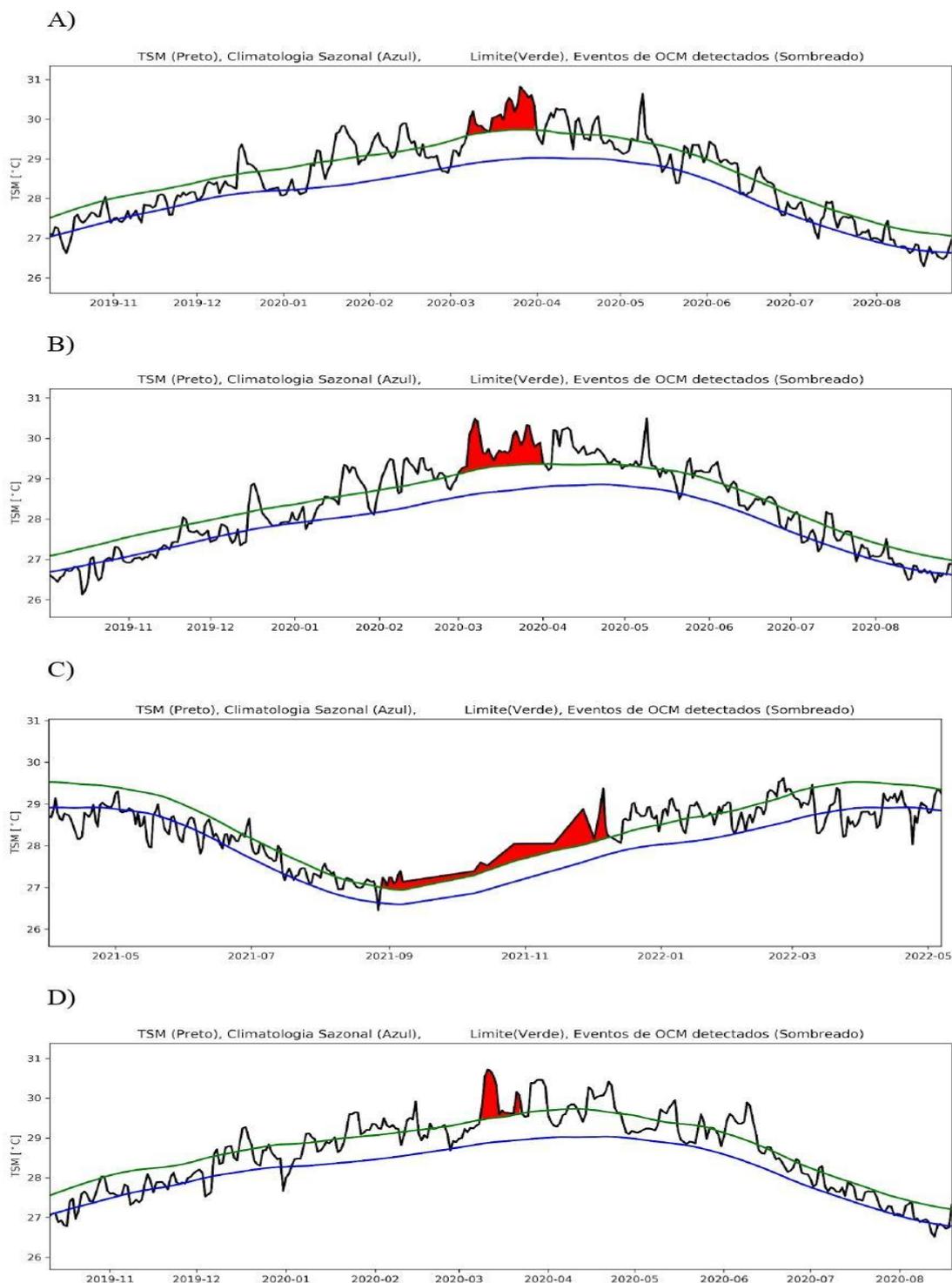


Figura 12 - Série dos maiores eventos de OCMs identificados (sombreamento vermelho escuro) para as quatro áreas. Fonte: A autora (2022).

Nos seus trabalhos, diferentemente de HOBDAV et al. (2016), SCHLEGEL et al. (2017), considera a intensidade acumulada a métrica mais ecologicamente relevante e discutem que esta pode ser usada como um índice de aferição da ameaça de eventos extremos nos ecossistemas. Isto porque a intensidade acumulada é o produto da intensidade máxima pela duração do evento. Assim, altas anomalias que persistem por um período curto causaram

um impacto relativamente similar a baixas anomalias com uma duração longa e, altas anomalias persistindo por uma longa duração causaram então, o maior dos impactos (COSTA, N., 2018).

As duas maiores intensidades acumuladas de OCMs foram registradas nos recifes offshore (Tabela 3). A intensidade acumulada média encontrada variou de $2,14^{\circ}\text{C}/\text{dia}$ a $49,92^{\circ}\text{C}/\text{dia}$. A área C apresentou a maior intensidade acumulada, com $49,92^{\circ}\text{C}/\text{dia}$. Isso se deve, em parte, aos eventos mais distantes da costa terem tido maiores durações do que as outras duas áreas próximas à costa, o que influenciou a métrica de intensidade cumulativa.

O exame das quatro áreas separadamente, sugeriu que as áreas offshore estão experimentando as OCMs mais intensas durante os meses de outono e inverno (Tabela 3). Foi observado um padrão de aumento na frequência de número de OCMs por ano, duração e intensidade nas quatro áreas estudadas.

5.2 Impactos das OCMs nos Parâmetros biofísicos.

5.2.1 Área A

A Figura 13 mostra a série temporal das anomalias de clorofila-a (mg/m^3) e Kd490-a (m^{-1}) para a área A nos anos de 2010 e 2020.

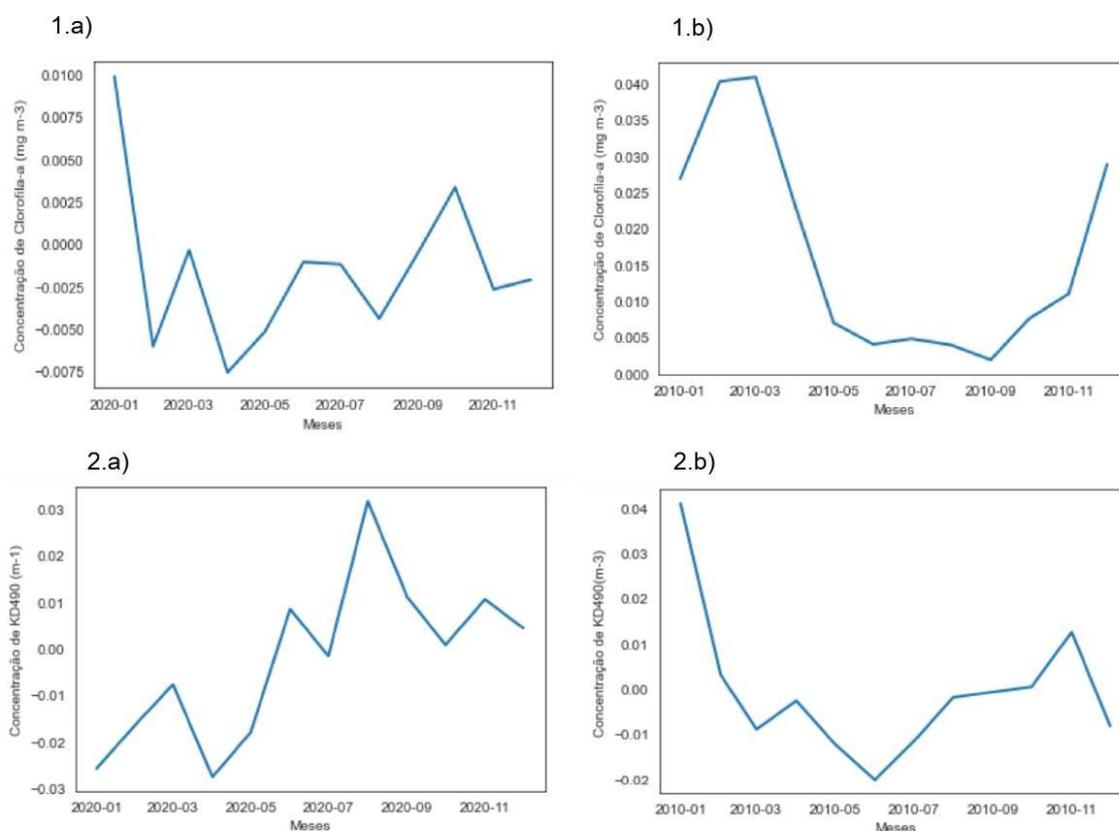


Figura 13 - Série Temporal das anomalias de clorofila-a (mg/m^3) e Kd490-a (m^{-1}) para a área A. 1.a)

Clorofila-a em 2020. 1.b) Clorofila-a em 2010. 2.a) KD490-a em 2020. 2.b) KD490-a em 2010. Fonte: A autora (2022).

Para a área A, os valores mais elevados de anomalia do KD490 foram registrados durante o mês de janeiro de 2010, seguido de uma diminuição nos meses seguintes, com o valor máximo de $0,040 \text{ m}^{-1}$ e valor mínimo no mês de junho. O maior valor da anomalia de clorofila-a para esse ano foi durante o mês de março, com o valor máximo de $0,040 \text{ mg/m}^3$ e valor mínimo no mês de setembro.

As anomalias de KD490 mais elevadas foram observadas no ano de 2020 quando comparadas às de 2010. O maior valor de anomalia do KD490 se concentra durante o mês de agosto, onde o valor máximo encontrado foi de $0,031 \text{ m}^{-1}$ e valor mínimo no mês de abril. O maior valor da anomalia de clorofila-a para esse ano foi durante o mês de janeiro, com o valor máximo de $0,009 \text{ mg m}^3$ e valor mínimo no mês de março.

5.2.2 Área B

A Figura 14 mostra a série temporal das anomalias de clorofila-a (mg^{-3}) e Kd490-a (m^{-1}) para a área B nos anos de 2010 e 2020.

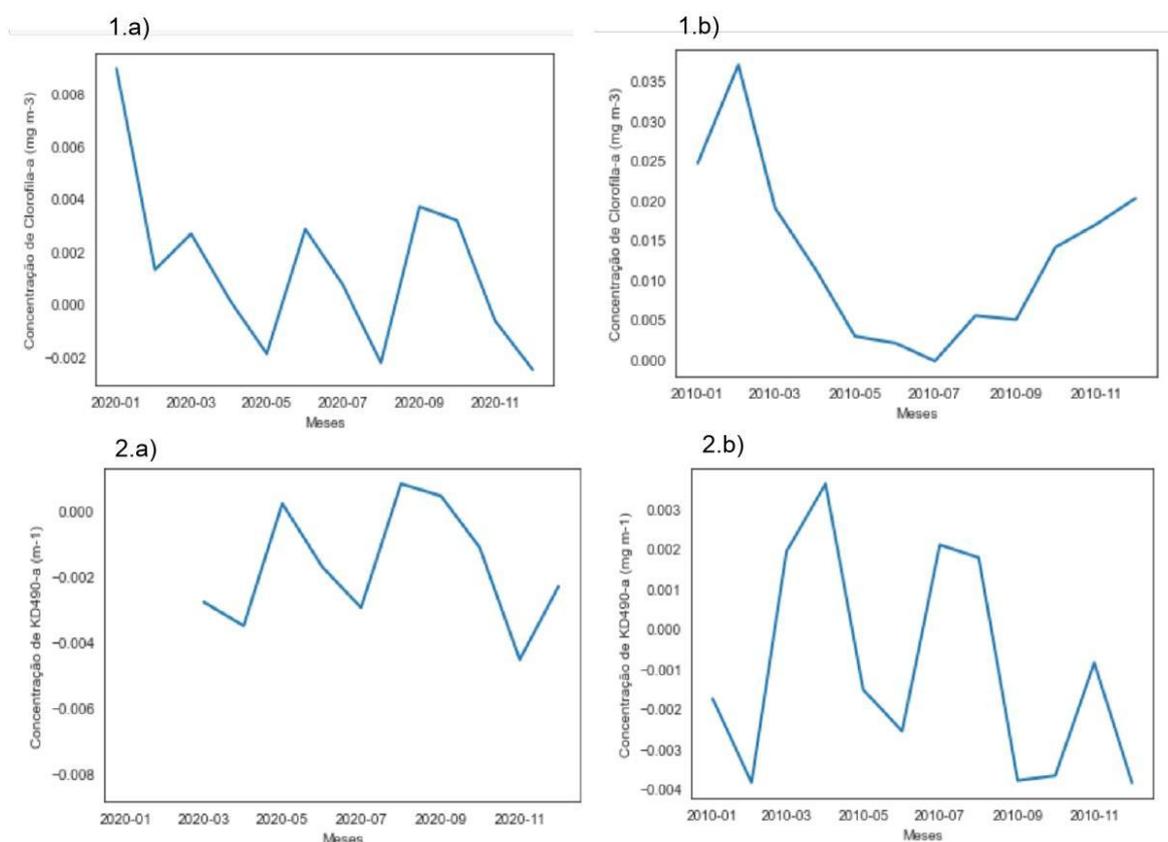


Figura 14 - Série Temporal das anomalias de clorofila-a (mg^{-3}) e Kd490-a (m^{-1}) dos anos de 2010 e 2020 para a

área B. 1.a) Clorofila-a em 2020. 1.b) Clorofila-a em 2010. 2.a) KD490-a em 2020. 2.b) KD490-a em 2010.
 Fonte: A autora (2022).

O ano de 2010 apresentou os maiores valores de anomalia da KD490 durante o mês de abril, com o valor máximo de $0,003 \text{ m}^{-1}$ e um valor mínimo durante o mês de fevereiro. O maior valor da anomalia de clorofila-a para esse ano foi durante o mês de fevereiro, com o valor máximo de $0,036 \text{ mg/m}^3$ e valor mínimo no mês de julho.

No ano de 2020 foram observadas anomalias mais elevadas quando comparados à 2010. O maior valor de anomalia da KD490 se concentra durante o mês de agosto, onde o valor máximo encontrado é de $0,0007 \text{ m}^{-1}$ e um valor mínimo no mês de novembro. O maior valor da anomalia de clorofila-a para esse ano foi durante o mês de janeiro, com o valor máximo de $0,008 \text{ mg m}^{-3}$ e valor mínimo no mês de novembro.

5.2.3 Área C

A figura 15 mostra a série temporal das anomalias de clorofila-a (mg/m^3) e Kd490-a (m^{-1}) para a área C nos anos de 2010 e 2021.

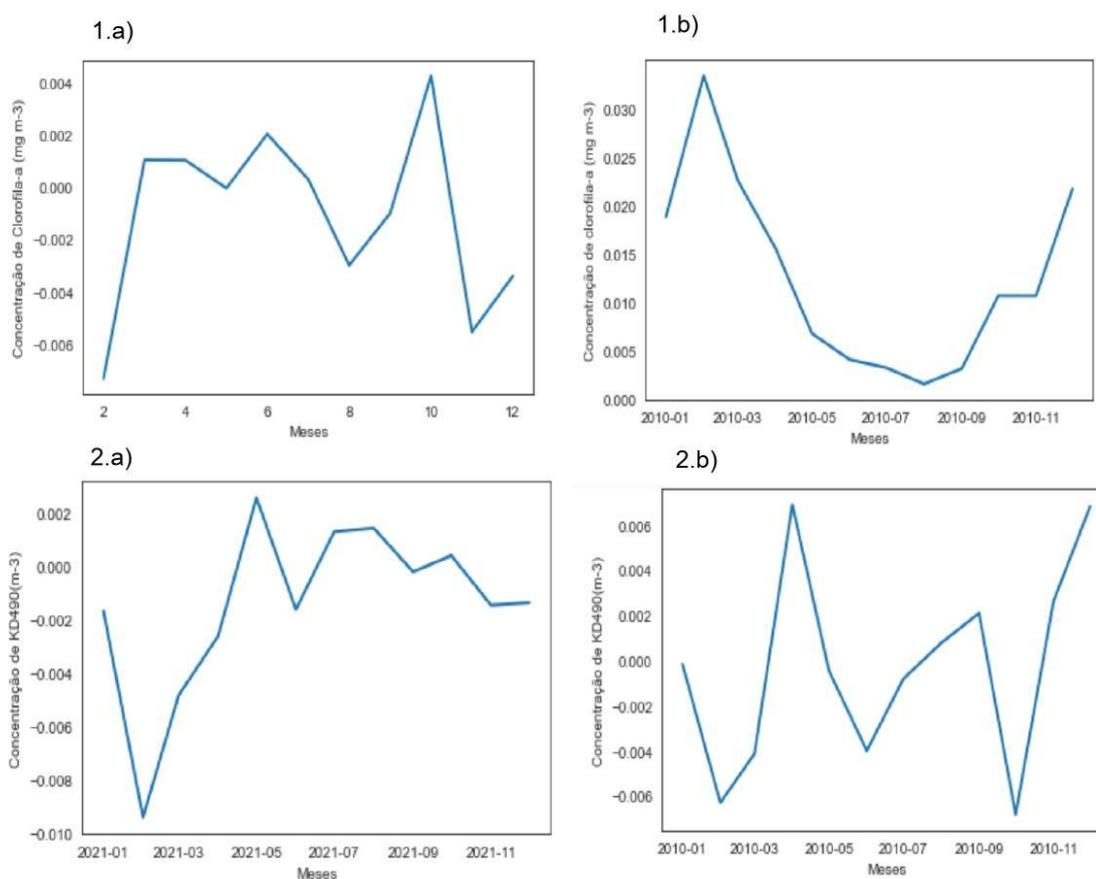


Figura 15 - Série Temporal das anomalias de clorofila-a (mg/m^3) e Kd490-a (m^{-1}) dos anos de 2010 e 2020 para a área C. 1.a) Clorofila-a em 2021. 1.b) Clorofila-a em 2010. 2.a) KD490-a em 2020. 2.b) KD490-a em 2010. Fonte: A autora (2022).

O ano de 2010 apresentou os maiores valores de anomalia da KD490 durante o mês de janeiro, com o valor máximo de $0,013 \text{ m}^{-1}$ e valores mínimos no mês de outubro. O maior valor da anomalia de clorofila-a para esse ano foi durante o mês de fevereiro, com o valor máximo de $0,033 \text{ mg}/\text{m}^3$ e valor mínimo no mês de agosto.

O ano de 2021 evidenciou anomalias mais elevadas quando comparados à 2010. O maior valor de anomalia da KD490 se concentra durante o mês de maio, onde o valor máximo encontrado é de $0,002 \text{ m}^{-1}$ e o valor mínimo está no mês de setembro. O maior valor da anomalia de clorofila-a para esse ano foi durante o mês de março, com o valor máximo de $0,004 \text{ mg}/\text{m}^3$ e valor mínimo no mês de maio.

5.2.4 Área D

A Figura 16 mostra a série temporal das anomalias de clorofila-a (mg/m^3) e Kd490-a (m^{-1}) para a área A nos anos de 2010 e 2020.

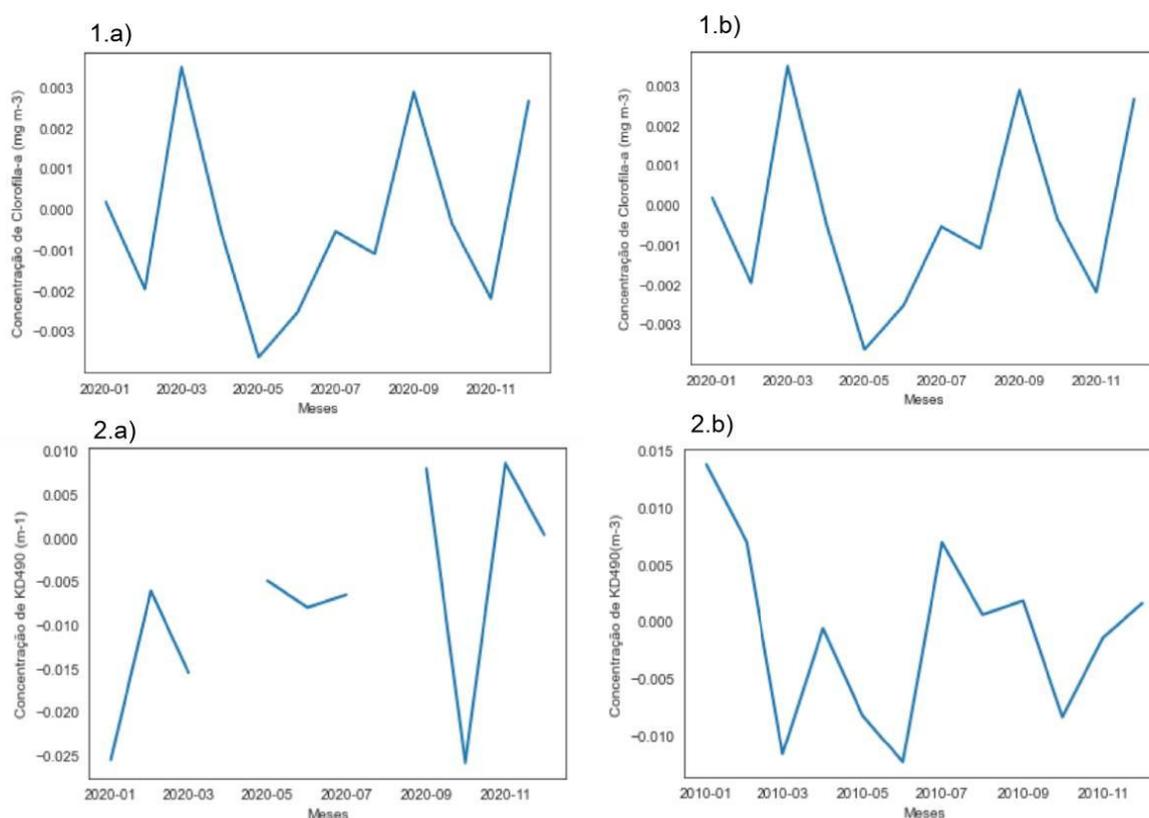


Figura 16 - Série Temporal das anomalias de clorofila-a (mg/m^3) e Kd490-a (m^{-1}) dos anos de 2010 e 2020 para a área D. 1.a) Clorofila-a em 2020. 1.b) Clorofila-a em 2010. 2.a) KD490-a em 2020. 2.b) KD490-a em 2010. Fonte: A autora (2022).

O ano de 2010 apresentou os maiores valores de anomalia da KD490 durante o mês de janeiro, com o valor máximo de $0,013 \text{ m}^{-1}$ e um valor mínimo no mês de março. O maior valor da anomalia de clorofila-a para esse ano foi durante o mês de fevereiro, com o valor máximo de $0,025 \text{ mg m}^{-3}$ e valor mínimo no mês de julho.

O ano de 2020 registrou anomalias mais elevadas quando comparados à 2010. O maior valor de anomalia do KD490 se concentrou durante o mês de novembro, onde o valor máximo encontrado foi de $0,008 \text{ m}^{-1}$. O maior valor da anomalia de clorofila-a para esse ano foi durante o mês de março, com o valor máximo de $0,003 \text{ mg m}^{-3}$ e valor mínimo no mês de dezembro.

Utilizando uma abordagem indireta, pode-se focar no ambiente ao redor dos recifes, como turbidez e clorofila que podem ser possíveis estressores. Utilizando a clorofila pode-se inferir que as OCMs são mais frequentes e intensas com a diminuição fitoplanctônica nas áreas de oceano aberto as OCMs e possivelmente impactam indiretamente ecossistemas marinhos recifais.

Torna-se necessário entender a variabilidade espaço-temporal desses constituintes. As anomalias de clorofila-a apresentaram variação sazonal, com valores máximos no verão austral e mínimos no outono/inverno austral.

Observando a série temporal de clorofila-a, de 20 anos, na Figura 17, as águas dos recifes costeiros e oceânicos mostraram resultados parecidos, devido à sua proximidade com os maiores valores de concentração de clorofila em 2010. Os menores valores foram observados nas áreas A e D em 2020.

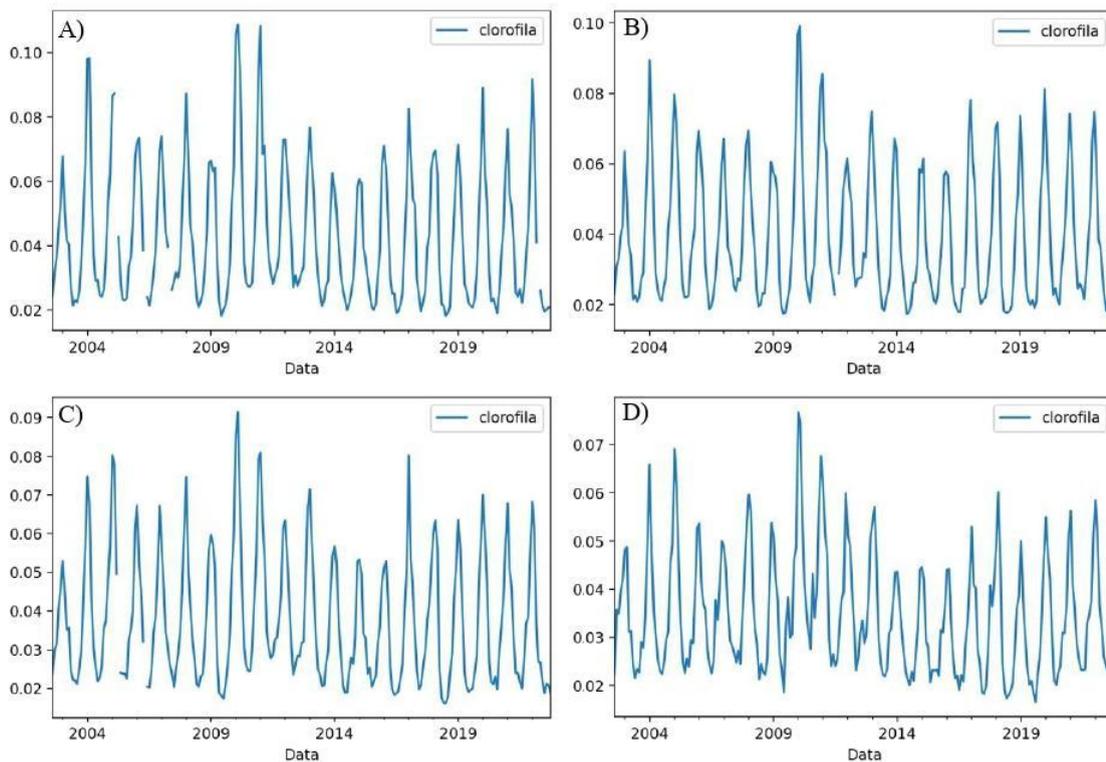
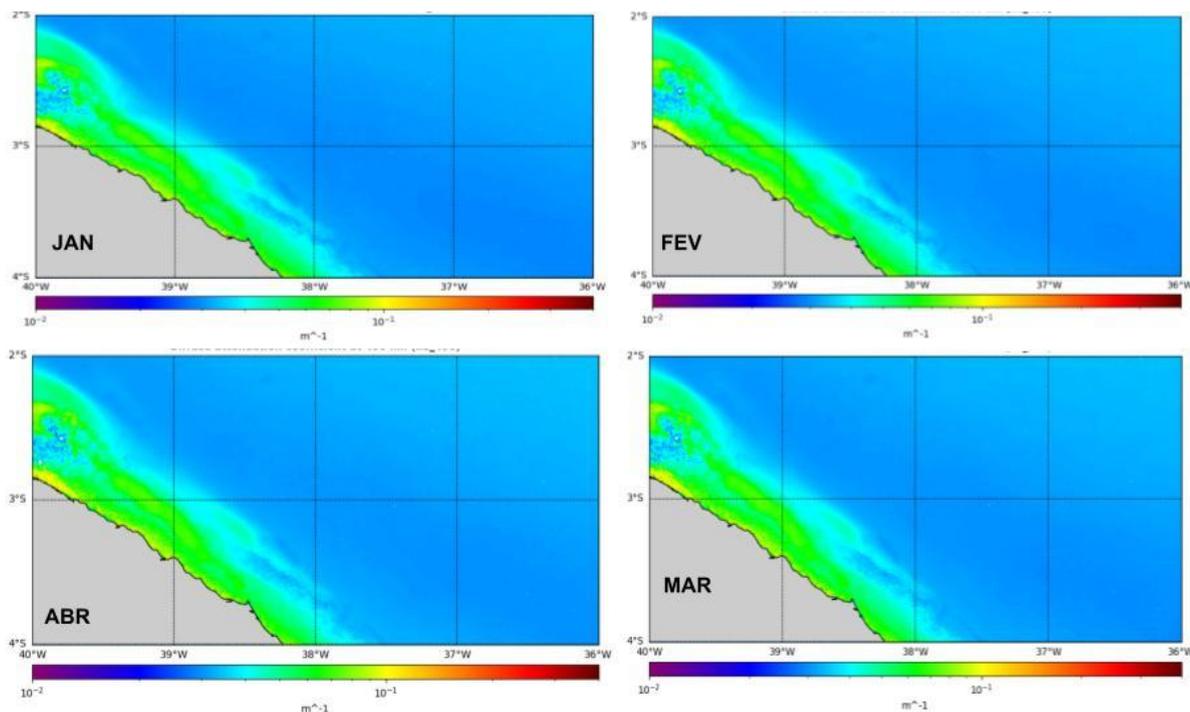


Figura 17 - Série Temporal de Clorofila (mg/m^3) de dados AQUA/MODIS de 20 anos (2002-2022) nas quatro áreas. Fonte: A autora (2022).

Quando observamos a turbidez da água ao redor dos recifes de coral, na Figura 18, é possível notar que as duas áreas – costeira e oceânica – estão submetidas ao mesmo regime sazonal (Figura 18). No entanto, a climatologia mensal de KD490 (Figura 18) apresenta picos mais evidentes no primeiro semestre do ano.



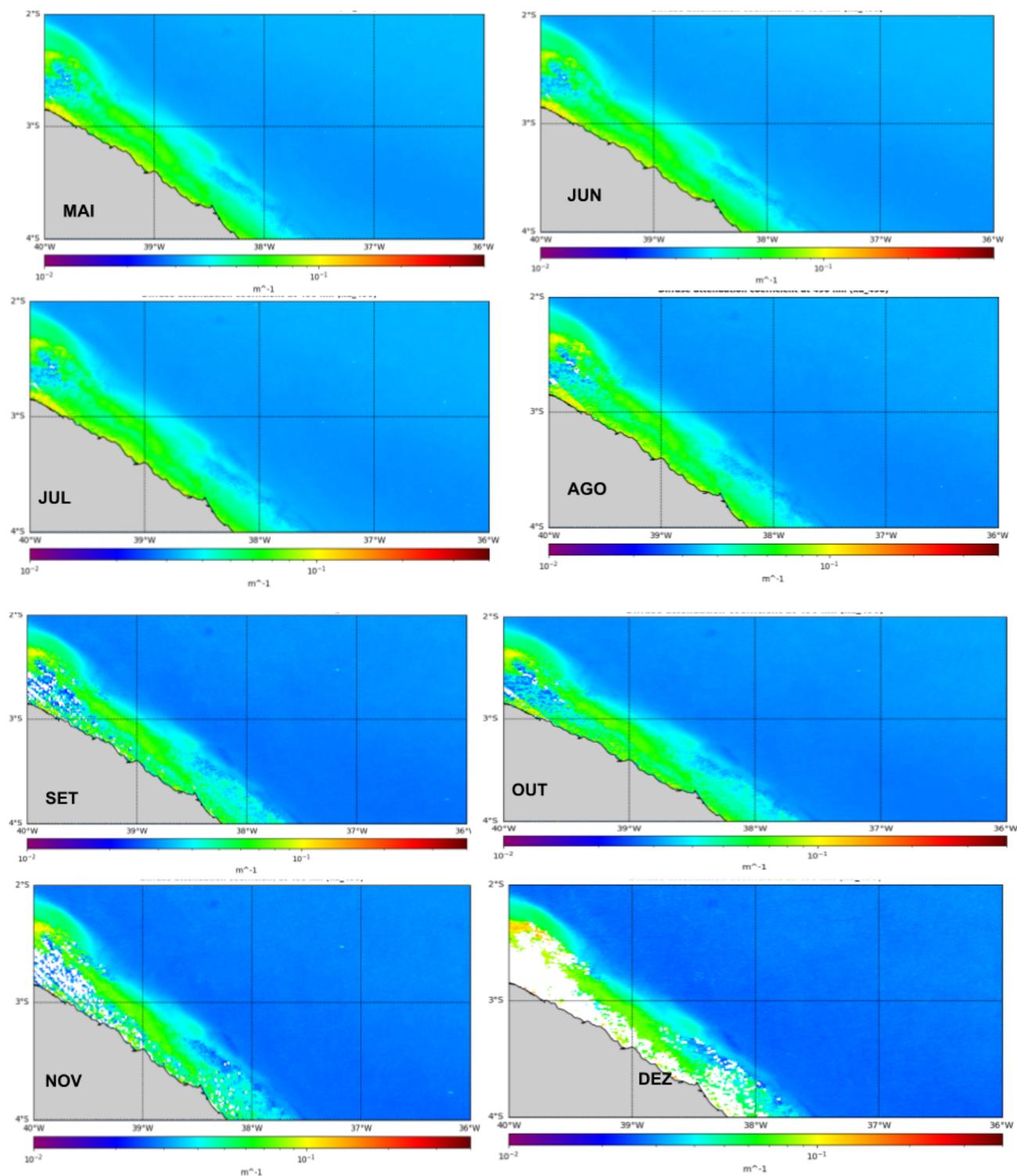


Figura 18 - Climatologia mensal de Kd490 (m⁻¹) de dados MODIS-Aqua de 20 anos (2002-2022). Fonte: A autora (2022).

As anomalias do KD490 indicam que nos anos de 2010 e 2020 os maiores valores de anomalia foram na região oceânica da área A (Figura 19). Durante o inverno e a primavera austral, é possível observar um aumento na distribuição espacial de águas mais turvas. Este padrão pode corresponder à ressuspensão de sedimentos carbonáticos nesta área. A série

temporal de Kd_{490} (m^{-1}) para o período analisado indica que nas áreas A e D tiveram picos de turbidez no ano de 2009. Os menores valores foram observados nas áreas C em 2019 e B em 2011.

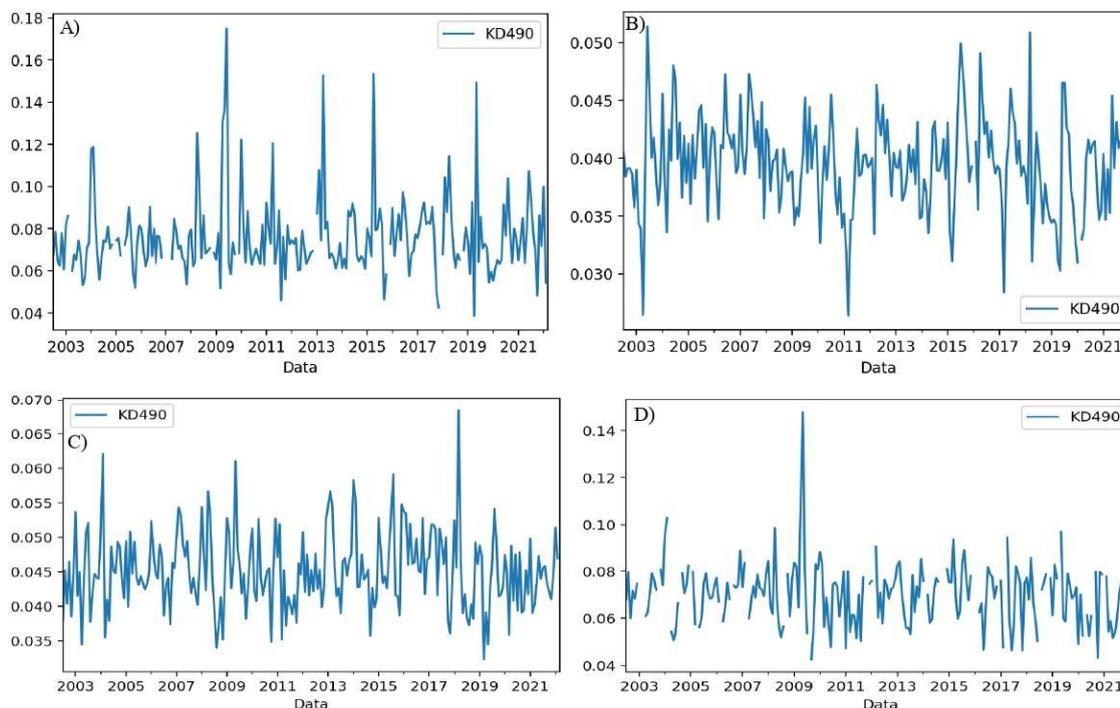
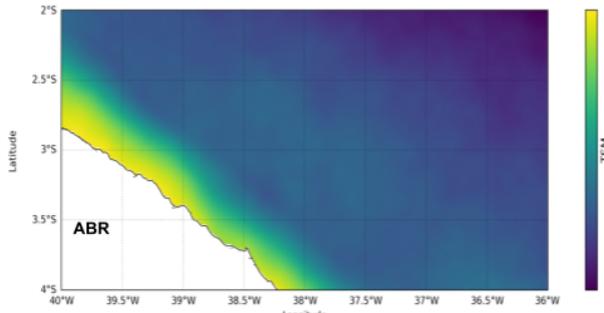
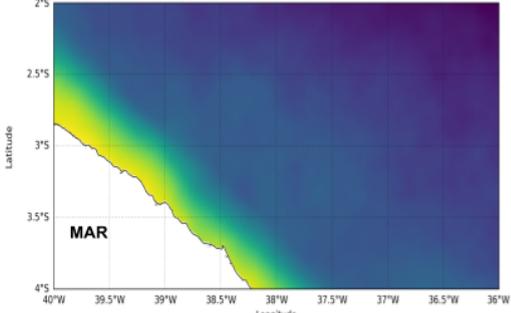
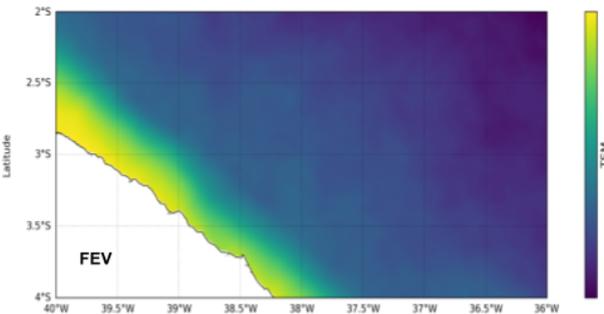
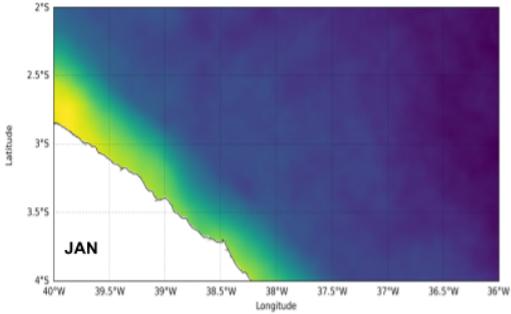


Figura 19 - Série Temporal de Kd_{490} (m^{-1}) de dados MODIS-Aqua de 20 anos (2002-2022) nas quatro áreas. Fonte: A autora (2022).

5.3 Impactos das OCMs no ecossistema recifal

Os valores da TSM registrados no período de análise variaram entre $26,37^{\circ}C$ e $29,98^{\circ}C$. É importante observar que, por se tratar de uma climatologia, seria normal encontrar um gradiente bastante suave entre as regiões mais internas e externas da área de estudo.

Temperaturas elevadas da água do mar em combinação com a forte luz solar causam estresse térmico nos corais. Esse estresse pode causar a interrupção dos processos fotossintéticos normais em zooxanthellae de corais, o que leva ao seu branqueamento. Na Figura 20 é possível observar a climatologia da TSM da área total de estudo, sendo que as mais altas temperaturas são observadas no primeiro semestre do ano.



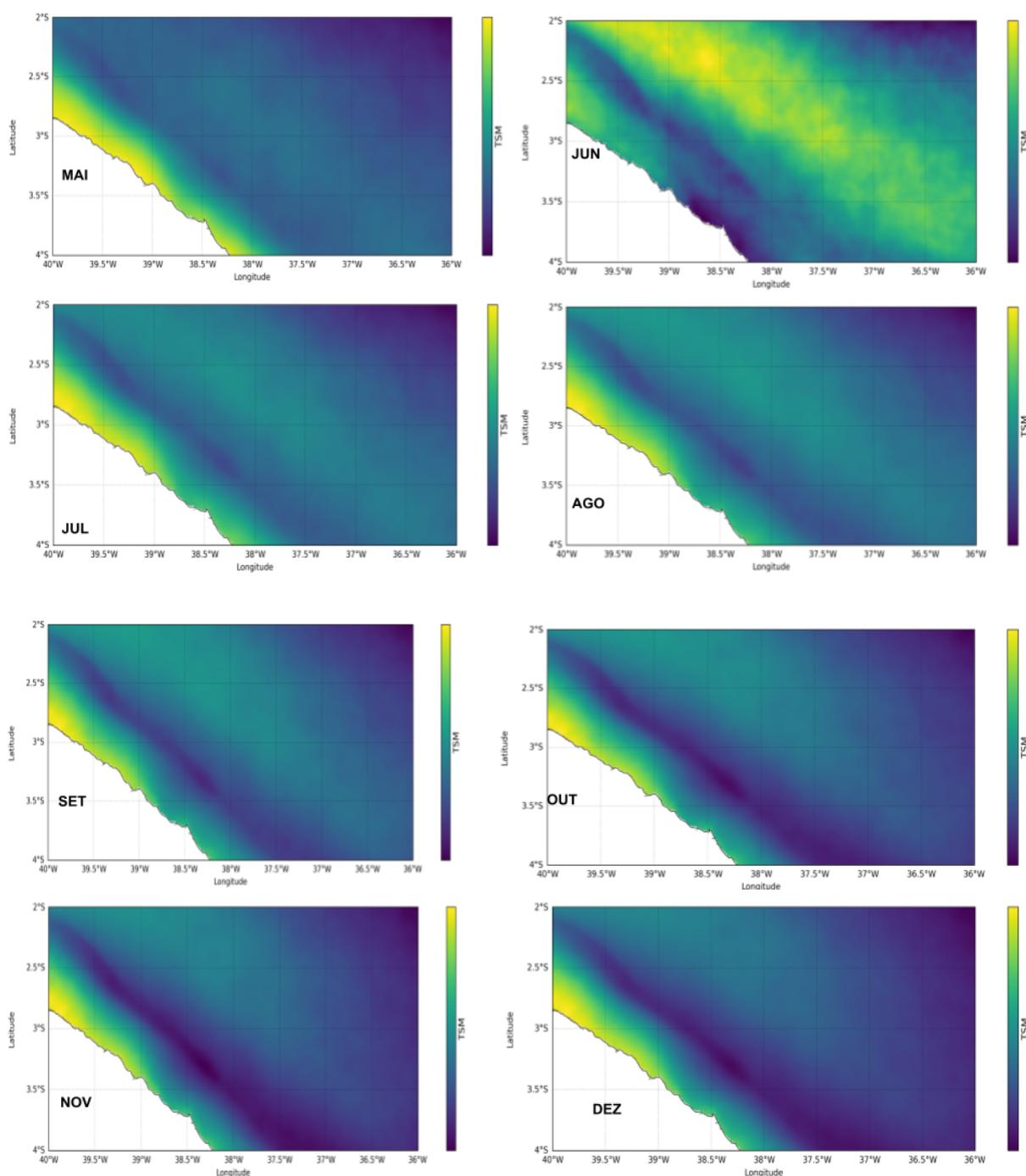


Figura 20 - Climatologia da Temperatura da Superfície do Mar de dados AVHRR de 20 anos (2002-2022).
Fonte: A autora(2022).

A região offshore da área A, apresentou a maior TSM com o valor de 29,95°C. Essa região se encontra praticamente em contato com o oceano aberto e sofre uma menor hidrodinâmica atuante na área. Sendo o mês de março de 2020 (Figura 21) que apresenta os maiores valores no período de OCM de maior duração e I_{max} de 1,81 °C (Tabela 3), o que demonstra uma diferença significativa quando comparado às temperaturas nos outros meses de observação.

A região onshore apresentou menores valores de TSM, variando de 29,85 °C a 26,19 °C, embora a OCM de maior intensidade em toda área de estudo tenha sido na região onshore com I_{max} de 1,87 °C (Tabela 3), também em março de 2020.

Interessante notar neste último caso que, embora o final do verão e começo do outono esteja mais quente nas áreas A e B, as temperaturas das demais áreas diferem entre si. Uma vez que, a área C apresentou uma OCM com I_{max} de 1,61 °C nos períodos de Inverno e Primavera 2021 (Tabela 3).

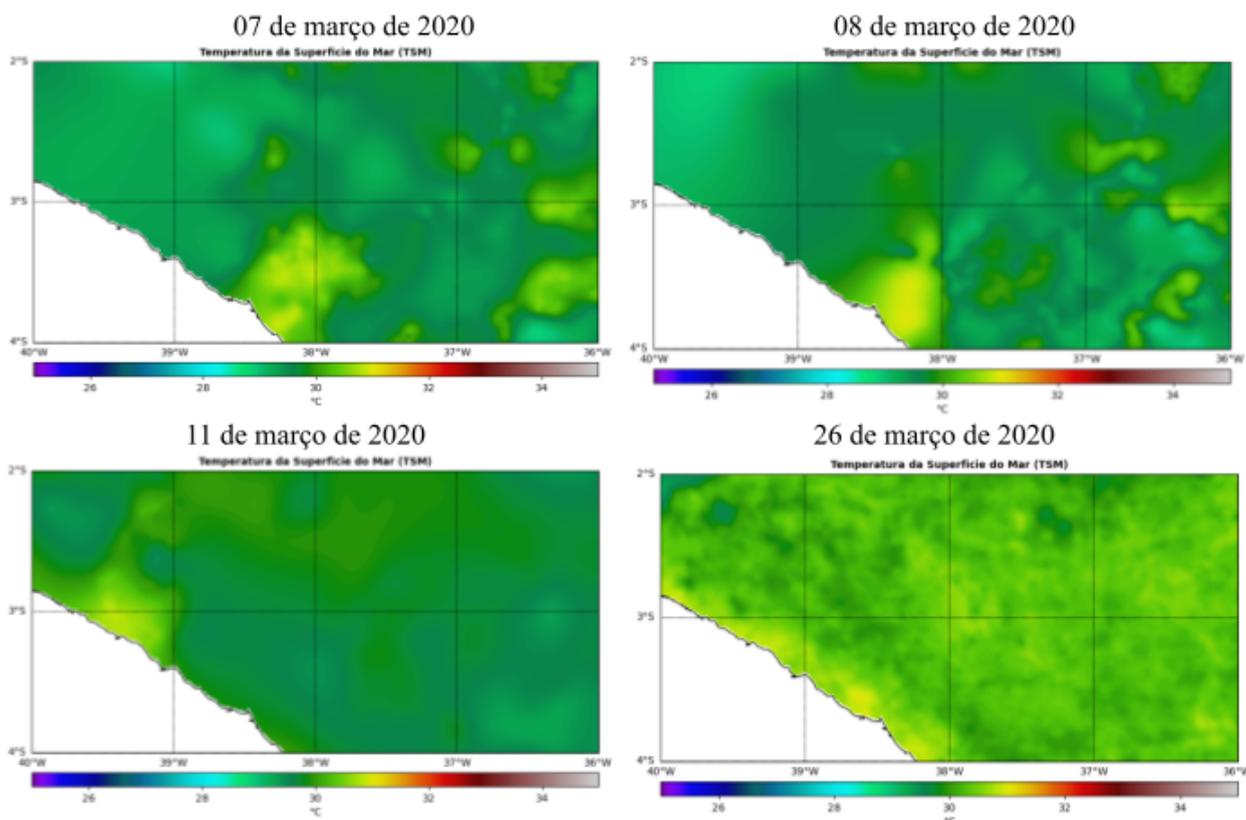


Figura 21 - Imagens diárias de TSM de vários dias em março/2020. Fonte: A autora (2022).

As Figuras 22, 23, 24 e 25 referem-se às séries temporais construídas para as áreas estudadas, através das quais se torna possível fazer algumas inferências. É importante observar o comportamento da TSM em relação à climatologia. Tal comportamento irá gerar as condições necessárias para o surgimento de OCMs.

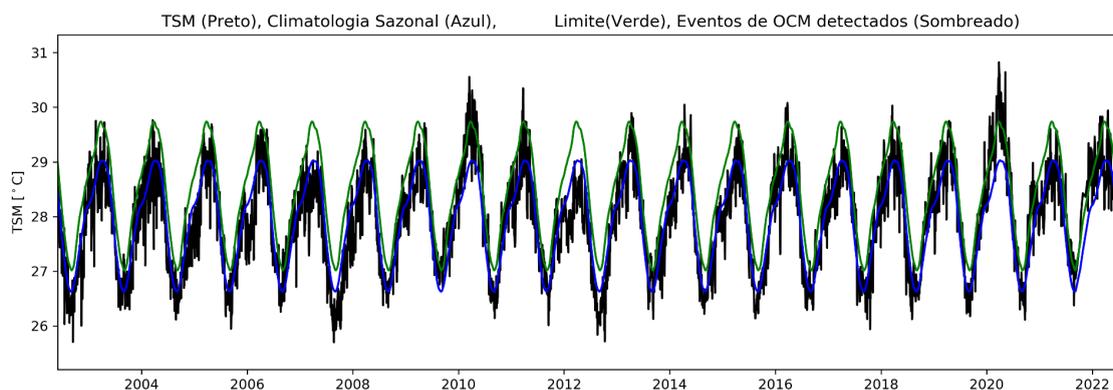


Figura 22 - Série climatológica de TSM de 20 anos (2002-2022) de dados AVHRR contendo o limite do percentil 90 (verde) e os eventos de OCM detectados (sombreado) na área A. Fonte: A autora (2022).

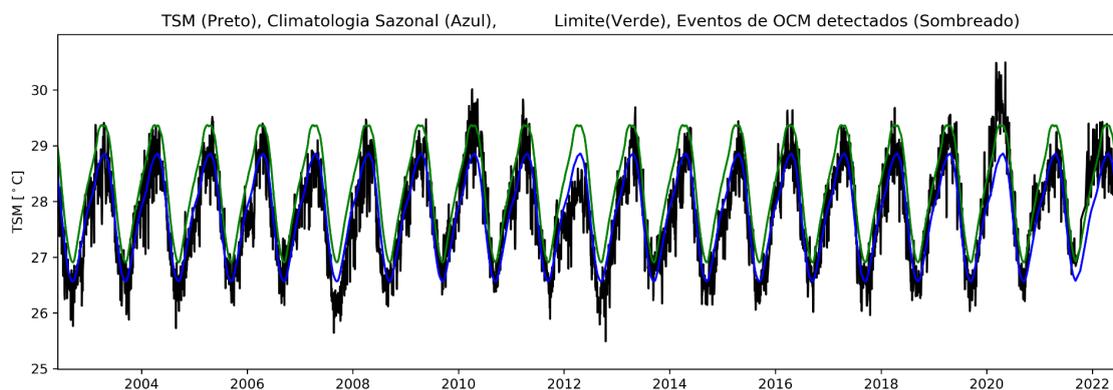


Figura 23 - Série climatológica de TSM de 20 anos (2002-2022) de dados AVHRR contendo o limite do percentil 90 (verde) e os eventos de OCM detectados(sombreado) na Área B. Fonte: A autora (2022).

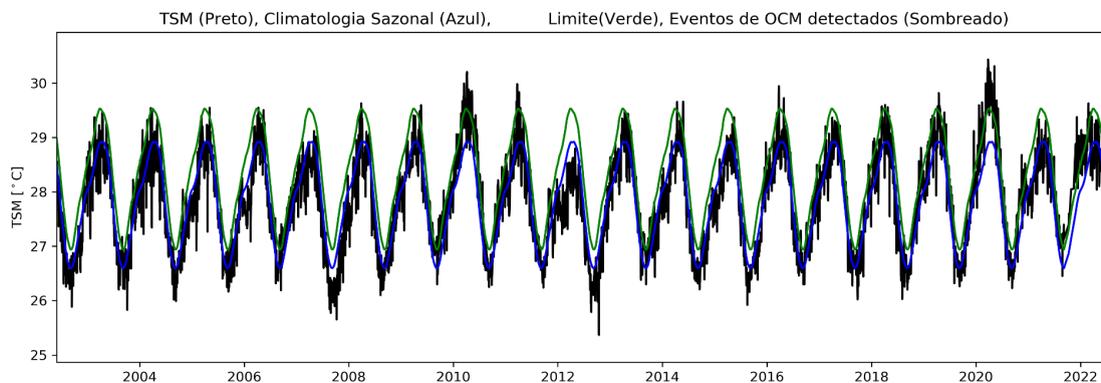


Figura 24 - Série climatológica de TSM de 20 anos (2002-2022) de dados AVHRR contendo o limite do percentil 90 (verde) e os eventos de OCM detectados(sombreado) na Área C. Fonte: A autora (2022).

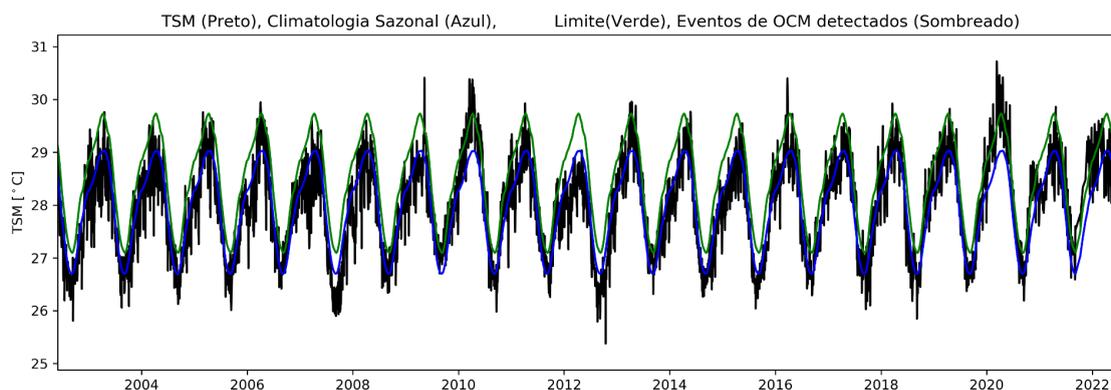


Figura 25 - Série climatólogica de TSM de 20 anos (2002-2022) de dados AVHRR contendo o limite do percentil 90 (verde) e os eventos de OCM detectados(sombreado) na Área D. Fonte: A autora (2022).

Apesar das séries da TSM, nas três áreas de estudo, apresentarem um comportamento geral bastante semelhante, afinal trata-se de pontos geograficamente não muito distantes entre si, algumas peculiaridades podem ser notadas em cada uma delas.

Tanto nos recifes offshore, quanto nas outras duas áreas de estudo, fica evidente que as temperaturas no outono apresentaram-se mais elevadas que a média. A climatologia teve picos acima do limite climatológico de eventos de OCM detectados nos anos de 2020 e 2010 nas quatro áreas e temperaturas mais elevadas no mês de março.

5.3.1 Anomalias relacionadas ao Branqueamento

Pode-se verificar na Figura 26 as anomalias da TSM para os anos de 2010 e 2020 que foram anos em que as OCM apresentaram maior intensidade e duração. A partir da análise dos gráficos apresentados, torna-se evidente um aumento gradativo no tempo de persistência das anomalias térmicas ocorridas nas áreas monitoradas.

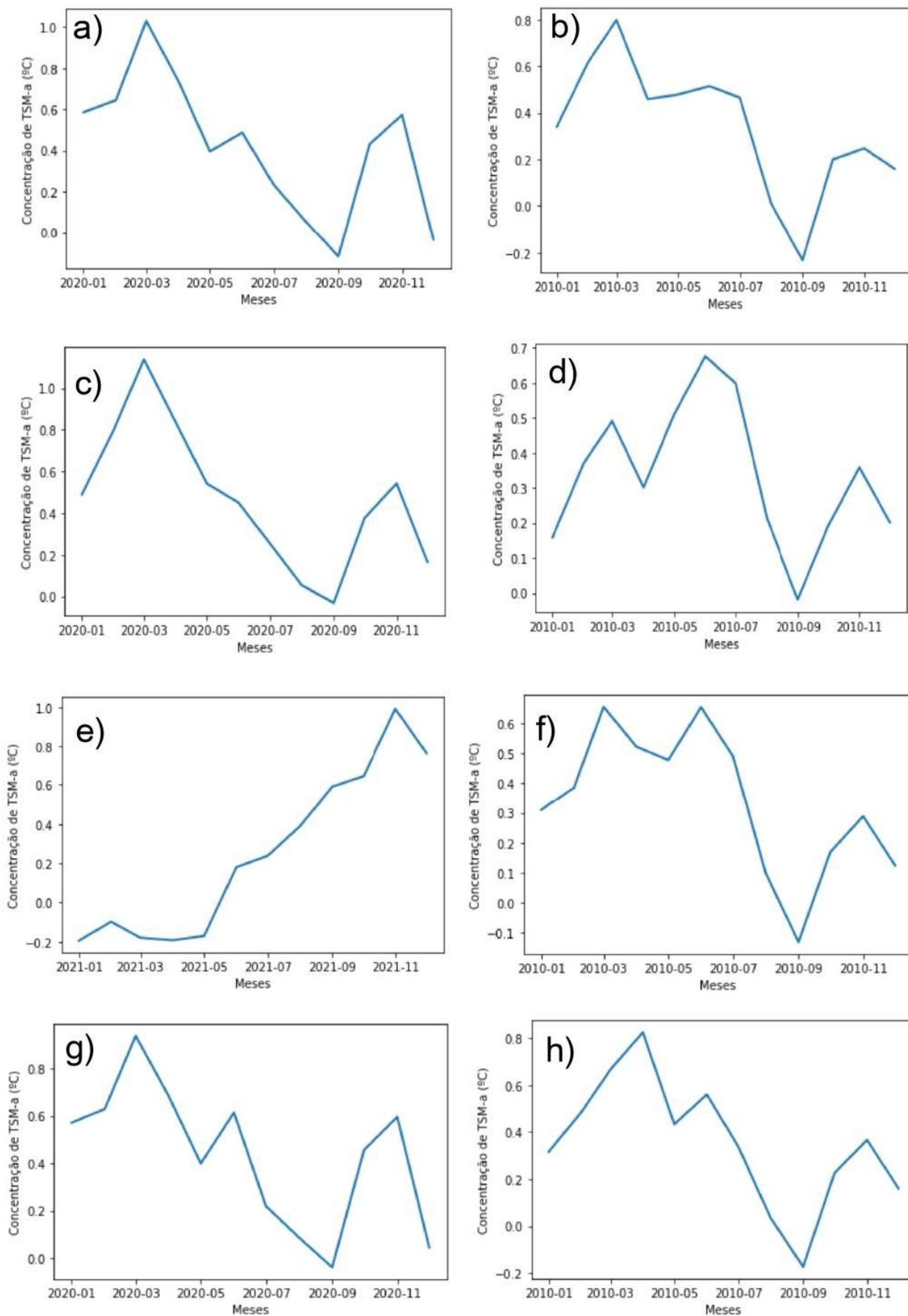


Figura 26 - Série Temporal das anomalias da TSM ($^{\circ}\text{C}$) para a área de estudo. a) TSM-a em 2020 na área A. b) TSMa-a em 2010 na área A. c) TSMa-a em 2020 na área B. d) TSMa-a em 2010 na área B. e) TSMa-a em

2021 na área C. f) TSMa-a em 2010 na área C. g) TSMa-a em 2020 na área D. h) TSMa-a em 2010 na área D. Fonte: A autora (2022).

O ano de 2010 apresentou maiores valores de anomalia da TSM no primeiro semestre do ano e diminuição no segundo, com anomalias positivas mais elevadas durante o período de março a julho, onde os valores máximos encontrados estão entre 0,82 °C e 0,49°C. As regiões onde se localizam essas áreas de estudos apresentaram valores bastante similares. Tais valores de anomalia da TSM fornecem evidências que indicam estresse térmico nas áreas A, B e D.

O ano de 2020 evidenciou anomalias mais elevadas quando comparadas às de 2010. Os maiores valores de anomalia da TSM se concentraram no primeiro semestre do ano e diminuíram no segundo, com anomalias positivas mais elevadas durante o período de março, onde os valores máximos encontrados estão entre 1,13°C e 0,93°C. As regiões onde se localizam essas áreas de monitoramento apresentaram valores bastante similares. Levando em consideração as informações supracitadas, pode-se considerar 2020 como o ano onde os recifes de corais das áreas A, B e D estiveram submetidos ao maior grau de estresse térmico, dentre os anos analisados. A turbidez, estimada a partir do baixo valor de *K*490-a, no primeiro semestre do ano variou de 0,003 a -0,009 m⁻¹.

O ano de 2021, dentre os avaliados, apresentou, no segundo período do ano, altos valores de anomalia da TSM. Nesta zona, encontra-se a área de estudo C, cujo valor máximo de TSM-a foi de 0,99 °C. A turbidez, inferida a partir do baixo valor de *KD*490-a, no segundo semestre do ano, variou de -0,000187 a 0,001459 m⁻¹, enquanto a clorofila-a variou de 0,057 mg/m³ a 0,021 mg/m³ neste período.

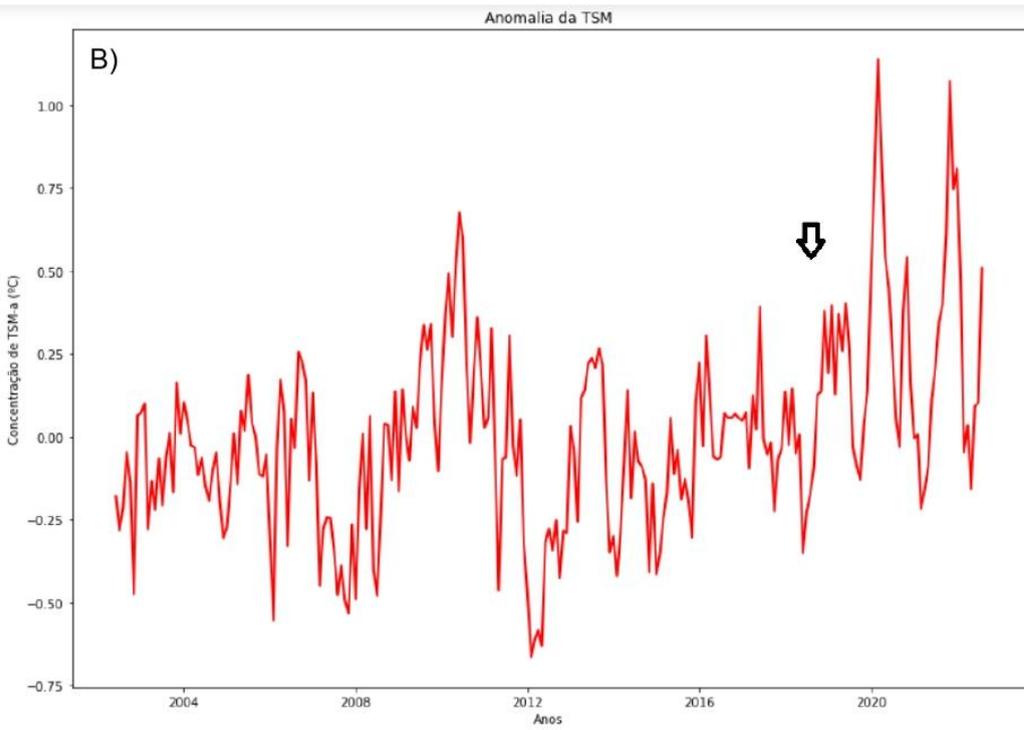
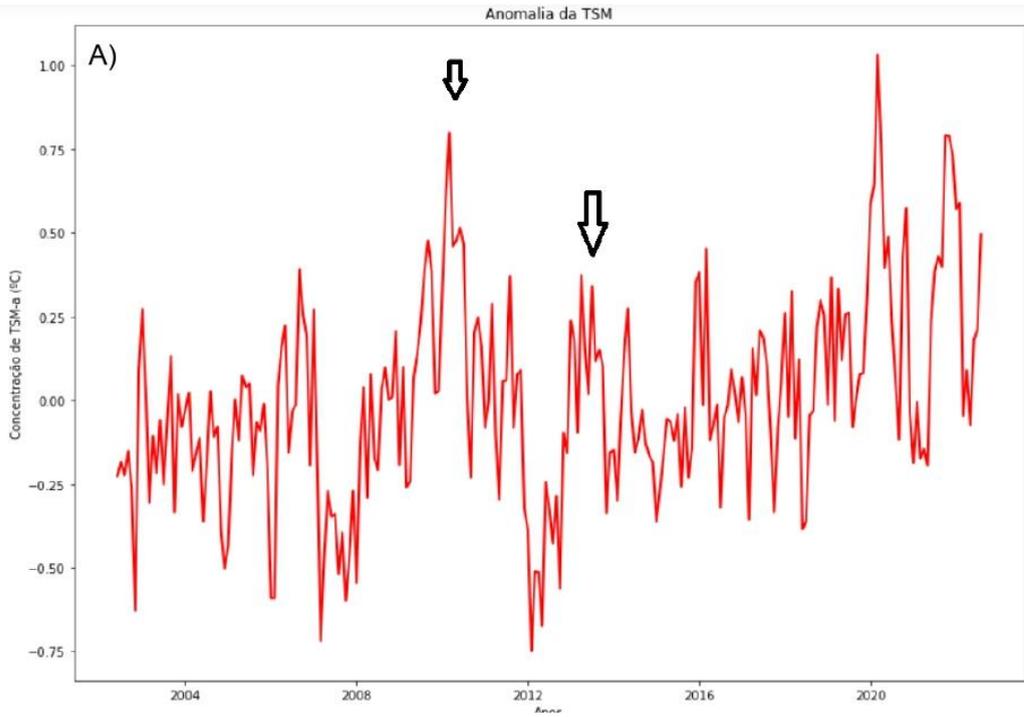
A partir dos resultados obtidos, verifica-se um aumento da frequência de ocorrência de eventos de anomalias térmicas positivas. Esse fato, em conjunção com ações antrópicas, fazem com que o ecossistema recifal sofra estresse, degradação e branqueamento. Nesse sentido, foi reunido um conjunto de dados pretéritos sobre ocorrências de branqueamento nas espécies do gênero *Siderastrea* que ocorrem no litoral do Ceará (NE, Brasil). Uma análise qualitativa da literatura especializada foi realizada em duas etapas. Primeiro, os termos "Branqueamento de corais", "recife norte Ceará", "*Siderastrea Stellata*", foram pesquisados em mecanismos de busca acadêmicos on-line (Google Scholar, Science Direct e repositório UFC). Os resultados da pesquisa bibliográfica foram classificados em razão das áreas recifais estudadas no trabalho de 2002 a 2022 (Tabela 4).

Áreas estudadas	Região dos recifes de coral	Espécies Branqueadas	Branqueamento de corais (%)	Período de Ocorrência	Fonte
Volta da Jurema	Norte - Ceará	<i>Siderastrea stellata</i>	73,21	Primavera/ Verão (2019)	(BARROS, 2019)
CIPP	Norte - Ceará	<i>Siderastrea stellata</i>	34,03 - 29,96	Outono (2015)	(LIMA, 2015)
PEPRIM	Norte - Ceará	<i>Siderastrea stellata</i>	90,90	Outono\ Inverno (2010)	(SOARES, 2019)
CIPP	Norte - Ceará	<i>Siderastrea stellata</i>	100	Verão (2010)	(SOARES e RABELO, 2014)
Paracuru	Norte - Ceará	<i>Siderastrea stellata</i>	*	Verão(2010)	(SOARES e RABELO, 2014)

* = sem dados de branqueamento.

Tabela 4 - Alguns eventos nas áreas estudadas de branqueamento na espécie *Siderastrea Stellata*, porcentagem região e períodos de ocorrência reportados na literatura. Fonte: A Autora (2022).

A Figura 27 mostra as anomalias da TSM, das áreas de estudo, durante o período de 20 anos (2002-2022). Os Recifes das áreas de estudos offshore nas áreas A e C, exibiram anomalias da TSM máximas entre 1,02°C e 0,99°C, respectivamente. Enquanto nas áreas de estudos dos recifes próximos à costa (B e C) apresentaram valores anômalos entre 1,13° e 0,93°C, respectivamente. No estudo de Schlegel et al, (2017) durante eventos de OCM obtiveram anomalias de temperatura com maiores valores no subcontinente do que no oceano.



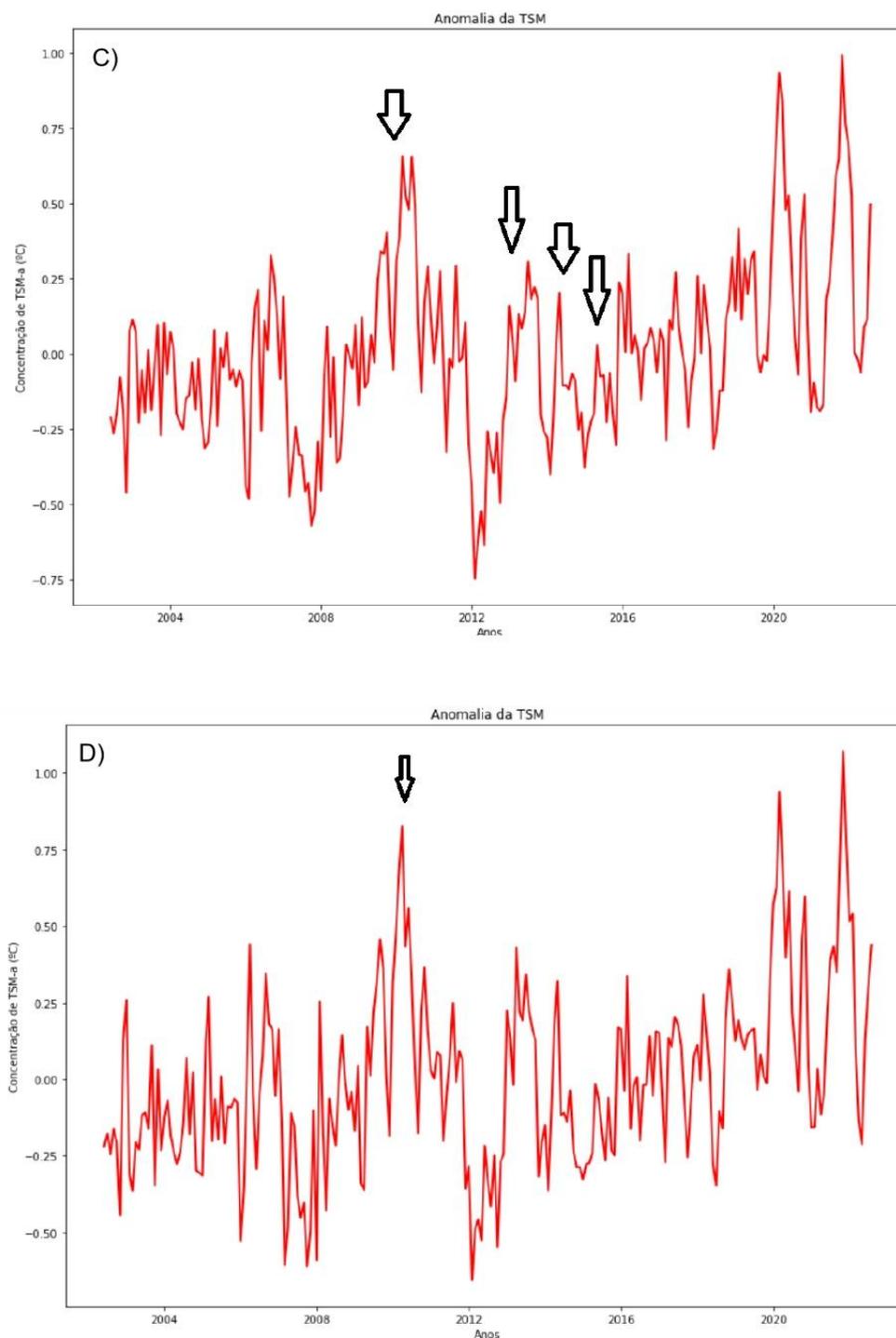


Figura 27 - Série Temporal de 20 anos (2002-2022) das anomalias da TSM ($^{\circ}\text{C}$) para a área de estudo, a seta preta indica o período no qual episódios de branqueamento foram relatados na literatura. a) TSMa na área A. b) TSMa na área B. c) TSMa na área C. d) TSMa na Área D. Fonte: A autora (2022).

Ainda no período de 2010 (início do verão), Soares e Rabelo (2014) relataram eventos de intenso branqueamento em massa nos recifes das áreas D e C, com a TSM variando de 30 a 32 $^{\circ}\text{C}$ e anomalias da temperatura da superfície do mar de 1 a 2 $^{\circ}\text{C}$ obtiveram taxas de 100% de branqueamento. O que foi atribuído à ocorrência de ENOS (El Niño/Oscilação Sul) no litoral do Ceará, configurando um estresse agudo. O valor de TSM-a durante o período de

branqueamento reportado foi de 3,99% em janeiro de 2010 e 0,1363 em fevereiro de 2010 (Figura 26.b). Nesse mesmo período de estudo houve dois eventos intensos de OCM, nos meses reportados. Em fevereiro e março houve 100% de branqueamento reportado na área. Detectamos OCMs em fevereiro e março de 2010, tendo um I_{max} de $1,0382^{\circ}C$ e $1,1883^{\circ}C$ e um I_{cum} de $7,0786^{\circ}$ /dias e $8,4641^{\circ}$ /dias, respectivamente. Nesse episódio, tiveram valores máximos de KD490-a e clorofila-a foram de $0,013797\ m^{-1}$ e $0,025455\ mg/m^3$, respectivamente (Figura 28).

A figura 28 mostra as séries temporais de KD490-a e Clorofila-a para a área C, ressaltando esses episódios de branqueamento.

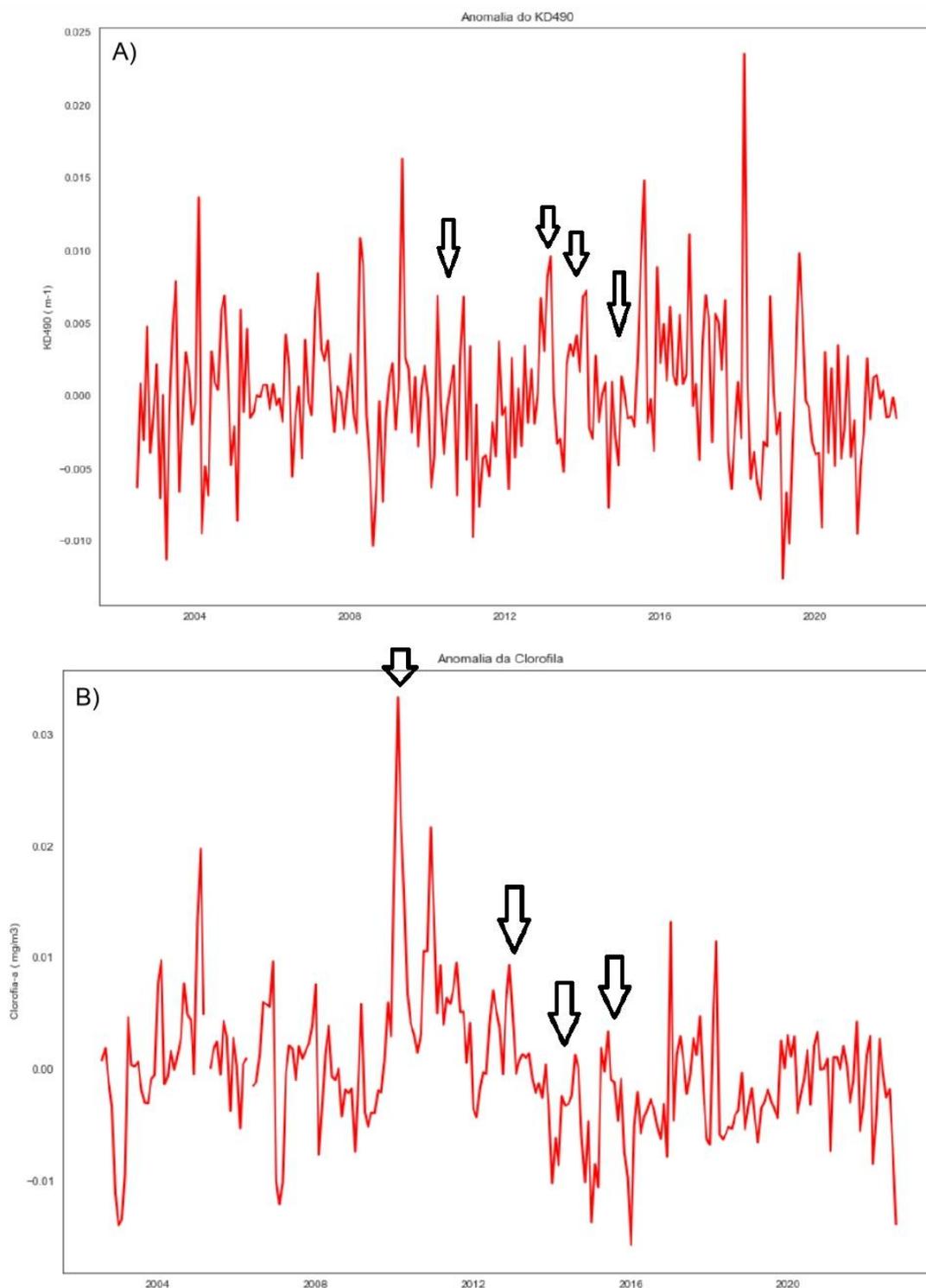


Figura 28 - Série Temporal de 20 anos (2002-2022) das anomalias de KD490-a e Clorofila-a para a área C, a seta preta indica o período em que os episódios de branqueamento foram relatados na literatura. a) KD490-a b) Clorofila-a. Fonte: A autora (2022).

A área C apresentou o menor valor de anomalia da temperatura se comparado às demais áreas de monitoramento com $0,83^{\circ}\text{C}$ (Figura 27c). Lima (2015), analisou 2880 colônias de *Siderastrea Stellata*, desde maio de 2013 até junho de 2015, com o valor da TSM variando entre $26,6^{\circ}\text{C}$ em setembro de 2014 e $29,4^{\circ}\text{C}$ em abril de 2013. Sendo reportado um

evento de branqueamento no 1ª semestre (outono) e variando ao longo do ano (44,3%-84,34%), demonstrando que o ambiente possui estresse crônico ao longo de todo o ano. O valor de TSM-a apresentou valores variando de $-0,2298^{\circ}\text{C}$ a $-0,1293^{\circ}\text{C}$, de maio de 2013 a junho de 2015, sendo o maior valor observado em setembro de 2014 com $0,6544^{\circ}\text{C}$. Neste mês o branqueamento foi de 6,76%. No período em que houve o branqueamento ocorreu um evento intenso de OCM detectado em agosto de 2013, tendo um I_{max} de $0,5882^{\circ}\text{C}$ e um I_{cum} de $5,9142^{\circ}\text{C}/\text{dias}$.

Nesse episódio, o valor de KD490-a (Figura 28a), teve valores variando de $-0,007664\text{ m}^{-1}$ a $0,000227\text{ m}^{-1}$, de maio de 2013 a junho de 2015, sendo o maior valor em abril de 2015 com $0,0049\text{ m}^{-1}$. Neste mês o branqueamento foi de 9,23%. O valor de clorofila-a, por sua vez, teve valores variando de $0,072276$ a $0,062209\text{ mg}/\text{m}^3$, de maio de 2013 a junho de 2015, sendo que o maior valor de clorofila-a ocorreu em junho de 2013, com o valor de $0,0333\text{ mg}/\text{m}^3$. Neste período o branqueamento foi de 29,26%.

As anomalias da temperatura indicaram maiores valores na zona costeira da área B, com valores máximos entre $1,13^{\circ}\text{C}$ e $0,83^{\circ}\text{C}$ (Figura 27b). No trabalho de Barros (2019), foram registradas temperaturas elevadas variando de $29,3$ a $35,2^{\circ}\text{C}$, no recife da Volta da Jurema, o que, somado à contaminação do recife por efluentes provenientes da galeria pluvial próxima e intensificado pelas chuvas mais intensa, resultou em taxas de branqueamento elevadas das colônias durante os meses de outubro de 2018 a março de 2019, com médias variando entre 26,7% (novembro) e 73,2% (março). Os maiores valores observados atingiram 100% de branqueamento forte e/ou fraco das colônias. O valor de TSM-a (Figura 27b) teve magnitudes variando de $0,1796^{\circ}\text{C}$ a $0,3042^{\circ}\text{C}$ de janeiro a dezembro de 2019, sendo o maior valor em dezembro. Nesse período de estudo, em que houve branqueamento, ocorreu um evento intenso de OCM detectado em dezembro de 2019, tendo um I_{max} de $1,1332^{\circ}\text{C}$ e um I_{cum} de $4,4038^{\circ}\text{C}/\text{dia}$.

A Figura 29a mostra a série temporal de KD490-a e Clorofila-a para a área B, ressaltando esses episódios de branqueamento descritos por Barros, (2019).

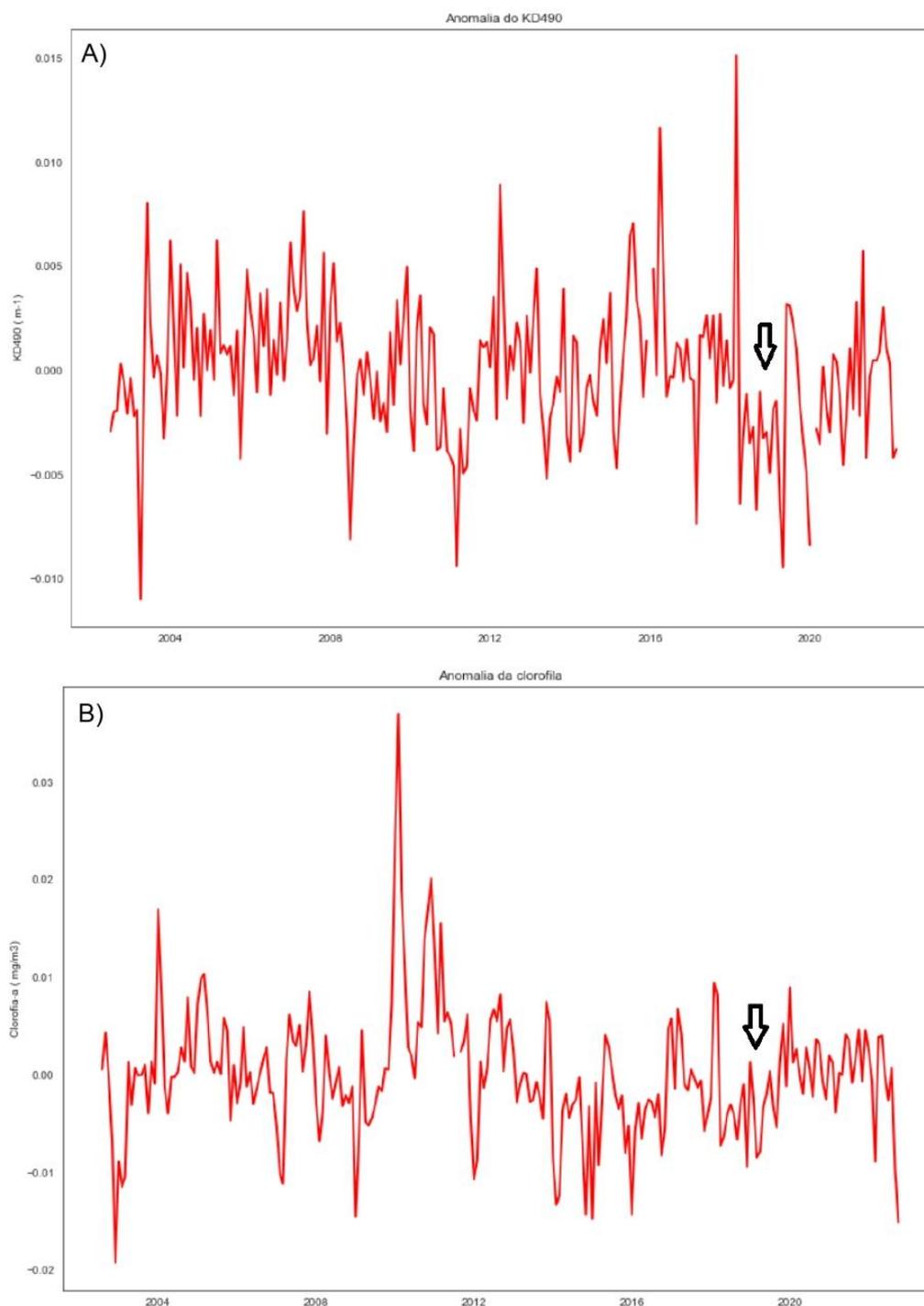


Figura 29 - Série Temporal de 20 anos (2002-2022) das anomalias de KD490-a e Clorofila-a para a área B, a seta preta indica o período em que o episódio de branqueamento foi relatado na literatura. a) KD490-a b) Clorofila-a. Fonte: A autora (2022).

Nesse episódio, o valor de KD490-a (Figura 29a), teve valores variando de $-0,004 m^{-1}$ a $0,00014 m^{-1}$ de janeiro a dezembro de 2019, sendo que o maior valor foi observado em fevereiro com $0,003m^{-1}$. Neste período o branqueamento foi de 32,28%. O valor da anomalia da clorofila, por sua vez, teve valores variando de $-0,002 mg/m^3$ a $-0,003 mg/m^3$ de janeiro a dezembro de 2019, sendo o maior valor também em fevereiro.

Soares et al. (2019), observaram na área A um forte clareamento na maioria das colônias de *S. stellata* com (90,9%), em julho de 2010, ocasionando branqueamento em massa de corais, relacionado a maior TSM que variava de 26,7 a 29,6 °C, levando à anomalias de 1 a 1,7 °C. Durante o episódio, o valor de turbidez detectado foi de 0,044 m⁻¹, a clorofila-a foi de 0,022 mg/m³ (Figura 30b) e a TSM-a (Figura 27a), neste mês foi de 0,45° C. No período em que houve branqueamento (Julho de 2010) ocorreu um evento intenso de OCM detectado com um I_{max} de 1,0406 °C e um I_{cum} de 3,7911°C /dia.

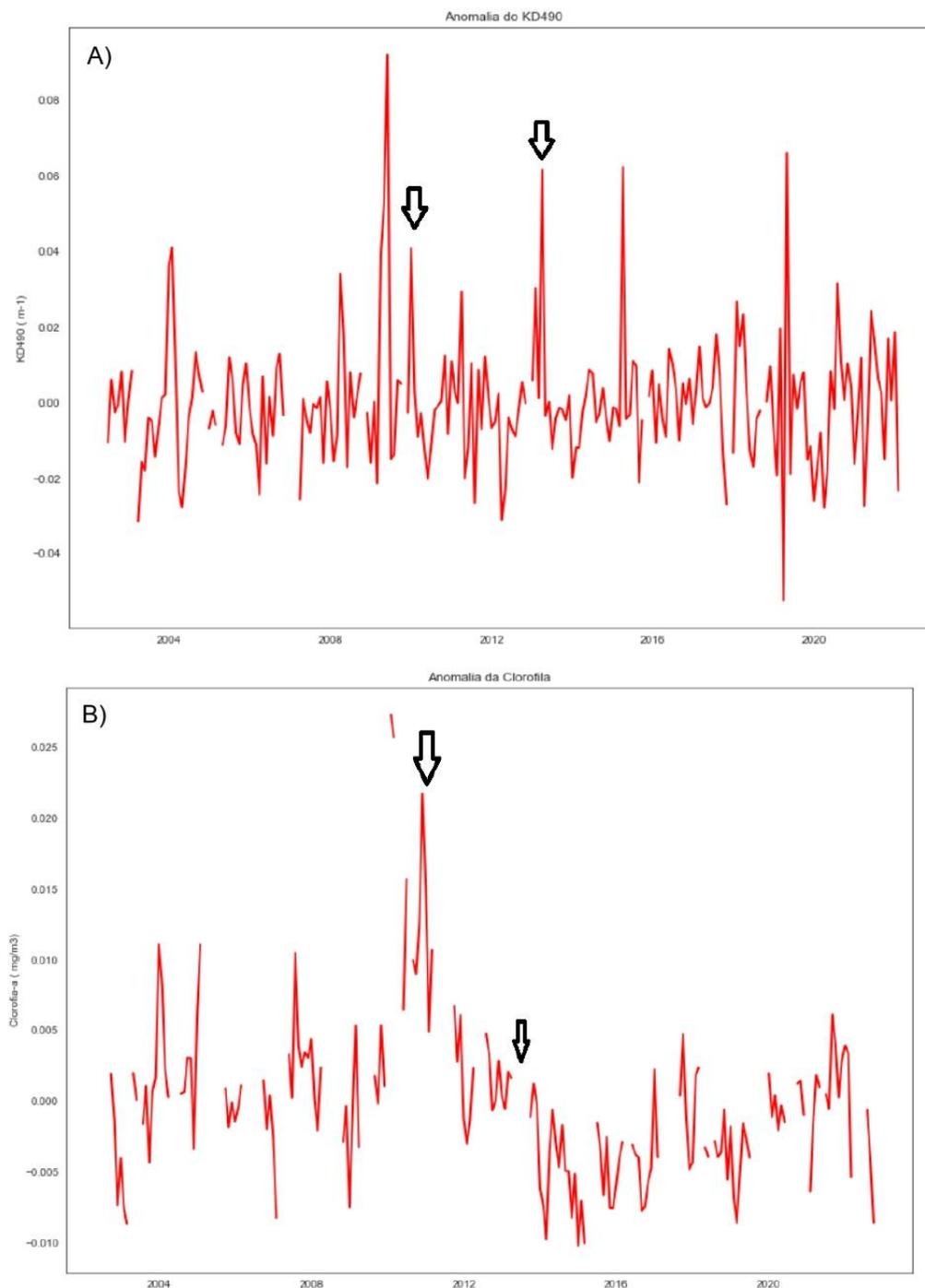


Figura 30 - Série Temporal de 20 anos (2002-2022) das anomalias de KD490-a e Clorofila-a para a área A, a seta preta indica o período em que os episódios de branqueamento foram relatados na literatura. a) KD490-a b) Clorofila-a. Fonte: A autora (2022).

Ainda segundo o trabalho de Soares et al. (2019), na área A, algumas colônias tiveram branqueamento de 10,9% em maio de 2013. O valor de TSMa (Figura 27a) foi de $0,151^{\circ}\text{C}$. Nesse mês, o KD490-a foi de $-0,003\text{ m}^{-1}$ (Figura 30a). Além disso, no período em que houve branqueamento não houveram eventos de OCM detectados. Corroborando com os resultados do estudo de Soares *et al.*, (2019), em que, o branqueamento foi associado a baixa sedimentação e não devido a temperatura, já que esta ficou próxima do valor médio.

Assim, pode-se supor que a turbidez na área B, durante esse período, pode ter influenciado diretamente o branqueamento e nessa área, ao invés da temperatura, seja a possível causa do branqueamento. Dessa forma, a área B (recife costeiro) teria águas mais turvas e frias, ao contrário da área C (recife offshore) que teria águas mais turvas e quentes nos períodos de branqueamento. Na área C, pode-se supor que a temperatura influenciou diretamente o branqueamento desse período no local, ou seja, em relação à temperatura, o branqueamento aumenta com o aumento do TSM-a.

6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, 20 anos de TSM diárias foram analisadas para quatro áreas distintas. Investigou-se os comportamentos da TSM nessas áreas, localizadas no litoral do Ceará, para identificar e examinar as OCMs no período de julho de 2002 a julho de 2022, enquanto outros autores defendem uma linha de base fixa de 30 anos de dados (Hobday *et al.*, 2016). Porém, segundo Jacox *et al.*, (2020) se o período de referência não for ajustado, mais aquecimento oceânico pode saturar essa medição, o que significa que todos os dias do ano podem ser classificados como um dia de OCM. Como espécies diferentes de corais respondem de maneira diferente, têm limiares diferentes e escalas de tempo diferentes, suas capacidades adaptativas e evolutivas são igualmente diversas na natureza e nas escalas de tempo. Nesse sentido, o uso de linhas de base fixas versus móveis deve realmente ser determinado pelo problema específico do estudo e se os ecossistemas afetados são susceptíveis de se adaptar ao longo do tempo, assim, diferentes períodos podem ser apropriados para diferentes estudos.

Desse modo, é proposto o uso de OCMs como uma nova abordagem para detectar a suscetibilidade ao branqueamento em áreas recifais. Apesar da falta de dados *in situ* para apoiar as observações de satélite, existem algumas referências que possibilitaram, através dos dados pretéritos, a realização deste trabalho. Com o agravamento progressivo das alterações climáticas, espera-se que a frequência, a quantidade e intensidade de OCMs aumente nos próximos anos. Alguns dos ecossistemas de recifes mais afetados estão localizados em águas mal monitoradas e, portanto, a extensão dos danos é desconhecida. Com base nisso, estudos relacionados para a identificação e categorização de OCMs tornam-se mais relevantes.

A intensidade máxima das OCMs tende a ocorrer no verão e outono na área de estudo, majoritariamente os episódios ocorreram durante o outono. O foco do trabalho foi principalmente em três períodos, que são o verão/outono de 2020, o inverno/primavera 2021 e outono de 2010, quando as áreas experimentaram condições de OCM e consequente branqueamento de corais. A intensidade das OCMs varia geograficamente nos recifes offshore e mais próximo da costa. Tendo OCMs mais intensas no recife costeiro da área B. A maior intensidade cumulativa foi na região offshore da área C. O que indica que por mais que nos recifes próximos à costa tenham intensidades máximas elevadas, o período em que esses corais experimentam OCMs é mais longo nos recifes offshore, estando sujeitos a maior estresse e possível branqueamento.

Dos indicadores apresentados, a intensidade cumulativa é talvez o mais importante ecologicamente. Propomos que a intensidade cumulativa, como produto da intensidade e

duração do evento, pode ser usada como um índice para medir as ameaças aos ecossistemas costeiros de eventos térmicos.

Ao aplicar uma definição de OCM às observações da temperatura da superfície do mar, para analisar todas OCMs que causaram o branqueamento de corais, nota-se que, a OCM, quando ajustada para um conjunto específico de condições, identifica todas as áreas onde o branqueamento de corais foi relatado anteriormente. Essas condições foram mais difundidas e frequentes do que o branqueamento relatado.

Entre as estações semestrais, o verão é claramente o mais turvo, embora também esteja sujeito, esporadicamente, a águas mornas e límpidas. A turbidez nos recifes offshore, mostrou mais branqueamento em valores mais altos de KD490 com anomalias positivas, e mais branqueamento em baixos valores de turbidez, em recifes costeiros. O exame dos níveis de KD490-a, na área de estudo, sugere que os recifes offshore têm como um fator importante a ressuspensão de sedimentos de fundo, uma vez que apresentam alta quantidade de sólidos em suspensão, especialmente na área C. De acordo com Soares *et al.*, (2017) a turbidez da água é o principal fator limitante para a ocorrência de recifes de corais em determinados trechos do nordeste do Brasil devido às taxas de deposição de sedimentos ao longo da costa, uma vez que esses corais não formam estruturas de recifes biogênicos devido à turbidez e ressuspensão de sedimentos.

No período de 2010 os resultados indicaram anomalias positivas da TSM e KD49, o que indica que a temperatura foi possivelmente a causa do branqueamento nessa área e a turbidez, ao contrário de um refúgio térmico pode ter causado maior estresse nos corais. Um novo padrão de eventos extremos de aquecimento é evidente na costa do Ceará (desde 2010). Anteriormente, pensava-se que a área era uma reserva termal de corais escleractíneos. Embora os corais da espécie *Siderastrea Stellata* exibam uma resistência térmica notavelmente alta, o rápido aumento da incidência de OCMs, de alta intensidade, indica que essa espécie possa vir a sofrer mais com o branqueamento na região. Nesse sentido, a intensidade das OCMs segue o padrão esperado de aumento do branqueamento com o aumento de OCMs.

É importante destacar que anomalias positivas de clorofila-a foram constatadas em dias de OCMs na área C, durante 2010, o que indica que nesse período apenas a ocorrência de OCMs não pode explicar a variabilidade da clorofila na área. As reduções na concentração de Clorofila-a na área C nos anos de 2014/20/21 podem estar associadas aos eventos de OCMs, visto que em dias de OCMs foram constatadas anomalias negativas na área.

A área estudada experimentou uma frequência de aumento de OCM, desde 2010, tendo sua maior duração de OCM em 2010, com picos em 2020. Nota-se que o recente aumento na duração pós 2010 possa estar relacionado à variabilidade interna como as condições do El Niño em 2010, 2014/15 e 2015/16. Nos anos de alto aquecimento de 2015-2016, foi registrado um dos mais fortes eventos de El Niño.

Logo, este trabalho além de mostrar a existência de OCMs no Atlântico Nordeste Equatorial, ainda revela que suas intensidades estão se acentuando desde 2010. Isso pode estar associado ao modo meridional do Atlântico (Conhecido como Dipolo do Atlântico). As causas específicas para as ocorrências de ondas de calor marinhas ainda precisam ser estudadas. Deve-se ter conhecimento das propriedades oceânicas e atmosféricas de mesoescala da área de estudo para gerar novos insights a partir dos resultados obtidos. Grandes lacunas de conhecimento em nossa compreensão atual de como a intensificação das OCMs afetará organismos marinhos e comunidades estão associadas à possibilidade de as espécies se aclimatarem e se adaptarem a condições mais quentes.

As observações neste trabalho podem fornecer uma estrutura introdutória para uma investigação mais aprofundada dessa região, talvez utilizando outros tipos de dados de sensoriamento remoto. Em última análise, sugere-se, para trabalhos futuros, a obtenção de dados *in situ* costeiros, para entender a ocorrência e possíveis impactos das OCMs. Enfatiza-se a necessidade de uma cobertura mais abrangente dos ecossistemas costeiros próximos em programas de monitoramento do branqueamento de recifes de corais a longo prazo. Além de um estudo minucioso sobre as forçantes físicas da região, como as correntes e massas d'água atuantes na região.

REFERÊNCIAS

Adams, PN, Inman, DL & Lovering, JL Efeitos das mudanças climáticas e direção das ondas nos padrões de transporte de sedimentos ao longo da costa no sul da Califórnia. *Mudança Climática* 109, 211–228 (2011). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0317-0>. Acesso em: 03 set. 2022.

Albuquerque, T. (2014). Avaliação do branqueamento no potencial construtor de uma comunidade de corais. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, p.31. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/21544>. Acesso em: 03 set. 2022.

Amaral FD, Hudson M, Steiner A (2006). Note on the widespread bleaching observed at the Manuel Luiz Marine State Park, Maranhão, Brazil. *Arquivos de Ciências do Mar* 39: 138-141. Disponível em: <https://doi.org/10.32360/acmar.v39i1-2.6383>. Acesso em: 15 ago. 2022.

AMARAL FD, HUDSON M, STEINER A (2006). Note on the widespread bleaching observed at the Manuel Luiz Marine State Park, Maranhão, Brazil. *Arquivos de Ciências do Mar* 39: 138-141. Disponível em: <http://www.periodicos.ufc.br/arquivosdecienciadomar/article/view/6383>. Acesso em: 09 set. 2007.

BARROS, Yasmin Nascimento de. MUDANÇAS AMBIENTAIS E RECIFES TROPICAIS URBANOS: BRANQUEAMENTO DE CORAIS RESISTENTES, ALGAS FILAMENTOSAS E SEDIMENTOS. 2019. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/50909>. Acesso em: 10 jul. 2022.

BARROSO, Hortência de Sousa et al. Distribution of nutrients and chlorophyll across an equatorial reef region: Insights on coastal gradients. Original Article, Special Article Collection, *Ocean Coast. Res.* 71 (suppl 2), 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2675-2824071.22016hdsb>. Acesso em: 5 jan. 2023

BATISTA, Ronaldo Gabriel Medon (2020). Impacto das Ondas de Calor Marinhas na Concentração de Clorofila-A no Atlântico Sul Sudoeste. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Oceanografia. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/212397>. Acesso em: 13 jul. 2022.

BITTENCOURT, L. P. Resposta da circulação no oceano Atlântico Tropical oeste ao Modo Meridional do Atlântico. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/19204>. Acesso em:

BRUNO, John F; SELIG, Elizabeth R; CASEY, Kenneth s; A PAGE, Cathie; WILLIS, Bette L; HARVELL, C. Drew; SWEATMAN, Hugh; MELENDY, Amy M. Thermal Stress and Coral Cover as Drivers of Coral Disease Outbreaks. **Plos Biology**, [S.L.], v. 5, n. 6, p. 1-124, 8 maio 2007. Public Library of Science (PLoS). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pbio.0050124>. Acesso em: 13 jul. 2022.

CAMP, Emma F. *et al.* The Future of Coral Reefs Subject to Rapid Climate Change: lessons from natural extreme environments. **Frontiers In Marine Science**, [S.L.], v. 5, p. 1, 2 fev. 2018. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fmars.2018.00004>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2018.00004/full>. Acesso em: 17 fev. 2022.

CONNELL, Joseph H.; HUGHES, Terence P.; WALLACE, Carden C. *et al* (1997). A 30-YEAR STUDY OF CORAL ABUNDANCE, RECRUITMENT, AND DISTURBANCE AT SEVERAL SCALES IN SPACE AND TIME. Disponível em: [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(1997\)067\[0461:AYSOCA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(1997)067[0461:AYSOCA]2.0.CO;2). Acesso em: 13 jul. 2022.

Correia, M. (2011). Scleractinian corals (Cnidaria: Anthozoa) from reef ecosystems on the Alagoas coast, Brazil. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 91(3), 659-668. Disponível em: <https://doi:10.1017/S0025315410000858>. Acesso em: 05 jul. 2022

COSTA, Cristiane Francisca; SASSI, Roberto; GORLACH-LIRA, Krystyna. Zooxanthellae genotypes in the coral *Siderastrea stellata* from coastal reefs in northeastern Brazil, *Journal of*

Experimental Marine Biology and Ecology, Volume 367, Issue 2, 2008, Pages 149-152, ISSN 0022-0981. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2008.09.012>. Acesso em: 05 jul. 2022

Duarte GA, Villela HD, Deocleciano M *et al* (2020). Heat Waves Are a Major Threat to Turbid Coral Reefs in Brazil. *Front Mar Sci* 7. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00179>. Acesso em: 10 out. 2022.

ELLIFF, Carla Isobel. PROTEÇÃO À LINHA DE COSTA POR RECIFES DE CORAL DO ARQUIPÉLAGO DE TINHARÉ-BOIPEBA, BAIXO SUL DA BAHIA, FRENTE A MUDANÇAS CLIMÁTICAS. 2019. 88 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/32328>. Acesso em: 05 jul. 2022

ELLIFF, Carla I. *et al*. Wave Attenuation and Shoreline Protection by a Fringing Reef System. **Anuário do Instituto de Geociências - Ufrj**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 1, p. 87-94, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.11137/2019_1_87_94. Acesso em: 10 out. 2022.

ELLIFF, Carla I.; SILVA, Iracema R.. Coral reefs as the first line of defense: shoreline protection in face of climate change. **Marine Environmental Research**, [S.L.], v. 127, p. 148-154, jun. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.03.007>. Acesso em: 10 out. 2022.

Fernandino, G., González, M., Cánovas, V., Tanajura, C.A.S. & Silva, I.R. 2018. Erosional patterns induced by coral reefs in the eastern coast of Brazil. *Pesquisas em Geociências*, 45: e0750. Disponível em: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.91391>. Acesso em: 20 nov. 2022

Ferreira, B.P., Costa, M.B.S.F., Coxey, M.S. et al. The effects of sea surface temperature anomalies on oceanic coral reef systems in the southwestern tropical Atlantic. *Coral Reefs* 32, 441–454 (2013). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00338-012-0992-y>. Acesso em: 20 nov. 2022

Ferreira BP, Maida M (2006). Monitoramento dos recifes de coral do Brasil. MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Disponível em:

http://www.mma.gov.br/estruturas/chm/_arquivos/18_introducaobr.pdf. Acesso em: 15 dez. 2022

FRÖLICHER, T.L., FISCHER, E.M. & GRUBER, N. Marine heatwaves under global warming. *Nature* 560, 360–364 (2018). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0383-9>. Acesso em: 15 dez. 2022

GINSBURG, R.N., KRAMER, P., LANG, J.C., SALE, P. & STENECK, R.S. 1998. AGRRA, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment. Disponível em: <http://agrra.org> (último acesso em 02/2022). Acesso em: 15 dez. 2022

GISSI, Elena *et al.* A review of the combined effects of climate change and other local human stressors on the marine environment. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 755, p. 142564-1, fev. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142564>. Acesso em:: 20 nov. 2022

GLEESON, M. W.; STRONG, A. E.. APPLYING MCSST TO CORAL REEF BLEACHING. **National Oceanic And Atmospheric Administration, United States Naval Academy, Oceanography Department**, Annapolis, v. 16, n. 10, p. 151-154, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00396-V](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00396-V). Acesso em:: 20 nov. 2022

GLYNN, P. W.; D’CROZ, L. 1990. Experimental evidence for high temperature estresse as the cause of El Nino-coincident coral mortality. *Coral Reefs* 8: 181-192 (1990). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00265009>. Acesso em:: 20 nov. 2022

GUERRA, R. G. P. Vulnerabilidade costeira a eventos de alta energia no Litoral de Fortaleza, Ceará. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/17611>. Acesso em:: 20 nov. 2022

GURGEL, Anne Larisse Alves Rebouças. Recifes de arenito entremarés na zona tropical: Um ecossistema com alta heterogeneidade espacial e temporal?. 2019. 94 f. TCC-Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia), Instituto de Ciências do Mar,

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/50255>. Acesso em: 15 dez. 2022

Hobday, A. J.; Alexander, L. V.; Perkins, S. E. et al (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227-238. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>. Acesso em:

Hoeksema BW, Wirtz P (2013) Mais de 130 anos de sobrevivência por uma pequena e isolada população de corais *Favia gravidana* Ilha de Ascensão (Atlântico Sul). *Recifes de Corais* 32:551. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00338-012-1002-0>. Acesso em:

JACOX, M.G., ALEXANDER, M.A., BOGRAD, S.J. et al. Thermal displacement by marine heatwaves. *Nature* 584, 82–86 (2020). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2534-z>. Acesso em: 10 jul. 2022.

JACOX, Michael G. Ondas de calor marinhas em um clima em mudança. *Natureza* 571, 485-487 (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02196-1>. Acesso em: 10 jul. 2022.

L.M. Keyzer *et al.* The potential of coastal ecosystems to mitigate the impact of sea-level rise in shallow tropical bays. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Volume 246, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107050>. Acesso em: 10 jul. 2022.

LABOREL-DEGUEN, Françoise; CASTRO, Clovis Barreira e; NUNES, Flávia Le Dantec; PIRES, Débora de Oliveira. RECIFES BRASILEIROS: O LEGADO DE LABOREL. **Séries e Livros do Museu Nacional**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 1-190, 1970. Disponível em: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00588/70007/67922.pdf>. Acesso: 10 jul. 2022.

Leão ZMAN, Kikuchi RKP, de Oliveira MDM (2008). Branqueamento de corais nos recifes da Bahia e sua relação com eventos de anomalias térmicas nas águas superficiais do oceano. *Biota Neotrop* 8: 69-82. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1676-06032008000300006>. Acesso em: 10 jul. 2022.

Leão ZMAN, Kikuchi RKP, Ferreira BP *et al* (2016). Os recifes de corais brasileiros em um período de mudança global: uma síntese. *Braz J Oceanogr* 64:97–116. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1679-875920160916064sp2>. Acesso em: 15 dez. 2022

LEGGAT, William P.; CAMP, Emma F.; SUGGET, David J. et al. Rapid Coral Decay Is Associated with Marine Heatwave Mortality Events on Reefs, *Current Biology*, Volume 29, Issue 16, 2019, Pages 2723-2730.e4, ISSN 0960-9822. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.06.077>. Acesso em: 15 dez. 2022

LIMA, Italo Cesar Camelo Soares. BRANQUEAMENTO DE CORAIS E MUDANÇAS AMBIENTAIS: ESTUDO DE CASO DE 3 ANOS NO ATLÂNTICO EQUATORIAL. 2015. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/34351>. Acesso em: 10 jul. 2022.

LIU, By Gang; E.STRONG, Alan; SKIRVING, William. Remote Sensing of Sea Surface Temperatures During 2002 Barrier Reef Coral Bleaching. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**, [s. l], v. 84, n. 15, p. 137-141, 15 abr. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2003EO150001>. Acesso em: 10 jul. 2022.

LISBOA, D.S. 2008. Aplicação da técnica de Hotspot à previsão de branqueamento de corais da plataforma continental do nordeste do Brasil. Monografia de Bacharelado em Oceanografia, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador, Bahia. Disponível em: Acesso em: 10 jul. 2022.

LISBOA, Danilo Silva; LENTINI, Carlos Alexandre Domingos. Geração de mapas de HotSpots e Índice de Aquecimento para identificação de regiões de branqueamento no Nordeste do Brasil com base em dois conjuntos de dados. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, v. 30, n. 25, p. 6541-6547, abr. 2009. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2008/11.17.19.01.31/doc/6541-6547.pdf>, Acesso em: 10 jul. 2022.

MCCLANAHAN, Timothy R. et al. EFFECTS OF CLIMATE AND SEAWATER TEMPERATURE VARIATION ON CORAL BLEACHING AND MORTALITY. **Ecological**

Monographs, [S.L.], v. 77, n. 4, p. 503-525, nov. 2007. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1890/06-1182.1>. Acesso em: 15 dez. 2022

MORAIS, J. O. (1980), Aspectos de geologia ambiental costeira do município de Fortaleza (Estado do Ceará). Tese de professor titular, Universidade Federal do Ceará, pp. 249. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/39838>. Acesso em: 15 dez. 2022

MORAIS, J.O. (1981) Evolução Sedimentológica da Enseada do Mucuripe. Arquivos de Ciências do Mar, Fortaleza, Edições UFC, v. 21, n. 1, p. 20-32. Disponível em: <https://doi.org/10.32360/acmar.v21i1-2.31547>. Acesso em: 10 jul. 2022.

MUMBY, Peter J. *et al.* Remote sensing of coral reefs and their physical environment. Marine Pollution Bulletin, [S.L.], v. 48, n. 3-4, p. 219-228, fev. 2004. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.10.031>. Acesso em: 10 jul. 2022.

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (2009).NOAA CORAL REEF WATCH. 2000. Disponível em> <http://www.noaa.gov>. Acesso em: 11 fev. 2022.

PALUMBI SR, BARSHIS DJ, TRAYLOR-KNOWLES N, BAY RA. Mechanisms of reef coral resistance to future climate change. Science. 2014 May 23; 344(6186): 895-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1251336>. Acesso em: 15 dez. 2022

Principe P, Bradley P, Yee S, Fisher W, Johnson E, Allen P and Campbell D. 2011. Quantifying Coral Reef Ecosystem Services. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Research Triangle Park, NC. EPA/600/R-11/206, January, 2012. Disponível em: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=239984. Acesso em: 15 dez. 2022

PO.DAAC, 2015. Projeto JPL MUR MEDIDAS. 2015. GHRSSST Nível 4 MUR Global Foundation Análise de Temperatura da Superfície do Mar. Ver. 4.1. PO.DAAC, CA, EUA. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/GHGMR-4FJ04>. Acesso em: 20 nov. 2022.

RABELO, Emanuelle F.; SOARES, Marcelo de O.; BEZERRA, Luis Ernesto Arruda; MATTHEWS-CASCON, Helena. Distribution pattern of zoanthids (Cnidaria: Zoantharia) on a tropical reef, *Marine Biology Research*, Norway, v. 11, n.6, p.584-592, 2015. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/60051>. Acesso em: 10 jul. 2022.

REGUERO, Borja G. *et al.* Coral reefs for coastal protection: a new methodological approach and engineering case study in grenada. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 210, p. 146-161, mar. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.024>. Acesso em: 10 jul. 2022.

ROCHA, Lucas Sarmiento Neves da. SUSCEPTIBILIDADE DOS RECIFES DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS AO BRANQUEAMENTO DE CORAIS. 2011. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011. Disponível em; <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/27691>. Acesso em: 10 jul. 2022.

SABADINI, Samira da Conceição. **Suscetibilidade dos recifes de Abrolhos aos eventos de branqueamento de corais**. 2019. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Instituto de Geociências da Ufmg, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/IGCM-AV4MZQ>. Acesso em: 10 jul. 2022.

Sassi R, Costa-Sassi CF, Gorlach-Lira K, Fitt WK (2015). Pigmentation changes in *Siderastrea* spp. during bleaching events in the coastal reefs of northeastern Brazil. *Lat Am J Aquat Res* 43: 176-185. Disponível em: <https://doi.org/10.3856/vol43-issue1-fulltext-15>. Acesso em: 15 dez. 2022

SCHLEGEL, Robert W. *et al* (2017). Nearshore and offshore co-occurrence of marine heatwaves and cold-spells. *Progress in Oceanography*, Volume 151, Pages 189-205, ISSN 0079-6611. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.01.004>. Acesso em: 10 jul. 2022.

Schlegel RW, Oliver ECJ, Perkins-Kirkpatrick S, Kruger A and Smit AJ (2017). Predominant Atmospheric and Oceanic Patterns during Coastal Marine Heatwaves. *Front. Mar. Sci.* 4:323. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00323>. Acesso em: 10 jul. 2022.

SHEPPARD, Charles et al. Mortalidade de corais aumenta a energia das ondas atingindo costas protegidas por recifes: exemplos das Seychelles. *Ciência Estuarina, Costeira e de Plataforma*. Online, p. 223-234. fev. 2005.

SOARES, Marcelo O; de PAIVA, Carolina Cerqueira; de FREITAS, João Eduardo Pereira; LOTUFO, Tito (2011). Gestão de unidades de conservação marinhas: o caso do Parque Estadual Marinho da Pedra da Risca do Meio, NE – Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada, Journal of Integrated Coastal Zone Management* 11(2): 257-268. Disponível em: <https://doi.org/10.5894/rgci261>. Acesso em: 10 jul. 2022.

SOARES, Marcelo de Oliveira; RABELO, Emanuelle Fontenele. PRIMEIRO REGISTRO DE BRANQUEAMENTO DE CORAIS NO LITORAL DO CEARÁ (NE, BRASIL): INDICADOR DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS? *Unesp, São Paulo*, v. 33, n. 1, p. 1-10, 2014. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/8631/6038>. Acesso em: 10 jul. 2022.

SOARES, Marcelo de Oliveira ; ROSSI, Sergio; GURGEL, Anne Rebouças *et al.* Impacts of a changing environment on marginal coral reefs in the Tropical Southwestern Atlantic, *Ocean & Coastal Management*, Volume 210, 2021, 105692, ISSN 0964-5691. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105692>. Acesso em: 10 jul. 2022.

SOARES, Marcelo de Oliveira, Teixeira, C.E.P., Ferreira, S.M.C. et al. Thermal stress and tropical reefs: mass coral bleaching in a stable temperature environment?. *Mar. Biodivers.* 49, 2921–2929 (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12526-019-00994-4>. Acesso em: 10 jul. 2022.

SOPPA, Mariana A.; GHERARDI, Douglas F. M.; SOUZA, Ronald Buss de; PEZZI, Luciano P. Variabilidade temporal da temperatura superficial do mar e vento estimados por satélites e reanálises em áreas de recife de coral no Brasil. **Anais XIII Simpósio Brasileiro**

de Sensoriamento Remoto: Divisão de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, v. 1, n. 1, p. 4715-4722, abr. 2007. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.18.58/doc/4715-4722.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2022

Souza IMM (2012). Avaliação da cobertura e monitoramento do branqueamento de corais nos recifes de Maracajá/RN. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, p 61. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/14046>. Acesso em: 10 jul. 2022.

STRONG, A.e.; LIU, Gang; KIMURA, T.; YAMANO, H.; TSUCHIYA, M.; KAKUMA, S.I.; VAN WOESIK, R.. Detecting and monitoring 2001 coral reef bleaching events in Ryukyu Islands, Japan using satellite bleaching HotSpot remote sensing technique. **Ieee International Geoscience And Remote Sensing Symposium**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-3, 2002. IEEE. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1024998>. Acesso em: 10 jul. 2022.

Sully, S., Burkepille, DE, Donovan, MK *et al.* Uma análise global do branqueamento de corais nas últimas duas décadas. *Nat Commun* 10, 1264 (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09238-2>. Acesso em: 15 dez. 2022

Teixeira, C.D., Leitão, R.L.L., Ribeiro, F.V. et al. Sustained mass coral bleaching (2016–2017) in Brazilian turbid-zone reefs: taxonomic, cross-shelf and habitat-related trends. *Coral Reefs* 38, 801–813 (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00338-019-01789-6>. Acesso em: 15 dez. 2022

VIANA, M. G.; ROCHA-BARREIRA, C. A.; GROSSI HIJO, C. A. MACROFAUNA BENTÔNICA DA FAIXA ENTREMARÉS E ZONA DE ARREBENTAÇÃO DA PRAIA DE PARACURU (CEARÁ-BRASIL). *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.*, 2005, 9(1):75-82. Disponível em: 10 jul. 2022. https://www.researchgate.net/publication/269602520_Macrofauna_bentOnica_da_faixa_entremares_e_zona_de_arrebentacao_da_Praia_de_Paracuru_Ceara-Brasil. Acesso em: 10 jul. 2022.

VIEIRA, L. A. A. et al. Análise estatística do regime de ondas ao longo da região marítima do porto do pecém. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=9748>. Acesso em: 15 dez. 2022.