



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE BIOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO  
BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS COM ÊNFASE EM CIÊNCIAS  
AMBIENTAIS

BRUNA RAFAELA SOUSA DE OLIVEIRA

**SENSIBILIDADE DA COMUNIDADE DA MEIOFAUNA ÀS ONDAS DE CALOR E  
EVENTOS DE BRANQUEAMENTO MAIS INTENSOS JÁ REGISTRADO NOS  
RECIFES DO ATLÂNTICO SUDOESTE**

RECIFE  
2022

BRUNA RAFAELA SOUSA DE OLIVEIRA

**SENSIBILIDADE DA COMUNIDADE DA MEIOFAUNA ÀS ONDAS DE CALOR E  
EVENTOS DE BRANQUEAMENTO MAIS INTENSOS JÁ REGISTRADO NOS  
RECIFES DO ATLÂNTICO SUDOESTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado ao Bacharelado em Ciências Biológicas com ênfase em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel.

Orientador (a): Dr. Paulo Jorge Parreira dos Santos

Coorientador (a): MSc. Marina de Siqueira Barroso

RECIFE  
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Oliveira, Bruna Rafaela Sousa de.

Sensibilidade da comunidade da meiofauna às ondas de calor e eventos de branqueamento mais intensos já registrado nos recifes do Atlântico Sudoeste. / Bruna Rafaela Sousa de Oliveira. - Recife, 2022.

42 : il., tab.

Orientador(a): Paulo Jorge Parreira dos Santos

Cooorientador(a): Marina de Siqueira Barroso

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Biociências, Ciências Biológicas /Ciências Ambientais - Bacharelado, 2022.

1. Recifes de corais. 2. Meiobentos. 3. Mudanças climáticas. 4. Aquecimento global. I. Santos, Paulo Jorge Parreira dos. (Orientação). II. Barroso, Marina de Siqueira. (Coorientação). III. Título.

590 CDD (22.ed.)

BRUNA RAFAELA SOUSA DE OLIVEIRA

**SENSIBILIDADE DA COMUNIDADE DA MEIOFAUNA ÀS ONDAS DE CALOR E  
EVENTOS DE BRANQUEAMENTO MAIS INTENSOS JÁ REGISTRADO NOS  
RECIFES DO ATLÂNTICO SUDOESTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado ao Bacharelado em Ciências Biológicas com ênfase em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel.

Aprovada em: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

**COMISSÃO EXAMINADORA**

\_\_\_\_\_  
Dr. Paulo Jorge Parreira dos Santos/ Dpt. Zoologia- UFPE

\_\_\_\_\_  
Dra. Adriane Pereira Wandeness / Dpt. Zoologia- UFPE

\_\_\_\_\_  
Dra. Elkênita Guedes Silva/ Dpt. Zoologia- UFPE

RECIFE  
2022

À minha família  
Jorge, Leila, Keylla, Josefa e Zuleide  
**Dedico.**

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico essa conquista primeiramente à Deus, que com sua abundante graça e amor tem guiado a minha vida e meus caminhos profissionais, me garantindo sempre a Sua proteção e consolo. Em seguida aos meus familiares, especialmente meus pais, Luiz Jorge Nogueira de Oliveira e Leila de Almeida Sousa, que são extensão da bondade do Senhor na minha vida. Desde a infância não pouparam esforços para uma melhor educação, levarei todos os seus ensinamentos comigo não seria o que sou hoje sem o apoio e amor de vocês! Obrigada por cada colo em momentos de angústia e cada demonstração do gigantesco amor de vocês nos mínimos detalhes. Agradeço também a minha irmã, Keylla Luiza Sousa de Oliveira, pela nossa eterna cumplicidade e companheirismo, seu apoio e seus conselhos foram fundamentais para que hoje eu estivesse aqui. Inclusive, você foi a responsável pela minha entrada em um laboratório e pela minha escolha de aproveitar o privilégio de estudar na UFPE, amo você pra sempre. Estendo esse agradecimento às minhas avós, Josefa Cabral e Zuleide Maria (que não está mais entre nós), mas ambas são essenciais em cada conquista minha, tenho certeza que se ela ainda estivesse viva, não pouparia esforços nas comemorações.

Ao meu namorado, Murilo Melo, que mais do que isso, tem sido um ótimo companheiro. Obrigada por me apoiar e incentivar em todas as áreas da minha vida. Agradeço por toda a paciência que teve e ainda tem em momentos de surtos, por fazer questão de se mostrar presente, seja indo buscar material comigo na Universidade ou na última sessão do cinema. Como venho repetindo, teremos uma família linda e todos esses momentos serão a prova do quanto nos importamos com nossa relação. Agradeço também às minhas amigas, Maria Clara e Maria Eduarda, que sempre foram uma válvula de escape nos momentos mais corridos, sei o quanto torcem por mim e vice-versa.

Ao meu orientador, Paulo Jorge Parreira dos Santos, pela confiança na elaboração deste trabalho, toda paciência e ensinamentos ao longo desses anos. A minha co-orientadora, Marina de Siqueira, por todo companheirismo e compreensão, sempre me apoiando em todos os momentos de correria. A todos os meus amados Labdiners (Aliny Barreto, Caroline Correia, Catarina Araújo, Elkênita Guedes, Ícaro Bernardo, Larissa Bacelar, Nayra Moura, Nídia Marinho, Rayanne Oliveira, Rebecka Tertuliano) e todos os novos e antigos que passaram pelo laboratório, garantindo

boas risadas, conversas e disposição para o esclarecimento de dúvidas durante os três anos em que faço parte. Em especial, agradeço a Michelly Lira, por todo apoio, paciência e disponibilidade na construção dos meus mapas.

Às minhas “Mean Girls”: Giovanna Couto, Marília Vieira, Nycolle Maux, Wanessa Silva, Sabrina Melo, Marília Calado e Thereza Beatriz. A amizade de vocês foi um presente para minha graduação, sendo um alívio cômico em todas as vésperas de provas e compromissos, agradeço demais ao companheirismo de vocês e tenho profunda admiração por cada uma como profissional. “Vamos galera, mulheres!”

À Universidade Federal de Pernambuco e seus servidores pelos consideráveis esforços na educação brasileira, é um privilégio aprender com profissionais que você admira.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), pelo investimento em bolsas de iniciação científica, possibilitando a realização deste trabalho.

Ao meu professor de ciências, Allan Maia, que me fez amar a biologia.

A todos, muito obrigada!

*“O que faz andar o barco não é a vela  
enfundada, mas o vento que não se vê...”*

Platão

## RESUMO

Os recifes de corais são fortemente impactados pelas mudanças climáticas, sendo essa a principal ameaça a estes ecossistemas em escala global. Em 2019 e 2020, a Organização Americana de Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA) emitiu alertas de branqueamento em massa nos recifes do Atlântico Sul, como consequência do aumento na temperatura da água do mar, que não têm precedentes. Neste estudo, a meiofauna, grupo de metazoários bentônicos, foi utilizada como bioindicadora para avaliação do impacto destes eventos no ambiente recifal, devido à sua alta sensibilidade a mudanças nas condições abióticas e sua rápida dinâmica em avaliar eventos de estresse. O experimento foi realizado através de uma amostragem em três momentos (TEMPO 1, TEMPO 2 e TEMPO 3) na bancada de recifes de coral localizada na Praia de Serrambi, litoral Sul de Pernambuco – Brasil. Cordas com Unidades Artificiais de Substrato (UAS), contendo 3 réplicas cada, foram fixadas paralelamente ao recife, para colonização em duas zonas de médiolitoral (Mediolitoral +40 e Mediolitoral +20) e uma de infralitoral (Infralitoral -20). O primeiro momento (TEMPO 1) aconteceu entre dezembro de 2018 e janeiro de 2019 (exposição: 22/12/2018- 24/01/2019), quando não foram emitidos alertas de aquecimento da água para a região. O segundo e o terceiro momentos de coleta (TEMPO 2 e TEMPO 3) ocorreram entre novembro de 2019 e março de 2020. Neste intervalo foram coletadas amostras em janeiro de 2020 (exposição: 12/11/2019- 10/01/2020), e em março do mesmo ano (exposição: 12/11/2019- 10/03/2020), sendo o TEMPO 2 uma situação de Bleaching Watch e TEMPO 3 de Bleaching Warning seguido de Alerta nível 1. Os dados climáticos (DHW e SST) foram retirados da base NOAA Coral Reef Watch usando o extrator de dados CoralTemp Versão 1.0 SST. A meiofauna bentônica foi identificada ao nível de grandes grupos taxonômicos, sendo encontrados: Copepoda Harpacticoida e seus Nauplii, Nematoda, Annelida, Ostracoda, Peracarida e outros grupos menos representativos. A comunidade respondeu para ambos os fatores, porém apresentando diferenças mais significativas entre os tempos ( $p(\text{perm})=0,0001$ ). Os grupos que mais contribuíram para a dissimilaridade entre os tempos foram: Nauplius (com baixas na sua densidade em situação de estresse térmico), Ostracoda e Nematoda (ambos favorecidos com o estresse térmico). Os dados apontam que os grandes grupos taxonômicos e ecológicos respondem diferentemente aos eventos de estresse térmico. O que levanta a hipótese de uma possível sucessão ecológica, com a ampliação da homogeneidade da comunidade e alterações na cadeia alimentar dos recifes de corais em cenários de aumentos na temperatura média global, impactando um ecossistema de grande importância biológica e econômica. Apesar de outros autores abordarem os eventos de branqueamento 2019/2020, ao nosso conhecimento este é um estudo pioneiro relatando os efeitos em comunidades bentônicas (não corais) dos recentes cenários de picos de temperatura.

**Palavras-chave:** Recifes de Corais; Meiobentos; Mudanças Climáticas; Aquecimento Global.

## ABSTRACT

Coral reefs are heavily impacted by climate change, which is the main threat to these ecosystems on a global scale. In 2019 and 2020, the American Organization for National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) released massive bleaching alerts on South Atlantic reefs, as a consequence of rising sea water temperatures, are unprecedented. In this study, meiofauna (group of benthic metazoans) was used as a bioindicator to assess the impacts of these events in the reef environment, due to its high sensitivity to changes in abiotic conditions and its rapid dynamic in assessing stress events. The experiment was carried out through sampling in three moments (TIME 1, TIME 2 and TIME 3) on the coral reef bench located at Praia de Serrambi, south coast of Pernambuco - Brazil. Ropes with Artificial Substrate Units (ASU), with 3 replicas each, were fixed, parallel to the reef, for colonization in two midlittoral zones (midlittoral +40cm and midlittoral +20cm) and one infralittoral zone (Infralittoral -20cm). The first sampling moment (TIME 1) took place between December 2018 and January 2019 (ASU exposure: from 12/22/18 to 01/24/19), when no water heating alerts were issued for the region. The second and third collection moments (TIME 2 and TIME 3) took place between November 2019 and March 2020. During this interval, samples were collected in January 2020 (ASU exposure: from 11/12/2019 to 01/10/2020), and in March of the same year (ASU exposure: from 11/12/2019 to 03/10/2020), with TIME 2 sampling occurring in an initial Bleaching Watch situation and TIME 3 sampling occurring during a Bleaching Warning followed by Level 1 Alert (DHW<sup>34</sup>). Climatic data (DHW and SST) were taken from the NOAA Coral Reef Watch database using the CoralTemp Version 1.0 SST data extractor. The benthic meiofauna was identified to major taxonomic groups, being found Copepoda Harpacticoida and its Nauplii, Nematoda, Annelida, Ostracoda, Peracarida and eight other less abundant groups. Both factors (Moment and littoral height) affected significantly the meiofauna community, but with more important differences occurring between times ( $p(\text{perm})=0.0001$ ). The taxonomic/ecological groups that most contributed to the dissimilarity between the times were: Harpacticoida Nauplius (with low density in situation of thermal stress), Ostracoda and Nematoda (both favored with thermal stress). The data indicate that large taxonomic and ecological groups respond differently to heat stress events. This raises the hypothesis of a possible ecological succession, with the expansion of community homogeneity and changes in the food chain of coral reefs in scenarios of increases in the global average temperature, impacting an ecosystem of great biological and economic importance. Although other studies have addressed the 2019/2020 bleaching events, to our knowledge this is the first study reporting the effects on benthic (non-coral) communities in recent temperature spike scenarios.

**Keywords:** Coral reefs; Meiobenthos; Climate changes; Global warming.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1– a) Mapa do Brasil indicando o estado de Pernambuco. b) 18  
Área de pesquisa localizada na Praia de Serrambi, Ipojuca-  
PE, Brasil, englobando a Estação Virtual Regional Costa  
dos Corais (CCRVS). c) Imagem de satélite indicando a  
bancada do recife de coral utilizada neste trabalho, através  
do marcador vermelho.
- Figura 2– a) Modelo esquemático da execução do desenho amostral. 19  
b) Fotografia em campo da montagem das Unidades  
Artificiais de Substratos (UAS).
- Gráfico 1– Dados de semanas de graus de aquecimento (DHW) e 20  
alertas de branqueamento da Estação Virtual Regional  
Costa dos Corais no período de 2018 a 2019, referente ao  
TEMPO 1. Fonte: NOAA Coral Reef Watch, adaptado.
- Gráfico 2– Dados de semanas de graus de aquecimento (DHW) e 21  
alertas de branqueamento da Estação Virtual Regional  
Costa dos Corais, no período de 2019 a 2020, indicando  
TEMPO 2 e TEMPO 3. Fonte: NOAA Coral Reef Watch,  
adaptado.
- Gráfico 3– Densidade média (indivíduos por UAS) dos grandes grupos 24  
da meiofauna entre os tempos amostrados (TEMPO 1,  
TEMPO 2 e TEMPO 3).
- Figura 3– Ordenação de MDS mostrando a similaridade de 25  
Bray-Curtis da estrutura da comunidade da meiofauna  
entre a interação Tempo x Altura. (T1, T2 e T3  
correspondem respectivamente a TEMPO 1, TEMPO 2 e  
TEMPO 3. INFRA-20, MÉDIO+20 e MÉDIO+40  
representam respectivamente as alturas de Infralitoral-20,  
Mediolitoral+20 e Mediolitoral+40).

Gráfico 4– Densidade média ( $\pm$  95% *IC*) dos principais grupos da 29  
meiofauna expostas aos diferentes tempos  
(Indivíduos/UAS) para as três alturas amostradas.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Tabela a posteriori Fisher LSD indicando diferenças significativas entre todos os níveis do fator tempo.	26
Tabela 2 –	Resultados da análise de SIMPER para dissimilaridade entre os diferentes tempos.	26-27

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	Área de Proteção Ambiental
COP	Conferência das Partes
cm	Centímetros
°C	Graus celsius
DHW	Semana de Graus de Aquecimento
IC	Intervalo de Confiança
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
km	Quilômetros
LSD	Diferença Mínima Significativa
m	Metros
MDS	Ordenação por Escalonamento Multidimensional
NOAA	Administração Oceânica e Atmosférica Nacional
$p(\text{perm})$	Probabilidade de permutações
$p(\text{MC})$	Probabilidade de permutações (Monte Carlos)
S/W	Sul/Oeste
SIMPER	Análise de Percentagens de Similaridade
SST	Temperatura Superficial do Mar
UAS	Unidade Artificial de Substrato

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>18</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO	18
3.2	METODOLOGIA DE CAMPO	19
3.2.1	<b>desenho amostral</b>	19
3.2.2	<b>tempos amostrados</b>	20
3.3	DADOS CLIMÁTICOS	21
3.4	ATIVIDADE LABORATORIAL	22
3.5	ANÁLISE DE DADOS	22
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>35</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são identificadas como a principal força que afeta a saúde dos corais em escala global (Hughes et al. 2017). Historicamente, eventos de aquecimento da água coincidem com declínios catastróficos na cobertura de coral, e branqueamento das colônias, geralmente associados a períodos de *El Niño*. Apesar de conferências ambientais, como a mais recente COP 26 (“*Conference of the Parties*”), buscarem reduzir o aumento da temperatura global para 1,5°C (comparado aos níveis pré- industriais), a previsão é de que ocorra um aumento de 2°C a 4°C nas temperaturas médias globais até o final do século 21. Os oceanos possuem um importante papel absorvendo parte dessa energia, conseqüentemente, também passarão por elevações na temperatura. A previsão é que haja um acréscimo de 0,6 a 2°C nos primeiros 100 metros de profundidade (IPCC 2014).

De acordo com Duarte et. al. (2020), o evento de branqueamento em massa nos recifes do Atlântico Sul em 2019, coincidindo com os aumentos na temperatura da água do mar reportado para essa região, não tem precedentes, nem mesmo durante o Terceiro Evento Global de Branqueamento entre 2014 e 2017, sendo então o evento mais prejudicial da história aos recifes do Atlântico Sul. O autor também destaca a longa duração do evento, com acúmulos de pontos quentes por cerca de 50 dias, provocando uma alta taxa de mortalidade dos corais da região (normalmente baixa em outros casos de branqueamentos em massa de recifes de corais), contrariando hipóteses de recifes do Atlântico Sudoeste servirem como refúgio térmico em previsões futuras. Semanas de aquecimento de vários graus da água do mar foram alertadas, segundo o programa NOAA *Coral Reef Watch*, novamente no ano de 2020. Surgindo, desta vez, ainda mais cedo que o verão de 2019 para as estações do Nordeste do Brasil, entre elas a Estação Regional Virtual da Costa dos Corais (aquecimento entre março e abril).

A Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA), órgão americano, realiza o monitoramento diário de eventos de branqueamento em massa por meio de um produto de dados 5km, atualmente na sua terceira versão. Os valores SST (Temperatura Superficial do Mar) e de DHW (Semanas de Graus de Aquecimento) são obtidos por meio de satélites alocados em Estações Virtuais Regionais, sendo sete delas com ocorrência no Brasil, e são responsáveis por contabilizar o acúmulo de pontos quentes da região. Além disso, os Alertas de Branqueamento foram representados pelo órgão em cinco categorias, de acordos com as taxas de Pontos

Quentes (HotSpot) e DHW obtidas, sendo elas: *No stress* (Ponto quente  $\leq 0$ , sem branqueamento); *Bleaching Watch* ( $0 < \text{Ponto quente} < 1$ , sem branqueamento); *Bleaching Warning* ( $1 \leq \text{Ponto quente}$ ,  $0 < \text{DHW} < 4$ , com possível branqueamento), *Alerta Nível 1* ( $1 \leq \text{Ponto quente}$ ,  $4 \leq \text{DHW} < 8$ , branqueamento significativo provável); *Alerta nível 2* ( $1 \leq \text{Ponto quente}$ ,  $8 \leq \text{DHW}$ , branqueamento grave e mortalidade significativa provável). O produto de dados 5km, portanto, permite um monitoramento dos eventos de branqueamento nos recifes de corais padronizado mundialmente (Methodology, 2022).

Os recifes de coral brasileiros da região Nordeste compreendem a maior e mais rica área de recifes em todo o Oceano Atlântico Sul (Ferreira et al. 2013). Essas estruturas são formações biogênicas e/ou de arenitos localizadas na região offshore e próximos ao litoral (Maida e Ferreira 2004). Entre elas os recifes costeiros do litoral Pernambucano, situados a menos de 5 km do continente, são amplamente estudados por sua importância ecológica, econômica e turística para a região (ex: Leão e Dominguez 2000; Kikuchi et al. 2010; Leão et al. 2010; Sarmiento et al. 2015; Barroso et al. 2018). Entretanto, esse ecossistema se encontra fortemente ameaçado devido à sua alta vulnerabilidade a impactos antrópicos e efeitos das mudanças climáticas como aquecimento, acidificação e aumento do nível dos oceanos (Hoegh-Guldberg et al. 2007; Kleypas e Yates 2009; Fabricius et al. 2011; IPCC 2014; Sarmiento et al. 2015; Sarmiento et al. 2017; Barroso et al. 2018).

No ambiente recifal, a meiofauna, grupo de metazoários bentônicos bem definidos biologicamente, desempenha um papel fundamental no fluxo de energia dos sistemas bentônicos servindo de alimento para animais da macrofauna e pequenos peixes e também como consumidores (Danovaro et al. 2007). Nos recifes esses organismos estão localizados na superfície das paredes biogênicas cobertas por algas macrófitas (Maida e Ferreira 1997), esse ambiente é denominado fital. Nele, a comunidade meiofaunística possui alta diversidade, agrupando representantes de quase todos os filos de invertebrados marinhos (cerca de 17 filos da biota) e grandes densidades (Giere 2009). Tem sido crescente o interesse em realizar estudos sobre a meiofauna, pois fatores como o seu pequeno tamanho, o rápido ciclo reprodutivo e a alta sensibilidade a mudanças nas condições ambientais tornam esses organismos excelentes bioindicadores de impactos antrópicos e efeitos das mudanças climáticas (Kennedy e Jacoby 1999; Sarmiento et al. 2015; Sarmiento et al. 2017; Barroso et al. 2018).

Os recifes de corais apresentam duas zonas determinadas pelo nível do mar: a faixa do recife que sofre variação entre exposta e imersa, dependendo do nível da maré (mediolitoral) e a zona sempre imersa (infralitoral), onde os animais que ocupam as diferentes faixas precisarão estar adaptados à fatores de estresses diferentes. Enquanto os organismos presentes nas zonas de infralitoral, caracterizada por uma maior estabilidade térmica, precisam de melhores estratégias para questões de disponibilidade de habitat, competição e predação. Os indivíduos que ocorrem no médiolitoral, com maior exposição à radiação solar, necessitam de melhores adaptações fisiológicas contra variações de temperatura, dessecação, hidrodinamismo (Chadwick 1991; Morosko e Rocha 1999). Eventos de estresse, como o aquecimento de 2019/2020, podem, portanto, resultar em mudanças no padrão de distribuição não apenas da diversidade de corais, mas também de outros táxons, gerando impacto na produtividade pesqueira e potencial turístico (Rogers et al. 1999).

Estudos para caracterizar a sensibilidade de comunidades bentônicas aos eventos extremos de ondas de calor permitem, além de avaliar os impactos locais das elevadas temperaturas da água, identificar grupos resistentes, monitorar a resiliência da comunidade recifal e também subsidiar futuros planos de manejo para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (Zeppilli et al. 2015; Duarte et al. 2020). Apesar de ser um registro recente (2019/2020), os efeitos das ondas de calor no Atlântico Sul nas espécies de corais (mortalidade e branqueamento) já foram apontados por Banha et al. (2019), Sully et al. (2019), Duarte et al. (2020) e Pereira et al. (2022). Porém nenhum estudo relacionou a abundância e biodiversidade das comunidades bentônicas (não corais) colonizadoras dos recifes de corais quanto às possíveis consequências das ondas de calor reportadas na região.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a sensibilidade da meiofauna aos efeitos das ondas de calor recentes no Atlântico Sudoeste (2019/2020).

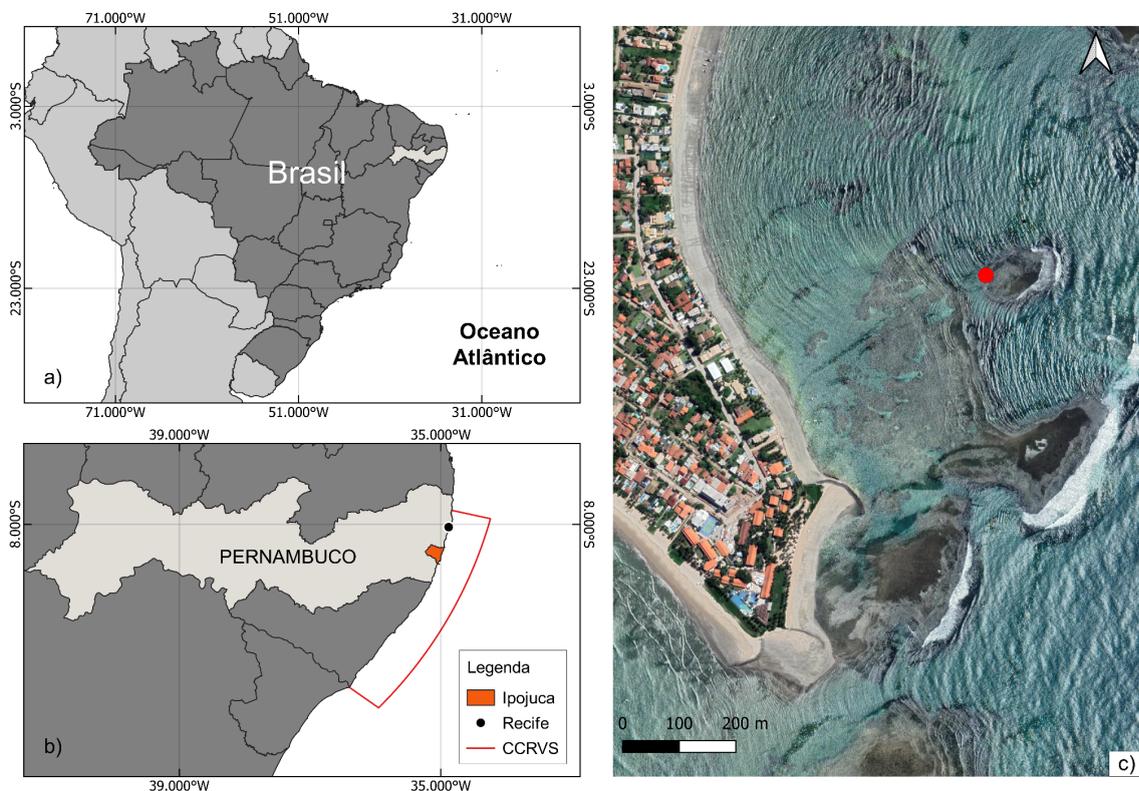
### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i) Apontar grupos da meiofauna mais resistentes ao aquecimento local da água do mar.
- ii) Determinar em que momento (para meses de verão de 2019 e de 2020) as comunidades apresentam maiores divergências quanto à abundância/densidade e composição da meiofauna e correlacionar com as temperaturas da água do mar reportadas.
- iii) Esclarecer sobre a possível resiliência da meiofauna e poder de recuperação após eventos de ondas de calor extremo.
- iv) Avaliar se houveram possíveis divergências nos padrões de impacto das ondas de calor entre a comunidade naturalmente presente nas zonas recifais de mediolitoral e infralitoral.
- v) Apontar a metodologia adequada para ser utilizada futuramente em pesquisas que visem através de experimentação em ambiente recifal simular os possíveis efeitos da elevação da temperatura nas comunidades bentônicas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi realizado na praia de Serrambi ( $8^{\circ}33'31.594''S$  e  $35^{\circ}0'17.201''W$ ), localizada no município de Ipojuca, no litoral Sul de Pernambuco, a cerca de 60km da cidade de Recife (Brasil). Os seus recifes de corais são constituídos por arenito, com formação do tipo franja, sendo um ecossistema que proporciona abrigo, obtenção de alimentos e lugar seguro para a reprodução de alguns representantes da fauna marinha (Leão e Dominguez 2000; Kikuchi et al. 2010; Leão et al. 2010). Além disso, tem grande importância econômica e turística para a região, sendo protegida diretamente pela Lei Federal 7.661/88 (Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro) e pelo Decreto Estadual 46.052 de 23.05.18 (implementação da APA Marinha Recifes Serrambi), como também áreas circundantes através do Decreto Federal de 23.10.97 (APA Costa dos Corais) e pelo Decreto Estadual 21.135/98 (APA de Guadalupe).



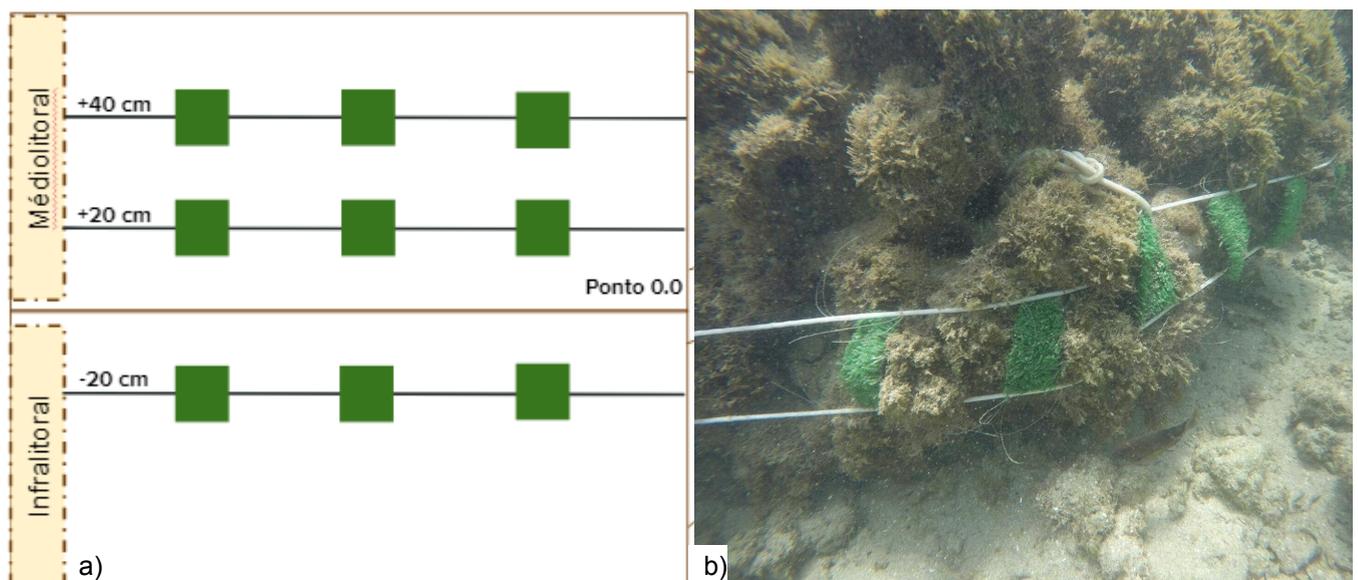
**Figura 1.** a) Mapa do Brasil indicando o estado de Pernambuco. b) Área de pesquisa localizada na Praia de Serrambi, Ipojuca- PE, Brasil, englobando a Estação Virtual Regional da Costa dos Corais (CCRVS). c) Imagem de satélite indicando a bancada do recife de coral utilizada neste trabalho, através do marcador vermelho.

## 3.2 METODOLOGIA DE CAMPO

### 3.2.1 desenho amostral

Foram utilizadas amostras coletadas na mesma bancada de recifes de coral localizada na Praia de Serrambi, em três momentos distintos. (TEMPO 1, TEMPO 2 e TEMPO 3). Para montagem foram utilizadas Unidades Artificiais de Substrato (UAS) do tipo grama sintética, por permitir uma redução na heterogeneidade do substrato entre réplicas, através da padronização das amostras (como em: Nascimento 2013; Sarmiento 2016; Sarmiento et al. 2017; Barroso 2018).

Também foram utilizadas amostras provenientes das mesmas alturas recifais, sendo duas alturas recifais de mediolitoral e uma de infralitoral, totalizando 3 alturas. Uma corda contendo 3 Unidades Artificiais de Substrato de tamanho 10 x 10 cm foi fixada verticalmente, de forma paralela ao recife, para cada uma das alturas amostrais para adequada colonização da meiofauna (Figura 2). As alturas amostradas do recife foram determinadas por régua de nível, sendo elas partindo da altura do Ponto Zero (relacionadas à posição do nível da maré 0,0m, zero hidrográfico ou média das baixa-mares de sizígia) +20cm, +40cm, e -20cm. Após o tempo adequado de colonização (mais de 30 dias) foram coletadas, acondicionadas em potes plásticos e fixadas em formol 4% todas as Unidades Artificiais de Substrato e sua fauna colonizadora.

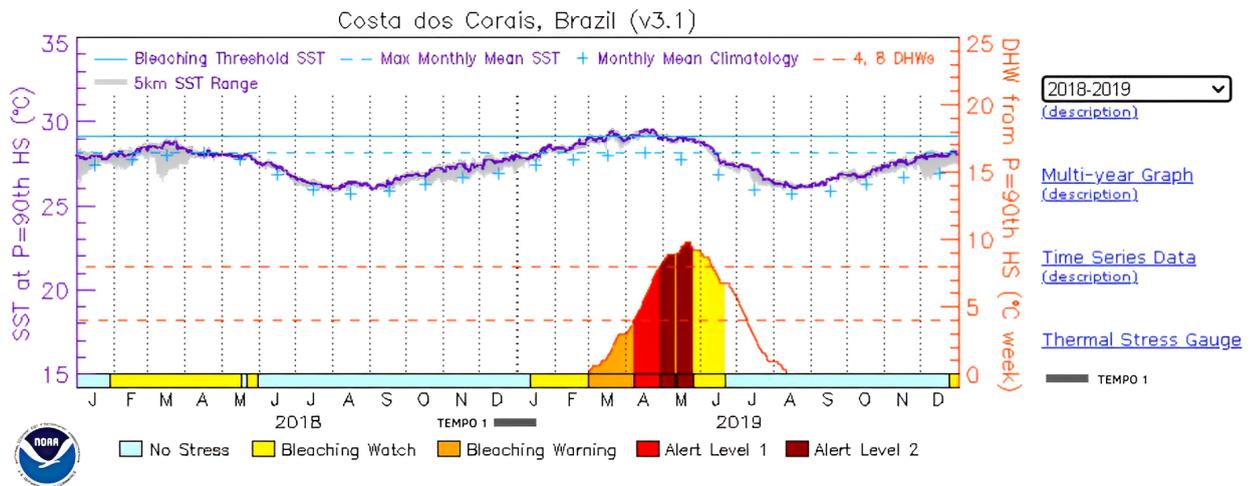


**Figura 2.** a) Modelo esquemático da execução do desenho amostral. b) Fotografia em campo da montagem das Unidades Artificiais de Substratos (UAS).

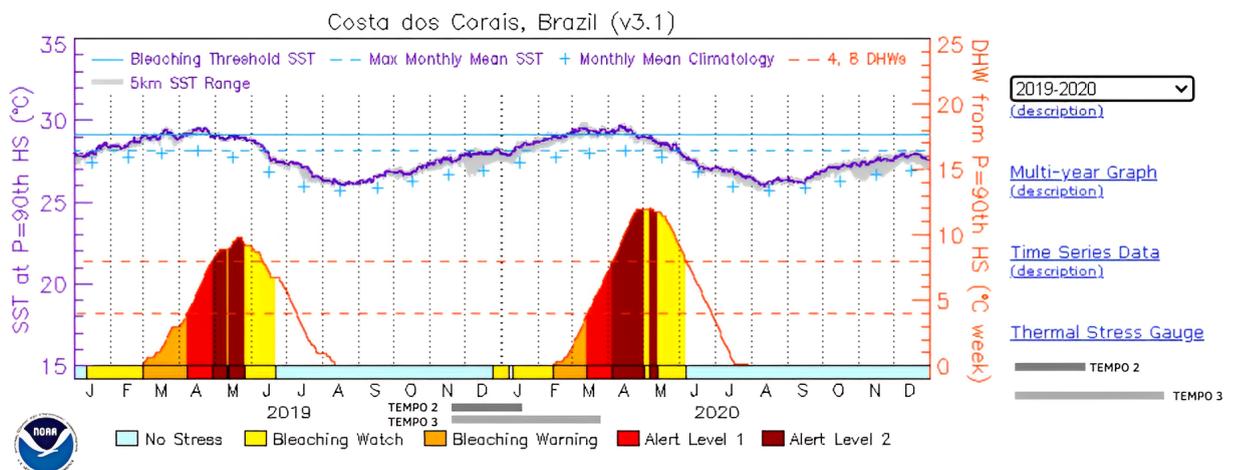
### 3.2.2 tempos amostrados

As amostras provenientes do primeiro momento de coleta permaneceram em campo entre dezembro de 2018 e janeiro de 2019 (22/12/2018- 24/01/2019). Durante o tempo de colonização da meiofauna em campo não foi dado nenhum alerta de aquecimento da água do mar para a região nesse primeiro intervalo de tempo, caracterizando o momento como de “No Stress” (Gráfico 1). Em questão de poucos dias após o primeiro experimento ser retirado do campo, foram emitidos alertas do primeiro grande evento de branqueamento (2019). O segundo e o terceiro momentos de coleta ocorreram entre novembro de 2019 e março de 2020. Neste intervalo foram coletadas amostras em janeiro de 2020 (colonização entre 12/11/2019- 10/01/2020), e em março do mesmo ano (colonização entre 12/11/2019- 10/03/2020). Essas duas coletas geraram as amostras denominadas TEMPO 2 e TEMPO 3. As amostras foram provenientes de outros estudos experimentais do mesmo laboratório, coincidindo de estarem em campo durante os eventos de pico de calor, por isso, não existe uma padronização entre os mesmos.

Da mesma maneira que as amostras TEMPO 1, as amostras TEMPO 2 permaneceram em campo durante um intervalo de tempo em que não foi dado nenhum alerta de aquecimento da água do mar para a região. Contudo, as amostras do TEMPO 2 foram estabelecidas 5 a 6 meses após os eventos de alerta de 2019 e estavam presentes no início do chamado “Bleaching Watch” no verão de 2020, iniciados com quase um mês de antecedência, se comparado com os eventos de branqueamento do verão de 2019 (Gráfico 2). Já as amostras do TEMPO 3 permaneceram em campo durante o evento de aquecimento da água reportado em fevereiro e março de 2020, parte do tempo caracterizado como “*Bleaching Warning*” e no final da sua colonização com variação em graus de aquecimento semanal (DHW) superior a 4, caracterizado como “*Alerta nível 1*” (Gráfico 2).



**Gráfico 1.** Dados de semanas de graus de aquecimento (DHW) e alertas de branqueamento da Estação Virtual Regional Costa dos Corais no período de 2018 a 2019, referente ao TEMPO 1. Fonte: NOAA Coral Reef Watch, adaptado.



**Gráfico 2.** Dados de semanas de graus de aquecimento (DHW) e alertas de branqueamento da Estação Virtual Regional Costa dos Corais, no período de 2019 a 2020, indicando TEMPO 2 e TEMPO 3. Fonte: NOAA Coral Reef Watch, adaptado.

### 3.3 DADOS CLIMÁTICOS

Os dados climáticos utilizados neste trabalho foram DHW (semanas de graus de aquecimento) e SST (temperatura superficial do mar, em graus), em que cada semana de SST superior a 1°C acima da média mensal histórica esperada para a

climatologia local é referente a 1 DHW (Duarte et al. 2020). Logo, se a temperatura for 1°C acima do esperado mensal durante 4 semanas, obtemos um valor de DHW igual a 4 (1°C x 4 semanas). Essas informações foram retiradas do programa NOAA Coral Reef Watch usando o extrator de dados CoralTemp Versão 1.0 SST da Estação Virtual Regional Costa dos Corais, sendo a Estação que inclui o recife de Serrambi, possibilitando elucidar a intensidade e duração do estresse térmico de forma padronizada globalmente (Pereira et al. 2022).

### 3.4 ATIVIDADE LABORATORIAL

Em laboratório, a fauna associada às UAS foi extraída da grama artificial através da lavagem em água corrente e a meiofauna retida entre peneiras de abertura de malha 500µm e 45µm foi armazenada em formol a 4% e corada com Rosa de Bengala, para melhor visualização. As triagens foram realizadas por meio de estereomicroscópio para identificação ao nível de grandes grupos, utilizando a placa de Dollfus. Foi necessário, visto a grande abundância de indivíduos da meiofauna por UAS (mais de 10.000 indivíduos por UAS), fazer o processo de quarteamento para 1/8 da amostra.

### 3.5 ANÁLISE DE DADOS

A meiofauna foi avaliada utilizando dados de abundância/densidade e composição da comunidade. A estrutura das comunidades foi comparada através de análise de variância multivariada por permutações (PERMANOVA) (Anderson, 2005). A ordenação por Escalonamento Multidimensional (MDS) foi usada para representar dentro de um modelo bidimensional as similaridades entre as réplicas. Em caso de diferença significativa na PERMANOVA, foi utilizado o teste a posteriori Fisher LSD (teste-t). Foi utilizada a probabilidade de permutações [p(perm)] quando as permutações únicas excederam 200 (limite máximo 9999), quando este número não foi alcançado foi utilizada a técnica de Monte Carlo para gerar probabilidades [p(MC)]. Para identificação de quais grupos foram mais representativos para distinguir os tratamentos avaliados utilizou-se a análise de percentagens de similaridade - contribuições de espécies (SIMPER). Todas as análises multivariadas foram executadas no programa PRIMER v.6+PERMANOVA, com os dados transformados em logaritmo natural (X+1). Para todas as análises estatísticas, o nível de significância adotado foi de 5%.

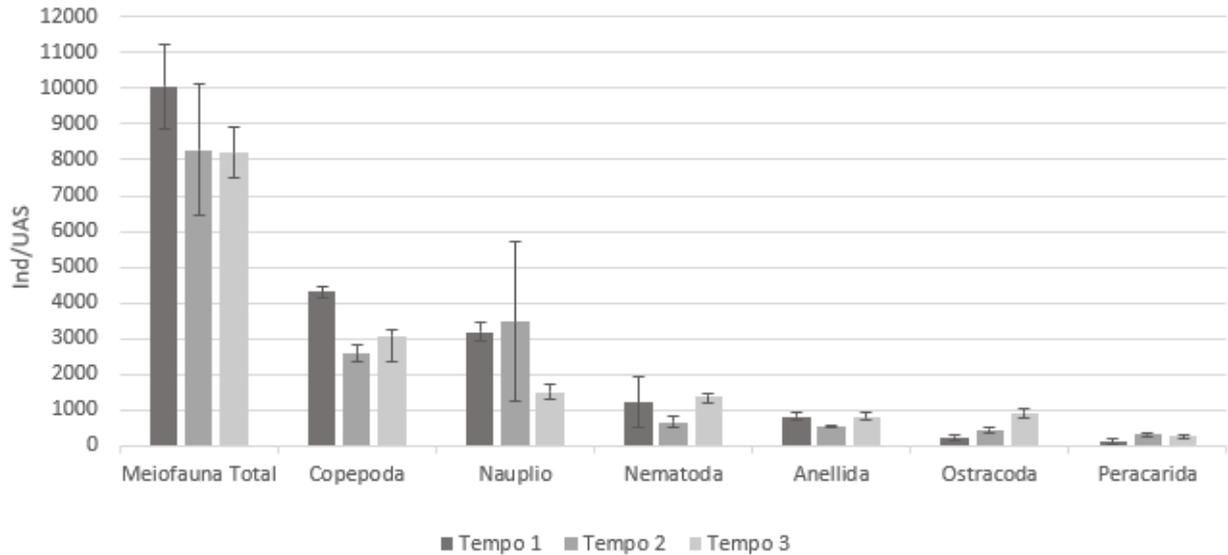
## 4 RESULTADOS

A comunidade de meiofauna amostrada no TEMPO 1 obteve uma média de 10.055 (Intervalo de Confiança 95% = 1.191) indivíduos por Unidade Artificial de Substrato Artificial (UAS), visto no Gráfico 3. A meiofauna foi composta por 12 táxons, dos quais os grupos mais abundantes foram: Copepoda Harpacticoida (Média= 4.302, 42,8%, IC= 139); Nauplius de Harpacticoida (Média= 3.193, 31,8%, IC= 250); Nematoda (Média= 1.227, 12,2%, IC= 719); Annelida (Média= 832, 8,3%, IC= 90); Ostracoda (Média= 238, 2,4%, IC=96); e Peracarida (Média= 114, 1,1%, IC= 69). Esses seis grupos ocorreram em todas as alturas amostradas no TEMPO 1. Também foram encontrados indivíduos raros (representatividade <1% do total) agrupados em “Outros” sendo eles representantes dos táxons: Tardigrada, Acari, Gastropoda, Turbellaria, Polyplacophora e Larva de Chironomidae.

A comunidade de meiofauna amostrada no TEMPO 2 (Gráfico 3), apresentou uma média de 8.282 (IC 95%= 1.843) indivíduos da meiofauna por Unidade Artificial de Substrato (UAS) coletada. Dentre os doze táxons encontrados da meiofauna, os grupos mais abundantes foram Nauplius de Harpacticoida (Média= 3.485; 42,1%; IC= 2.245 ); Copepoda Harpacticoida (Média= 2.580; 31,1%; IC= 238); Nematoda (Média= 676; 8,2%; IC= 163); Annelida (Média= 540; 6,5%; IC= 34); Ostracoda (Média= 458; 5,5%; IC= 73); Peracarida (Média= 323; 3,9%; IC= 58). Esses seis grupos ocorreram em todas as alturas amostradas. Foram encontrados no TEMPO 2 os mesmos grupos raros já reportados TEMPO 1, com exceção de Gastropoda e Larva de Chironomidae que não ocorrem no TEMPO 2 e com o registro dos grupos Kinorhyncha e Cladocera, não observados no TEMPO 1.

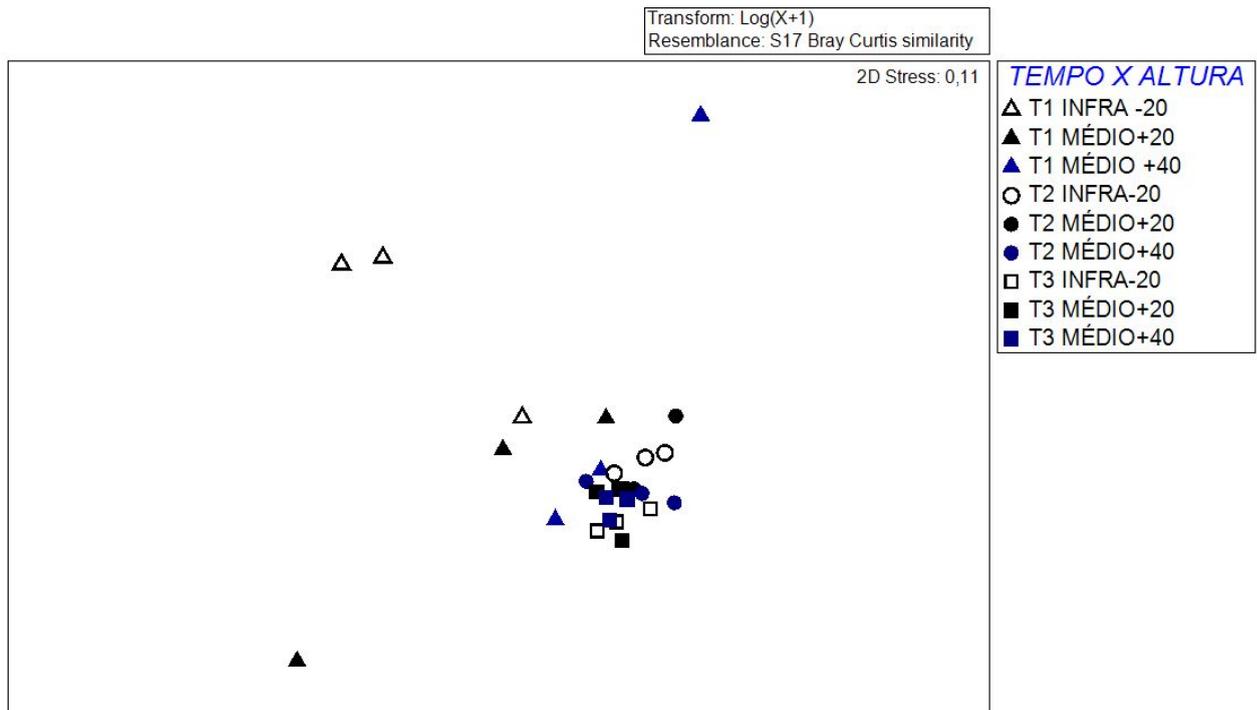
Na amostragem do TEMPO 3, como demonstra o Gráfico 3, a comunidade de meiofauna apresentou uma média de 8.208 (IC 95% = 719) indivíduos por Unidade Artificial de Substrato (UAS) coletada. A composição da comunidade meiofaunística registrou treze táxons, sendo os grupos mais abundantes: Copepoda Harpacticoida (Média= 3.077; 37,5%; IC=194); Nauplius de Harpacticoida (Média= 1.502; 18,3%; IC= 204); Nematoda (Média= 1.399; 17,0%; 58); Ostracoda (Média= 922; 11,2%; IC= 107); Annelida (Média= 788; 9,6%; 160); Peracarida (Média= 292; 3,6%; IC= 26). Esses seis grupos ocorreram em todas as alturas amostradas. Para o TEMPO 3 também foram encontrados os mesmos grupos raros reportados nos dois tempos

amostrados, com a ausência de Larva de Chironomidade, assim como no TEMPO 2 e a presença de Kinorhyncha e Cladocera, que não ocorrem apenas no TEMPO 1.



**Gráfico 3.** Densidade média (indivíduos por UAS) dos grandes grupos da meiofauna entre os tempos amostrados (TEMPO 1, TEMPO 2 e TEMPO 3).

A análise de escalonamento multidimensional (MDS) (figura 3) representa graficamente a matriz de similaridade das amostras da meiofauna dos três momentos amostrais para as três alturas de microzonação. É possível perceber uma diferenciação entre as amostras coletada em TEMPO 1 das coletadas em TEMPO 2 e TEMPO 3 (triângulos, bolas e quadrados, respectivamente na figura 3), principalmente observando as amostras coletadas na altura recifal infralitoral -20 (T1 INFRA-20, T2 INFRA-20 e T3 INFRA-20 – triângulos, bolas e quadrados abertos, respectivamente na figura 3). É possível observar também uma maior proximidade entre o TEMPO 2 e o TEMPO 3.



**Figura 3.** Ordenação do MDS mostrando a similaridade de Bray-Curtis da estrutura da comunidade da meiofauna entre a interação Tempo x Altura. (T1, T2 e T3 correspondem respectivamente a TEMPO 1, TEMPO 2 e TEMPO 3. INFRA-20, MÉDIO+20 e MÉDIO+40 representam respectivamente as alturas de Infralitoral-20, Mediolitoral+20 e Mediolitoral+40).

Os resultados para a análise multivariada PERMANOVA confirmaram o padrão no MDS e detectaram diferenças significativas na estrutura da comunidade da meiofauna para o fator Tempo ( $F=5,207$ ;  $p(\text{perm})=0,0001$ ), para o fator Altura ( $F=2,161$ ;  $p(\text{perm})=0,028$ ) e para a interação entre os tempos amostrados e as diferentes alturas na microzonação ( $F=2,073$ ;  $p(\text{perm})=0,012$ ). O teste a posteriori Fisher LSD para o fator Tempo indicou que as diferenças significativas se davam na comparação das amostras coletadas entre todos os tempos (Tabela 1). Considerando que o fator Altura obteve probabilidade próxima ao nível de significância e, ainda, o dobro daquela obtida para a interação, o teste a posteriori para Alturas foi obtido da interação, tempo a tempo, e indicou que diferenças só ocorreram entre as alturas infralitoral-20 e mediolitoral+40 no TEMPO 2 ( $p(\text{MC})=0,037$ ). Enquanto para a interação dos fatores, o teste a posteriori detectou diferenças significativas entre as microzonas de infralitoral-20 do TEMPO 1 em

comparação ao TEMPO 2 e TEMPO 3 ( $p(MC)= 0.0132$ ;  $p(MC)= 0.0114$ , respectivamente).

PAIR-WISE TESTS				
Groups	t	P(perm)	Unique perms	P(MC)
TEMPO1, TEMPO2	2,1849	0.0002	9962	0.0107
TEMPO1, TEMPO3	2,4181	0.0001	9950	0.0041
TEMPO2, TEMPO3	2,1148	0.0011	9952	0.0074

**Tabela 1.** Teste a posteriori Fisher LSD indicando diferenças significativas entre todos os níveis do fator tempo.

As análises SIMPER (Tabela 2) apontam Peracarida como o grupo que mais contribuiu para a dissimilaridade entre TEMPO 1 e TEMPO 2 e TEMPO 1 e TEMPO 3. Já para a dissimilaridade entre os tempos TEMPO 2 e TEMPO 3 os grupos: Nematoda, Ostracoda e Nauplius foram os de importância mais aparente, indicando um aumento na densidade dos dois primeiros grupos em contrapartida a uma diminuição na densidade dos Nauplius.

Species	Average dissimilarity = 8.84		Group TEMPO 2			
	Group TEMPO 1	Group TEMPO 2	Av.Diss	Diss/SD	Contrib%	Cum.%
	Av.Abund	Av.Abund				
<b>Peracarida</b>	3.21	5.69	3.47	1.12	39.24	39.24
<b>Ostracoda</b>	5.16	6.04	1.36	1.47	15.34	54.59
<b>Nauplius</b>	7.90	7.72	1.13	1.31	12.79	67.37
<b>Nematoda</b>	6.79	6.37	1.07	1.38	12.12	79.50
<b>Copepoda</b>	8.19	7.81	0.96	1.59	10.84	90.33

<b>Average dissimilarity = 8.92</b>						
<b>Species</b>	<b>Group TEMPO 1</b>		<b>Group TEMPO 3</b>			
	<b>Av.Abund</b>	<b>Av.Abund</b>	<b>Av.Diss</b>	<b>Diss/SD</b>	<b>Contrib%</b>	<b>Cum.%</b>
<b>Peracarida</b>	3.21	5.61	3.32	1.10	37.18	37.18
<b>Ostracoda</b>	5.16	6.71	2.01	1.84	22.58	59.76
<b>Nauplius</b>	7.90	7.27	1.02	1.71	11.46	71.22
<b>Nematoda</b>	6.79	7.21	0.94	1.28	10.58	81.79
<b>Copepoda</b>	8.19	7.98	0.84	1.37	9.45	91.25
<b>Average dissimilarity = 4.76</b>						
<b>Species</b>	<b>Group TEMPO 2</b>		<b>Group TEMPO 3</b>			
	<b>Av.Abund</b>	<b>Av.Abund</b>	<b>Av.Diss</b>	<b>Diss/SD</b>	<b>Contrib%</b>	<b>Cum.%</b>
<b>Nematoda</b>	6.37	7.21	1.12	1.75	23.60	23.60
<b>Nauplius</b>	7.72	7.27	0.95	1.19	19.87	43.47
<b>Ostracoda</b>	6.04	6.71	0.93	1.33	19.60	63.07
<b>Annelida</b>	6.26	6.56	0.68	1.43	14.22	77.29
<b>Peracarida</b>	5.69	5.61	0.60	1.45	12.51	89.80
<b>Copepoda</b>	7.81	7.98	0.49	1.30	10.20	100.00

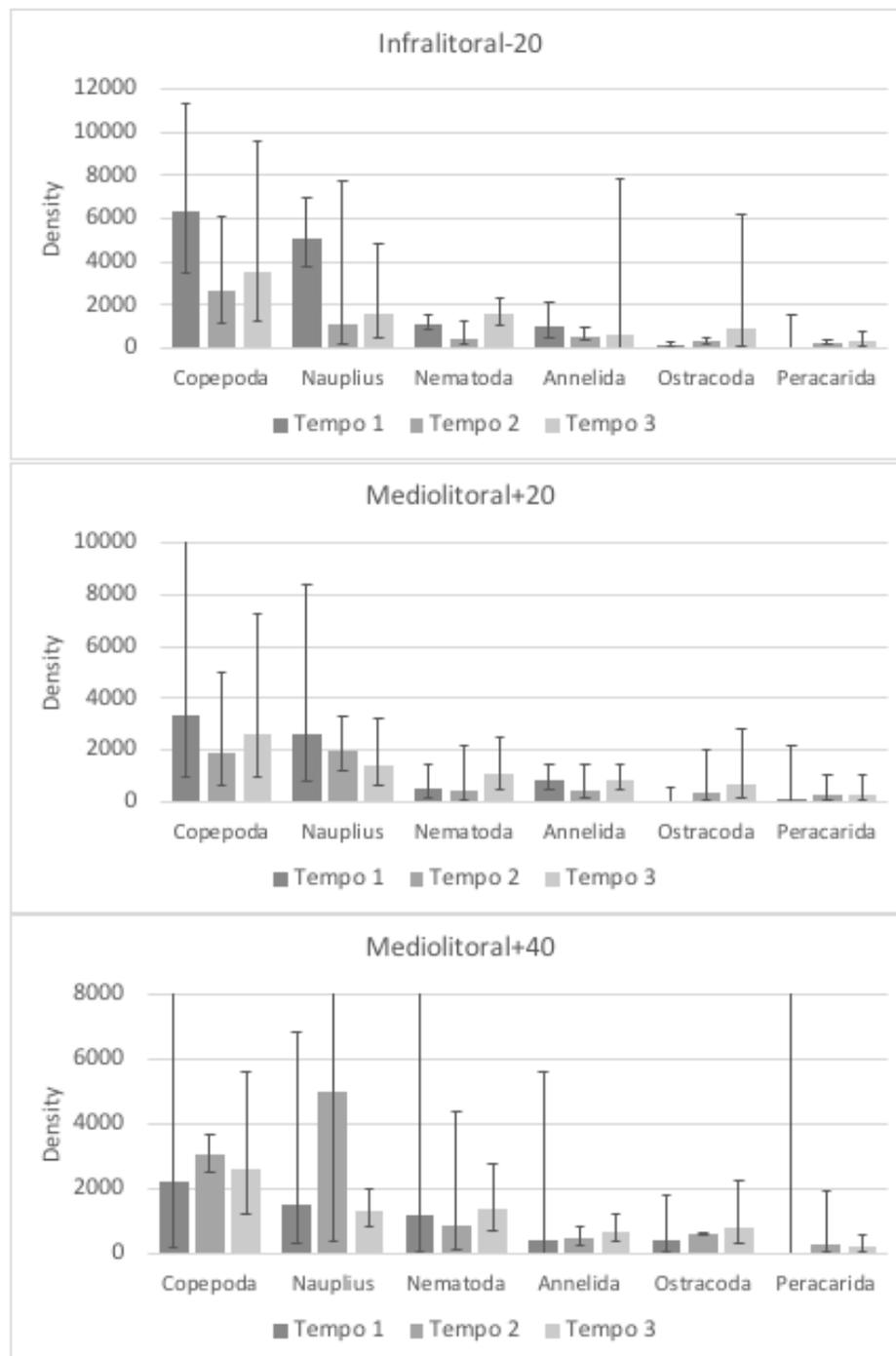
**Tabela 2.** Resultados da análise SIMPER para dissimilaridade entre os diferentes tempos. Ab.média - Abundância média; Diss.média - Dissimilaridade média; Contrib.% - porcentagem de espécies que contribuíram para a dissimilaridade média. Cum.% - porcentagem acumulada da contribuição para dissimilaridade média.

A comunidade da meiofauna em situações de ausência de estresse (TEMPO 1) apresentou na altura infralitoral-20, como os mais abundantes entre os principais grupos: Copepoda de Harpacticoida (Média= 6.443), Nauplius de Harpacticoida

(Média= 5.120), Nematoda (Média= 1.173), Annelida (Média= 1.088), Ostracoda (Média= 160), Peracarida (Média= 21). O padrão é semelhante na altura médiolitoral+40, com a exceção de Nematoda (Média= 1.973), que passa a ser o segundo grupo mais abundante. Já para a altura médiolitoral+20, os grupos mais abundantes são: Copepoda de Harpacticoida (Média= 3.627), Nauplius de Harpacticoida (Média= 2.795), Annelida (Média= 853), Nematoda (Média= 533), Peracarida (Média= 235) e Ostracoda (Média= 96), como exposto no Gráfico 4.

Na situação com ausência de alertas (TEMPO 2), mas classificada como "Bleaching Watch", a distribuição vertical é alterada. Na altura infralitoral-20, Copepoda Harpacticoida (Média= 2.728) e Nauplius de Harpacticoida (Média= 1.405) se mantêm como os dois primeiros grupos mais abundantes, Annelida (Média= 595) passa a ser o terceiro mais abundante, seguido de Nematoda (Média= 496), Ostracoda (Média= 312) e Peracarida (Média= 256). Para a altura médiolitoral+40, Nauplius de Harpacticoida (Média= 7.037) se encontra como grupo de maior abundância, seguido por Copepoda Harpacticoida (Média= 3.051), Nematoda (Média= 987), Ostracoda (Média= 629), Annelida (Média= 509) e Peracarida (Média= 363). Na altura médiolitoral+20, Nauplius de Harpacticoida (Média= 2.013) também passam a ser o grupo mais abundante, em seguida se encontram: Copepoda Harpacticoida (Média= 1.960), Nematoda (Média= 544), Annelida (Média= 515), Ostracoda (Média= 432) e Peracarida (Média= 349) (Gráfico 4).

A amostragem do TEMPO 3 (situação de "Bleaching Warning" e alerta nível 1), apresentou como grupos mais abundantes na altura infralitoral-20 os Copepoda Harpacticoida (Média= 3.701), Nauplius de Harpacticoida (Média= 1.709), Nematoda (Média= 1.597), Ostracoda (Média= 1.072), Annelida (Média= 808) e Peracarida (Média= 336), respectivamente. Para a altura médiolitoral+40, o padrão é semelhante ao encontrado no TEMPO 1, com a exceção de Ostracoda (Média= 883), que passa a ser o quarto grupo mais abundante. A altura médiolitoral+20 apresenta como grupos com maior abundância: Copepoda Harpacticoida (Média= 2.803) Nauplius Harpacticoida (Média= 1.475), Nematoda (Média= 1.149), Annelida (Média= 869), Ostracoda (Média= 811) e Peracarida (Média= 288), respectivamente. Esses padrões podem ser vistos no Gráfico 4.



**Gráfico 4.** Densidade média ( $\pm$  95% IC) dos principais grupos da meiofauna expostas aos diferentes tempos (Indivíduos/UAS) para as três alturas amostradas.

## 5 DISCUSSÃO

As condições climáticas de TEMPO 1 e de TEMPO 2 são semelhantes, ambas aparecem sem sinais de alertas de branqueamento e com temperaturas climáticas que não ultrapassam a média máxima esperada para o período mensal (Gráficos 1 e 2), apesar das diferenças temporais (distância de quase um ano entre os experimentos). Ainda que o ambiente tenha experimentado uma situação de alerta de aquecimento 6 meses antes da coleta amostral do TEMPO 2, o rápido ciclo de vida da comunidade meiofaunística, que pode ser completado em algumas semanas (Giere, 2009), dificilmente permitiria manter a detecção de diferenças significativas devido às mudanças climáticas, sugerindo que as distâncias entre TEMPO 1 e TEMPO 2 se dão por um fator temporal relacionado a diferenças interanuais. Entretanto, ao comparar o TEMPO 2 e o TEMPO 3, que são muito próximos temporalmente, mas com diferenças importantes na temperatura no momento da coleta, identificou-se diferenças significativas que podem ser explicadas pela resposta da meiofauna ao aquecimento da água.

Segundo Duarte et al. (2020) e Donner et al. (2005) o limiar de branqueamento é dado em temperaturas acima de 27,9°C. De acordo com estes autores, taxas de DHW  $\geq 4$  resultam em porcentagens de 30-40% de branqueamento dos recifes de corais expostos a esta situação, sendo essas condições experimentadas pelos organismos durante praticamente todo o último mês de exposição das UAS no TEMPO 3 (março/2020), como mostra o Gráfico 2. O fato da duração do experimento no TEMPO 3 ser superior ao TEMPO 1 e TEMPO 2 não altera o patamar ou saturação da colonização da meiofauna, uma vez que estudos sobre avaliações de UAS's (Unidade Artificial de Substrato) indicam uma saturação da colonização da meiofauna com mudanças pouco substanciais após cerca de 15 dias de experimento (Nascimento 2013). Isto pode ser percebido inclusive pela maior densidade, e riqueza semelhante de grupos, entre as UAS de TEMPO 1, que ficaram um mês em campo, e aquelas UAS dos TEMPO 2 e TEMPO 3 que ficaram 2 e 4 meses em campo, respectivamente. Logo, as diferenças amostrais devem ser explicadas pela importante mudança de temperatura.

A partir da análise SIMPER (Tabela 2) é possível visualizar diferentes respostas às ondas de calor e eventos de branqueamento reportados no Atlântico Sudoeste entre os grandes grupos da meiofauna. Os Peracarida, naturalmente menos abundante entre a meiofauna típica, estão apontados como grupo que mais

influenciou a dissimilaridade entre a comparação do TEMPO 1 com os demais tempos (TEMPO 2 e TEMPO 3), possivelmente não relacionada com os picos de temperatura, uma vez que não apresenta alta taxa de contribuição para as diferenças entre o TEMPO 2 e o TEMPO 3, onde o último tempo amostrado evidencia um maior estresse térmico. Já entre o TEMPO 2 e TEMPO 3, as principais diferenças estão: 1) no aumento da densidade de Ostracoda e Nematoda, grupos típicos de meiofauna e que se mostraram resistentes e favorecidos pelas mudanças de temperatura representadas pelos picos de aquecimento, e 2) pela diminuição dos Nauplius de Harpacticoida, sendo estes mais sensíveis a essas condições climáticas, uma vez que as taxas de crescimento de invertebrados marinhos são fortemente correlacionadas com a temperatura (Przeslawski 2008). Copepoda Harpacticoida e Annelida não responderam ao fator Tempo ao nível de grandes grupos. O padrão de resposta negativo para Nauplius e positivo para Nematoda já foi verificado para estudo experimental de cenários de mudanças climáticas (Sarmiento et al. 2017). Neste estudo, no entanto, Ostracoda respondeu negativamente ao aumento de temperatura o que possivelmente se deveu ao efeito concomitante de redução de pH.

O aumento da densidade de Nematoda durante os alertas de temperatura e branqueamento possivelmente se deve ao aumento de indivíduos de espécies oportunistas, com curto ciclo de vida (completo em alguns dias), altas taxas reprodutivas, elevada habilidade de colonização e maior tolerância a perturbações (Felix 2015). Este mesmo comportamento oportunista de Nematoda foi visto em outros trabalhos que focam no efeito da temperatura e outros fatores associados às mudanças climáticas (Sarmiento 2016; Sarmiento et al. 2017; Esteves et al. 2022) ou de outros fatores de estresse (Barroso 2015; Felix 2015).

A elevação da temperatura, é um fator determinante para os Copepoda e seus Nauplius, impulsionando a eclosão, crescimento, desenvolvimento e o número de ovos produzidos, contanto que o limite ótimo não seja ultrapassado (Santos et al., 1999; Chertoprud e Azovsky, 2006; McAllen e Brennan, 2009). Através dos dados encontrados é detectado um pequeno acréscimo de Nauplius de Copepoda para o TEMPO 2 (comparado ao TEMPO 1), em que as taxas de SST (temperatura superficial do mar) atingem a média máxima mensal esperada, mas sem níveis de

alertas. Contudo, comparado ao TEMPO 3, que ao final do experimento surgem os alertas níveis 1 de branqueamento e graus de SST chegando a 30°C (sendo o limiar regional de branqueamento 27,9°C), percebe-se um impacto negativo para esse grupo, com diminuição da sua densidade (Gráfico 3). Em trabalhos anteriores (Sarmiento et al. 2017; Sarmiento 2016; Barroso 2015), os Nauplius de Copepoda se mostram mais sensíveis a estresses de longa duração (29 dias), sendo similar ao contexto encontrado no TEMPO 3, com estresse de aquecimento (DHW)  $\geq 4$  no momento da coleta. O aumento da densidade de Nauplius de Harpacticoida no TEMPO 2 pode ter garantido a estabilidade na densidade de Copepoda Harpacticoida durante o evento de estresse (TEMPO 3), uma vez que entre o período de uma coleta para a outra o estágio larval deste grupo já estaria completo e a duração das fases de copepoditos mais adulta pode ultrapassar 1 mês.

Os padrões de grupos resistentes e sensíveis encontrados neste trabalho foram similares aos de estudos anteriores utilizando uma simulação de elevações na temperatura através de microcosmos tanto em algas naturais, quanto utilizando UAS (Sarmiento et al. 2017; Sarmiento 2016; Barroso 2015), corroborando o uso de Unidades Artificiais de Substratos (UAS) como metodologia adequada para ser aplicada em pesquisas que visem através de experimentação em ambiente recifal descrever os possíveis efeitos da elevação da temperatura nas comunidades bentônicas.

Os grupos dentro da comunidade meiofaunística apresentam diferentes preferências para o fator Altura, mesmo em condições de ausência de estresse térmico. Por meio das densidades médias percebe-se que os grupos mais abundantes e frequentes são os Copepoda Harpacticoida e suas larvas Nauplius, para quase todas as alturas, com exceção da zona médiolitoral+40, que parece ter um destaque maior de Nematoda em comparação com Nauplius de Harpacticoida, apontando à sensibilidade dessas larvas ao aumento de temperatura. Além disso, Annelida demonstra uma maior preferência às alturas de médiolitoral+20, faixas que sofrem constantemente variação da maré. Enquanto Ostracoda são menos abundantes para a mesma zona (médiolitoral+20). Essas variações estão possivelmente ligadas às melhores adaptações aos fatores abióticos (variações de temperatura, dessecação, hidrodinamismo, granulometria) e biológicos (disponibilidade de habitat, competição e predação), como apontam Chadwick (1991) e Morosko and Rocha (1999). O sucesso dessas estratégias se torna mais

visível ao comparar os dados encontrados no presente estudo com a literatura, onde a comunidade da meiofauna responde de forma diferente a depender da zona em que ocorre, apresentando diferenças significativas entre elas.

Os organismos presentes no médiolitoral+40 demonstram um menor impacto perante os estresses térmicos, visto que já possuem adaptações necessárias para uma maior exposição ao calor. Enquanto os táxons do infralitoral-20, de forma geral, apresentam uma maior suscetibilidade ao efeito de elevações térmicas, apresentando uma relativa diminuição na sua densidade populacional.

Os Ostracoda entram como grupo que apresentou diferenças significativas para ambos os fatores, sendo eles Tempo e Altura ( $p=0.0001$ ;  $p= 0.0248$ , respectivamente). As respostas positivas do grupo em estresses térmicos também foi sentida entre as alturas. O táxon passou a ser mais abundante em alturas que naturalmente tinham uma menor ocorrência, como as duas alturas de médiolitoral (+20 e +40). Fatores anteriormente limitantes, como a fragilidade à dessecação por parte das larvas de Ostracoda (Machado 2016) passaram a não ser suficientes para limitar seu crescimento.

A comunidade meiofaunística, de forma geral, apresenta uma maior densidade populacional para a zona de infralitoral-20, sendo cerca de duas vezes mais abundante que as demais alturas amostradas (médiolitoral+40 e médiolitoral+20), possivelmente explicada pela maior estabilidade dos fatores ambientais, uma vez que permanece submerso mesmo com a variação da maré (Branch 2001).

Embora não tenha ocorrido interação, porque houve uma tendência semelhante de variação nas três alturas, as mudanças relacionadas à interação dos fatores, parecem mais importantes no infralitoral-20. Este fato já era esperado, uma vez que essa zona passa a perder a estabilidade climática existente em cenários com ausência de estresses térmicos, na qual a comunidade estaria melhor adaptada.

A partir das respostas encontradas na comunidade meiofaunística, identificam-se padrões de variação da estrutura da comunidade como resultado de respostas diferenciadas dos grupos aos eventos de estresse térmico. Caso os cenários de temperatura previstos ocorram conforme as previsões, com aumentos de 2°C a 4°C até o final deste século, comportamentos como os apontados neste estudo tendem a ser estabelecidos, determinando uma sucessão ecológica na comunidade semelhante ao descrito para a comunidade de macrofauna infralitoral

de costão rochoso por Dijkstra et al. (2011). A sensibilidade da fase larval de Copepoda Harpacticoida (Nauplius), por exemplo, pode impactar a abundância e composição específica de um dos principais e mais abundantes grupos da comunidade de meiofauna, geralmente determinante da sua densidade total e elo importante na cadeia trófica (Danovaro et al. 2007).

Além disso, de forma geral, a mudança nas condições ambientais pode determinar uma maior homogeneidade da comunidade, com redução de grupos funcionais e alterações no fluxo da cadeia alimentar do ecossistema recifal (Kroeker et al. 2013), deixando de ser um impacto apenas em uma comunidade específica. É provável que grupos que neste estudo ocorrem como oportunistas passem a ser táxons persistentes e de maior abundância ou que espécies invasoras tenham seu sucesso facilitado como sugerido por Dijkstra et al. (2011). Esses fatores prejudicam diretamente na manutenção do ecossistema recifal e nas suas relações interespecíficas. Um exemplo das consequências sobre o sistema recifal pode ser dado citando a espécie *Abudefduf saxatilis*, peixe popularmente conhecido como Sargentinho e foco frequente de atividades aquáticas, como o mergulho turístico. Esses peixes recifais têm os Copepoda Harpacticoida como parte no seu conteúdo estomacal (Feitosa 2010; Costa 2020) e potencialmente terão uma redução de recurso alimentar em cenários de elevadas temperaturas, considerando a sensibilidade das fases Nauplius de Copepoda Harpacticoida. Em contrapartida, grupos como os Turbellaria, que se alimentam de Copepoda Harpacticoida mas também de Nematoda (grupo beneficiado no estresse térmico), podem manter ou ampliar sua abundância e eventualmente intensificar a pressão predatória em Copepoda.

Análises ao nível de comunidade são de grande relevância para a compreensão e conservação, não apenas de espécies de animais mas também no que diz respeito à manutenção das relações ecossistêmicas nos recifes de corais no ambiente marinho. Contudo, é necessário que haja mais estudos que auxiliem no entendimento dos impactos deste evento sobre a taxa de forma mais específica, especialmente para Ostracoda, possibilitando uma melhor projeção de como os ecossistemas serão afetados em cenários de aumento da temperatura da água do mar.

## 6. CONCLUSÃO

O presente estudo suporta a hipótese de que a meiofauna se apresenta como uma boa ferramenta na compreensão de impactos gerados pelas mudanças climáticas, devido a suas características como rápido ciclo de vida, sensibilidade a alterações ambientais e fácil manuseio em experimentos de laboratório. Nossos resultados também indicam que as UAS são eficientes em simular o ambiente fital no qual a comunidade está inserida, permitindo diferentes abordagens experimentais, *in situ* (como neste estudo) ou em laboratório, sobre os impactos das mudanças climáticas. Os resultados indicaram variações significativas quanto ao efeito do fator Tempo entre todos os meses de verão coletados (dezembro de 2018 a janeiro de 2019, no TEMPO 1, novembro de 2019 a janeiro de 2020, como TEMPO 2 e novembro de 2019 a março de 2020, TEMPO 3) permitindo concluir que picos de temperatura modificam a comunidade da meiofauna de formas diferentes considerando os grandes grupos taxonômicos e ecológicos. Além disso, para o fator Altura, percebe-se que os organismos que naturalmente são expostos a uma maior radiação solar (médiolitoral, especificamente a microzonação +40) respondem diferentemente da comunidade sempre imersa (infralitoral-20), sugerindo que a fauna presente em zonas mais profundas estão mais suscetíveis a impactos negativos diante de cenários de elevações na temperatura da água do mar. Nematoda e Ostracoda foram beneficiados com a elevação da temperatura enquanto Nauplius teve uma redução importante na sua abundância. Copepoda e Annelida não responderam às elevadas temperaturas no período de duração da amostragem. A partir dos resultados, se levanta a hipótese de ampliação da homogeneidade da comunidade, com redução de grupos funcionais e alterações na cadeia alimentar dos recifes de corais em cenários de estresse térmico, impactando um ecossistema de grande importância biológica e econômica. Apesar de outros estudos descreverem os impactos de picos de temperatura da água do mar (Banha et al. 2019; Duarte et al. 2020; Pereira et. al 2022), ao nosso conhecimento este é um estudo pioneiro relatando o comportamento da comunidade da meiofauna em resposta aos recentes eventos de picos de aquecimento que determinam branqueamento de corais e impactos nos recifes, reafirmando a importância de serem realizados outros estudos analisando o impacto deste evento a nível dos táxons.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M. J. Permutational multivariate analysis of variance. **Department of Statistics, University of Auckland, Auckland**, v. 26, p. 32-46, 2005.
- BANHA, T. N. S. et al. Low coral mortality during the most intense bleaching event ever recorded in subtropical Southwestern Atlantic reefs. **Coral Reefs**, v. 39, n. 3, p. 515-521, 2020.
- BARROSO, M. S. et al. Anthropogenic impacts on coral reef harpacticoid copepods. **Diversity**, v. 10, n. 2, p. 32, 2018.
- BARROSO, M. S. **Efeito da elevação da temperatura da água do mar sobre a meiofauna e Copepoda Harpacticoida de ambiente fital**. 60 páginas. Monografia – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- BRANCH, G. M. Encyclopedia of Ocean Sciences. 1ª edição, p. 242-243. **Editora Academic Press**, 2001.
- CHADWICK, N. E. Spatial distribution and the effects of competition on some temperate Scleractinia and Corallimorpharia. **Marine Ecology Progress Series**, p. 39-48, 1991.
- CHERTOPRUD, E. S.; AZOVSKY, A. I. Seasonal dynamics of the populations of intertidal harpacticoids (Harpacticoida: Copepoda) in the White Sea. **Oceanology**, v. 46, n. 1, p. 71-80, 2006.
- COSTA, C. R. L. Comportamento alimentar e dieta do peixe *Abudefduf saxatilis* nos recifes do sudoeste do Atlântico. 35 páginas. Monografia - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.
- DANOVARO, R. et al. Trophic importance of subtidal metazoan meiofauna: evidence from in situ exclusion experiments on soft and rocky substrates. **Marine Biology**, v. 152, n. 2, p. 339-350, 2007.

DIJKSTRA, J. A.; WESTERMAN, E. L.; HARRIS, L. G. The effects of climate change on species composition, succession and phenology: a case study. **Global Change Biology**, v. 17, n. 7, p. 2360-2369, 2011.

DONNER, S. D. et al. Global assessment of coral bleaching and required rates of adaptation under climate change. **Global Change Biology**, v. 11, n. 12, p. 2251-2265, 2005.

DUARTE, G. A. S. et al. Heat waves are a major threat to turbid coral reefs in Brazil. **Frontiers in Marine Science**, p. 179, 2020.

ESTEVEZ, A. M. et al. Effects of the ocean acidification on the functional structure of coral reef nematodes. **Coral Reefs**, p. 1-14, 2022.

FABRICIUS, K. E. et al. Losers and winners in coral reefs acclimatized to elevated carbon dioxide concentrations. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 3, p. 165-169, 2011.

FEITOSA, João L. L. **Alimentação e ecomorfologia trófica de *Stegastes fuscus* e *S. variabilis* (*Actinopterygii: pomacentridae*) nos recifes de Tamandaré, Pernambuco**. 63 páginas. Dissertação em Oceanografia – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

FELIX, G. et al. Resposta de associações bênticas ao lançamento de resíduos de drenagem urbana. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 19, n. 2, p. 47-57, 2015.

FERREIRA, B. P. et al. The effects of sea surface temperature anomalies on oceanic coral reef systems in the southwestern tropical Atlantic. **Coral reefs**, v. 32, n. 2, p. 441-454, 2013.

GIERE, O. Meiobenthology: **The microscopic motile fauna of aquatic sediments**. Springer-Verlag, Berlin, 2009, 2nd ed.

HOEGH-GULDBERG, O. et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. **Science**, v. 318, n. 5857, p. 1737-1742, 2007.

HUGHES, T. P. et al. (2017b). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. **Nature**, v. 543, p. 373-377.

IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University Press**, New York, NY, USA, 2014.

KENNEDY, A. D.; JACOBY, C. A. Biological indicators of marine environmental health: meiofauna—a neglected benthic component?. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 54, n. 1, p. 47-68, 1999.

KIKUCHI, R. K. P.; LEÃO, Z. M. A. N.; OLIVEIRA, M. D. M. Conservation status and spatial patterns of AGRRA vitality indices in Southwestern Atlantic Reefs. **Revista de biologia tropical**, v. 58, p. 10-32, 2010.

KLEYPAS, J. A.; YATES, K. K. Coral reefs and ocean acidification. **Oceanography**, v. 22, n. 4, p. 108-117, 2009.

KROEKER, K. J. et al. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. **Global change biology**, v. 19, n. 6, p. 1884-1896, 2013.

LEÃO, Z. M. A. N.; DOMINGUEZ, José ML. Tropical coast of Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, 2000, 41, 112–122.

LEÃO, Z. M. A. N. et al. Status of Eastern Brazilian coral reefs in time of climate changes. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 224-235, 2010.

MACHADO, C. P. Uma breve discussão sobre estratégias e processos de dispersão em Ostracoda. **Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada**, v. 1, n. 2, p. 44-48, 2016.

MAIDA, M.; FERREIRA, B. P. Coral reefs of Brazil: an overview. In: **Proceedings of the 8th international coral reef symposium**. Smithsonian Tropical Research Institute Panamá, 1997. p. 74.

MAIDA, M.; FERREIRA, B. P. Os recifes de coral brasileiros. **Oceanografia: Um Cenário Tropical. Recife: Ed. Bagaço**, p. 617-640, 2004.

MCALLEN, R.; BRENNAN, E. The effect of environmental variation on the reproductive development time and output of the high-shore rockpool copepod *Tigriopus brevicornis*. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 368, n. 1, p. 75-80, 2009.

METHODOLOGY, **Product Description, and Data Availability of NOAA Coral Reef Watch's Version 3.1 Daily Global 5km Satellite Coral Bleaching Heat Stress Monitoring Products**. Disponível em: <https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/methodology.php#hospot>. Acesso em: 29 ago, 2022.

MOROSKO, E. M.; ROCHA, R. M. **Tamanho de clareiras e tempo de recolonização no mediolitoral rochoso**. In VII Congresso Latino Americano sobre Ciências del Mar, 1999, Trujillo: Nuevo Norte S. A., v. 01, p. 498-499.

NASCIMENTO, R. **Teste de três tipos de UAS (Unidade Artificial de Substrato) para avaliação da associação de meiofauna em ambiente recifal**. 41 páginas. Monografia – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

PEREIRA, P. H. et al. Unprecedented coral mortality on Southwestern Atlantic (SWA) coral reefs following major thermal stress. **Frontiers in Marine Science**, p. 338.

PRZESLAWSKI, R. et al. Beyond corals and fish: the effects of climate change on noncoral benthic invertebrates of tropical reefs. **Global Change Biology**, v. 14, n. 12, p. 2773-2795, 2008.

ROGERS, S. I.; CLARKE, K. Robert; REYNOLDS, John D. The taxonomic distinctness of coastal bottom-dwelling fish communities of the North-east Atlantic. **Journal of Animal Ecology**, v. 68, n. 4, p. 769-782, 1999.

SANTOS, P. J. P.; CASTEL, J.; SOUZA-SANTOS, L. P. Development time of harpacticoid copepods: some empirical models and implications. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**, v. 79, n. 6, p. 1123-1124, 1999.

SARMENTO, V. C. et al. Effects of seawater acidification on a coral reef meiofauna community. **Coral Reefs**, v. 34, n. 3, p. 955-966, 2015.

SARMENTO, V.C. **Efeito da redução do pH e elevação da temperatura da água do mar sobre a comunidade de meiofauna e associação de Copepoda Harpacticoida**. 160 páginas. Tese em Biologia Animal – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

SARMENTO, V. C. et al. Impact of predicted climate change scenarios on a coral reef meiofauna community. **ICES Journal of Marine Science**, v. 74, n. 4, p. 1170-1179, 2017.

SULLY, S. et al. A global analysis of coral bleaching over the past two decades. **Nature communications**, v. 10, n. 1, p. 1-5, 2019.

ZEPPILLI, D. et al. Is the meiofauna a good indicator for climate change and anthropogenic impacts?. **Marine Biodiversity**, v. 45, n. 3, p. 505-535, 2015.