UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
MESTRADO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DESAFIOS E ABORDAGENS NA IDENTIFICAÇÃO DE ONDAS DE CALOR MARINHAS: UM ESTUDO COMPARATIVO NO OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL

CHRISTIANA DA COSTA DOS SANTOS

Orientador:
Dr. rer. nat. ANDRÉ LUIZ BELÉM

NITERÓI, RJ
2024

CHRISTIANA DA COSTA DOS SANTOS

DESAFIOS E ABORDAGENS NA IDENTIFICAÇÃO DE ONDAS DE CALOR MARINHAS: UM ESTUDO COMPARATIVO NO OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Geologia e Geofísica Marinha.

Orientador: Dr. rer. nat. André Luiz Belém

NITERÓI, RJ
2024

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S237d Santos, Christiana da Costa dos
Desafios e Abordagens na Identificação de Ondas de Calor Marinhas: Um Estudo Comparativo no Oceano Atlântico Tropical / Christiana da Costa dos Santos. - 2024.
121 f.: il.

Orientador: André Luiz Belém.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Niterói, 2024.

1. Ondas de Calor Marinhas. 2. Oceano Atlântico Tropical. 3. El Niño. 4. Índice Solar de Baixa Frequência. 5. Produção intelectual. I. Belém, André Luiz, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. III. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

CHRISTIANA DA COSTA DOS SANTOS

DESAFIOS E ABORDAGENS NA IDENTIFICAÇÃO DE ONDAS DE CALOR MARINHAS: UM ESTUDO COMPARATIVO NO OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre. Área de Concentração: Geociências

Aprovada em 28 de Outubro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
ANDRE LUIZ BELEM
Data: 30/10/2024 17:34:12-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Andre Luiz Belem, Dr. (Orientador)
Universidade Federal Fluminense

Documento assinado digitalmente
JONAS TAKEO CARVALHO
Data: 30/10/2024 10:00:35-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Jonas Takeo Carvalho, Dr.
Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici

Documento assinado digitalmente
ANA LUIZA SPADANO ALBUQUERQUE
Data: 30/10/2024 11:49:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Ana Luiza Spadano Albuquerque, Dr.
Universidade Federal Fluminense

Documento assinado digitalmente
ARTHUR AYRES NETO
Data: 30/10/2024 15:01:02-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Arthur Ayres Neto , Dr.
Universidade Federal Fluminense

Dedico este trabalho aos meus filhos, Theo e Chloe. Vocês são minha maior inspiração e alegria. Que esta jornada pelo conhecimento os encoraje a explorar o mundo com curiosidade e amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a oportunidade de fazer parte de uma instituição de ensino pública, a quem devo a minha formação no curso de graduação, e agora, no programa de pós-graduação. Ter uma universidade pública e gratuita como opção de pós-graduação e com a qualidade da UFF, é de extrema importância na minha formação e de outros alunos que desejam uma excelente formação.

Ao Programa de Pós-graduação Dinâmica dos Oceanos e da Terra e aos funcionários da Universidade Federal Fluminense, pelo comprometimento em garantir infraestrutura e funcionamento dos processos, mesmo em período de pandemia, em especial, à Maristela Moreira e à Laressa Martins, pela sua prontidão em sempre ajudar.

Ao meu orientador, Prof. Andre Belem, pela valiosa parceria de trabalho. Sua orientação presente e respeitosa, marcada pelo incentivo e pelo compartilhamento de conhecimentos, proporcionou uma experiência acadêmica singular. Sem dúvidas, ele é uma inspiração, e sou profundamente grata por todo o apoio. E, ao universo, por esse encontro.

Aos meus amigos, que me dão suporte nos momentos mais difíceis, sendo essenciais para o meu caminhar. Assim, como são excelentes companhias nos momentos de felicidade. Mesmo a distância, eles se fazem presentes em todos os momentos.

Em especial, a Nina Clara, minha amiga de infância, a qual foi a maior incentivadora para a inscrição no mestrado e o caminhar ao longo dela nessa jornada. Apesar de áreas distintas de execução, conseguimos trocar bastante experiências sobre o meio acadêmico. Vê-la entregar o trabalho pronto foi um combustível para não desistir do meu, apesar dos grandes desafios pessoais que enfrentei simultaneamente a execução da dissertação.

À minha família, no geral, pelo apoio concedido ao longo de toda a minha jornada educacional.

Aos meus irmão, Marcos e Luciana por todo o incentivo. A minha irmã Eliana, em especial, por toda a sua dedicação para viabilizar a minha formação, desde o princípio, sendo a minha base.

Aos meus pais, pelos seus ensinamentos e esforços em toda a minha formação. Atualmente, me acompanham de outro plano, mas seus ensinamentos sempre serão o norte das minhas escolhas.

Ao meu marido, Renan Moraes, por me proporcionar um ambiente seguro para execução do meu trabalho acadêmico e ao incentivo nos momentos de exaustão.

Aos meus filhos, Theo e Chloe, por serem meu combustível diário de reinvenção e amor. E, que isso seja inspirador para os desafios que eles possam encontrar.

A mim, pela minha escolha assertiva, por sempre ter acreditado, por ter enfrentado as dificuldades, por ter conseguido me manter motivada, mesmo quando o ambiente não era favorável.

"Você nunca sabe a força que tem, até que a sua única alternativa é ser forte."

— Cora Coral

RESUMO

O estudo investiga as ondas de calor marinhas no Oceano Atlântico Tropical, focando na comparação de metodologias para sua identificação e análise. Utilizando dados de temperatura superficial do oceano provenientes do Projeto PIRATA e do OISST, a pesquisa analisou os padrões e variabilidades das ondas de calor marinhas, destacando a crescente frequência e intensidade desses eventos associada ao aquecimento global. A diversidade de métodos para identificar as ondas de calor marinhas é discutida, evidenciando como a escolha da metodologia pode influenciar significativamente os resultados obtidos. Uma análise detalhada das características das ondas de calor marinhas, incluindo intensidade, duração e extensão, é apresentada, assim como a relação entre esses eventos e fenômenos climáticos como El Niño, Oscilação do Atlântico Norte (NAO) e manchas solares. Os resultados revelam que a metodologia escolhida impacta as conclusões sobre a ocorrência e severidade das MHWs, sublinhando a necessidade de padronização nas abordagens de análise. A pesquisa enfatiza a importância do monitoramento contínuo e da coleta de dados de alta qualidade para uma melhor compreensão das dinâmicas oceânicas e climáticas.

Palavras-chave: Ondas de Calor Marinhas, Oceano Atlântico Tropical, El Niño e Índice Solar de Baixa Frequência.

ABSTRACT

This study investigates marine heatwaves in the Tropical Atlantic Ocean, focusing on the comparison of methodologies for their identification and analysis. Using sea surface temperature data from the PIRATA Project and OISST, the research analyzed the patterns and variabilities of marine heatwaves, highlighting the increasing frequency and intensity of these events associated with global warming. The diversity of methods for identifying marine heatwaves is discussed, emphasizing how the choice of methodology can significantly influence the results obtained. A detailed analysis of the characteristics of marine heatwaves, including intensity, duration, and extent, is presented, as well as the relationship between these events and climatic phenomena such as El Niño, the North Atlantic Oscillation (NAO), and sunspots. The results reveal that the chosen methodology impacts the conclusions regarding the occurrence and severity of marine heatwaves, underscoring the need for standardization in analytical approaches. The research emphasizes the importance of continuous monitoring and the collection of high-quality data for a better understanding of oceanic and climatic dynamics.

Keywords: Marine Heatwaves, Tropical Atlantic Ocean, El Niño, Low-Frequency Solar Index

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Influências para a formação de ondas de calor marinha em escala de tempo e espaço. 26

Figura 2: Diferença entre a curva de climatologia e o limiar em um dia do ano. A) Percentil de 90 demarcado para o cenário da curva normal. B) Percentil de 90 demarcado para a cauda a direita. C) Percentil de 90 demarcado com a cauda para a direita..... 27

Figura 3: Demonstração gráfica dos impactos das MHWs em diferentes setores..... 31

Figura 4: Demonstração gráfica dos métodos para identificação de ondas de calor marinhas: a) Limite contínuo ao longo do tempo; b) Limite definido por percentil de 90th da média climatológica; c) Limite de 99th de percentil da climatológica..... 34

Figura 5: Esquematização das categorias definidas para ondas de calor..... 35

Figura 6: Esquematização das categorias definidas para ondas de calor..... 37

Figura 7: Posição sazonal da ZCIT..... 38

Figura 8: Influência do El Nino e La Nina no Oceano Atlântico Tropical..... 40

Figura 9: Dipolo do Atlântico nos cenários reais e teóricos..... 43

Figura 10 - Localização das estações de coleta utilizadas neste estudo. O código de cada posição das bóias é o mesmo usado nos resultados..... 45

Figura 11: Imagem da bóia oceanográfica, tipo Atlas, em operação..... 46

Figura 12: Localização das áreas do Oceano Pacífico Tropical monitoradas para o estudo do El Niño. O ONI é representativo da anomalia de temperatura da região do Nino 3.4.....50

Figura 13 - Médias móveis das séries temporais do PIRATA e OISST ao longo dos meses, com seus respectivos desvios padrões - Estação 0N35W..... 59

Figura 14 - CResultado da correlação de Pearson descrita para a estação 0N35W..... 60

Figura 15 - Climatologia descritas pelo Ocean Niño Index, publicado pela NOAA (2024).... 61

Figura 16 - Possíveis curvas climatológicas para as ondas de calor marinhas..... 62

Figura 17: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote MarineHeatWaves..... 65

Figura 18: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote PyMHW..... 65

Figura 19: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de

ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo MarineHeatWaves..... 66

Figura 20: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo PyMHW. 67

Figura 21: A - Série temporal com os dados de temperatura superficial da água do mar, a climatologia e o limiar calculado a partir do percentil de 90. B - Detalhe do evento de maior intensidade média e máxima de ondas de calor marinhas da série temporal. C - Detalhe do evento mais duradouro e de maior intensidade acumulada de ondas de calor marinhas da série temporal..... 68

Figura 22: Localização dos eventos ao longo da diferença entre a climatologia e o limiar do percentil de 90..... 69

Figura 23: Distribuição do número de eventos de ondas de calor marinhas calculados a partir dos pacotes MarineHeatWaves, PyMHW e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses..... 70

Figura 24: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote MarineHeatWaves e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses.....71

Figura 25: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote PyMHW e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses..... 71

Figura 26: Transformada de Wavelet do dos dados da nóia do Projeto PIRATA..... 75

Figura 27: Transformada de Wavelet do Índice de Oscilação do El Niño (NOI)..... 76

Figura 28: Análise de cross-wavelet entre as intensidades máximas de ondas de calor marinhas e o índice de El Niño em quatro estações PIRATA. (A) Estação 0N0E, (B) Estação 0N10W, (C) Estação 0N23W e (D) Estação 0N35W..... 79

Figura 29: Transformada de Wavelet do Índice de Oscilação do Atlântico Norte (NAO)..... 81

Figura 30: Análise de cross-wavelet entre o índice de Oscilação do Atlântico Norte e as séries temporais das estações PIRATA. (A) Estação 0N0E, (B) Estação 0N10W, (C) Estação 0N23W e (D) Estação 0N35W.....83

Figura 31: Transformada de Wavelet do Índice de manchas solares..... 84

Figura 32: Análise de cross-wavelet entre o índice de manchas solares e as séries temporais das estações PIRATA. (A) Estação 0N0E, (B) Estação 0N10W, (C) Estação 0N23W e (D) Estação 0N35W..... 86

Figura 17A: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote MarineHeatWaves - 0N3W..... 104
Figura 17B: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote MarineHeatWaves - 0N10W..... 104
Figura 17C: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote MarineHeatWaves - 0N23W..... 104
Figura 17D: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote MarineHeatWaves - 0N35W..... 105
Figura 18A: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote PyMHW - 0N3W..... 106
Figura 18B: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote PyMHW - 0N10W..... 106
Figura 18C: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote PyMHW - 0N23W..... 107
Figura 18D: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote PyMHW - 0N35W..... 107
Figura 19A: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo MarineHeatWaves - 0N3W..... 108
Figura 19B: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo MarineHeatWaves - 0N10W..... 108
Figura 19C: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo MarineHeatWaves - 0N23W..... 109
Figura 19D: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo MarineHeatWaves - 0N35W..... 109
Figura 20A: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo PyMHW- 0N3W..... 110

Figura 20B: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo PyMHW- 0N10W..... 110

Figura 20C: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo PyMHW- 0N23W..... 111

Figura 20D: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo PyMHW- 0N35W..... 111

Figura 21: D - Série temporal com os dados de temperatura superficial da água do mar, a climatologia e o limiar calculado a partir do percentil de 90. E - Detalhe do evento de maior intensidade média e máxima de ondas de calor marinhas da série temporal. F - Detalhe do evento mais duradouro e de maior intensidade acumulada de ondas de calor marinhas da série temporal - 0N3W..... 112

Figura 21: G - Série temporal com os dados de temperatura superficial da água do mar, a climatologia e o limiar calculado a partir do percentil de 90. H - Detalhe do evento de maior intensidade média e máxima de ondas de calor marinhas da série temporal. I - Detalhe do evento mais duradouro e de maior intensidade acumulada de ondas de calor marinhas da série temporal. - 0N10W..... 113

Figura 21: J - Série temporal com os dados de temperatura superficial da água do mar, a climatologia e o limiar calculado a partir do percentil de 90. K - Detalhe do evento de maior intensidade média e máxima de ondas de calor marinhas da série temporal - 0N23W..... 114

Figura 21: L - Série temporal com os dados de temperatura superficial da água do mar, a climatologia e o limiar calculado a partir do percentil de 90. M - Detalhe do evento de maior intensidade média e máxima de ondas de calor marinhas da série temporal. - 0N23W..... 115

Figura 23A: Distribuição do número de eventos de ondas de calor marinhas calculados a partir dos pacotes MarineHeatWaves, PyMHW e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N3W.....115

Figura 23B: Distribuição do número de eventos de ondas de calor marinhas calculados a partir dos pacotes MarineHeatWaves, PyMHW e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N10W..... 116

Figura 23C: Distribuição do número de eventos de ondas de calor marinhas calculados a partir

dos pacotes MarineHeatWaves, PyMHW e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N23W..... 116

Figura 23D: Distribuição do número de eventos de ondas de calor marinhas calculados a partir dos pacotes MarineHeatWaves, PyMHW e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N35W.....117

Figura 24A: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote MarineHeatWaves e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N3W. 117

Figura 24B: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote MarineHeatWaves e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N10W..... 117

Figura 24C: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote MarineHeatWaves e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N23W..... 118

Figura 24D: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote MarineHeatWaves e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N35W..... 118

Figura 25A: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote PyMHW e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N3W..... 119

Figura 25B: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote PyMHW e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N10W..... 120

Figura 25C: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote PyMHW e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N23W..... 120

Figura 25D: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote PyMHW e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N35W..... 121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores impulsionadores das ondas de calor marinhas.....19

Tabela 2: Tipos de Bóias do Projeto PIRATA e data de transição..... 41

Tabela 3: Informações sobre os dados adquiridos do Projeto PIRATA..... 51

Tabela 4: Resultado da Análise de Correlação de Pearson..... 53

Tabela 5: Informações das MHWs em diferentes métodos de análise - PIRATA.....57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **18**

2. OBJETIVOS **21**

2.1. GERAL 21

2.2. ESPECÍFICOS 21

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA **22**

3.1.ASPECTOS GERAIS SOBRE AS ONDAS DE CALOR MARINHAS 22

3.2. MÉTODOS DE MONITORAMENTO E ANÁLISE PARA IDENTIFICAÇÃO DE ONDAS DE CALOR MARINHAS 32

3.3. O CONTEXTO DO OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL 36

3.3.1 - Influências da Zona de Convergência Intertropical 37

3.3.2 - Impactos do El Niño-Southern Oscillation 39

3.3.3 - Zona de formação de Ciclones Tropicais 41

3.3.4 - Influência do Dipolo do Atlântico 42

3.3.5 - Influências de Baixa Frequência (Atividade Solar) 43

4. MATERIAIS E MÉTODOS **44**

4.1 ÁREA DE ESTUDO 44

4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS 45

4.2.1 Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA) 45

4.2.2 Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) 48

4.2.3 Oceanic Niño Index (ONI) 49

4.2.4 Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO) 50

4.3 PROCESSAMENTO DE DADOS 52

4.3.1 Pacote MarineHeatWaves 52

4.3.2 Pacote PyMHW 53

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA 54

4.4.1 Coeficiente de Correlação de Pearson 54

4.4.2 - Transformada Wavelet 55

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 56

6. CONCLUSÕES 87

8. TRABALHOS FUTUROS 89

7. REFERÊNCIAS 90

Apêndice 1 - FIGURAS COMPLEMENTARES 99

1. INTRODUÇÃO

A interação entre os atributos climáticos e a sociedade é um tema amplamente discutido na literatura científica. Segundo o IPCC (2001), entre esses atributos, a temperatura emerge como o fator primordial para a vida humana, com uma influência muito além do que se pode imaginar. Desde a disponibilidade de alimentos e água até a saúde, uma infinidade de aspectos de nossas vidas está intrinsecamente ligada à temperatura.

As variações de temperatura, registradas nos últimos 150 anos, refletem tanto mudanças naturais quanto antropogênicas. Essas variações não foram uniformes geograficamente e não foram constantes ao longo do tempo. No clima, a temperatura coordena os padrões atmosféricos de circulação que influenciam nos padrões de evaporação e precipitação, nas intensidades de tempestades e em outros fenômenos climáticos de larga escala. Além disso, possuem consequências indiretas, influenciando outros fatores climáticos importantes, como o El Nino, por exemplo (IPCC, 1998). O aquecimento atmosférico influencia diretamente na temperatura dos oceanos, já que os oceanos absorvem 90% do excesso de calor provenientes do efeito estufa (Levitus *et al*., 2012). O aumento da temperatura da água do mar, tanto superficialmente, quanto em profundidade, pode provocar importantes impactos diretos, sociais e ambientais, como o aumento do nível do mar e impactos significativos na biodiversidade marinha (Hoegh-Guldberg *et al*., 2007). Além disso, podem causar impactos indiretos, como alterações na intensidade e direção de correntes oceânicas que impactam nos padrões climáticos e na distribuição de nutrientes (Schmittner *et al*., 2008).

Os aumentos de temperatura também estão associados ao aparecimento das ondas de calor. Conceitualmente, as ondas de calor são períodos extremos de aumento da temperatura que persistem por dias a meses, e podem se estender por milhares de quilômetros (Frölicher *et al*., 2018). Na região oceânica, as ondas de calor foram denominadas pela primeira vez, em 2011, quando relatou um aquecimento da água do mar combinado com o fenômeno de La Nina, sem precedentes ao longo da costa sudoeste da Austrália. Esse evento específico causou um grande impacto biológico na região, além de ter gerado consequências socioeconômicas significativas. Esse impacto impulsionou a realização de estudos mais aprofundados e atenção da comunidade científica para esse fenômeno, visando aprimorar a capacidade de prever esse tipo de ocorrência.

Apesar de ter ganho oficialmente um nome de um fenômeno somente em 2011, as ondas de calor marinhas possuem registros muito mais antigos e também podem estar associadas ao El Nino, como descrito por Philander (1983). No entanto, em escala global, esses eventos de temperatura extrema têm aumentado em frequência e intensidade (Holbrook *et al.,* 2019). Ao longo do tempo, a identificação das ondas de calor marinha tem sido guiada por uma variedade de protocolos metodológicos. Cada metodologia possui suas próprias características e critérios de identificação, o que resulta em uma diversidade significativa de abordagens. Essa diversidade metodológica deve ser levada em consideração ao comparar os eventos identificados por diferentes autores, pois pode haver variações substanciais nos resultados dependendo do método utilizado. Por exemplo, alguns estudos podem utilizar percentis específicos para definir anomalias de temperatura, enquanto outros podem empregar limiares fixos ou técnicas de análise de séries temporais. Esta variação metodológica é essencial para entender e comparar as MHWs relatadas na literatura.

Além disso, a escolha e definição do método a ser utilizado não é um processo trivial e se baseia no objetivo específico do estudo e nos possíveis bancos de dados disponíveis para viabilizar o estudo (Oliver *et al*., 2018). A seleção de um método adequado envolve considerar a resolução temporal e espacial dos dados, a extensão geográfica do estudo e a disponibilidade de dados históricos. Em muitas regiões, especialmente em áreas equatoriais, a coleta e disponibilização de dados apresentam desafios significativos. A escassez de estações de monitoramento, a variabilidade dos dados e a falta de registros históricos consistentes podem limitar a precisão e a abrangência dos estudos de MHWs. A dificuldade na coleta de dados é exacerbada pela natureza esparsa e intermitente das observações oceânicas em algumas áreas. Por exemplo, os dados de temperatura da superfície do mar (SST) são essenciais para a identificação de MHWs, mas podem ser limitados pela cobertura irregular de satélites e bóias oceanográficas. Além disso, as condições meteorológicas e oceanográficas podem afetar a precisão dos sensores e a qualidade dos dados coletados (Deser *et a*l. 2010). A disponibilização desses dados para a comunidade científica também pode ser um obstáculo, devido a restrições de acesso, formatos de dados inconsistentes e a necessidade de processamento e validação extensivos. Oliver *et al*. (2021) ressaltam que a qualidade dos dados disponíveis influencia diretamente a escolha do método de identificação de MHWs. Estudos que dispõem de dados de alta resolução e abrangência temporal tendem a utilizar

metodologias mais complexas e detalhadas, enquanto estudos com dados limitados podem recorrer a abordagens mais simples e generalizadas. A variabilidade na disponibilidade de dados também pode levar a uma inconsistência nos resultados, dificultando a comparação entre diferentes regiões e períodos de tempo.

A compreensão desses desafios é essencial para o desenvolvimento de metodologias robustas e a interpretação precisa dos eventos de MHWs, especialmente em áreas com dados limitados, e a principal motivação deste estudo está apoiada no reconhecimento dessas dificuldades, e na tentativa de direcionar esforços para melhorar a infraestrutura de coleta de dados e promover a padronização de métodos. Com isso, acreditamos que a comparação de resultados entre diferentes estudos contribui para um entendimento mais completo dos impactos das ondas de calor marinhas.

Este trabalho tem como objetivo comparar e aprimorar os métodos operacionais existentes para identificar ondas de calor marinhas no Atlântico Equatorial.

Além disso, incluímos aqui uma metodologia que utiliza a rede observacional existente, permitindo o estudo dessas ondas de calor utilizando dados *in situ* coletados por bóias oceanográficas na região do Atlântico Equatorial. O especial interesse nesta região é justificado pelas suas particularidades significativas, devido à influência de eventos únicos, como El Niño e a ZCIT (Oliver *et al*., 2018).

A comparação entre metodologias é importante para entender como a diversidade de protocolos existentes pode levar a variações nos resultados de identificação de MHWs . Além disso, a análise de dados *in situ* permite uma compreensão mais detalhada dos eventos de calor extremo no oceano, fornecendo insights valiosos sobre a sua frequência, intensidade e impacto ecológico (Holbrook *et al*. 2019). A região do Atlântico Equatorial é particularmente desafiadora para esses estudos devido à sua variabilidade climática e à influência de fenômenos como El Niño, que podem intensificar ou modificar as características das MHWs (Cai *et al*., 2018).

Portanto, este estudo visa não apenas aprimorar a precisão na identificação de MHWs, mas também contribuir para um melhor entendimento das dinâmicas oceânicas e climáticas

específicas do Atlântico Equatorial, que são frequentemente moduladas por eventos climáticos globais e regionais.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

O objetivo deste trabalho é analisar as ondas de calor na região tropical do Oceano Atlântico, utilizando diversas fontes de dados de acesso público e avaliando as metodologias propostas para sua identificação e monitoramento. Com essa abordagem, busca-se entender os padrões e variabilidades dessas ondas de calor, contribuindo para uma análise mais detalhada dos processos climáticos que podem influenciar a ocorrência desses eventos do contexto do Atlântico Tropical.

2.2. ESPECÍFICOS

- Compreender os desafios atuais na análise das ondas de calor marinhas e os possíveis contornos.
- Analisar as variações nos resultados obtidos a partir das diferentes fontes de dados.
- Comparar metodologias de análise.
- Analisar os eventos mais significativos ao longo do tempo e correlacionar os resultados com a sazonalidade, bem como com os eventos climatológicos e oceanográficos ocorridos no mesmo período.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1.ASPECTOS GERAIS SOBRE AS ONDAS DE CALOR MARINHAS

As ondas de calor, primeiramente identificadas e classificadas na região atmosférica, também possuem ocorrência na região oceânica e se formam devido a combinação de fatores climáticos e oceanográficos. São eventos climáticos extremos que se caracterizam pelo aumento anômalo e persistente da temperatura da superfície do mar em comparação com a média histórica. Definidos como períodos em que a temperatura da superfície do mar excede um determinado limiar por um intervalo de tempo prolongado, as ondas de calor marinhas podem ocorrer em várias escalas temporais e espaciais e são amplamente reconhecidas como uma manifestação do aquecimento global e das mudanças climáticas (Hobday *et al*., 2016).

As ondas de calor marinhas podem ser originadas/impulsionadas por condições atmosféricas e oceânicas significativas. Para determinar influências do oceano x atmosféricas para as ondas de calor identificadas superficialmente, é importante mencionar a equação da tendência de temperatura na camada de mistura é dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{H}\int_{-H}^{0}(\mathbf{u}\cdot\nabla_h T)dz + \frac{Q}{\rho C_p H} + \text{residual}$$

,

onde:

$\frac{\partial T}{\partial t}$ é a taxa de variação temporal da temperatura média na coluna de água. Esse termo representa como a temperatura média muda ao longo do tempo

H é a profundidade da coluna de água.

u é o vetor velocidade horizontal da água. Este vetor tem componentes nas direções horizontais (u, v) e descreve o movimento da água ao longo da superfície.

$\nabla_h T$ é o gradiente horizontal da temperatura. gradiente horizontal da temperatura. Representa as variações de temperatura ao longo das direções horizontais (x, y) na coluna de água.

$\int_{-H}^{0}(\cdots)\,dz$ é a integral ao longo da profundidade da coluna de água. Esta integral acumula os efeitos ao longo de toda a profundidade da coluna.

Q é a taxa de fluxo de calor por unidade de área na superfície da água. Representa a quantidade de energia térmica que entra ou sai da superfície da coluna de água.

ρ é a densidade da água. Uma constante que descreve a massa por unidade de volume da água.

C_p é a capacidade calorífica específica da água. Representa a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de água em um grau Celsius.

residual é a representação de outros possíveis termos não especificados na equação, que podem incluir efeitos adicionais como difusão turbulenta, processos biológicos, ou outras fontes e sumidouros de calor, porém normalmente essas contribuições são desprezíveis quando comparadas aos processos locais e não-locais.

Conceitualmente, o primeiro termo é a advecção horizontal e descreve o transporte de calor devido ao movimento horizontal da água. Esse termo é responsável por redistribuir o calor dentro da coluna de água, considerando as variações de temperatura horizontal. Já o segundo termo considera a quantidade de calor por unidade de área Q, a densidade da água ρ e a capacidade calorífica específica C*p*. E por último, o valor residual é descrito por fluxos de calor horizontal por redemoinhos e o fluxo de calor na base da camada de mistura devido à perda radiativa de calor, difusão vertical, engolfamento e advecção vertical (Holbrook *et al*., 2019).

Utilizando a equação mencionada, o valor da taxa de variação temporal da temperatura média precisa ser suficientemente grande e positiva para que a temperatura da superfície da água do mar alcance uma anomalia com intensidade e duração necessárias para a identificação de uma onda de calor. No entanto, para que essa variação ocorra, é necessário entender os fatores impulsionadores das ondas de calor marinhas.

Para compreender os fatores que impulsionam as ondas de calor marinhas, é importante analisar um conjunto de mecanismos que, coletivamente, geram esses eventos

extremos. Esses fatores podem ser divididos em processos locais e mecanismos de forçantes climáticas em larga escala, além de processos de teleconexão que conectam essas duas escalas. Os processos locais são aqueles que afetam diretamente a evolução da temperatura do oceano em uma determinada área, especialmente na camada superficial mista. Já os processos climáticos referem-se a modos de variabilidade climática de grande escala que podem influenciar a ocorrência de MHWs, seja remotamente ou localmente. Por fim, os processos de teleconexão são mecanismos que conectam os processos climáticos com os processos locais que afetam as temperaturas do oceano. A Tabela 1 exibe exemplos de fenômenos em cada processo descrito anteriormente.

Tabela 1: Fatores impulsionadores das ondas de calor marinhas

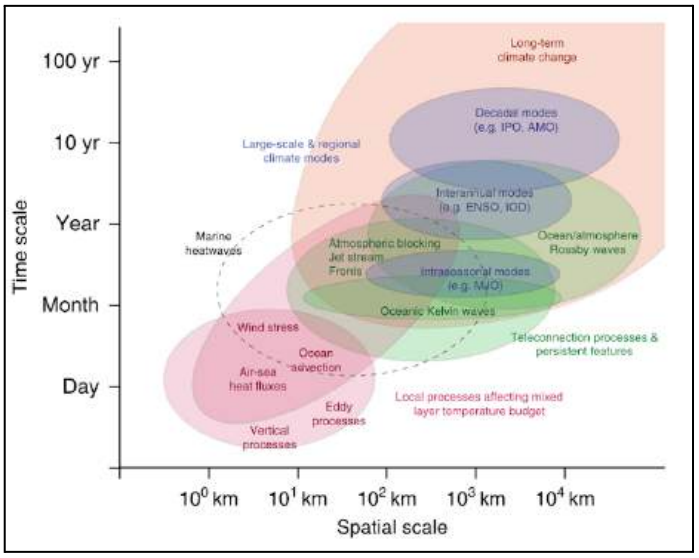
MARINE HEAT WAVE DRIVERS		
LOCAL PROCESSES	CLIMATIC PROCESSES	TELECONNECTION PROCESSES
Ocean Advection	El Niño-Southern Oscillation	Atmospheric Blocking
	Central Pacific El Niño	Aleutian Low
	Interdecadal Pacific Oscillation	Sea Level Pressure
	Pacific Decadal Oscillation	Jet Stream position
Eddy heat flux	Indian Ocean Dipole	Pacific North American Pattern
	Madden-Julian Oscillation	Rossby Wave (Atmospheric)
	Northern Annular Mode	Angola-Benguela Front
Air-sea heat flux	North Atlantic Oscillation	Baroclinic Instability
	North Pacific Gyre Oscillation	Kelvin Wave (Oceanic)
	North Pacific Oscillation	Rossby Wave (Oceanic)
Vertical Processes (entrainment, turbulent mixing, thermocline deepening)	Atlantic Multi-decadal Oscillation	Regional wind stress change
	Southern Annular Mode	Regional air-sea coupling
	Asian Summer Monsoon	Local wind stress change

Fonte: Holbrook *et al*., 2019

Isso torna o estudo das ondas de calor complexo, pois são resultado de uma interação complexa entre processos locais que diretamente alteram a temperatura da água e mecanismos climáticos de larga escala que modulam essas condições. Exigindo assim, análise de uma variedade de fenômenos e condições externas de diferentes origens. É necessário considerar variáveis climáticas, oceânicas e atmosféricas, entre outras, para compreender plenamente as causas e os mecanismos por trás das ondas de calor marinhas. A Figura 1 mostra os diversas

possíveis origens da onda de calor e sua escala no tempo e espaço, exemplificando um resultado multifatorial para as origens das ondas de calor marinhas.

Figura 1: Influências para a formação de ondas de calor marinha em escala de tempo e espaço.



Fonte: Holbrook *et al*., 2019

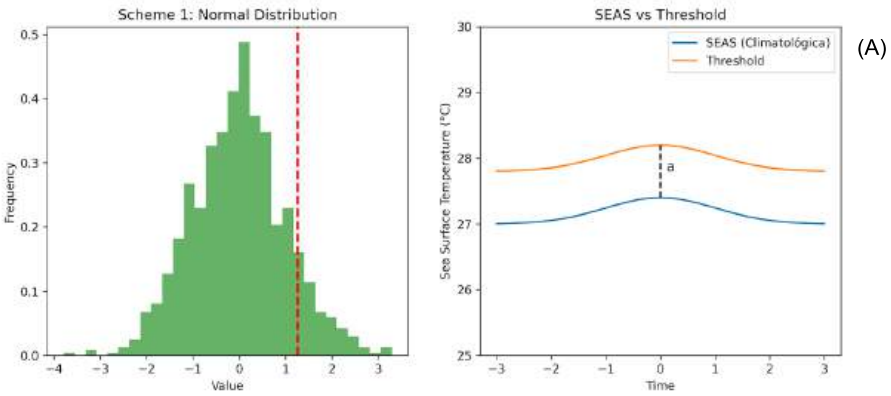
As principais características das ondas de calor marinhas incluem intensidade, duração e extensão. A intensidade refere-se à magnitude do aumento da temperatura em relação à média histórica, geralmente expressa em graus Celsius acima do normal, é definida como a diferença entre o pico da temperatura da superfície do mar durante o evento e a climatologia, que é a média das temperaturas para um determinado período. Essa definição pode gerar confusão, pois muitas vezes é interpretada como um indicativo de que uma maior intensidade implica uma categoria mais elevada de onda de calor. No entanto, essa percepção é enganosa. A categoria de uma onda de calor é determinada pela diferença entre a temperatura do limiar – que é a temperatura crítica para definir uma MHW – e a climatologia, não pela intensidade máxima em si. Portanto, é possível que uma onda de calor apresenta um valor de intensidade máxima elevado, mas ainda assim não alcance uma categoria significativa..

Essa confusão se deve, em parte, à normalidade da curva de temperatura para cada dia do ano, que é fundamental na avaliação das ondas de calor. A análise da normalidade permite entender como as temperaturas variam ao longo do ano, ajudando a definir a climatologia e, consequentemente, o limiar para a categoria das ondas de calor. Assim, enquanto a

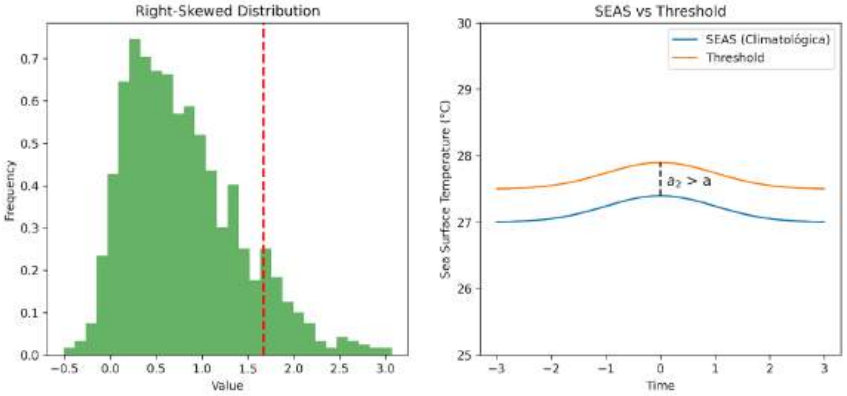
intensidade máxima reflete um evento específico de calor extremo, a categoria considera a posição desse evento em relação ao histórico de temperaturas para dias correspondentes em anos anteriores. Essa distinção deve ser analisada para uma correta interpretação e análise das ondas de calor marinhas e suas implicações climáticas e ecológicas. A Figura 2 mostra como essas diferenças nos valores entre a climatologia e o limiar, influenciado pela normalidade do dia analisado.

A duração é o período de tempo durante o qual as temperaturas permanecem acima do limiar definido, que pode variar de alguns dias a várias semanas ou meses. A extensão refere-se à área geográfica afetada pelo evento, que pode variar desde regiões locais até amplas áreas oceânicas. Estudos têm mostrado que a intensidade e a duração das ondas de calor marinhas têm aumentado globalmente, enquanto a extensão pode variar dependendo das condições atmosféricas e oceanográficas locais (Frölicher *et al.*, 2018; Oliver *et al.*, 2018). Este aumento na intensidade e na duração das MHWs tem implicações diretas para os ecossistemas marinhos, uma vez que condições de temperatura mais extremas e prolongadas intensificam os impactos ecológicos desses eventos.

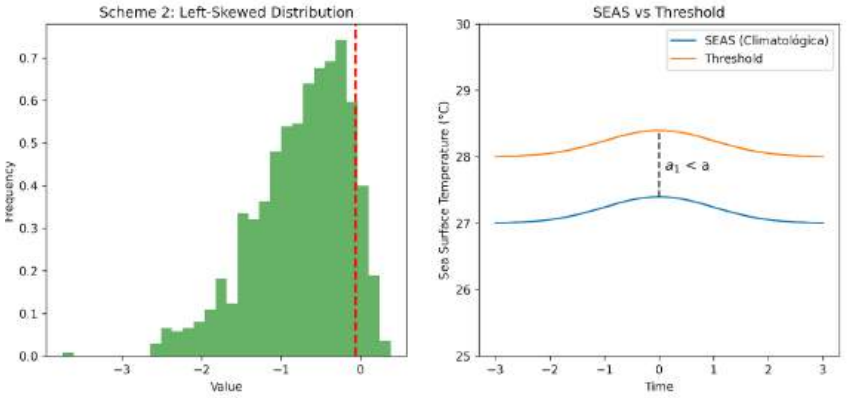
Figura 2: Diferença entre a curva de climatologia e o limiar em um dia do ano. A) Percentil de 90 demarcado para o cenário da curva normal. B) Percentil de 90 demarcado para a cauda a direita. C) Percentil de 90 demarcado com a cauda para a direita.



(Figura continua na próxima página)



(B)



(C)

As ondas de calor marinhas exercem um impacto profundo e frequentemente letal sobre a biologia marinha. Quando a temperatura da água do mar aumenta de forma anômala e prolongada, diversas espécies marinhas enfrentam estresse térmico, o que pode resultar em mortalidade em larga escala. Este fenômeno, ainda pouco estudado, requer maior atenção e investigação devido à urgência da questão climática e seus efeitos devastadores sobre os ecossistemas marinhos. A elevação da temperatura da água durante as ondas de calor marinhas não só afeta diretamente a biologia marinha, mas também altera os processos ecológicos e biogeoquímicos. Por exemplo, o aumento da temperatura pode acelerar o metabolismo dos organismos marinhos, aumentando suas necessidades de oxigênio e recursos alimentares. No entanto, simultaneamente, a disponibilidade de oxigênio pode diminuir, criando um cenário onde a demanda supera a oferta. Além disso, a temperatura elevada pode alterar as redes alimentares, favorecendo algumas espécies enquanto outras declinam,

resultando em uma redistribuição de espécies e mudanças nos ecossistemas marinhos (Smale *et al*., 2019). Espécies que não conseguem migrar para áreas mais frias ou adaptar-se rapidamente às mudanças de temperatura são especialmente vulneráveis. Por exemplo, durante eventos de MHWs, como o "The Blob" no Pacífico Norte, houve uma mortalidade massiva de organismos marinhos, incluindo peixes, aves marinhas e mamíferos marinhos. A alta mortalidade é muitas vezes exacerbada pela falta de oxigênio, uma consequência comum do aquecimento, que reduz a capacidade de retenção de oxigênio na água e aumenta a taxa metabólica dos organismos marinhos (Breitburg *et al.,* 2018). No entanto, em regiões costeiras ou em áreas onde ecossistemas mais sensíveis estão presentes, o componente biológico desempenha um importante papel na determinação da intensidade, duração e presença das ondas de calor marinhas (Hobday *et al*., 2016). Apesar das temperaturas anormalmente elevadas da água do mar terem aumentado em aproximadamente 38% das regiões costeiras mundiais, os ecossistemas marinhos são pouco estudados, com a literatura sendo bastante pontual em alguns eventos extremos (Wernberg *et al*., 2013). Não serão todas as espécies diretamente afetadas por ondas de calor marinhas, mas sim as espécies mais vulneráveis ao calor. O prejuízo em algumas espécies é um fator fundamental para o desequilíbrio do ecossistema. Entre os ecossistemas marinhos impactados, os recifes de corais são os mais estudados por serem sensíveis à mudança de temperatura e de grande importância ecológica.

Os corais, por exemplo, são particularmente vulneráveis ao aumento da temperatura da superfície do mar, o que pode provocar eventos de branqueamento. Esses eventos ocorrem quando corais expostos a temperaturas elevadas expelindo suas zooxantelas simbióticas, levando a uma perda de cor e, frequentemente, à morte do coral se as condições não melhorarem (Hughes *et al*. 2017). O branqueamento não só reduz a biodiversidade dos recifes de corais, mas também afeta as espécies que dependem desses habitats para abrigo e alimentação. Os recifes de corais branqueados podem levar décadas para se recuperarem e, em muitos casos, a recuperação completa pode não ocorrer devido à frequência crescente desses eventos de calor.

Além das espécies coralíneas, as ondas de calor marinhas podem afetar diretamente a distribuição geográfica e os ciclos sazonais de muitas outras espécies marinhas (Mills *et al*. 2013). Caputi *et al*. (2016) observaram a ocorrência de ondas de calor nos oceanos ao longo

da costa ocidental da Austrália, onde mudanças na distribuição de várias espécies de peixes resultaram em impactos negativos na pesca local. A redução das populações de peixes pode prejudicar não apenas o ecossistema, mas também as comunidades que dependem desses recursos para sua subsistência e economia. Em 2012, a costa noroeste do Oceano Atlântico foi atingida por uma intensa onda de calor marinha, afetando significativamente o ciclo de vida sazonal de lagostas. No estado do Maine, Estados Unidos, a produção de lagosta durante a primavera é uma atividade econômica importante para a região. As lagostas, que normalmente migram das águas profundas para as águas costeiras mais aquecidas na primavera, fizeram essa movimentação três semanas antes do esperado devido ao aumento das temperaturas da água do mar (Mills *et al*., 2013). Esse deslocamento antecipado resultou em um período de captura mais prolongado, permitindo uma maior quantidade de lagostas capturadas. A captura intensiva pode ter consequências negativas para o próximo ciclo de produção, pois diminui o número de lagostas adultas disponíveis para reprodução futura.

Além das preocupações ecológicas, os impactos econômicos e sociais também foram críticos. A captura massiva de lagostas levou a uma queda considerável nos preços, já que a oferta foi maior que a demanda, prejudicando a estratégia econômica dos pescadores locais, que enfrentaram dificuldades financeiras. Não só os pescadores estadunidenses do Maine, mas também os pescadores canadenses sofreram uma crise, pois as lagostas americanas tornaram-se mais baratas, sendo a primeira opção dos mercados canadenses, o que fez despencar os preços das lagostas canadenses.

Sendo assim, o impacto negativo sobre os corais e a biodiversidade marinha pode afetar diretamente setores econômicos que dependem desses ecossistemas. A indústria pesqueira, por exemplo, é afetada de várias maneiras, incluindo a diminuição das populações de peixes devido às alterações no habitat e nas condições ambientais, o que pode reduzir a captura e aumentar a incerteza no fornecimento de pescado (IPCC, 2022) O turismo costeiro, que frequentemente depende de ambientes marinhos saudáveis e atrativos, pode sofrer com o deterioramento dos recifes de corais e a redução da biodiversidade marinha, afetando a atração de turistas e a receita associada (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007). Além disso, a indústria marítima pode enfrentar desafios adicionais, como a deterioração das infraestruturas e o aumento dos custos de operação devido às alterações nas condições oceânicas (Ng *et al*.,

2013). Esses impactos econômicos são intrinsecamente ligados aos efeitos ecológicos das MHWs e também têm repercussões na saúde humana.

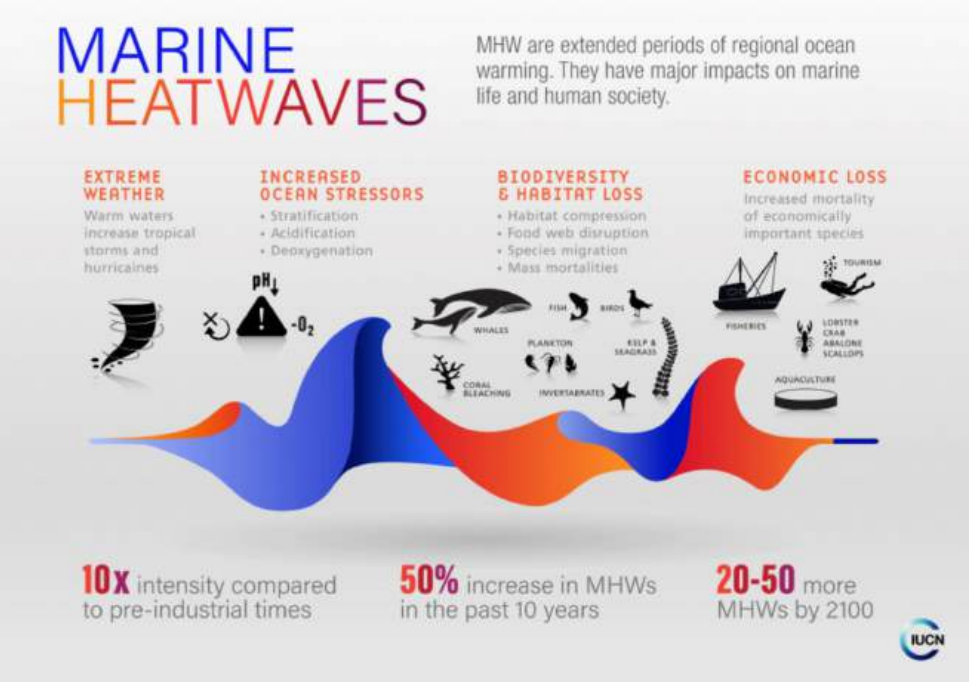
As ondas de calor marinhas também têm implicações para a saúde humana e os ecossistemas marinhos. O aumento da temperatura da água pode promover a proliferação de algas nocivas, que podem produzir toxinas prejudiciais tanto para os organismos marinhos quanto para os seres humanos que consomem produtos do mar contaminados (Anderson *et al*., 2012). Além disso, os MHWs podem exacerbar problemas de saúde relacionados ao calor e à qualidade da água, impactando comunidades costeiras que dependem diretamente dos recursos marinhos para subsistência e bem-estar (Ebi *et al*., 2018). Esses efeitos ressaltam a necessidade de monitoramento contínuo e de estratégias de mitigação para proteger tanto os ecossistemas marinhos quanto a saúde humana. A Figura 3 mostra o impacto das MHWs nos setores já descritos.

A evolução das ondas de calor marinhas ao longo do tempo mostra uma tendência clara de intensificação e maior frequência. Estudos históricos indicam que as MHWs têm se tornado mais comuns e severas nas últimas décadas, um fenômeno amplamente associado ao aquecimento global e às mudanças climáticas. De acordo com estudos de Hobday *et al* (2016), os registros históricos revelam que eventos de MHWs que antes eram raros estão se tornando cada vez mais frequentes e intensos, refletindo o aumento das temperaturas médias globais. Além disso, a análise de séries temporais de dados de temperatura da superfície do mar mostra um aumento significativo na duração e na intensidade dos eventos de MHWs desde o final do século XX, o que destaca a evolução contínua desses fenômenos climáticos extremos (Frölicher *et al*., 2018). Esta tendência global reforça a necessidade urgente de monitoramento contínuo e de estratégias adaptativas para lidar com os impactos crescentes das MHWs.

Reduzir os impactos das MHWs exige uma abordagem integrada que combina a mitigação das causas subjacentes e a implementação de medidas específicas para proteger os ecossistemas e as comunidades costeiras. A mitigação das MHWs está intrinsecamente ligada à redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que o aquecimento global é o principal motor desses eventos extremos. A adoção de políticas climáticas rigorosas, como a promoção de energias renováveis e a melhoria da eficiência energética, é importante para limitar o aumento das temperaturas globais e, por conseguinte, a frequência e intensidade das

MHWs (IPCC, 2023). Além disso, a proteção e a restauração de habitats naturais, como manguezais e recifes de corais, podem aumentar a resiliência dos ecossistemas marinhos ao oferecer refúgios para espécies vulneráveis e atenuar os efeitos do aumento da temperatura (Gedan *et al*., 2011). Práticas de gestão sustentável das pesqueiras e a implementação de zonas de proteção marinha também são fundamentais para reduzir a pressão sobre os ecossistemas e permitir sua recuperação após eventos de MHWs (Mora *et al*., 2013).

Figura 3: Demonstração gráfica dos impactos das MHWs em diferentes setores.



Fonte: https://iucn.org/resources/issues-brief/marine-heatwaves

A previsão de aumento de intensidade e frequência das ondas de calor marinhas, mencionadas também por Holbrook *et al*. (2019) está sendo um combustível para o estudo das ondas de calor na comunidade biológica. Apesar dos inúmeros trabalhos que estão sendo realizados dentro da comunidade científica, o esforço ainda não é suficiente para prever uma solução ou preparação da população para acontecimentos futuros. Para as comunidades costeiras, é fundamental o desenvolvimento de planos de gestão de risco que integrem a previsão e o monitoramento das MHWs, permitindo uma resposta rápida e eficaz para minimizar os impactos econômicos e sociais. A educação e a conscientização das

comunidades sobre os riscos e as melhores práticas de adaptação, como a diversificação das fontes de renda e a melhoria das infraestruturas costeiras, também são essenciais para aumentar a resiliência local (Ebi *et al*., 2018). Além disso, a colaboração entre governos, cientistas e comunidades locais pode facilitar a implementação de medidas adaptativas e promover uma abordagem coesa para enfrentar os desafios impostos pelas MHWs (Leslie & McLeod, 2007).

3.2. MÉTODOS DE MONITORAMENTO E ANÁLISE PARA IDENTIFICAÇÃO DE ONDAS DE CALOR MARINHAS

A análise de ondas de calor marinhas é fundamental para entender a variabilidade e a mudança climática dos oceanos. Existem vários métodos desenvolvidos para identificar e quantificar esses eventos de forma eficaz, cada um com suas próprias vantagens e limitações.

Um dos métodos utilizados para a detecção de ondas de calor marinhas é aquele que estabelece um limite com base em temperatura absoluta contínua no tempo. Geralmente são utilizados como limites máximos de temperatura da água que uma espécie pode existir sem prejuízo de suas funções fisiológicas. Como exemplo, é importante citar os estudos de branqueamento de corais, definidos por Liu *et al*. (2014). O limite máximo de temperatura é definido com um acréscimo de 1°C no valor máximo da média mensal. A desvantagem desse tipo de abordagem é que maiores valores de anomalias de temperaturas podem também atingir o inverno e não serão identificadas com esse tipo de método.

Outro método mais versátil e utilizado atualmente é o apresentado por Hobday (2016), onde a identificação de ondas de calor marinhas é dada por um limite variável baseado na sazonalidade climatológica. A fim de aprofundar melhor os detalhes deste conceito, é necessário entender como a base climatológica é definida dentro desse contexto. A climatologia é estabelecida com base em um período de 30 anos de temperatura da água do mar, conforme recomendado por estudos anteriores que influenciam e impulsionam os processos e fenômenos oceânicos, como o El Niño (Trenberth *et al*., 2002). No entanto, quando não é possível dispor de uma série temporal tão longa, é fundamental explicar o período utilizado para o cálculo da climatologia. A climatologia será definida em relação à estação do ano, abrangendo todos os dados dentro de uma janela de 11 dias centrada na

estação em questão, a partir da qual a média climatológica e o limiar serão calculados. Sendo assim, a detecção de ondas de calor marinha é dada para temperaturas acima do percentil de 90 com referência climatológica, como também é utilizado nas ondas de calor atmosféricas. Além disso, para caracterizar um evento como uma onda de calor marinha, este deve ter uma duração superior a cinco dias, sendo considerado discreto, com início e fim bem definidos. No entanto, segundo a definição proposta, lacunas de dois dias ou menos entre eventos, seguidas por períodos de cinco dias ou mais, serão consideradas como um único evento contínuo, em alinhamento com definições semelhantes aplicadas a ondas de calor atmosféricas (Hobday *et al*., 2016). O limite com percentil de 90, utilizado por Hobday (2016), gera muitas ondas de calor marinhas que não possuem um grande impacto ecológico no ambiente.

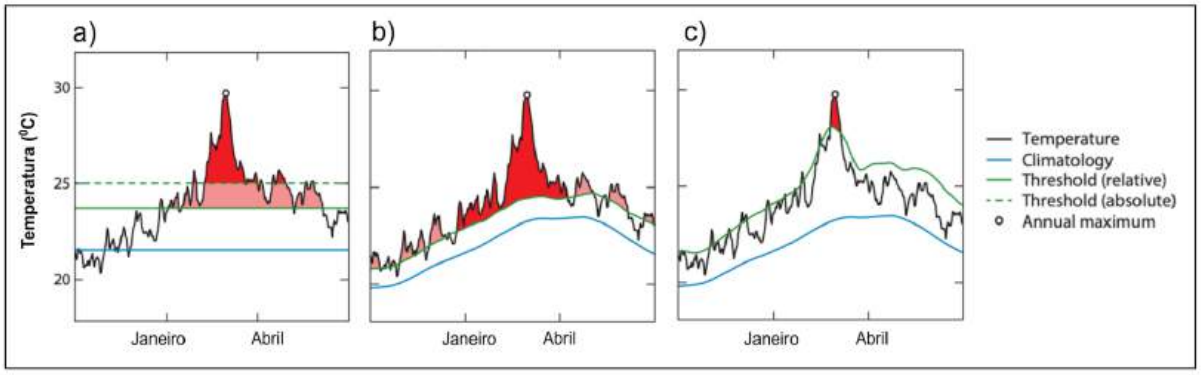
Com o objetivo de detectar ondas de calor que tenham um impacto significativo, Frölicher *et al.* (2018) utilizou a mesma ideia metodológica que (Hobday *et al*. 2016), porém determinou como limite o percentil de 99. O alto limite empregado gera algumas dificuldades que devem ser levadas em consideração, como por exemplo, a utilização de um registro observacional muito longo, o que pode ser um desafio para alguns registros observacionais.

Oliver *et al*. (2021) gerou alguns gráficos para exemplificar os diferentes métodos de análises de ondas de calor marinhas, utilizando dados para as ondas de calor da costa oeste da Austrália em 2011, publicados por Pearce & Feng (2013). A Figura 4 apresenta os gráficos de Oliver *et al*. (2021) para os métodos descritos.

Desastres ambientais ou eventos climáticos extremos como furacões, ciclones e terremotos recebem uma classificação de intensidade definida em escalas e/ou são nomeados seguindo alguns critérios. A classificação ou nomenclatura desses eventos é importante para que sejam rapidamente identificados e conhecidos pelo público e pela comunidade científica. Além do que, a existência de uma classificação permite a comparação dos eventos ao redor do mundo. Registros históricos de desastres naturais são amplamente divulgados na literatura com nomes formais ou denominados em escalas, o que auxilia na comunicação. Assim como eventos extremos, as ondas de calor marinhas também podem ser classificadas, seguindo alguns critérios. Segundo Hobday *et al*. (2016), classificações de ondas de calor marinha possuem uma clara dicotomia, onde ondas quantitativamente expressivas podem ter resultados biológicos mais suaves quando comparados com eventos menos intensos. Não só a

intensidade do evento, mas como a comunidade biológica vai reagir a esse aquecimento deveria ser levada em consideração em uma classificação.

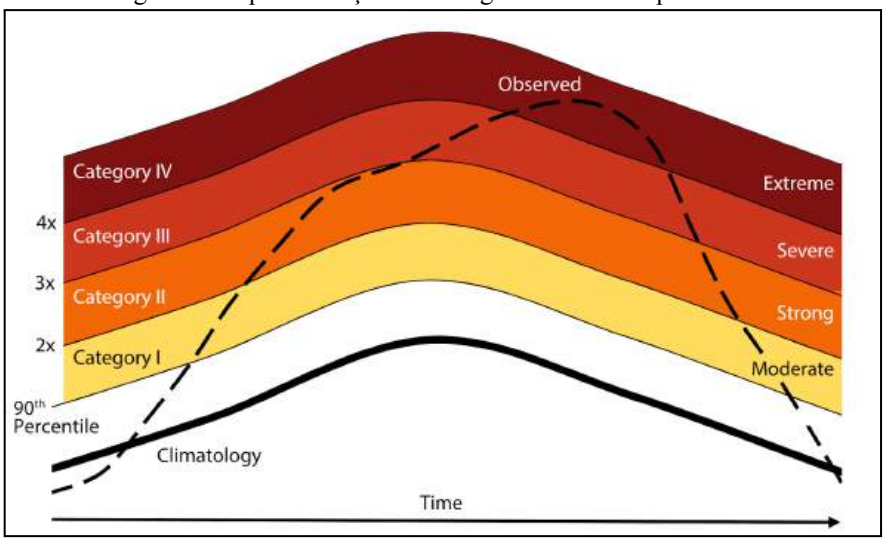
Figura 4: Demonstração gráfica dos métodos para identificação de ondas de calor marinhas: a) Limite contínuo ao longo do tempo; b) Limite definido por percentil de 90th da média climatológica; c) Limite de 99th de percentil da climatológica.



Fonte: Oliver *et al.*, 2021.

Além dos métodos para identificação das ondas de calor marinhas já expostas, Hobday *et al*. (2018) definiu uma classificação de ondas de calor marinha prática, simples, com o objetivo de ser difundida e facilmente entendida pela comunidade científica. A categorização do evento só é possível ser realizada quando o evento está finalizado, pois é considerada a intensidade máxima. No entanto, é possível classificar o evento ao longo do seu acontecimento, à medida que ocorre o fortalecimento e o enfraquecimento do aquecimento, assim como também acontece com os furacões. Assim que o evento é concluído, é possível classificar o evento, como um todo, em categorias, denominadas como moderada - I, forte - II, severa - III, extrema - IV. A base de cálculo desta escala de intensidade é fundamentada na própria definição de ondas de calor marinha e no método publicado por Hobday *et al*., (2016), onde é definida a climatologia e o percentil de 90 das intensidades encontradas. As categorias são definidas a partir dos múltiplos cálculos entre os valores da climatologia e o percentil de 90. Sendo assim, a categoria I é definida entre o valor do percentil de 90 até duas vezes o valor da diferença entre climatologia e percentil de 90. As outras categorias, são definidas a partir da mesma base de cálculo, sendo a categoria IV definida como valores maiores de 4 vezes a diferença entre climatologia e o percentil de 90th, como descrito na Figura 5.

Figura 5: Esquematização das categorias definidas para ondas de calor.



Fonte: Hobday *et al*, 2018.

Em geral, para garantir comparações consistentes entre diferentes ondas de calor, é importante que todas as ondas de calor sejam calculadas com a mesma base climatológica pois com bases climatológicas distintas, as referências para comparação não são as mesmas (Hobday *et al*., 2016).

Seguindo a classificação de Hobday *et al* (2018), mesmo após a classificação, existem alguns critérios que devem ser levados em conta quando estes eventos são classificados. O primeiro critério é a impossibilidade de classificação do evento enquanto o mesmo está acontecendo. A classificação só pode ser definida quando o evento termina, pois variáveis como duração, intensidade e taxa de decaimento de temperatura são levados em conta para a classificação. O segundo critério é a análise pós classificação. Levar em consideração os impactos associados a biota se faz necessário em uma comparação entre eventos, o que possibilita avaliar o impacto. Além disso, eventos muito grandes espacialmente, podem apresentar diferentes níveis de impacto em diferentes áreas. O terceiro critério é a possibilidade de diferentes classificações ao longo do período de duração das ondas de calor. O enfraquecimento e o fortalecimento podem ser definidos através das variáveis de intensidade, intensidade máxima e intensidade cumulativa. O último critério é baseado na simplificação da métrica a fim de difundir seu uso e facilitar o entendimento. A metodologia

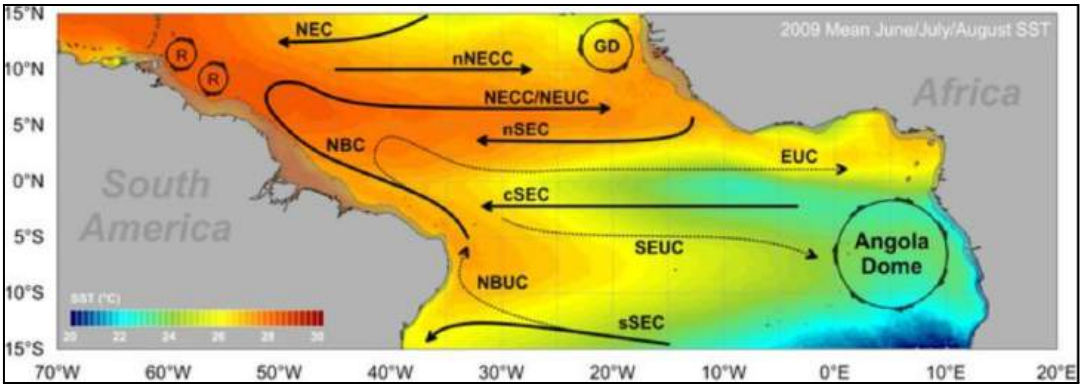
apresentada por Hobday *et al*. (2018) será uma das metodologias utilizadas neste trabalho e a seção 4.3.1 demonstra como essa metodologia será empregada.

3.3. O CONTEXTO DO OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL

O Oceano Atlântico Equatorial é uma região de grande importância climática e ecológica, situada entre a costa nordeste da América do Sul e a costa ocidental da África. Este trecho do oceano é caracterizado por condições climáticas específicas e processos oceanográficos que influenciam não só o clima regional, mas também o clima global (Stramma & England, 1999).

Nesta região, ocorre uma interação complexa entre as correntes oceânicas superficiais e profundas (Stramma & England, 1999), que são importantes na dinâmica climática. Além de serem fundamentais para a redistribuição de calor e sal, essas correntes influenciam diretamente a formação de fenômenos extremos. Além disso, o Oceano Atlântico Tropical é uma área estratégica de conexão inter hemisférica da Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC), sendo vital para o transporte de calor entre os hemisférios, o que afeta não só o clima regional, mas também global. A Figura 6 mostra as correntes superficiais oceânicas na região do Oceano Atlântico Tropical.

Figura 6: Esquematização das categorias definidas para ondas de calor.



Fonte: Araújo *et al*, 2018.

A biodiversidade no Atlântico Tropical é rica e variada, incluindo importantes ecossistemas marinhos como recifes de coral, manguezais e áreas de desova de várias

espécies de peixes. Esses ecossistemas são fundamentais para a pesca local e para a manutenção da biodiversidade marinha global (Pauly *et al*., 1998). A diversidade desses habitats é fortemente influenciada pelas condições climáticas e pelas correntes oceânicas da região, resultando em ambientes únicos e altamente produtivos que sustentam uma vasta gama de vida marinha.

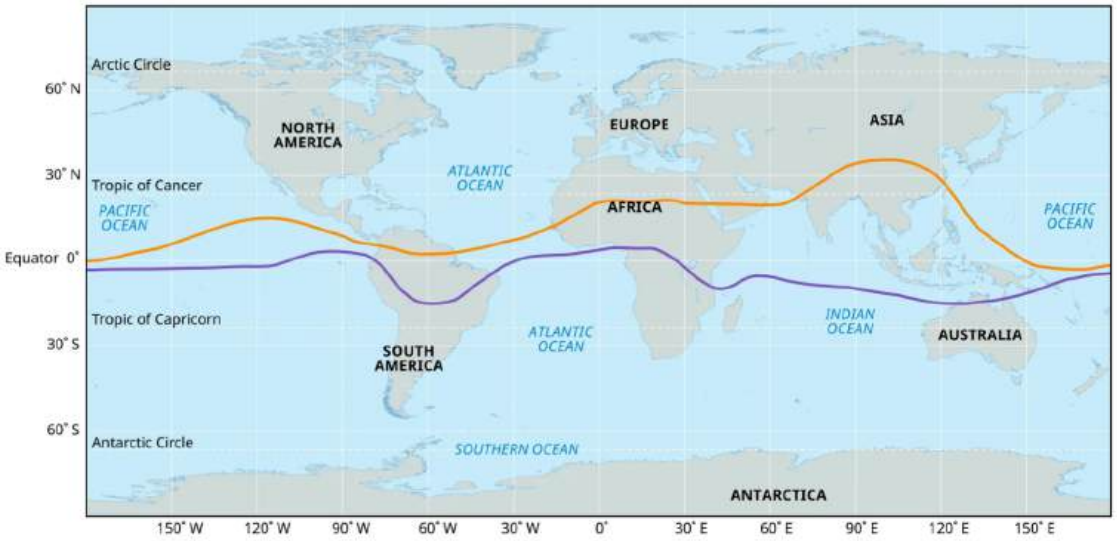
O clima da região equatorial do Atlântico é influenciado pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), uma área de convergência de ventos alísios que resulta em alta pluviosidade e convecção intensa. Esta zona é importante na modulação de eventos climáticos como o El Niño-Oscilação Sul (ENSO). Além disso, fenômenos como o Dipolo do Atlântico também têm implicações climáticas importantes, afetando a precipitação e a circulação atmosférica na bacia do Atlântico (Xie & Carton, 2013). A formação de ciclones tropicais é outro aspecto crítico do Atlântico Equatorial. Esses sistemas de tempestade se desenvolvem quando a temperatura da superfície do mar é suficientemente alta para fornecer energia e umidade ao sistema. As ondas de calor marinhas podem exacerbar a formação e a intensidade dos ciclones tropicais ao elevar ainda mais as temperaturas da superfície do mar. Essa elevação aumenta a energia disponível para os ciclones, potencializando seus efeitos devastadores.

3.3.1 - Influências da Zona de Convergência Intertropical

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é uma das características mais importantes da circulação atmosférica global. Trata-se de uma faixa de baixa pressão atmosférica que circunda a Terra próximo ao Equador, onde os ventos alísios dos hemisférios norte e sul convergem. A ZCIT é reconhecida por ser uma região de intensa atividade convectiva, caracterizada por fortes chuvas e tempestades, desempenhando um papel essencial na climatologia das regiões tropicais (Hartmann & Michelsen, 1989). A formação da ZCIT está intimamente ligada à convergência dos ventos alísios. No hemisfério norte, os alísios sopram do nordeste, enquanto no hemisfério sul, sopram do sudeste. Quando esses ventos se encontram na ZCIT, o ar quente e úmido é forçado a subir. Esse ar em ascensão esfria à medida que ganha altitude, levando à condensação do vapor de água e à formação de

nuvens cumulonimbus, responsáveis pelas frequentes e intensas precipitações nesta região (Wallace & Hobbs, 2006). A Figura 7 mostra a variação da ZCIT durante o inverno e o verão.

Figura 7: Posição sazonal da ZCIT.



Fonte: Cheng *et al*. 2012.

A posição da ZCIT não é fixa e varia ao longo do ano, seguindo o movimento aparente do Sol. Durante o verão do hemisfério norte, a ZCIT tende a se deslocar para o norte, enquanto no verão do hemisfério sul, ela se move para o sul. Esse deslocamento sazonal influencia os padrões de precipitação em várias regiões tropicais, impactando atividades agrícolas e ecossistemas (Lutgens *et al*., 2019). Mudanças na posição da ZCIT podem alterar os padrões de circulação atmosférica e oceânica. Essas alterações podem modificar as correntes oceânicas e o transporte de calor, influenciando diretamente a distribuição das temperaturas na superfície do mar. Quando a ZCIT se desloca anormalmente para o norte ou para o sul, áreas que normalmente são resfriadas pela atividade convectiva, por uma maior formação de nuvens e precipitações podem experimentar aquecimento, favorecendo o desenvolvimento de MHWs (Lutgens *et al*., 2019). Em regiões onde a ZCIT está ativa, há geralmente que podem levar ao resfriamento da superfície do oceano devido ao aumento da evaporação e à diminuição da radiação solar direta (Hartmann & Michelsen 1989).

Ondas de calor marinhas, por sua vez, podem influenciar a atmosfera, alterando os padrões de precipitação e a circulação atmosférica. Essas mudanças podem afetar a posição e

a intensidade da ZCIT, criando um ciclo de feedback em que a ZCIT e as MHWs se influenciam mutuamente (Wallace & Hobbs, 2006). No Oceano Atlântico, a ZCIT desempenha um papel fundamental na regulação do clima e na dinâmica dos ecossistemas marinhos. Sua posição e intensidade afetam diretamente os padrões de precipitação e a circulação atmosférica sobre a bacia do Atlântico, influenciando a formação de ciclones tropicais. Além disso, a ZCIT interage com correntes oceânicas superficiais e profundas, como a Corrente Equatorial Norte e a Corrente Equatorial Sul, impactando a distribuição de nutrientes e a produtividade biológica na região (Chang *et al*., 2005).

A ZCIT tem uma importância central na distribuição das chuvas nas regiões tropicais. Ela é responsável pela estação chuvosa em muitas áreas, como a Amazônia, a África Ocidental e o Sudeste Asiático. Em regiões como a África Subsaariana, o deslocamento da ZCIT está intimamente ligado à ocorrência do período das monções, que é essencial para a agricultura local (Holton & Hakim, 2013). A variabilidade na posição e intensidade da ZCIT pode levar a períodos de seca ou a chuvas excessivas, causando impactos econômicos e sociais significativos. Em termos de climatologia global, a ZCIT é uma componente vital do ciclo de Walker e da circulação de Hadley, sistemas que influenciam o transporte de calor e umidade entre os hemisférios e desempenham um papel principal na distribuição global dos padrões climáticos (Wallace & Hobbs, 2006).

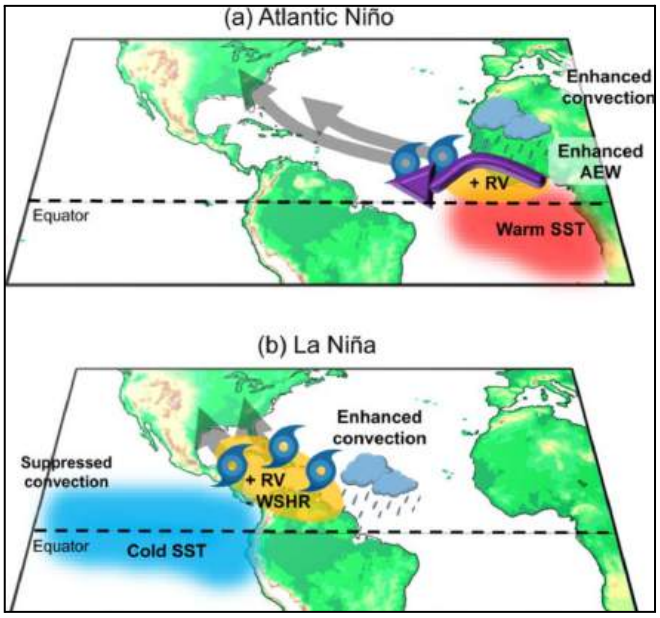
3.3.2 - Impactos do El Niño-Southern Oscillation

O El Niño-Oscilação Sul (ENSO) é um fenômeno climático de grande escala que envolve a interação entre o aquecimento anômalo das águas superficiais no Oceano Pacífico central e oriental, conhecido como El Niño, e o resfriamento correspondente, denominado La Niña. Esse ciclo tem implicações significativas para o clima global, influenciando diversos aspectos dos sistemas oceânicos e atmosféricos, incluindo o Oceano Atlântico Tropical (Cai *et al*., 2018).

Durante os eventos de El Niño, o aquecimento das águas do Pacífico pode alterar os padrões de circulação atmosférica e oceânica. Essas mudanças têm efeitos diretos sobre a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). O deslocamento da ZCIT para o norte, comum durante eventos de El Niño, pode afetar a distribuição das chuvas e alterar o transporte de

calor e umidade, influenciando as condições oceânicas no Atlântico Tropical (Chang *et al*., 2008). A Figura 8 mostra a influência dos fenômenos de El Niño e La Niña.

Figura 8: Influência do El Nino e La Nina no Oceano Atlântico Tropical.



Fonte: Kim *et al*., 2023.

Estudos recentes mostram que o fenômeno El Niño pode exacerbar as ondas de calor marinhas em várias regiões oceânicas, incluindo o Oceano Atlântico. Durante eventos de El Niño, o aquecimento anômalo das águas superficiais no Pacífico pode se propagar para o Atlântico, resultando em MHWs mais intensas e prolongadas. Cai *et al*. (2018) indicam que o aumento das temperaturas da superfície do mar, em resposta ao aquecimento atmosférico, amplifica esses eventos no Atlântico Tropical. Hobday *et al*. (2018) também demonstraram que El Niño aumenta a frequência, intensidade e duração das MHWs devido às alterações nos padrões de circulação oceânica. Além disso, Di Lorenzo & Mantua (2016) ressaltam que a modulação dessas ondas de calor é fortemente influenciada por interações climáticas globais, como a Oscilação Sul, reforçando a necessidade de monitorar ambos os fenômenos para prever seus impactos nos ecossistemas marinhos e no clima costeiro.

Por outro lado, durante os eventos de La Niña, o resfriamento anômalo das águas no Pacífico pode levar a um fortalecimento dos ventos alísios e aumentar a atividade convectiva. Isso pode resultar em condições diferentes no Oceano Atlântico Equatorial, com possíveis

impactos sobre a frequência e a intensidade das MHWs. As variações na temperatura da superfície do mar, influenciadas por La Niña, podem modificar os padrões de circulação oceânica e atmosférica, afetando a dinâmica das ondas de calor marinhas na região (Smith *et al*. 2019).

3.3.3 - Zona de formação de Ciclones Tropicais

Ciclones tropicais, incluindo furacões, formam-se principalmente em regiões tropicais onde as temperaturas da superfície do mar (TSM) são suficientemente elevadas, geralmente acima de 26,5°C, para sustentar a convecção atmosférica necessária (Gray, 1968). No Oceano Atlântico Equatorial, essas condições são mais comuns durante os meses de verão e outono, quando as águas superficiais são aquecidas pela radiação solar. A temperatura elevada da superfície do mar fornece a energia essencial para o desenvolvimento e intensificação dos ciclones tropicais (Emanuel, 2005). Além disso, condições de baixa cisalhamento do vento, onde há pouca variação na velocidade e direção do vento com a altitude, são favoráveis à manutenção da estrutura organizada do ciclone. Outro fator importante é a presença de vorticidade, que se refere à rotação atmosférica necessária para o desenvolvimento desses sistemas (Gray, 1968). Esses elementos combinados criam um ambiente propício para a formação e intensificação de ciclones tropicais no Atlântico Tropical

O aumento dos eventos, intensidades e categorias das MHWs pode criar condições favoráveis para o desenvolvimento de ciclones tropicais ao elevar as temperaturas da superfície do mar (TSM) em regiões críticas do Atlântico Tropical. Águas mais quentes fornecem mais energia para a formação e intensificação dos ciclones, conforme descrito por Emanuel (2005). Dessa forma, um aumento na frequência e intensidade das MHWs pode estar relacionado com uma maior atividade ciclônica, especialmente durante a temporada de furacões no Atlântico, como sugerido por Knutson *et al*. (2010).

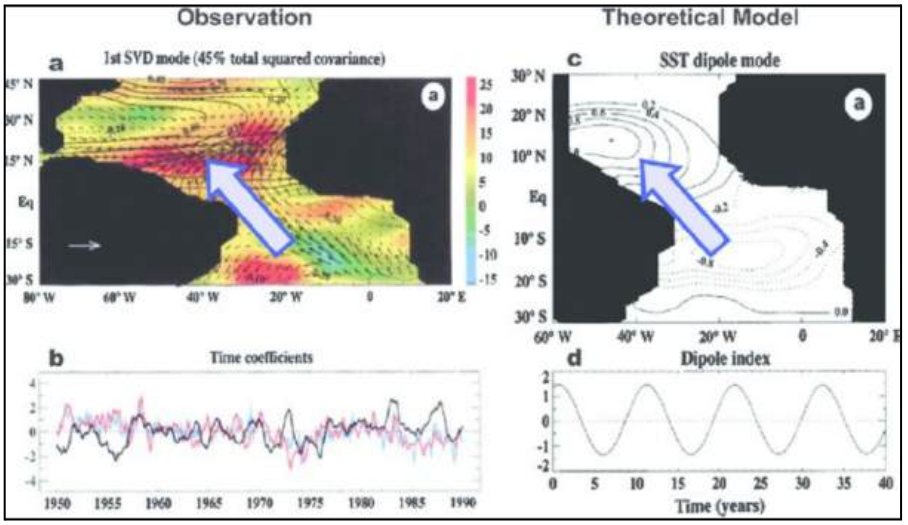
Por outro lado, ciclones tropicais podem atenuar temporariamente as ondas de calor marinhas. Isso ocorre porque os ciclones podem promover o upwelling, um processo que mistura águas superficiais quentes com águas mais frias das profundezas, reduzindo assim as temperaturas da superfície do mar na área afetada pelo ciclone, como descrito por Evans *et al*. (2017). No entanto, após a passagem do ciclone, a atmosfera pode retornar a condições de

aquecimento, o que pode permitir que as MHWs se estabeleçam ou até se intensifiquem, dependendo da circulação atmosférica subsequente.

3.3.4 - Influência do Dipolo do Atlântico

O Dipolo do Atlântico, também conhecido como Dipolo do Atlântico Norte, é um fenômeno climático que envolve a variação das temperaturas da superfície do mar (TSM) no Atlântico Norte. Este padrão de variabilidade climática é caracterizado por uma diferença entre a temperatura da superfície do mar em duas regiões distintas: uma região quente e outra fria, localizadas no Atlântico Norte, conforme apresentado na Figura 9. Essa diferença pode ter um impacto significativo nos padrões atmosféricos e climáticos regionais (Cheng *et al*. 2019; Alexander, 2022).

Figura 9: Dipolo do Atlântico nos cenários reais e teóricos.



Fonte:(Liu, 2012).

O Dipolo do Atlântico é impulsionado por uma combinação de fatores atmosféricos e oceânicos onde a variabilidade natural do clima desempenha um papel importante na manifestação do Dipolo do Atlântico podendo se apresentar como um reflexo das variações naturais do clima, que são influenciadas por padrões oceânicos e atmosféricos em escalas de tempo interanuais (Alexander *et al*., 2022). Além disso, as interações entre a atmosfera e o

oceano são essenciais para o desenvolvimento e a intensidade desse fenômeno. Mudanças na circulação atmosférica, como o fortalecimento ou enfraquecimento dos ventos, podem impactar a distribuição das temperaturas da superfície do mar e, portanto, influenciar o Dipolo do Atlântico (Cheng *et al*., 2019). Outro fator relevante é a influência de fenômenos climáticos globais, como o El Niño-Oscilação Sul (ENSO) e a Oscilação Sul do Atlântico, que podem interagir com o Dipolo do Atlântico e afetar suas características e efeitos (Knutson *et al*., 2010). Além disso, durante as fases positivas do Dipolo do Atlântico, quando uma região do Atlântico Norte está mais quente, pode ocorrer um aquecimento adicional das águas no Atlântico Tropical, o que pode intensificar as MHWs, uma vez que as águas mais quentes fornecem mais energia para o desenvolvimento e a manutenção dessas ondas de calor (Alexander *et al*., 2022). Por outro lado, durante uma fase negativa do Dipolo, em que a temperatura da superfície do mar é mais baixa, a capacidade das águas do Atlântico Tropical de sustentar MHWs pode ser reduzida (Knutson *et al*., 2010).

3.3.5 - Influências de Baixa Frequência (Atividade Solar)

A atividade solar é também um fator a ser considerado na variabilidade climática do Atlântico Tropical e um dos marcadores mais significativos e simples da atividade do ciclo solar de baixa frequência são as manchas solares. Essas regiões temporárias de atividade intensa na superfície do Sol estão associadas a flutuações na radiação solar que atingem a Terra. Durante períodos de maior atividade solar, observa-se um aumento na quantidade de radiação que atinge a atmosfera terrestre, o que pode manifestar mudanças nas temperaturas da superfície do mar (TSM) e também impactar os padrões climáticos globais e regionais (Lean & Rind, 2008).

Embora de forma não direta, alguns estudos demonstram que as flutuações nas manchas solares podem afetar os padrões de circulação atmosférica, resultando em variações na precipitação e na temperatura no Atlântico Tropical (Lean & Rind, 2008). Essa relação é especialmente evidente durante os ciclos solares, que duram cerca de 11 anos, quando a intensidade das manchas solares pode levar a alterações significativas nas condições oceânicas (Mordvinov *et al*., 2020). Durante os períodos de alta atividade solar, o aumento da radiação pode intensificar o aquecimento das águas superficiais, contribuindo para condições

que favorecem o desenvolvimento de fenômenos climáticos, como o El Niño e a Oscilação Sul, que, por sua vez, influenciam a variabilidade climática na região (Emanuel, 2005). Além disso, a relação entre as manchas solares e o clima do Atlântico Tropical é complexa, pois envolve interações com outros fatores climáticos e também com as correntes oceânicas e os ventos alísios (Gray, 1968). A influência das manchas solares sobre o clima da região deve ser compreendida em conjunto com esses fatores, permitindo uma melhor previsão das condições climáticas futuras e suas implicações para os ecossistemas marinhos e as comunidades costeiras (Solanki *et al*. 2013). Apesar de ser um tema um pouco controverso, pois pode desviar o foco do aquecimento global causado pelas atividades antrópicas, há a possibilidade de explorar as correlações entre as ondas de calor marinhas e a atividade solar em baixas frequências. Nessas escalas, os impactos do aquecimento global, que têm aumentado desde o período pré-industrial até o presente, não devem ser observados.

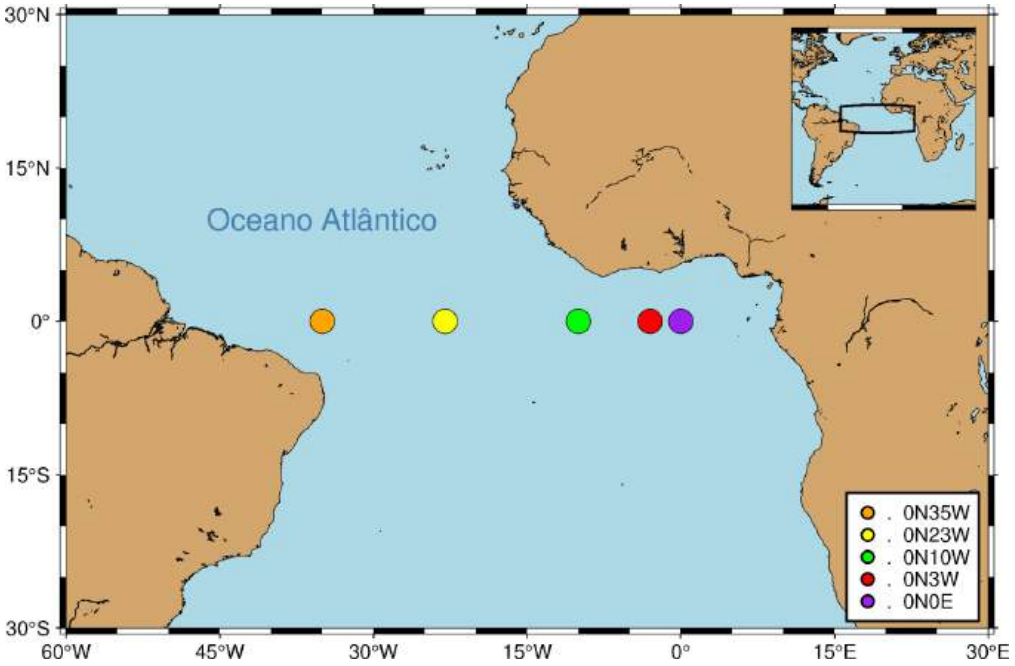
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange a região tropical do Oceano Atlântico. No contexto oceanográfico, o Atlântico Tropical é caracterizado por uma complexa rede de correntes que são responsáveis pela dinâmica da região. As análises foram realizadas na linha do Equador entre a longitude 0º e -35º distribuídos em 5 pontos de coleta. A Figura 10 mostra a localização dos pontos de coleta.

Além de ser uma região onde a interação entre o oceano e a atmosfera gera aquecimento local, essa área também recebe calor transportado pelas correntes oceânicas, o que torna a região um núcleo térmico para a Circulação Meridional do Atlântico (AMOC). A AMOC atua como uma espécie de corrente transportadora, levando águas quentes das zonas tropicais até o Atlântico Norte, o que regula o clima global e influencia diretamente a ocorrência das ondas de calor marinhas.

Figura 10 - Localização das estações de coleta utilizadas neste estudo. O código de cada posição das bóias é o mesmo usado nos resultados.



4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

4.2.1 Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA)

A GTMBA (Global Tropical Moored Buoy Array) opera nos oceanos tropicais adquirindo séries de dados em alta resolução e com qualidade para serem utilizados em diversos estudos com o objetivo de entender e prever variabilidades climáticas, circulação oceânica e fenômenos meteorológicos na região. No Oceano Atlântico, o GTMBA implementou o PIRATA (Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic), o qual foi estabelecido em 1997, com uma rede de bóias oceânicas para o monitoramento do Oceano Atlântico Tropical. O PIRATA é operado por uma colaboração entre observatórios do Brasil, França e Estados Unidos. Os dados coletados pelas bóias são de cunho meteorológicos e oceanográficos, transmitidos em tempo real e disponibilizados publicamente (Servain *et al.,* 1998).

O sistema de aquisição de dados do PIRATA, conhecido como ATLAS (Autonomous Temperature Line Acquisition System), está em operação desde 1984, em outros projetos, tendo passado por diversas atualizações ao longo dos anos para aprimorar sua performance. A última versão do ATLAS está em uso desde 2000, sem significativas atualizações desde então.

Contudo, com os avanços tecnológicos recentes e a chegada de um novo sistema de telemetria mais eficiente, o Laboratório Ambiental Marinho do Pacífico da NOAA (PMEL) desenvolveu um novo sistema de monitoramento, denominado T-Flex (Tropical-Flex) (Freitag *et al*., 2018). A Figura 11 apresenta a imagem da bóia oceanográfica ATLAS, em operação.

Figura 11: Imagem da bóia oceanográfica, tipo Atlas, em operação.

Fonte:(Liu, 2012).

O T-Flex foi criado com o objetivo de fornecer dados de qualidade igual ou superior aos das bóias do sistema ATLAS, garantindo a continuidade e a precisão das séries temporais de dados climáticos e conectando os instrumentos de medições mais modernos com sistemas de telemetria também mais atuais, além de modificações para prever vandalismos. Este novo sistema tem se mostrado eficaz na coleta de dados e, desde 2015, o T-Flex está sendo gradualmente implementado para substituir as bóias ATLAS nas redes de monitoramento das regiões tropicais, sem promover desvios, normalmente causados por mudanças de estratégias de medições (Freitag *et al*., 2018).

A Tabela 2 mostra os tipos de bóias e sistemas utilizados nas estações analisadas neste estudo, juntamente com as datas de transição entre os sistemas, quando aplicável. Essa substituição é muito bem acompanhada para manter a integridade dos dados e assegurar que as medições continuem a atender aos rigorosos padrões de monitoramento climático estabelecidos pelo projeto.

Tabela 2: Tipos de Bóias do Projeto PIRATA e data de transição.

Estações	Tipos de Sistema	Data de Modificação
0ºN/0ºE	ATLAS	-
0ºN/3ºW	ATLAS	-
0ºN/10ºW	ATLAS	-
0ºN/23ºW	ATLAS - T-Flex	1º Semestre de 2016
0ºN/35ºW	ATLAS - T-Flex T-Flex - ATLAS	2º Semestre de 2017 1º Semestre de 2022

Ao longo do desenvolvimento do programa, algumas bóias deixaram de operar, enquanto outras foram adicionadas à rede, resultando atualmente em 18 boias em operação no Oceano Atlântico. Para o presente estudo, serão utilizadas as bóias localizadas ao longo da linha do Equador, nomeadamente: 0N0E, 0N3W, 0N10W, 0N23W e 0N35W, conforme foi descrito na Figura 10. Destas, somente a estacao 0N35W é operada pelo Brasil atraves do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pela Diretoria de Hidrografia e Navegacao da Marinha do Brasil, os demais são operados pela Franca atraves do France's Institut de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (IRD) e pelo Meteo-France (Freitag *et. al*., 2018).

Tanto os dados do sistema ATLAS quanto os do sistema T-Flex são disponibilizados pelo PMEL (Pacific Marine Environmental Laboratory) no website (http://www.pmel.noaa.gov/gtmba/data-access/disdel). Do conjunto de dados adquiridos pelo PIRATA, serão utilizados neste trabalho os dados de temperatura da água do mar, os quais são coletados através do sensor desenvolvido pelo PMEL, modelo ATLAS Module, no sistema ATLAS e pelo Seabird Electronics, modelos SBE37 e SBE39, no sistema T-Flex. A profundidade de medição dos sensores pode ter diferenças nominais de profundidade quando o fundeio responde às forças dos ventos ou das correntes oceânicas. Para a temperatura superficial da água do mar, a expectativa é que essa profundidade seja menor ou igual a 1 metro (Freitag *et al*., 2018).

4.2.2 Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST)

O DOISST (Daily Optimal Interpolation Sea Surface Temperature) é um conjunto de dados climáticos que integra observações de diversas fontes, como satélites (provenientes do sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), navios, bóias e flutuadores Argo. O DOISST utiliza um método de interpolação ótima que gera um conjunto contínuo e espacialmente coerente de dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) em escala global. Este método, baseado em princípios estatísticos avançados, considera não apenas as observações diretas da TSM, mas também a variabilidade espacial e temporal dos dados. Assim, é possível preencher lacunas nas observações e gerar estimativas confiáveis da TSM em áreas onde os dados são escassos ou ausentes (Saha, 2010).

Devido às diferentes fontes, os dados precisam passar por ajustes, pois são adquiridos em diferentes profundidades. Os satélites adquirem dados da lâmina superficial da água, enquanto as medições *in situ* são feitas a aproximadamente 0,2 metros de profundidade. Além disso, os dados de satélite podem ser contaminados por nuvens e aerossóis, resultando em divergências em relação aos dados *in situ*. Por isso, os dados *in situ* são utilizados para calibrar os dados de satélite.

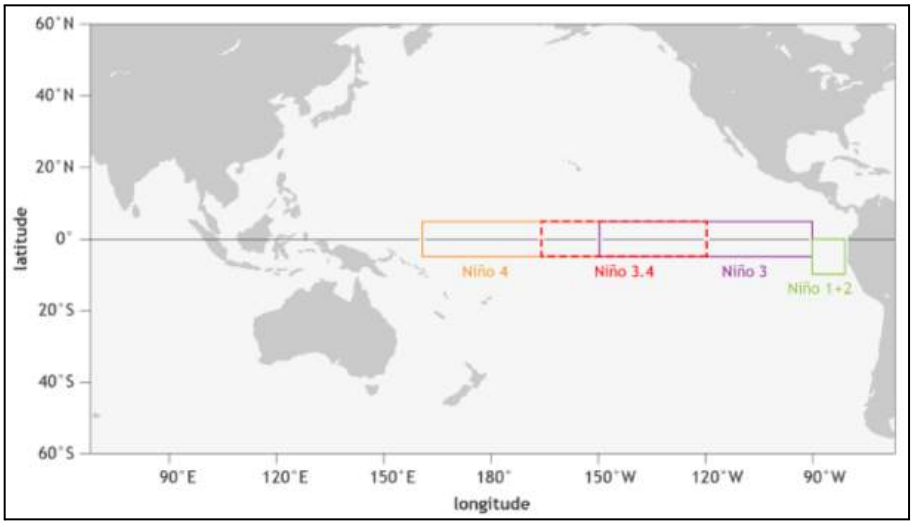
Os dados são disponibilizados com resolução temporal diária desde setembro de 1981 até os dias atuais, com uma resolução espacial de 0,25°, os quais são publicamente acessíveis através do site da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) no National Center for Environmental Prediction (NCEP). Recentemente, uma nova versão foi lançada, oferecendo melhorias significativas na qualidade dos dados, especialmente nas regiões polares. A versão atualizada, denominada DOISST v2.1, foi a utilizada neste trabalho.

Os conjuntos de dados DOISST são utilizados em estudos climáticos, modelagem oceânica e atmosférica, monitoramento ambiental e previsão meteorológica. Eles fornecem subsídios para estudos sobre padrões de aquecimento e resfriamento dos oceanos, fenômenos climáticos como El Niño e La Niña, tendências de longo prazo na temperatura da superfície do mar e ondas de calor marinhas. No presente trabalho, os dados do DOISST estão sendo utilizados para o cálculo da curva climatológica no período entre 1982 e 2011, fundamental para a detecção de ondas de calor marinhas.

4.2.3 Oceanic Niño Index (ONI)

O Oceanic Niño Index (ONI) é um indicador para monitorar El Niño e La Niña, calculado com base nas anomalias de temperatura da superfície do mar (SST) na região Niño 3.4 do Pacífico Equatorial (Figura 8), entre as latitudes 5°N e 5°S e longitudes 120°W e 170°W (NOAA, 2020). Esta região é a mais representativa para avaliar os impactos globais desses fenômenos climáticos. Embora regiões como Niño 1+2 e Niño 4 também apresentam variações de temperatura, a Niño 3.4 captura de forma mais consistente as mudanças que afetam o clima global. A região Niño 1+2 mostra anomalias mais localizadas e temporárias, enquanto a Niño 4 reflete padrões de variabilidade menos diretamente relacionados aos impactos globais (Trenberth 1997). A Figura 12 apresenta a localização destas regiões.

Figura 12: Localização das áreas do Oceano Pacífico Tropical monitoradas para o estudo do El Niño. O ONI é representativo da anomalia de temperatura da região do Nino 3.4



Fonte: https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/why-are-there-so-many-enso-indexes-instead-just-one

Para calcular o ONI, as anomalias de SST na região Niño 3.4 são comparadas a uma climatologia de referência, que é a média de 30 anos da SST, atualmente baseada no período de 1991 a 2020 (NOAA, 2020). As anomalias de SST refletem a diferença entre a temperatura observada e a climatologia, permitindo avaliar o quanto a temperatura está acima ou abaixo do normal. No cálculo do ONI, essas anomalias são suavizadas por meio de uma média móvel de 3 meses, que ajuda a identificar tendências mais claras e duradouras, evitando flutuações temporárias (Trenberth, 1997). A partir dessas anomalias, o ONI classifica as condições de El

Niño e La Niña com base em seus valores e na persistência dessas condições ao longo do tempo. Quando as anomalias de SST na região Niño 3.4 são de +0.5°C ou mais durante cinco trimestres consecutivos, o fenômeno El Niño é identificado. Por outro lado, quando as anomalias são de -0.5°C ou menos por cinco trimestres consecutivos, caracteriza-se um evento de La Niña. Valores intermediários entre -0.5°C e +0.5°C indicam condições neutras, ou seja, a ausência de um evento El Niño ou La Niña (Wang *et al*., 2017).

Os dados do Oceanic Niño Index foram utilizados a partir do ano 2000, cobrindo cerca de 20 anos de análise. Esse ponto de partida foi escolhido para alinhar os dados do ONI com os das bóias do projeto PIRATA. Embora o período de dados varie entre as bóias, essa escolha permite uma comparação mais consistente ao longo do tempo, mesmo que em alguns casos os dados das bóias ultrapassem esse intervalo de 20 anos. O acesso dos dados pode ser feito diretamente pelo link: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_change.shtml. As variações de temperatura na região Niño 3.4 têm consequências globais, incluindo efeitos sobre as Ondas de Calor Marinhas, já que esse fenômeno tende a aquecer ainda mais os oceanos, especialmente em regiões tropicais e subtropicais. Em contrapartida, os eventos de La Niña podem ter um efeito oposto, resfriando algumas áreas e reduzindo a frequência ou intensidade das MHWs (Heidemann & Ribbe, 2019).

No entanto, a relação entre as MHWs e o El Niño não é direta e pode variar conforme a região oceânica. Em algumas áreas, como o Pacífico Equatorial, o El Niño pode ser um forte impulsionador das MHWs, enquanto em outras regiões, fatores locais, como correntes oceânicas e mudanças atmosféricas, também são essenciais. Assim, a combinação dos efeitos globais do ONI e as condições regionais específicas torna a análise das MHWs complexa e multifacetada, exigindo uma abordagem abrangente para entender como essas anomalias térmicas impactam ecossistemas marinhos e o clima global (Heidemann & Ribbe, 2019).

4.2.4 Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO)

O Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO) é uma base de dados que fornece informações sobre a atividade solar, particularmente o número de manchas solares observadas ao longo do tempo. As manchas solares são regiões temporárias de intensa atividade magnética na superfície do Sol, e seu número é um importante indicador do ciclo

solar. Os dados do SILSO são coletados a partir de observações telescópicas realizadas em diferentes observatórios ao redor do mundo e são compilados para fornecer um índice contínuo e consistente da atividade solar desde o século XVII. Essas observações incluem registros históricos e medições modernas, oferecendo uma visão abrangente das variações solares ao longo do tempo.

Para este trabalho, será utilizado o índice de manchas solares fornecido pelo Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO). O dado selecionado é o número de manchas solares suavizado ao longo de 13 meses, com um intervalo que vai de janeiro de 1749 até o mês completo mais recente, com valores provisórios. Esse índice é calculado utilizando uma média móvel dos números mensais de manchas solares, centrada no mês correspondente. Assim como foi feito com os dados do Oceanic Niño Index (ONI), os dados do SILSO foram selecionados a partir do ano 2000 até o período final disponível para cada bóia. Essa abordagem assegura a consistência na análise, permitindo uma comparação eficaz entre os dados de manchas solares e as medições das bóias, alinhando o período de estudo com as séries temporais disponíveis. Os dados podem ser encontrados no website do SISLO no link: https://www.sidc.be/SILSO/datafiles.

4.2.5 - North Atlantic Oscillation (NAO)

A Oscilação do Atlântico Norte (NAO) é um dos principais modos de variabilidade atmosférica no Hemisfério Norte, afetando significativamente o clima na Europa, América do Norte e na bacia do Atlântico Norte. A NAO é caracterizada pela diferença de pressão atmosférica entre duas importantes regiões: a alta pressão subtropical dos Açores e a baixa pressão subpolar da Islândia. Essa diferença de pressão oscila entre duas fases principais, a fase positiva e a fase negativa, cada uma associada a padrões climáticos distintos. Durante a fase positiva da NAO, a diferença de pressão entre os centros de alta e baixa pressão é intensificada, resultando em ventos mais fortes de oeste que trazem invernos mais suaves e úmidos para o norte da Europa e condições mais secas para o sul da Europa e o Mediterrâneo (Hurrell *et al*., 2003). Além disso, essa fase é marcada por tempestades mais frequentes sobre o Atlântico Norte e maior transporte de calor e umidade para a Europa Ocidental (Hurrell *et al*., 2003). Em contraste, a fase negativa da NAO enfraquece a diferença de pressão, permitindo que ventos mais meridionais prevaleçam. Isso resulta em invernos mais frios e

secos no norte da Europa, enquanto o sul da Europa experimenta condições mais úmidas (Wanner *et al*., 2001). O impacto da NAO não se limita à Europa e também afeta a costa leste da América do Norte, a região do Ártico e as áreas costeiras do Atlântico Norte, influenciando regimes de precipitação, temperaturas, e a formação de tempestades de inverno (Visbeck e*t al.*, 2001). A NAO também tem influência sobre a circulação oceânica e os ecossistemas marinhos. Por exemplo, as variações na intensidade dos ventos associadas à NAO afetam as correntes oceânicas de grande escala e a temperatura da superfície do mar, modificando a distribuição de nutrientes e, consequentemente, impactando a biologia marinha (Dickson *et al*., 2000).

A Oscilação do Atlântico Norte é uma importante área de estudo para cientistas climáticos, devido ao seu papel em modificar o clima em escalas sazonais e interanuais. Embora a NAO seja considerada uma característica interna do sistema climático, pesquisas indicam que suas interações com fenômenos como o El Niño-Oscilação Sul (ENSO) podem amplificar seus efeitos (Rodwell *et al.*, 1999).

4.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

4.3.1 Pacote *MarineHeatWaves*

O pacote *MarineHeatWaves*, foi desenvolvido inicialmente por Eric C. J. Oliver e Thomas Wernberg em Python e R, foi posteriormente aprimorado por Alistair Hobday. Este pacote é amplamente utilizado para identificar e caracterizar eventos de MHWs em séries temporais de Temperatura da Superfície do Mar. Ele oferece funcionalidades para calcular métricas essenciais, como duração, intensidade máxima, intensidade média e intensidade cumulativa das ondas de calor marinhas. Além disso, o pacote permite classificar os eventos em diferentes categorias, proporcionando uma visão abrangente dos padrões e tendências das MHWs ao longo do tempo.

Baseado exclusivamente nos conceitos apresentados por Hobday *et al*. (2016), o pacote adota requisitos específicos, incluindo a climatologia de um período de 30 anos, uma duração mínima de 5 dias para a classificação de uma Onda de Calor Marinha e, principalmente, a utilização do percentil de 90 como limiar de temperatura.

Neste trabalho, utilizou-se a versão em Python do *MarineHeatWaves* disponivel no Github (https://github.com/ecjoliver/marineHeatWaves), explorando as diversas ferramentas oferecidas pelo pacote para moldar diferentes cenários de análise. Entre as funcionalidades utilizadas, destacam-se a suavização dos dados a serem analisados e da climatologia, realizada por meio de médias móveis ajustadas pelo usuário.

4.3.2 Pacote *PyMHW*

O *PyMHW* é um pacote desenvolvido em Python pelo Observatório Oceanográfico da Universidade Federal Fluminense com o objetivo de identificar e analisar Ondas de Calor Marinhas de maneira acessível e precisa, e com uma base estatística sólida. Ele utiliza o cálculo do z-score para analisar anomalias térmicas em séries temporais de temperatura da superfície do mar (SST), oferecendo uma ferramenta flexível que permite extrair estatísticas detalhadas sobre a intensidade, duração e frequência desses eventos.

Inspirado pelas diretrizes de Hobday *et al*. (2016), no entanto, não exclusivamente, o *PyMHW* baseia-se na criação de uma climatologia de 30 anos a partir de uma série observacional similar à séria da boia, porém usando dados de SST satelital e definindo um limiar de referência que ajuda a identificar MHWs. Um evento de MHW é caracterizado por uma sequência de, no mínimo, 5 dias consecutivos em que a temperatura da água ultrapassa esse limiar, com uma tolerância de até 2 dias de queda temporária abaixo do valor de referência, sem descaracterizar o evento. Essa abordagem garante maior precisão na detecção de eventos extremos, mesmo em séries temporais com oscilações naturais.

Uma das grandes inovações do *PyMHW* é a sua capacidade de lidar com lacunas nos dados, uma situação comum nas medições de bóias oceanográficas, que frequentemente apresentam interrupções nos registros. O pacote foi desenvolvido pensando nessa realidade, tornando-se uma ferramenta muito útil para pesquisadores que trabalham com séries temporais incompletas, especialmente em ambientes marinhos onde a coleta de dados pode ser desafiadora. Atualmente, o *PyMHW* está disponível para uso no GitHub (https://github.com/andrebelem/pymhw). Embora o pacote já ofereça funcionalidades valiosas, ele ainda está em fase de construção e aprimoramento. As próximas atualizações terão como foco aprimorar a robustez das análises, especialmente no que diz respeito ao

tratamento de dados esparsos, além de incorporar novas funcionalidades que ampliarão ainda mais sua aplicabilidade em diversos contextos científicos.

Essa combinação de precisão e flexibilidade torna o *PyMHW* uma ferramenta promissora para quem deseja estudar o impacto das mudanças climáticas nos ecossistemas marinhos e compreender melhor as ondas de calor que afetam a temperatura da superfície do mar.

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

4.4.1 Coeficiente de Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson é uma ferramenta utilizada em diversas áreas de estudo para medir a relação linear entre duas variáveis numéricas. Desenvolvida por Karl Pearson no final do século XIX, ela continua sendo utilizada, especialmente quando se busca entender a força e a direção de variáveis numéricas. O coeficiente, simbolizado por 'r', vai de -1 a 1, sendo que um valor de 1 significa que as duas variáveis estão perfeitamente alinhadas de forma positiva: à medida que uma aumenta, a outra também cresce proporcionalmente. Já um valor de -1 indica uma relação inversa perfeita, onde o aumento de uma variável corresponde à diminuição da outra. Por fim, um 'r' igual a 0 sugere a ausência de uma relação linear (Pearson, 1985). A fórmula do coeficiente de Pearson pode ser expressa da seguinte forma:

$$r = \frac{\sum (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \overline{x})^2 \sum (y_i - \overline{y})^2}}$$

Em que xi e yi são os valores individuais das variáveis X e Y, e $\overline{x}$ e $\overline{y}$ correspondem às médias dessas variáveis. A equação captura a covariância normalizada entre as variáveis, permitindo interpretar a força da relação linear entre elas.

A técnica assume que a relação entre as variáveis é linear, ou seja, que qualquer variação em uma variável resulta em uma variação proporcional na outra. Além disso, pressupõe que as variáveis sigam uma distribuição normal, especialmente em amostras

pequenas, e que sejam medidas em escalas intervalares ou proporcionais (Weisberg, 2005). Caso essas condições não sejam atendidas, como em situações com relações não lineares ou presença de outliers, os resultados fornecidos pela correlação de Pearson podem ser enganosos ou imprecisos.

A correlação de Pearson é uma ferramenta estatística com uma ampla gama de aplicações. No contexto deste trabalho, vamos usar o coeficiente de correlação de Pearson para comparar os dados de temperatura da água coletados por boias e por satélites, ambos para o mesmo local e no mesmo período. Essa análise permite verificar como essas duas fontes de dados, que são compostas de diferentes métodos, se relacionam entre si. Mostrar essa correlação é importante porque as informações obtidas por satélites são amplamente utilizadas para identificar Ondas de Calor Marinhas na região tropical, e entender a relação entre os dados de diferentes métodos de coleta pode ajudar a validar e aprimorar esses processos de monitoramento.

4.4.2 - Transformada Wavelet

A análise wavelet é uma técnica matemática utilizada para decompor um sinal em diferentes escalas de tempo e frequências, permitindo a análise simultânea no domínio do tempo e da frequência. Ao contrário da transformada de Fourier, que converte o sinal para o domínio da frequência e perde a informação temporal, a análise wavelet mantém tanto a localização temporal quanto a informação de frequência, o que a torna ideal para analisar sinais não estacionários (Torrence & Compo, 1998). As wavelets são funções baseadas em oscilações rápidas que podem ser escalonadas e deslocadas para se ajustarem a diferentes partes de um sinal. Essa característica faz com que a análise seja capaz de identificar tanto variações rápidas (alta frequência) quanto tendências mais lentas (baixa frequência) ao longo do tempo. A técnica é aplicada em diversas áreas, como em sinais biológicos, análise financeira, e estudos ambientais, onde fenômenos complexos apresentam variabilidade em múltiplas escalas temporais e espaciais (Mallat, 1999).

No contexto ambiental e climático, a análise wavelet tem sido amplamente utilizada para identificar padrões em séries temporais de eventos naturais, como ondas de calor marinhas e ciclos climáticos, possibilitando a detecção de fenômenos como El Niño e La Niña. Ao fornecer uma visão detalhada das mudanças em diferentes escalas temporais, a

análise wavelet é uma ferramenta essencial para compreender a dinâmica de fenômenos ambientais variáveis (Percival & Walden 2000). Além da análise wavelet simples, outra aplicação relevante é a wavelet cruzada, que permite a comparação entre duas séries temporais em termos de fase e potência. A wavelet cruzada examina a co-variação entre duas séries ao longo do tempo e em diferentes escalas de frequência, revelando não apenas se os fenômenos estão correlacionados, mas também em quais momentos e escalas essa correlação é mais forte ou fraca (Torrence, 1999). Esse tipo de análise é particularmente útil em estudos climáticos para investigar a relação entre variáveis, como a interação entre o índice de El Niño e padrões de temperatura da superfície do mar (Grinsted *et al*,. 2004).

Neste estudo, será aplicada a análise de wavelet simples para caracterizar o fenômeno das MHWs e identificar as frequências dominantes ao longo do tempo. A metodologia de análise wavelet aplicada neste estudo envolveu a normalização da série temporal. Em seguida, foi utilizada a transformada wavelet contínua, empregando a função mãe 'Morlet', amplamente utilizada em análises de séries temporais devido à sua capacidade de detectar oscilações em diferentes escalas de tempo. A análise foi realizada com a aplicação de preenchimento (padding) para mitigar os efeitos de borda. Cada oitava foi subdividida em 4 sub-oitavas (dj = 0.25), proporcionando maior resolução nas escalas de tempo. A escala inicial foi definida em 6 vezes o intervalo temporal dos dados, e o número total de potências de dois analisadas foi 7, cobrindo uma ampla gama de frequências. Além disso, foi considerada uma autocorrelação lag-1 de 0.72 para modelar o ruído de fundo vermelho presente nos dados climáticos, assegurando uma análise robusta das oscilações em várias escalas de tempo. Além disso, a wavelet cruzada será utilizada para avaliar a relação entre os eventos de MHWs e fenômenos climáticos, como o El Niño, com base nos dados disponibilizados pelo ONI, NAO e as manchas solares, com dados fornecidos pelo SILSO.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, a seção de "Resultados e Discussão" é apresentada de forma combinada para facilitar a compreensão comparativa dos métodos propostos, permitindo uma análise mais integrada e contextualizada.

O primeiro aspecto a ser abordado é a quantidade de dados disponíveis para a detecção das ondas de calor marinhas e suas análises. Este estudo utilizou um conjunto extenso de dados de diferentes fontes. Começando pelo DOISST, foram utilizados dados diários, cobrindo o período de 1º de janeiro de 1982 até 31 de dezembro de 2011, sem lacunas ou intervalos de dados ausentes. Em relação à localização geográfica, os dados coincidiram com as posições das bóias do Projeto PIRATA.

Além disso, foram utilizados dados de cinco estações das bóias do Projeto PIRATA. As informações detalhadas sobre esses dados estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Informações sobre os dados adquiridos do Projeto PIRATA.

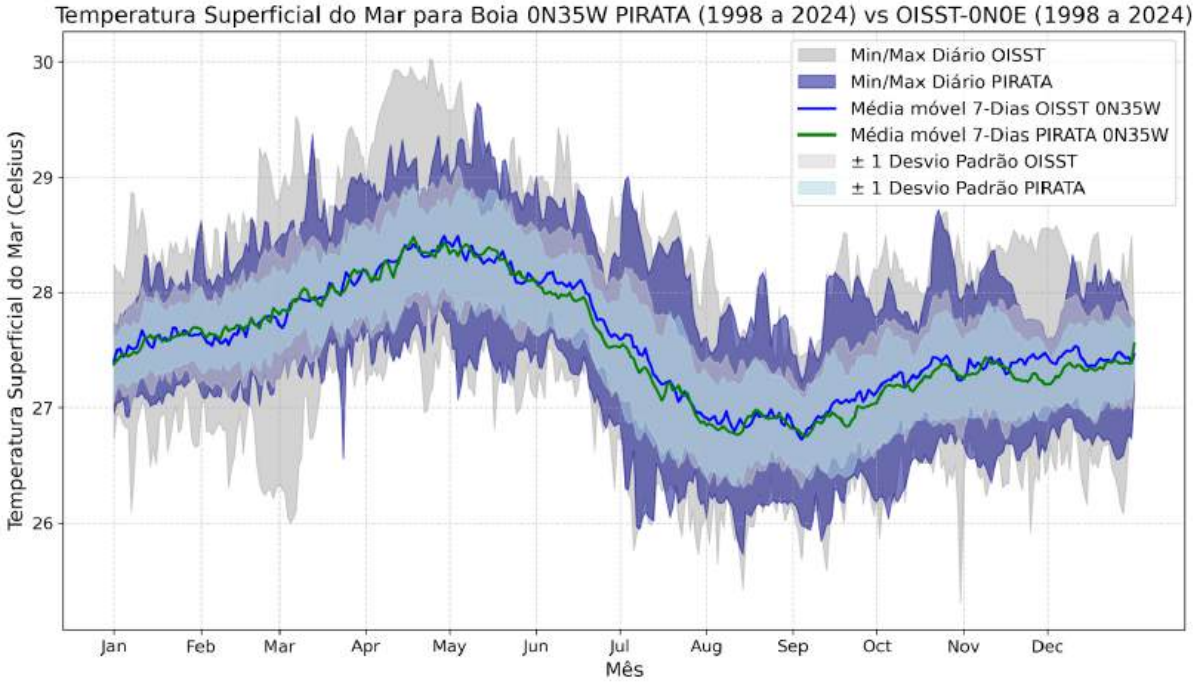
DADOS DO PROJETO PIRATA			
Estações	**Início**	**Fim**	**% NaNs**
0ºN/0ºE	1998-02-02	2021-03-22	22.41
0ºN/3ºW	2021-03-25	2024-06-30	0
0ºN/10ºW	1997-09-15	2024-06-30	19.58
0ºN/23ºW	1999-03-07	2024-06-30	16.03
0ºN/35ºW	1998-01-22	2024-06-30	31.83

A climatologia foi construída a partir de dados do OISST, por possuírem um longo registro sem interrupções - características ideais para o cálculo de climatologia. Os dados *in situ* foram coletados pelo projeto PIRATA, provenientes de bóias oceanográficas e esses foram os dados utilizados para a identificação das ondas marinhas. Como são provenientes de diferentes fontes e com distintas metodologias de coleta, foi necessário realizar uma comparação e até mesmo uma correlação entre os dados antes de se iniciar as análises de ondas de calor marinhas.

Os dados do mesmo período, provenientes tanto do PIRATA quanto do OISST, foram processados com seus respectivos valores de média e desvio padrão para o mesmo período de análise que coincidiu com os dados disponíveis para o PIRATA. A Figura 13 apresenta os resultados dessas análises de forma sazonal para a estação 0N35W, com os dados suavizados em uma média móvel de 7 dias, para facilitar as observações. Observa-se que, de maneira geral, ambas as fontes de dados seguem tendências semelhantes, ainda que os valores absolutos não sejam exatamente os mesmos, o que pode ser identificado visualmente. O

resultado para as demais estações se encontram no Apêndice 1. Vale ressaltar que para as análises de ondas de calor marinhas não foram removidas as tendências de temperatura (aquecimento ou resfriamento) da série temporal.

Figura 13 - Médias móveis das séries temporais do PIRATA e OISST ao longo dos meses, com seus respectivos desvios padrões - Estação 0N35W.



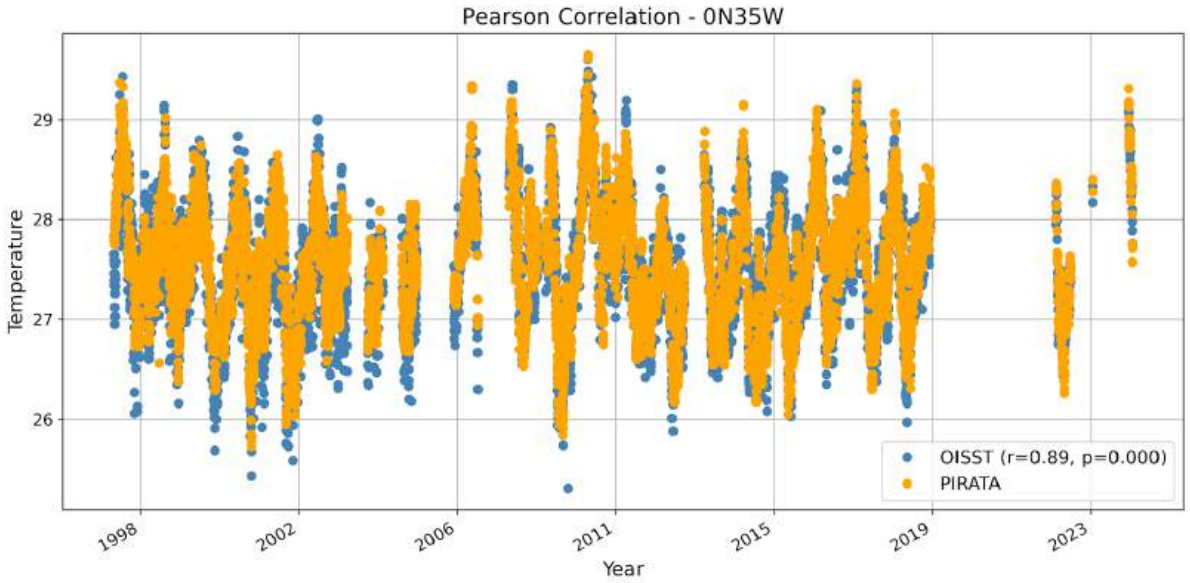
Para aumentar a confiança nessas comparações, foi utilizada a análise de correlação de Pearson que permitiu avaliar estatisticamente e afirmar essas correlações. Os resultados das análises de Pearson estão apresentados na Tabela 4. Para todas as estações, a correlação entre os dados do DOISST e do PIRATA foi significativa e classificada como linear positiva. Somente para a estação 0N35W, a correlação foi forte. Para as demais estações, as correlações foram perfeitas, o que sugere que à medida que a temperatura proveniente do OISST aumenta, a temperatura medida pela bóia também tende a aumentar de maneira bastante consistente. O gráfico 14 apresenta o resultado gerado graficamente para a estação 0N35W. Os demais gráficos encontram-se no Apêndice 1.

Com os resultados encontrados foi possível continuar o estudo e utilizar os dados do OISST como base climatológica para a detecção de ondas de calor através das bóias do PIRATA.

Tabela 4: Resultado da Análise de Correlação de Pearson.

RESULTADOS - CORRELAÇÃO DE PEARSON		
Estações	**r**	**p**
0ºN/0ºE	0,98	0
0ºN/3ºW	0,98	0
0ºN/10ºW	0,99	0
0ºN/23ºW	0,97	0
0ºN/35ºW	0,89	0

Figura 14 - CResultado da correlação de Pearson descrita para a estação 0N35W.



Todos os estudos sobre ondas de calor marinhas utilizados neste trabalho como referência bibliográfica, empregam dados satelitais para a construção da curva climatológica, uma vez que não existe um banco de dados *in situ* capaz de fornecer monitoramento contínuo

para o período de 1982-2011, que totalizam 30 anos de dados. O uso de um período climatológico fixo, como 1981-2010 ou 1982-2011, amplamente adotado na literatura, pode influenciar significativamente a identificação de Ondas de Calor Marinhas, levando a um aumento no número de eventos e na intensidade das categorias ao longo do tempo. Isso ocorre devido à natureza estática da climatologia utilizada, que não acompanha as mudanças recentes no clima, potencialmente pode distorcer a avaliação dos fenômenos ao longo de séries temporais extensas.

Diferentemente de outros fenômenos climáticos, como o El Niño – cuja base climatológica é atualizada periodicamente, a cada cinco anos –, a climatologia das ondas de calor marinhas ainda não passa por esse processo de revisão constante. Para o El Niño, além da atualização periódica da climatologia, o período de análise de eventos deve ser vinculado a uma base climatológica específica. Isso evita a superestimação do número e da intensidade dos fenômenos em séries temporais longas, onde o impacto das mudanças climáticas é mais pronunciado nos últimos anos. Uma análise com climatologia fixa pode supervalorizar os eventos ao longo do tempo, resultando em uma visão distorcida das tendências reais. A Figura 15, publicada pela NOAA (2024), ilustra as diferentes bases metodológicas para a análise do El Niño, enquanto a Figura 16, elaborada neste estudo, segue essa inspiração para aplicar um raciocínio semelhante às Ondas de Calor Marinhas, utilizando dados da estação 0N0E do projeto PIRATA. Essa abordagem sugere que é possível desenvolver uma nova regra metodológica para a identificação de MHWs a nível global, adaptada à realidade climática em constante mudança. É possível perceber que as curvas mais recentes possuem as maiores temperaturas absolutas.

Figura 15 - Climatologia descritas pelo Ocean Niño Index, publicado pela NOAA (2024).

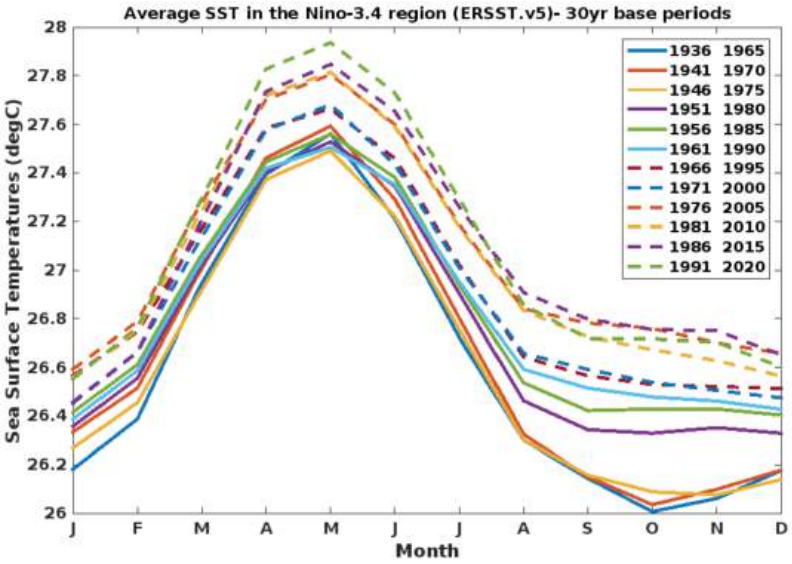
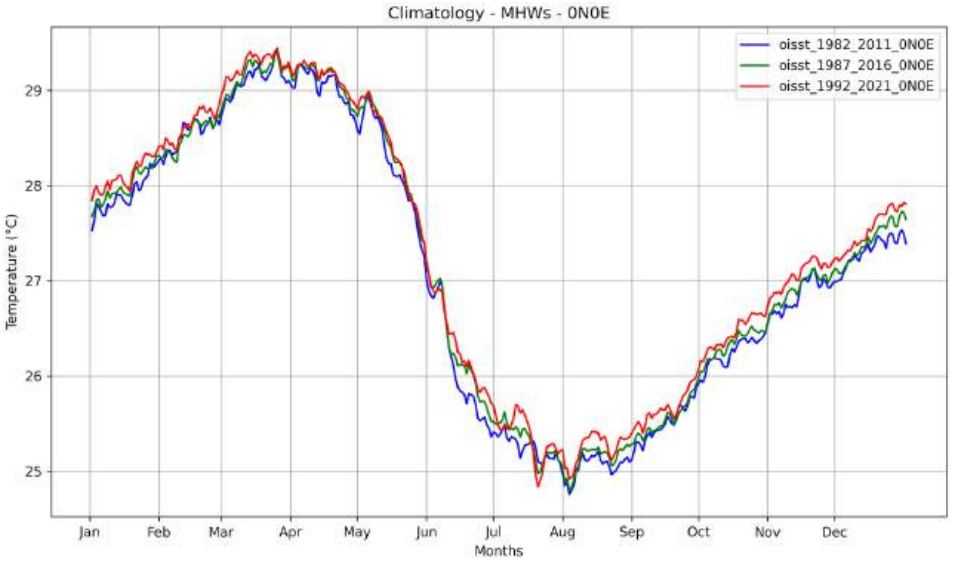


Figura 16 - Possíveis curvas climatológicas para as ondas de calor marinhas.



Dentro da metodologia de análise de ondas de calor marinhas é fundamental ressaltar que Hobday *et al*. (2016) exigem a aplicação consistente da mesma metodologia para que as MHWs possam ser comparadas ao longo do tempo e em diferentes regiões. No entanto, uma problemática comum é que diferentes autores podem adotar a metodologia de forma superficial, resultando em diferentes resultados.

Hobday *et al*. (2016) destacam que, para comparar diferentes ondas de calor em diferentes regiões, é essencial utilizar a mesma curva climatológica, além da mesma metodologia. É importante destacar que a simples utilização da mesma base climatológica, dos mesmos conjuntos de dados e do mesmo pacote de análise de MHWs não garante a aplicação uniforme da metodologia. Isso ocorre porque, dentro dos pacotes de detecção de MHWs, existem diversas combinações de parâmetros estatísticos que podem afetar os resultados de forma significativa. Esses detalhes podem incluir desde a forma de suavização dos dados até os limiares utilizados para identificar os eventos. Assim, para que seja possível comparar diferentes regiões ou o mesmo local em períodos distintos, é essencial que todos os parâmetros e ajustes dentro do pacote de análise sejam consistentes. No entanto, esses detalhes metodológicos frequentemente não são explicitados nos estudos publicados, pois são parte de arranjos estatísticos internos dos pacotes de análise, estando explícitos nos scripts, o que dificulta a replicabilidade e a precisão nas comparações entre diferentes estudos.

A fim de identificar as ondas de calor marinhas, foram empregados dois pacotes que se diferenciam em suas metodologias com o objetivo de demonstrar como essas variações impactam os resultados. Para garantir consistência, utilizamos os mesmos dados na construção da climatologia, baseando-nos nos dados do OISST entre 1982 e 2011. Os períodos analisados para a identificação das MHWs correspondem aos períodos de coleta de dados por cada bóia do Projeto PIRATA utilizadas neste estudo. A primeira metodologia aplicada foi a descrita por Hobday *et al.* (2016), implementada no pacote *MarineHeatWaves*, desenvolvido por Oliver *et al.* (2021). Neste caso, o limiar para a identificação das MHWs é definido pelo percentil 90, ajustado aos dados absolutos sem suavização. O segundo pacote utilizado foi o *PyMHW* com os dados absolutos das medições de temperatura do mar, sem qualquer tipo de suavização. Essa abordagem permite identificar todos os sinais de possíveis anomalias e analisá-los dentro do contexto das MHWs. O *PyMHW* utiliza o cálculo do z-score como limiar para a detecção das ondas de calor marinhas, tornando essa metodologia adequada para uma análise mais direta das variações na temperatura.

A Tabela 5 apresenta as principais características das MHWs encontradas por ambos os pacotes para todas as estações. Essa comparação evidencia como a escolha da metodologia pode influenciar a detecção e a caracterização das ondas de calor marinhas, sendo importante adaptar o método ao objetivo de cada estudo. As ondas de calor marinhas identificadas pelo

pacote *PyMHW* apresentaram resultados mais intensos, com maior duração, com maior intensidade acumulativa e os eventos alcançando maiores categorias de classificação.

Apesar dos resultados bastante distintos entre os pacotes de identificação de ondas de calor marinhas, é possível verificar semelhanças nos resultados de forma qualitativa. Em ambos os pacotes, as maiores intensidades acumuladas e as maiores durações ocorreram na estação 0N0E e as menores intensidade acumuladas e duração foram encontradas na estação 0N23W. Já os menores valores de intensidades máximas foram encontradas na estação 0N35W, que é a estação mais próxima da costa. Neste aspecto, o *PyMHW* é mais conservador em relação à quantidade de eventos, porém, estatisticamente mais robusto em termos de classificação de severidade.

Tabela 5: Informações das MHWs em diferentes métodos de análise - PIRATA.

Estações	**N Eventos**	**Duração_Max**	**I_Max**	**I_Cum**	**Categorias**	**Analise**
0ºN/0ºE	119	100	4,24	239,36	4	*PyMHW*
0ºN/0ºE	88	142	2,83	190,51	3	*MarineHeatWaves*
0ºN/3ºW	73	63	4,16	166,5	4	*PyMHW*
0ºN/3ºW	31	84	2,51	113,99	2	*MarineHeatWaves*
0ºN/10ºW	73	74	3,92	168,29	4	*PyMHW*
0ºN/10ºW	128	66	3,83	103,44	3	*MarineHeatWaves*
0ºN/23ºW	83	36	4,30	104,71	4	*PyMHW*
0ºN/23ºW	70	36	2,71	67,7	3	*MarineHeatWaves*
0ºN/35ºW	79	79	3,27	148,33	4	*PyMHW*
0ºN/35ºW	66	88	1,77	79,88	2	*MarineHeatWaves*

As Figuras 17 e 18 apresentam os resultados da variação temporal da série de dados para a estação 0N0E provenientes de cada pacote de identificação de ondas de calor marinhas. Além disso, durante a apresentação da série temporal, os eventos e as categorias das ondas de calor estão em destaque, evidenciando a classificação. Os resultados revelam um aumento na

frequência e nas categorias das ondas de calor marinhas ao longo dos anos e o *PyMHW* apresenta maior sensibilidade nesses aumentos. No entanto, comparando os dois dados eles seguem uma mesma tendência na disposição dos resultados. Observa-se que a mesma onda de calor, especialmente nas categorias mais altas, é identificada em ambos os pacotes. Essa comparação destaca a consistência dos resultados, apesar das diferentes abordagens metodológicas adotadas. Uma observação importante na comparação é que, na Figura 17, após o comando de detecção de ondas de calor, as lacunas de ausência de dados da bóia foram preenchidas pela climatologia local. Embora esse preenchimento não interfira nos cálculos, ele pode ser visualizado nesse tipo de gráfico. Os resultados das demais estações estão apresentados no Apêndice 1 para ambos os pacotes.

Figura 17: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote *MarineHeatWaves*.

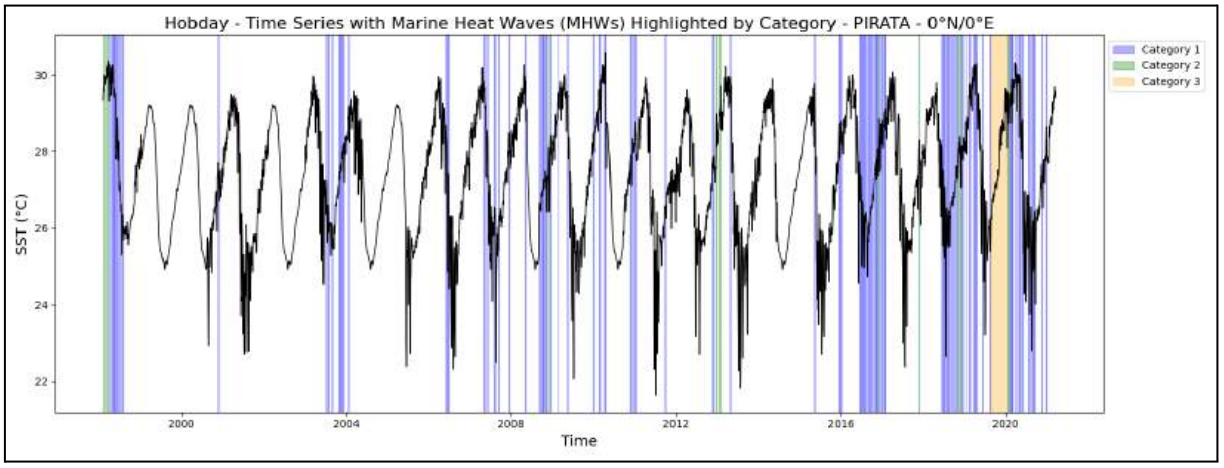
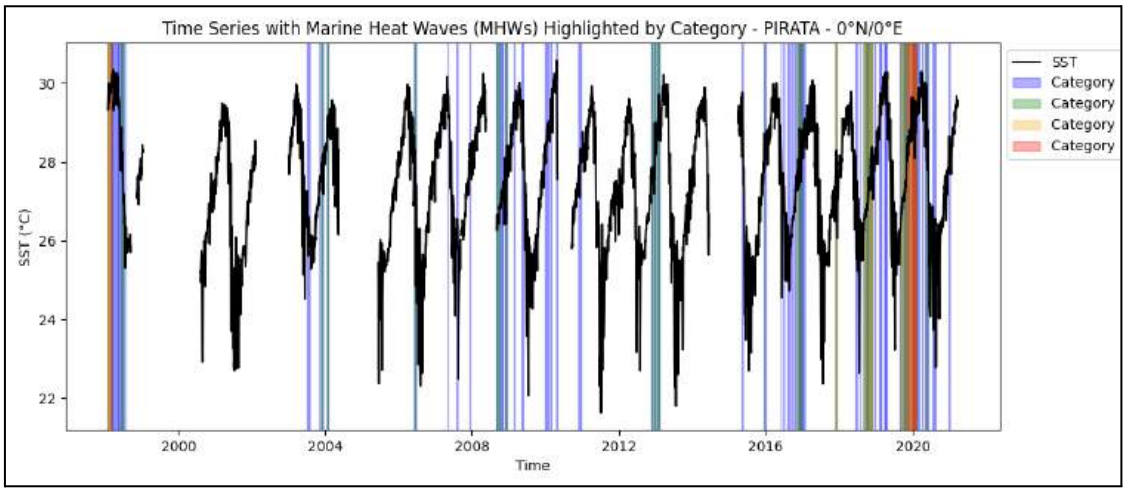


Figura 18: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote *PyMHW*.



A duração e as intensidades média, máxima e acumulada são os parâmetros mais utilizados na análise de ondas de calor marinhas, dependendo do objetivo do estudo, e foram avaliados neste trabalho para entender o comportamento dos eventos ao longo do tempo. A Figura 19 apresenta a análise dos mesmos parâmetros para a mesma estação, porém com os resultados obtidos pelo pacote *MarineHeatWaves*. Neste caso, dois eventos distintos se destacam por seus valores máximos e com diferentes características. O primeiro evento exibe as maiores intensidades média e máxima de toda a série temporal. Já o segundo, um evento mais recente, é caracterizado por uma maior duração e uma intensidade acumulada superior, associada a um período prolongado de persistência. A Figura 20 apresenta os resultados dessas análises para a estação 0N0W utilizando o pacote *PyMHW*. Pode-se notar um aumento desses parâmetros ao longo das ocorrências das ondas de calor, especialmente nas intensidades. Observa-se que a mesma onda de calor marinha concentra os maiores valores desses parâmetros, embora nem sempre uma mesma onda seja tanto a mais duradoura quanto a mais intensa.

Figura 19: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo *MarineHeatWaves*.

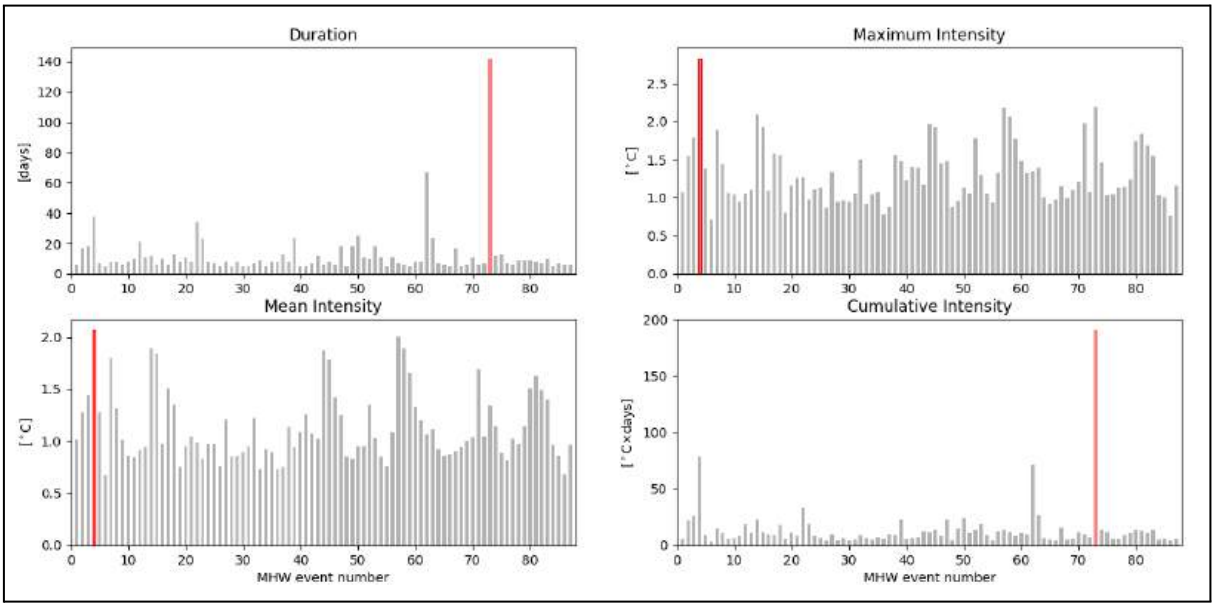
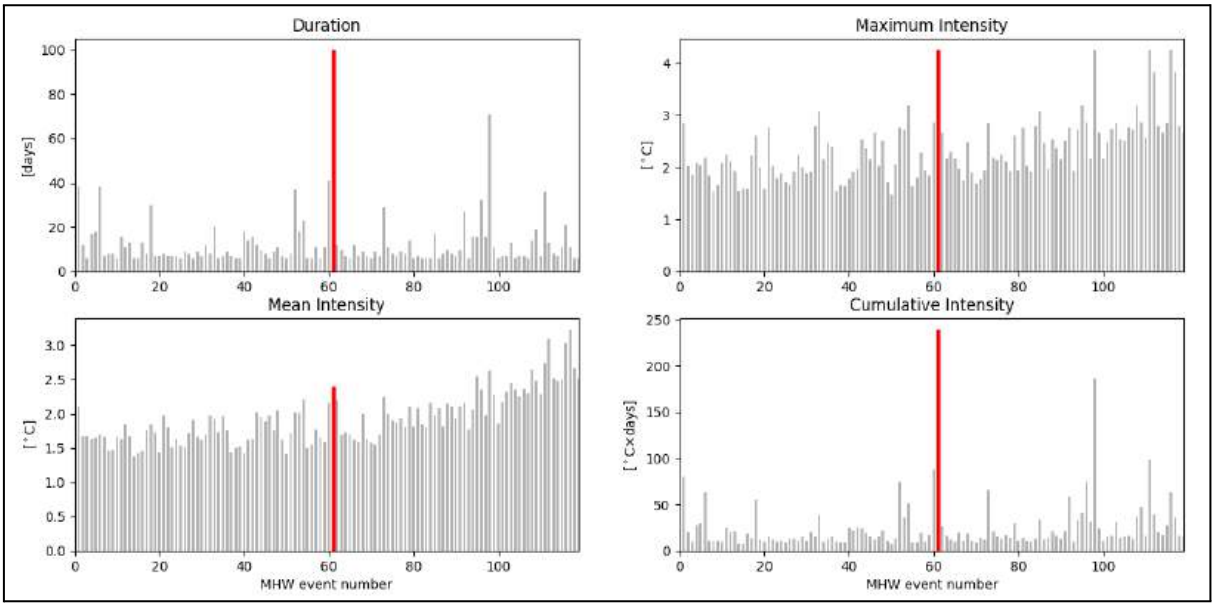


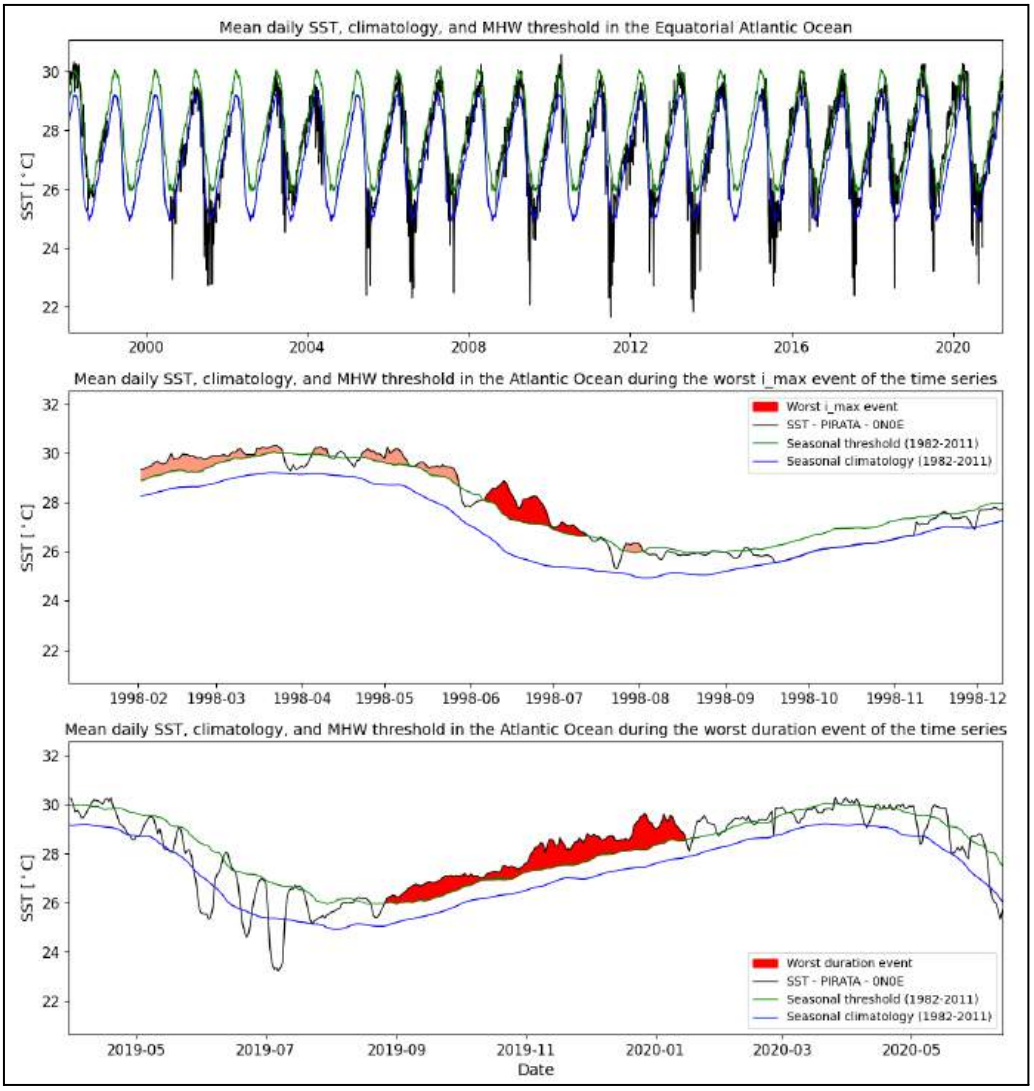
Figura 20: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo *PyMHW*.



De modo geral, em termos de magnitude e distribuição das ocorrências ao longo do tempo, os dois pacotes apresentaram respostas distintas. Na prática, ao analisar a estação 0N0E, nota-se que a intensidade máxima está mais relacionada à interação entre a

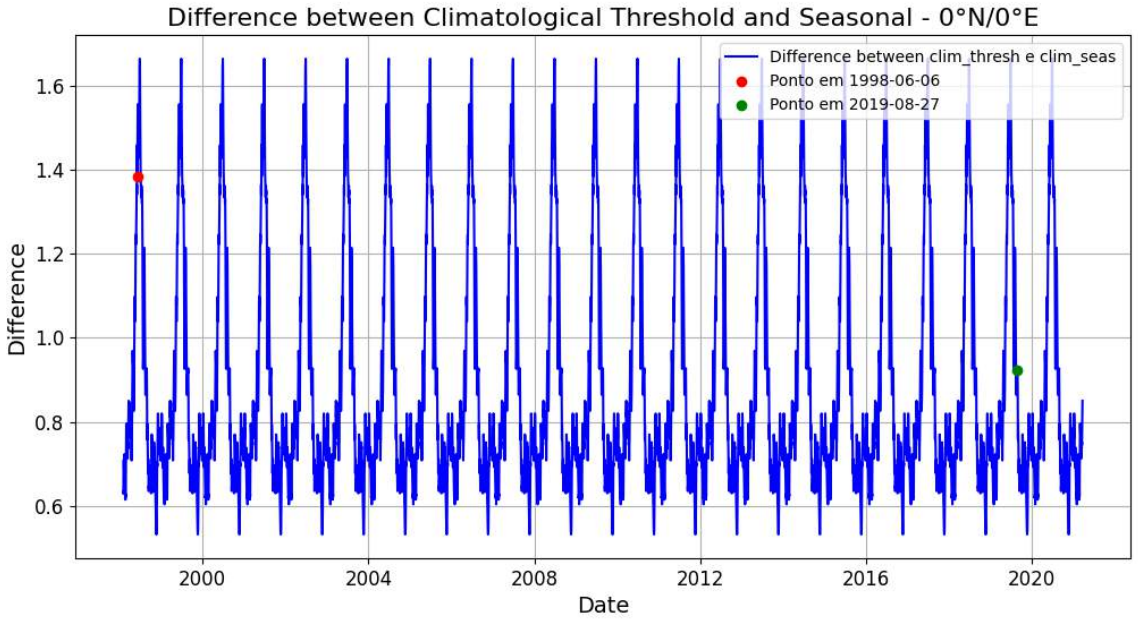
climatologia e o limiar de detecção das ondas de calor, do que com a categorização das mesmas. Para explorar mais a fundo esse aspecto, foram analisadas as duas ondas de calor marinhas - a mais duradoura e a de maior intensidade máxima da estação 0N0E - conforme descrito na Figura 20 anteriormente. Nesta nova análise, mostrada na Figura 21, a onda de calor é destacada em vermelho nas Figuras 21B e 21C, ilustrando o período de suas ocorrências e detalhando a relação entre a climatologia e o limiar de detecção de ondas de calor marinhas adotado pelo *MarineHeatWaves*. Na Figura 21B, onde a onda de calor é caracterizada pela maior intensidade, a classificação desse evento como categoria 1. Já no evento mais duradouro, a onda de calor tem categoria 3. Isso se deve pela intensidade máxima ser a diferença entre o pico da série e a base climatológica e a categoria ser definida pela amplitude a partir do limiar. Na Figura 21B é possível observar que a diferença entre o pico e a base climatológica é muito maior que o evento exibido na Figura 21C.

Figura 21: A - Série temporal com os dados de temperatura superficial da água do mar, a climatologia e o limiar calculado a partir do percentil de 90. B - Detalhe do evento de maior intensidade média e máxima de ondas de calor marinhas da série temporal. C - Detalhe do evento mais duradouro e de maior intensidade acumulada de ondas de calor marinhas da série temporal.



Para complementar essa observação, a Figura 18 mostra a diferença entre a climatologia e o limiar e o posicionamento desses eventos. O evento de maior intensidade máxima e média está localizado na curva de maior diferença entre a climatologia e o limiar. Enquanto o evento de maior duração se encontra mais abaixo na curva, se localizando em uma posição de menor diferença entre as curvas.

Figura 22: Localização dos eventos ao longo da diferença entre a climatologia e o limiar do percentil de 90.

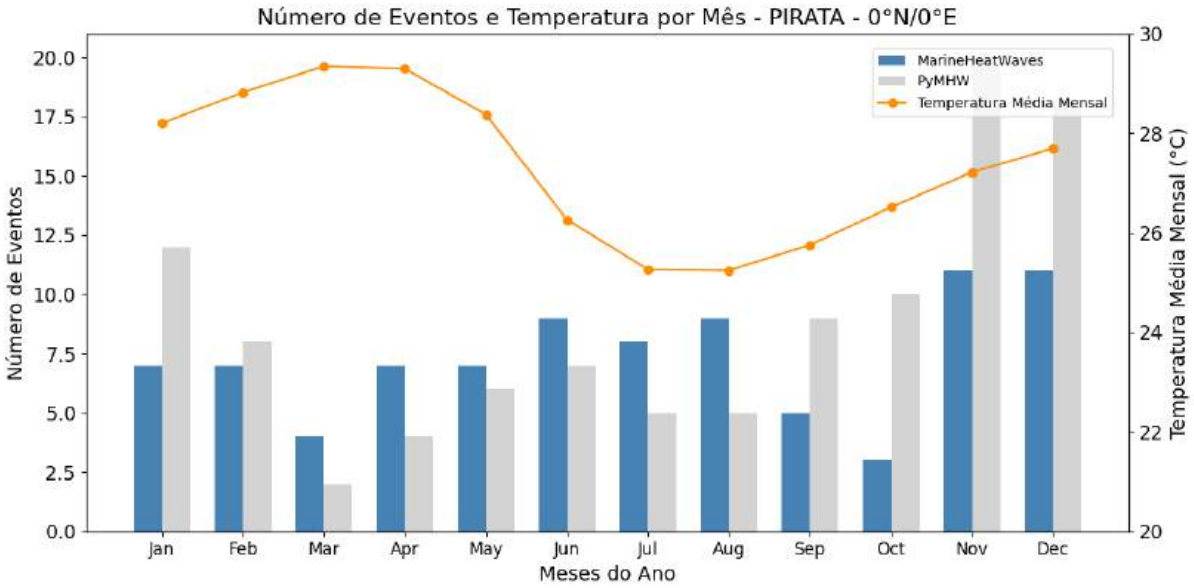


Dando continuidade às análises das ondas de calor marinhas, o objetivo é ampliar o escopo da investigação para, além de caracterizar e compreender os eventos e suas projeções, identificar potenciais impactos futuros. Este estudo busca não apenas contribuir para o entendimento desses fenômenos, mas também oferecer uma base robusta para previsões e, quando possível, mitigar suas consequências. Nesse contexto, foi realizada uma análise sazonal das ondas de calor marinhas.

As Figuras 23 e 24 ilustram o número de eventos de ondas de calor ao longo dos meses, bem como a temperatura média da superfície do mar em cada período. Os eventos foram identificados utilizando pacotes específicos para detecção de ondas de calor marinhas, enquanto as temperaturas médias mensais foram extraídas dos dados das bóias do Projeto PIRATA. A Figura 23 apresenta os resultados obtidos com o pacote *MarineHeatWaves* e a Figura 24, os resultados do pacote *PyMHW*. Ambos os pacotes mostram uma distribuição semelhante ao longo dos meses, com maior concentração de eventos nos meses de novembro e dezembro. Além disso, à medida que os valores da temperatura superficial do mar começam

a diminuir a partir de maio, observa-se um aumento na frequência de eventos, particularmente com o pacote *MarineHeatWaves*, nos meses adjacentes.

Figura 23: Distribuição do número de eventos de ondas de calor marinhas calculados a partir dos pacotes *MarineHeatWaves, PyMHW* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses.



Esse padrão evidencia que as MHWs não estão restritas aos meses mais quentes, o que é particularmente relevante para certas aplicações biológicas. Em algumas espécies de algas marinhas, como o *Scytothalia dorycarpa*, o ciclo reprodutivo ocorre em estações mais frias, e durante esse período, os estágios iniciais de desenvolvimento são mais sensíveis ao estresse térmico do que os adultos (Lotze *et al.,* 2001). (Andrews *et al*., 2014) demonstraram que a sobrevivência dos juvenis de pós-assentamento dessa espécie depende fortemente da temperatura, com maiores taxas de sobrevivência nas condições mais frias, enquanto temperaturas elevadas resultam em mortalidade aumentada ou total. Nesse contexto, uma MHW durante uma estação fria pode comprometer o recrutamento de algas marinhas formadoras de habitat.

Para enriquecer essa análise, as Figuras 24 e 25 apresentam a variação da intensidade máxima das ondas de calor ao longo dos meses, por meio de gráficos boxplot. No gráfico também são incluídas as médias mensais da temperatura da superfície do mar. Nessa avaliação, os pacotes revelam diferentes padrões nos resultados. Na Figura 24, as maiores

intensidades máximas mensais e suas variações se concentram nos meses com temperaturas superficiais mais baixas. Por outro lado, na Figura 25, observa-se que as maiores intensidades de ondas de calor ocorrem nos meses que antecedem os picos de temperatura da superfície do mar. No ápice das temperaturas, as intensidades máximas mensais e suas variações são relativamente menores.

Figura 24: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote *MarineHeatWaves* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses.

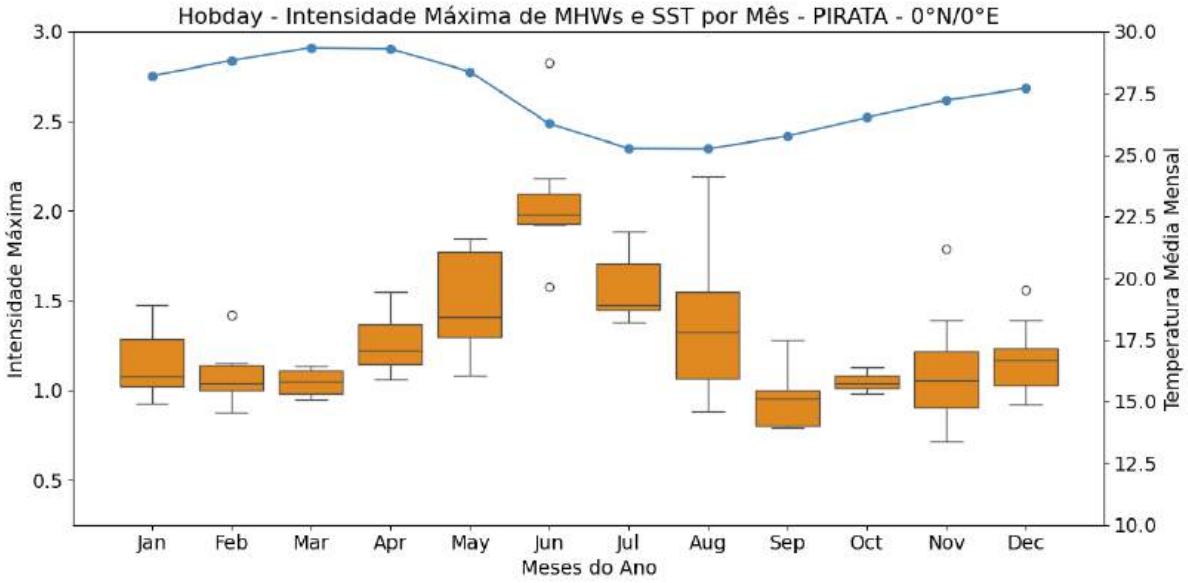
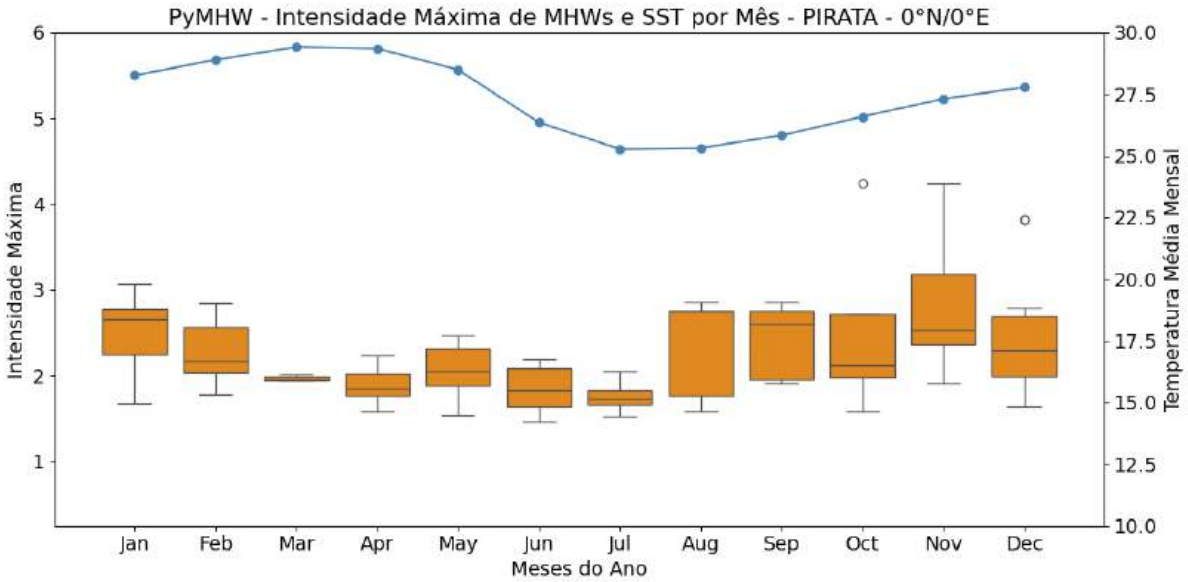


Figura 25: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote *PyMHW* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses.



Até o momento, foram apresentados os resultados dos parâmetros das ondas de calor marinhas, bem como as diferentes abordagens utilizadas para a detecção desses eventos através dos distintos pacotes de identificação, cada um com seus próprios métodos. No entanto, além de estudar o clima e compreender os fenômenos e suas características, é igualmente necessário examinar o ambiente ao redor e os fatores que podem influenciar esses eventos. No contexto do Oceano Atlântico Tropical, uma região que sofre influência direta e indireta de diversos fenômenos climáticos, não é simples determinar a origem exata ou o grau de contribuição de cada evento para a ocorrência das ondas de calor marinhas. No contexto do estudo de fenômenos climáticos, como as ondas de calor marinhas no Oceano Atlântico Tropical, um dos maiores desafios enfrentados pelos pesquisadores é a falta de dados disponíveis e contínuos. A ausência de séries temporais completas e de alta resolução espacial e temporal compromete a capacidade de identificar padrões consistentes e de entender a influência de fenômenos climáticos, como El Niño e a Oscilação do Atlântico Norte (NAO), na formação e intensificação das ondas de calor marinhas (Hobday *et al*., 2016). Essa escassez de dados, especialmente em regiões oceânicas remotas, afeta a precisão das modelagens climáticas e das previsões sobre a variabilidade das condições ambientais. Estudos como os de Lentini *et al*. (2023) destacam que a falta de cobertura contínua, tanto por boias quanto por satélites, resulta em lacunas no entendimento dos processos climáticos complexos, como a interação entre correntes oceânicas e a atmosfera. Esses desafios comprometem a elaboração

de estratégias eficazes de mitigação e adaptação às mudanças climáticas e às suas consequências nos ecossistemas marinhos.

Para aprofundar a compreensão das ondas de calor marinhas e suas possíveis influências climáticas, utilizam-se ferramentas estatísticas avançadas, como a análise da Transformada Contínua de Wavelet (CWT) e Cross Wavelet Transform (XWT). Essas técnicas são amplamente empregadas na identificação de padrões temporais em séries de dados ambientais, permitindo a detecção de variabilidades em diferentes escalas de tempo. Ao contrário das abordagens tradicionais, a análise de wavelets permite examinar séries temporais de forma localizada, fornecendo direção sobre como a variabilidade do sinal climático evolui ao longo do tempo e em diversas frequências. O comportamento do sinal climático é dinâmico e apresenta oscilações em frequências variadas, cada uma associada a processos físicos e fenômenos naturais distintos. Fenômenos oceânicos, como correntes de maré e frentes oceânicas, provocam flutuações rápidas na temperatura da superfície do mar, refletindo oscilações que vão de dias a semanas. Essas oscilações de curta duração são cruciais para a previsão de eventos climáticos extremos e suas consequências (Hobday *et al*., 2016). Em contraste, oscilações sazonais, ligadas a mudanças previsíveis na temperatura da água ao longo do ano, são influenciadas pela inclinação da Terra e pela posição do sol (Feldman & Vardavas, 1995). Além disso, as mudanças climáticas provocam oscilações em escalas multidecadal, afetando a temperatura média da superfície do mar e resultando em tendências de aquecimento global (IPCC, 2023). Essa dinâmica é especialmente relevante para as MHWs, uma vez que o aquecimento global tende a aumentar a frequência e a intensidade desses eventos (Oliver *et al*. 2018).

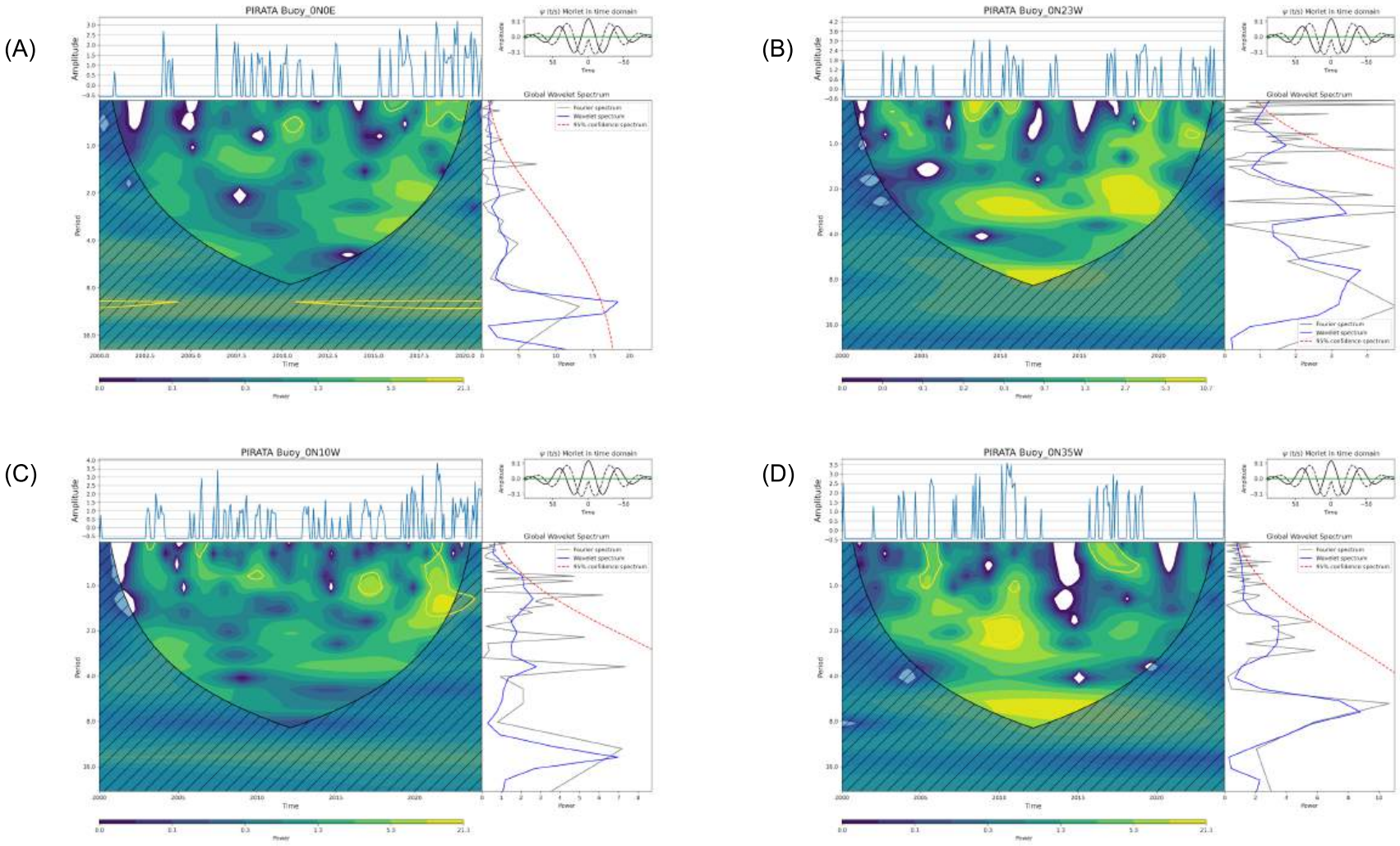
Para a análise de wavelet foram utilizados os dados das intensidades máximas mensais das ondas de calor provenientes do pacote *MarineHeatWaves*. A estação 0N3W não foi incluída, pois sua operação começou apenas em 2021 pois não seria viável analisar a influência de fenômenos climáticos que operam em escalas de tempo maiores. O início de todas as análises foi realizado a partir de janeiro de 2000 com limite até o limite máximo de dados coletados da bóia até 30 de junho de 2024.

A Figura 26 apresenta a análise wavelet simples para a estação 0N0E, enquanto os gráficos correspondentes às demais estações estão disponíveis no Apêndice 1. No primeiro gráfico, referente à amplitude, são exibidos os dados das intensidades máximas das ondas de

calor ao longo do tempo. O gráfico "Global Wavelet Spectrum" fornece uma visão mais condensada da distribuição de energia em diferentes escalas ao longo do período de análise. Já na análise wavelet apresentada pelo cone de confiança, o eixo y representa as escalas de frequência, associadas a diversos processos climáticos, que vão desde oscilações de curto prazo até padrões de longo prazo. As cores do gráfico indicam a intensidade da energia em cada escala e período: cores mais quentes (vermelho e amarelo) correspondem a maior intensidade, enquanto cores mais frias (azul e verde) indicam menor intensidade. As áreas em branco refletem a ausência de dados.

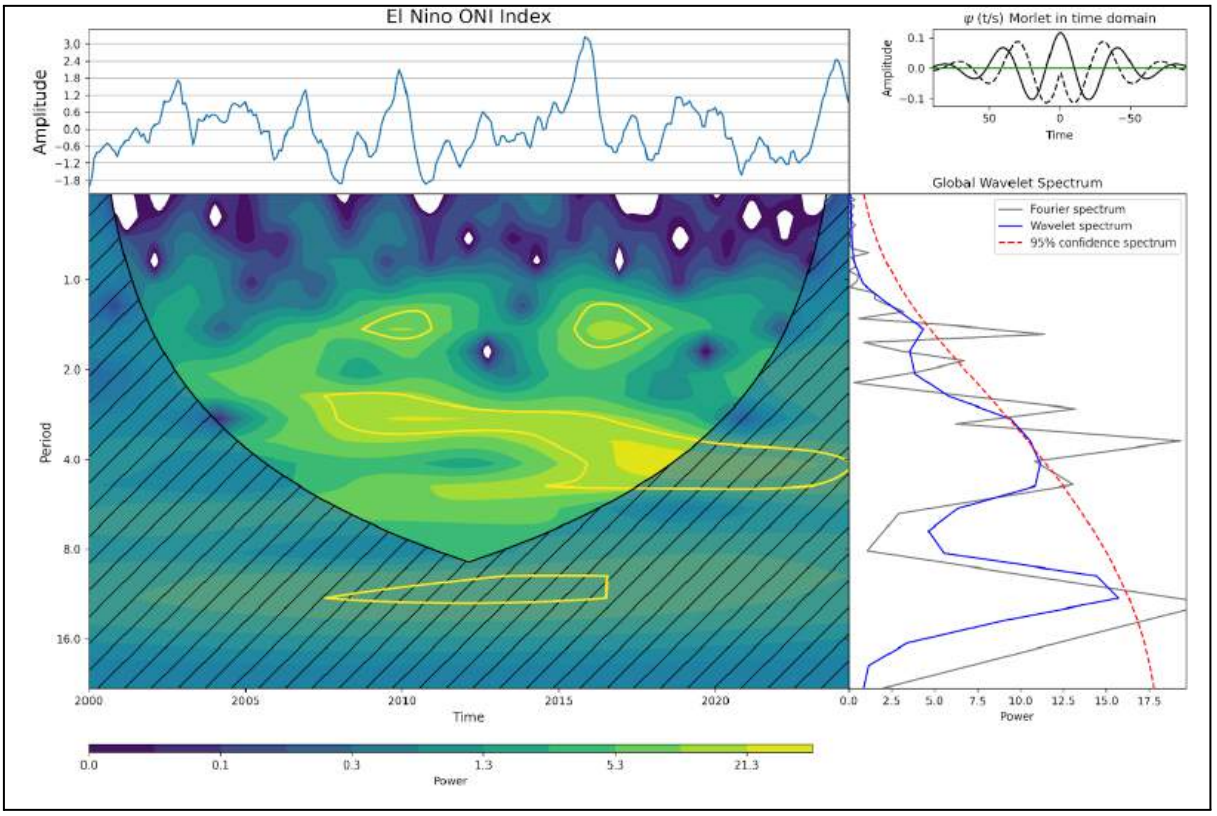
Na estação 0N0E, eventos significativos acima do nível de confiança foram observados em diferentes frequências. O primeiro evento ocorreu antes de 1 ano, o segundo em torno de 1 ano, o terceiro por volta de 1 ano e meio, e o último em aproximadamente 12 anos. A estação 0N10W apresentou sinais com frequências significativas no intervalo de meses até 1 ano. Já a estação 0N23W registrou resultados relevantes para frequências em torno de 1 ano. Por fim, a estação 0N35W também apresentou sinais significativos para frequências menores que 1 ano. Esses resultados sugerem que eventos com frequências mais curtas podem ter uma influência maior sobre a intensidade máxima das ondas de calor marinhas.

Figura 26: Transformada de Wavelet do dos dados da nóia do Projeto PIRATA.



A transformada de wavelet possibilita a decomposição do Índice de Oscilação de El Niño em suas diferentes componentes de frequência, revelando padrões de oscilações que podem passar despercebidos em análises convencionais. A Figura 27 apresenta os resultados da análise wavelet aplicada ao NOI. Observa-se que as frequências mais intensas associadas ao fenômeno El Niño ocorrem em períodos de 1 a 2 anos, em torno de 4 anos, e aproximadamente a cada 12 anos, destacando a presença de oscilações em múltiplas escalas temporais.

Figura 27: Transformada de Wavelet do Índice de Oscilação do El Niño (NOI).



Para investigar as possíveis relações entre as ondas de calor marinhas e fenômenos climáticos de larga escala, como o El Niño, utilizamos a análise Cross Wavelet Transform. Essa técnica permite identificar correlações entre duas séries temporais em diferentes escalas de tempo, revelando como esses fenômenos podem estar associados ao comportamento das MHWs em diferentes períodos. Ao analisar as frequências em que essas correlações ocorrem, podemos identificar padrões de interação entre os eventos, bem como os atrasos ou

sincronizações entre eles. Isso nos ajuda a compreender as influências climáticas sobre as MHWs e a identificar as escalas de tempo mais relevantes para esses fenômenos.

O gráfico de uma wavelet cruzada exibe as regiões onde as duas séries apresentam maior coerência ao longo do tempo e nas diversas frequências. As áreas de alta coerência são destacadas por cores mais intensas, indicando que os sinais das duas séries se comportam de forma semelhante em determinadas escalas temporais. As setas no gráfico indicam a fase relativa entre os sinais: setas para a direita indicam que as séries estão em fase (ou seja, os picos e vales ocorrem simultaneamente), enquanto setas para a esquerda mostram que as séries estão em oposição de fase. Setas apontando para cima ou para baixo indicam um atraso de fase, onde uma série pode estar liderando a outra em um determinado intervalo de tempo.

A Figura 28 apresenta os resultados da análise de wavelet cruzada entre as intensidades máximas das ondas de calor marinhas e o índice mensal de El Niño.

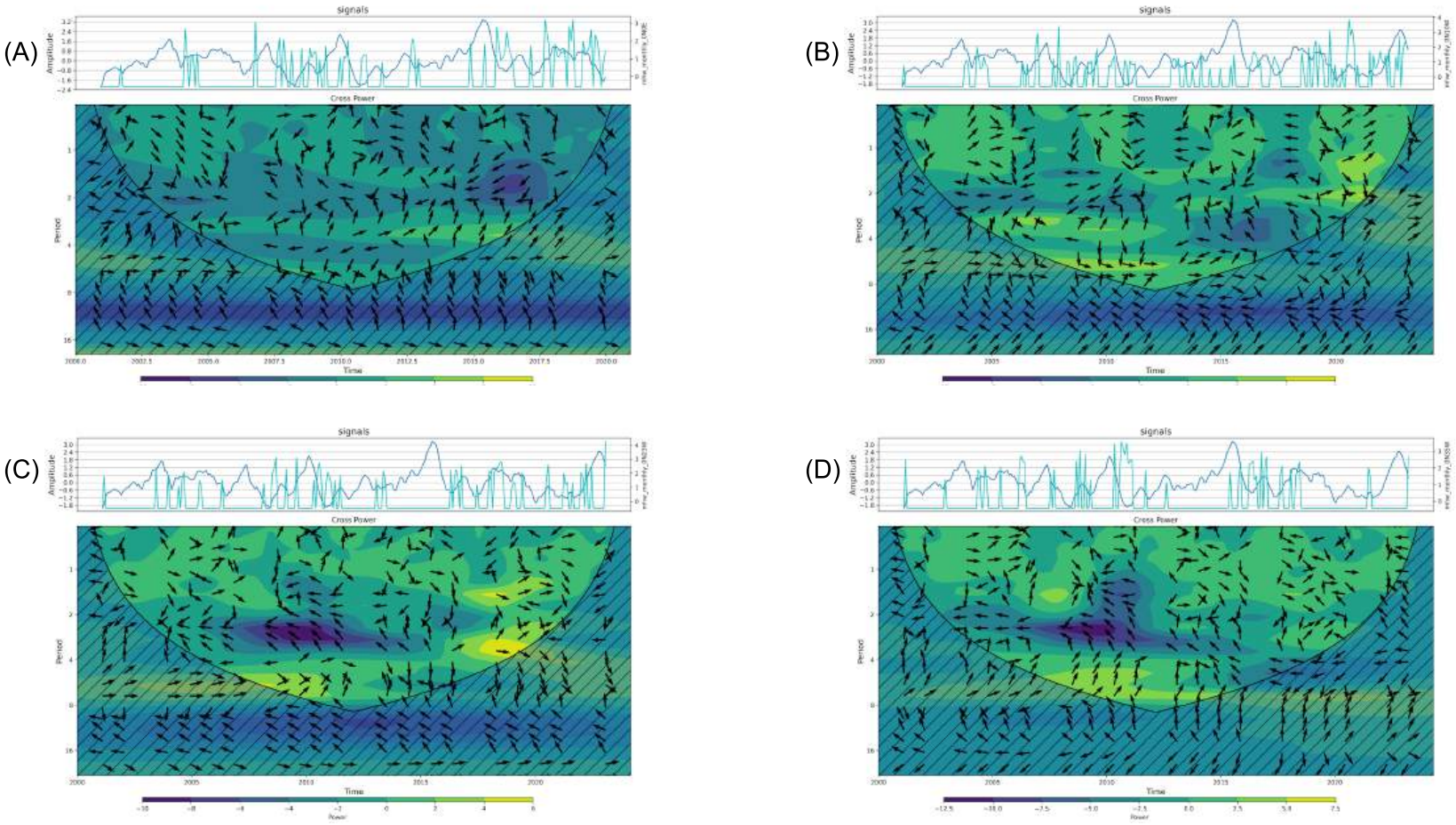
Na estação 0N0E, os resultados da wavelet cruzada não revelaram muitas correlações significativas entre as intensidades das ondas de calor marinhas e o índice de El Niño. Dentro do cone de significância, observou-se um sinal em torno de 2016, com uma periodicidade entre 1 e 2 anos e intensidade negativa e fora de fase. Apesar de essa estação registrar as maiores durações e intensidades acumuladas de ondas de calor marinhas, não foi identificada uma correlação substancial entre a intensidade máxima e os os eventos de El Niño. Fora do cone de significância, há indícios de correlação em ciclos de aproximadamente 12 anos ao longo de toda a série temporal, mas esses sinais devem ser interpretados com cautela, devido à baixa confiabilidade estatística.

Na estação 0N10W, os resultados dentro do cone de significância não apresentaram sinais expressivos que indicariam uma correlação robusta entre as variáveis. Entretanto, fora do cone de significância, foi detectado um sinal que se intensifica à medida que a série temporal avança, com um período de aproximadamente 12 anos, o que pode sugerir uma interação de longo prazo entre os fenômenos, ainda que careça de significância estatística.

Na estação 0N23W, um sinal de intensidade negativa observado dentro do cone de significância está provavelmente relacionado ao El Niño, resultando em um conjunto fora de fase. No entanto, próximo aos anos de 2018-2019, um sinal de alta intensidade, com uma periodicidade de 4 anos e em fase, sugere uma possível correlação entre os eventos de MHW e El Niño, indicando uma interação mais direta nesse período. Os sinais das séries temporais

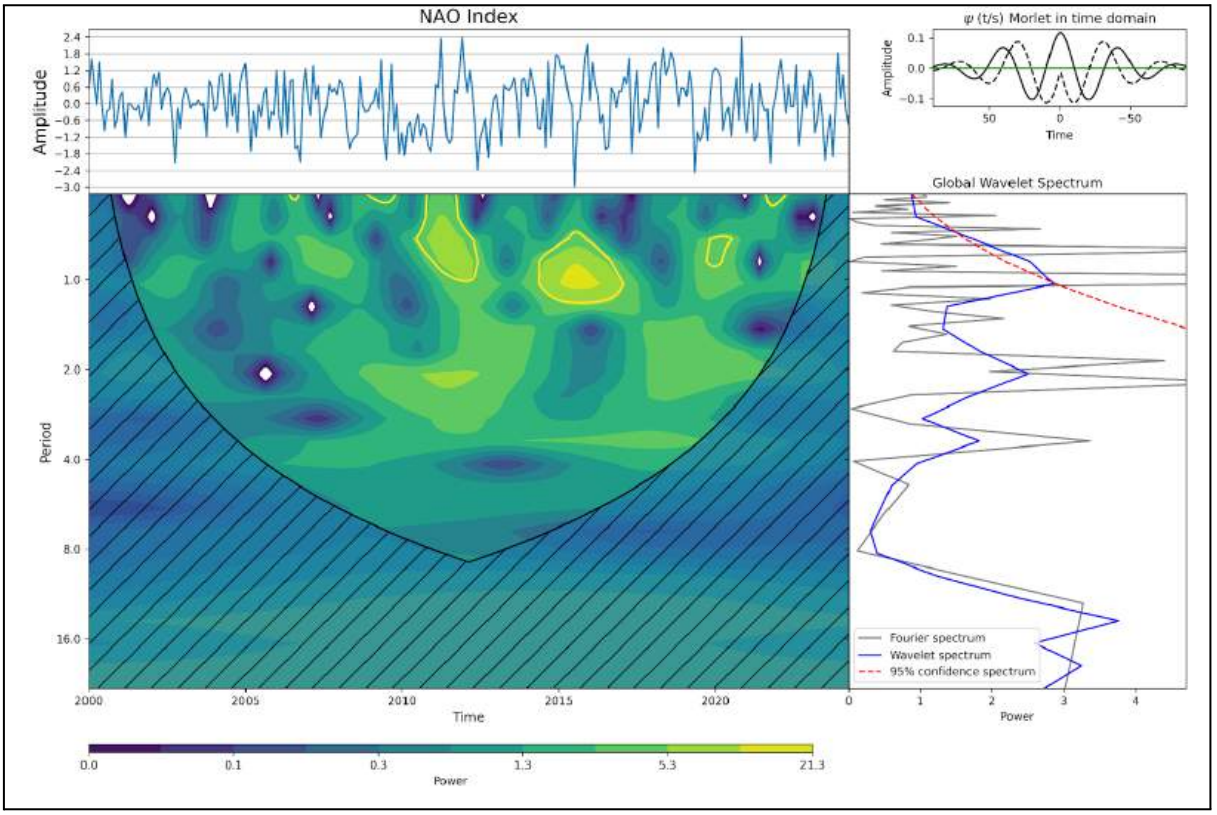
confirmam essa correlação, aumentando as chances de ser uma real correlação entre as variáveis. Já na estação 0N35W, o sinal de intensidade negativa dentro do cone de significância segue o mesmo comportamento para a estação 0N23W resultando em variáveis fora de fase.

Figura 28: Análise de cross-wavelet entre as intensidades máximas de ondas de calor marinhas e o índice de El Niño em quatro estações PIRATA. (A) Estação 0N0E, (B) Estação 0N10W, (C) Estação 0N23W e (D) Estação 0N35W.



Após a investigação dos padrões de variabilidade temporal associados ao fenômeno do El Niño por meio da análise de wavelets, é pertinente direcionar o foco para outro fenômeno climático significativo: a Oscilação do Atlântico Norte (NAO). Assim como o El Niño, a NAO é importante na modulação do clima, influenciando padrões atmosféricos e oceânicos em escalas regionais e globais. A análise de wavelets permitirá verificar as flutuações do NAO em diferentes escalas de tempo, mostrando suas interações complexas com as ondas de calor marinhas. Através dessa abordagem, é possível compreender melhor como as variações no índice da NAO se manifestam ao longo do tempo e como essas mudanças podem impactar as condições climáticas globais. A Figura 29 apresenta os resultados da transformada de wavelet aplicada ao índice da Oscilação do Atlântico Norte (NAO). A análise revela que o NAO é predominantemente estimulado em escalas de tempo mais curtas, exercendo influência significativa em eventos de alta frequência, correspondentes a períodos iguais ou inferiores a um ano. Notavelmente, observa-se um sinal intenso em 2016, com um período próximo a um ano, o que sugere uma forte interação do NAO com a variabilidade climática durante esse período.

Figura 29: Transformada de Wavelet do Índice de Oscilação do Atlântico Norte (NAO).



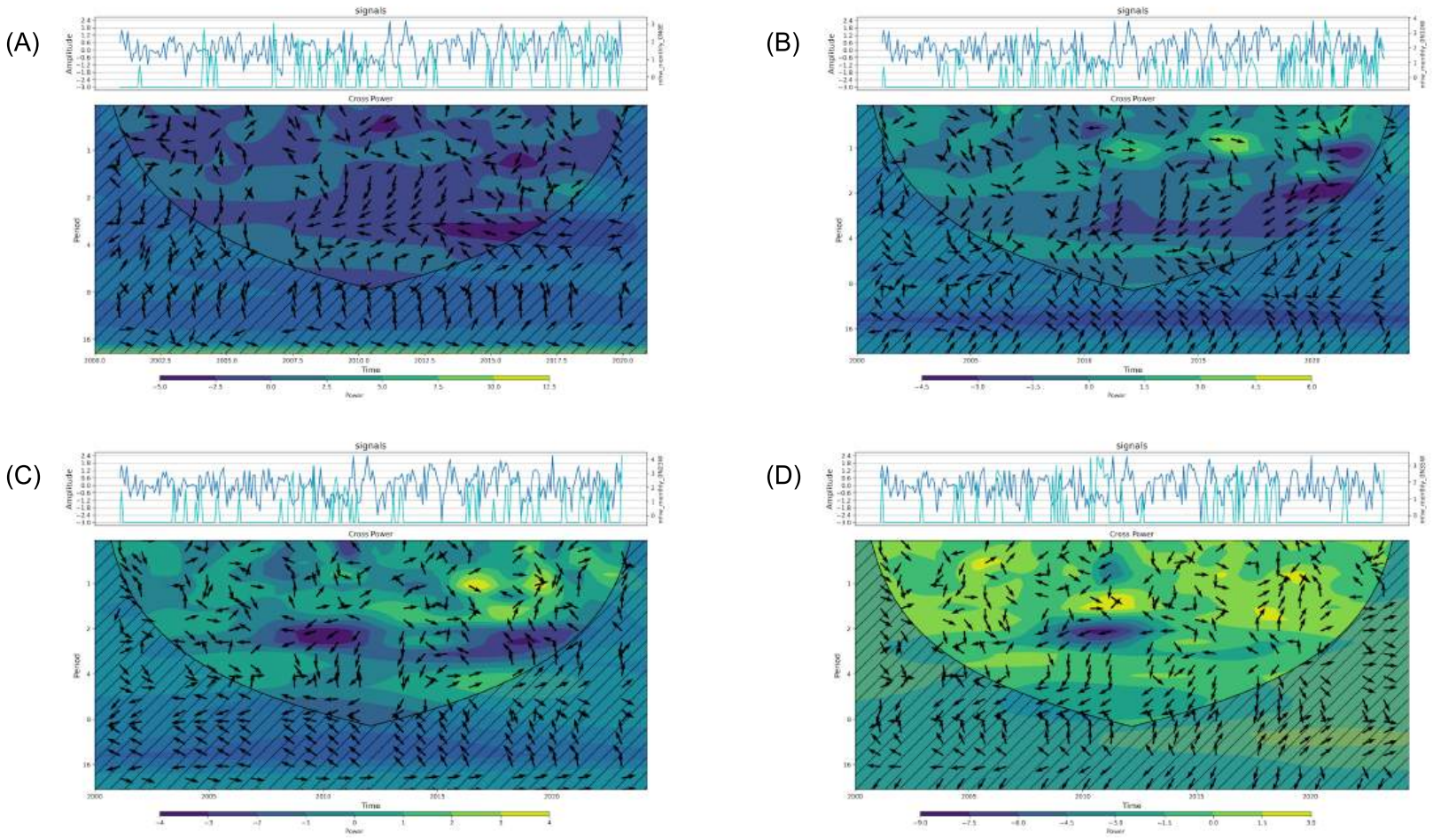
A análise de wavelet cruzada entre as intensidades máximas das ondas de calor marinhas e o índice mensal de oscilação do Atlântico Norte (NAO) revela resultados interessantes (Figura 30). Na estação 0N0E, dentro do cone de significância, identificaram-se dois sinais relevantes. O primeiro sinal, semelhante ao que foi observado para o índice de Oscilação do El Niño, apresenta um período de 1 a 2 anos, com intensidade negativa e dominância do NAO sobre as intensidades máximas das Ondas de Calor Marinhas em torno de 2016. É importante ressaltar que o El Niño também exerce uma influência significativa sobre a NAO, afetando os padrões de circulação atmosférica e as temperaturas oceânicas no Atlântico Norte. Estudos indicam que durante os eventos de El Niño, ocorrem mudanças na pressão atmosférica que podem alterar a força e a fase da NAO, o que, por sua vez, impacta as condições climáticas e oceanográficas na região (Kumar & Ho, 2012). O segundo sinal, com um período aproximado de quatro anos e também de intensidade negativa, ocorre entre o segundo semestre de 2012 e o primeiro semestre de 2017.

Na estação 0N10W, três sinais principais foram observados. O primeiro, com intensidade positiva em 2016, encontra-se em fase, dentro do período de 1 a 2 anos. O segundo sinal, também no período de 1 a 2 anos, aparece aproximadamente entre o segundo semestre de 2021 e o primeiro semestre de 2022, apresentando um sinal de intensidade negativa, mas fora de fase entre as variáveis analisadas. O terceiro sinal, entre 2019 e 2021, no período de 2 anos, também é de intensidade negativa. Embora fora do cone de significância, um sinal com intensidade negativa foi identificado em um período de aproximadamente 15 anos, sugerindo uma interação de longo prazo entre os fenômenos, embora careça de significância estatística.

Na estação 0N23W, foram encontrados quatro sinais significativos dentro do cone de significância. O primeiro sinal, entre 2009 e 2011, com um período de 2 a 3 anos, apresenta intensidade negativa. O segundo sinal, que também aparece na estação 0N10W, entre 2019 e 2021, é negativo e ocorre em um período semelhante de 2 a 3 anos. O terceiro sinal, próximo de 2016, apresenta intensidade positiva e está em fase, com um período próximo de 1 ano. O quarto sinal, no segundo semestre de 2019, também está em fase, com um período semelhante de 1 ano. Fora do cone de significância, não foi identificado nenhum sinal relevante.

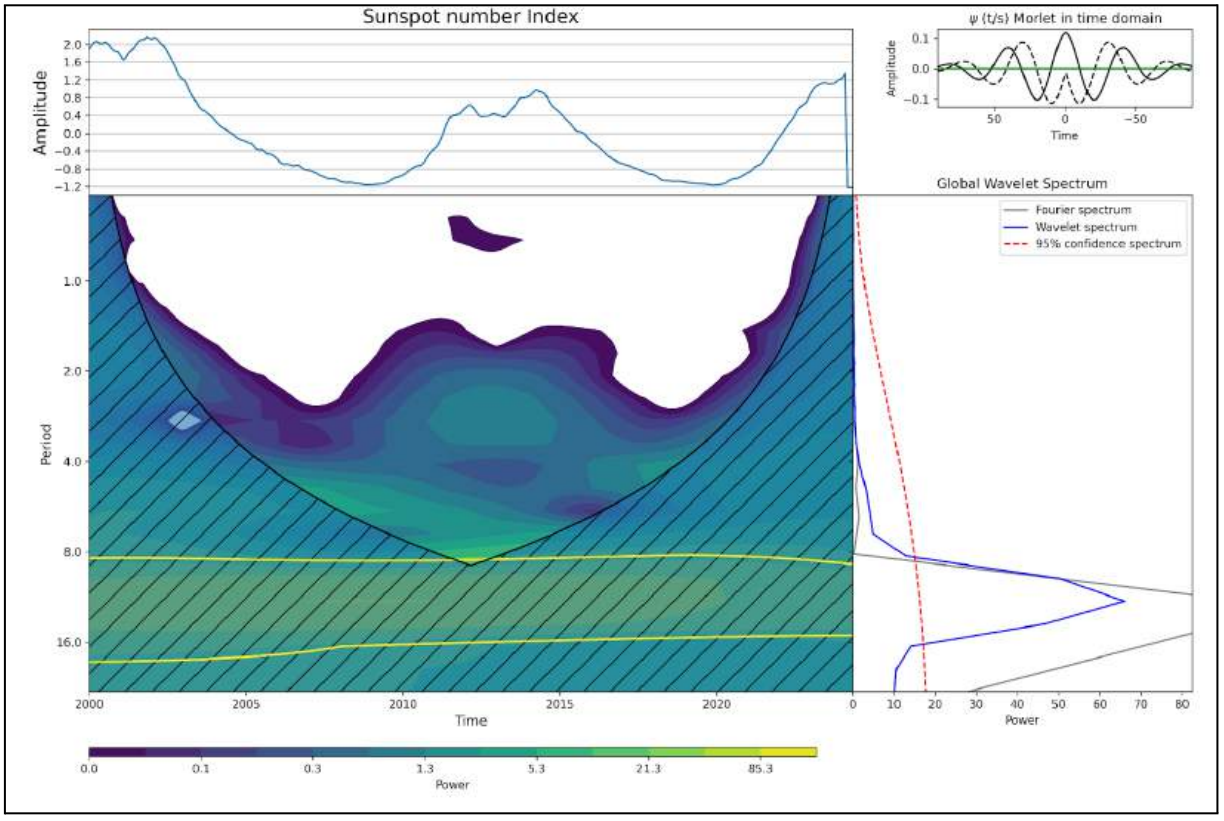
Por fim, na estação 0N35W, que apresenta, em geral, intensidades mais elevadas, foram identificados sinais significativos dentro do cone de significância. Um desses sinais, também observado na estação 0N23W, apresentou intensidade negativa entre os anos de 2009 e 2011, com as variáveis analisadas em desacordo de fase. Os resultados estão alinhados com estudos anteriores, como o de Chen *et al*. (2019), que indicam a influência do NAO nas MHWs. Os autores demonstraram uma relação entre o NAO e as temperaturas da superfície do mar, reforçando a ideia de que as flutuações no NAO podem impactar as intensidades das ondas de calor marinhas em várias regiões do Atlântico.

Figura 30: Análise de cross-wavelet entre o índice de Oscilação do Atlântico Norte e as séries temporais das estações PIRATA. (A) Estação 0N0E, (B) Estação 0N10W, (C) Estação 0N23W e (D) Estação 0N35W.



O índice SILSO, que se refere à contagem de manchas solares e aqui é considerado um proxy de atividade solar, pode influenciar as ondas de calor marinhas. Em períodos de alta atividade solar, com mais manchas solares, há um aumento na radiação solar que pode contribuir para o aquecimento das águas superficiais em determinadas regiões, potencialmente intensificando as ondas de calor marinhas. Por outro lado, em períodos de baixa atividade solar, a redução na radiação pode amenizar o aquecimento das águas, influenciando indiretamente a frequência e a intensidade das MHWs. Conforme ressaltado por White *et al*. (1997), a variabilidade solar pode afetar o transporte de calor pelos oceanos, modificando o equilíbrio térmico das águas superficiais. Assim, as MHWs podem estar correlacionadas a períodos de alta atividade solar, em que as águas superficiais recebem mais radiação. Analisando a Figura 31, fica evidente que existe um forte sinal entre 8 e 17 anos..

Figura 31: Transformada de Wavelet do Índice de manchas solares.



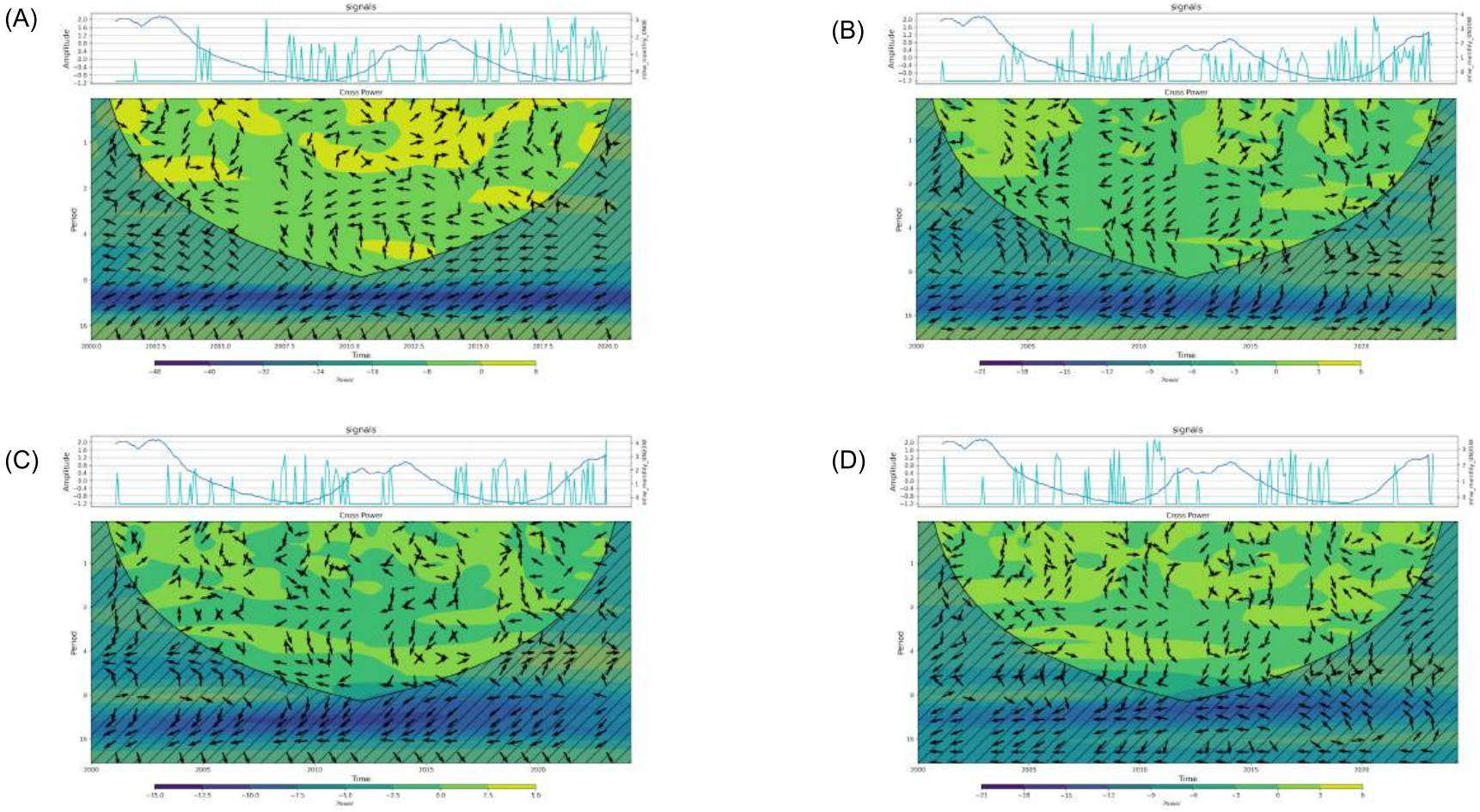
Além disso, essa influência da variabilidade solar no oceano pode ser amplificada por outros fatores climáticos, como padrões de vento, correntes oceânicas e eventos como El

Niño, que interagem com as mudanças na radiação solar associadas ao ciclo das manchas solares (Gray *et al*., 2010).

A Figura 32 apresenta a análise de wavelet cruzada, onde o espectro global não apresenta valores para grandes frequências. Nas demais estações, não foram identificadas correlações significativas entre as variáveis analisadas no cone de influência. Fora do cone de significância, todas as estações exibiram um padrão de coerência com intensidade negativa, em torno de 8 a 16 anos de período, sugerindo uma correlação das variáveis fora de fase, principalmente a estação 0N0E.

É importante ressaltar que as análises wavelets foram pensadas utilizando as intensidades máximas das ondas de calor marinhas. No entanto, podem ser realizadas para qualquer outra variável das ondas de calor marinhas, a fim de encontrar correlações que expliquem suas influências.

Figura 32: Análise de cross-wavelet entre o índice de manchas solares e as séries temporais das estações PIRATA. (A) Estação 0N0E, (B) Estação 0N10W, (C) Estação 0N23W e (D) Estação 0N35W.



É importante ressaltar que as análises wavelets foram pensadas utilizando as intensidades máximas das ondas de calor marinhas. No entanto, podem ser realizadas para qualquer outra variável.

6. CONCLUSÕES

A análise das ondas de calor marinhas no Oceano Atlântico Tropical mostra a complexidade e a relevância desses fenômenos climáticos. A combinação de dados provenientes de diferentes fontes, juntamente com a aplicação de metodologias robustas, como a análise de correlação de Pearson e a análise de wavelet, proporcionou uma compreensão mais aprofundada das interações entre as ondas de calor marinhas e os fenômenos climáticos de grande escala, como o El Niño e a Oscilação do Atlântico Norte (NAO). Os resultados indicam que as MHWs não são eventos isolados, mas parte de um sistema dinâmico influenciado por múltiplos fatores climáticos.

É importante ressaltar que, embora a utilização de dados climatológicos provenientes de fontes distintas dos dados *in situ* seja validada, é necessário realizar a análise para todas as estações de coleta, pois a correlação não é constante para todos os pontos geográficos. O cenário ideal seria a utilização de uma única fonte de dados ao longo de todo o estudo. Atualmente, no entanto, não há um banco de dados disponível que ofereça 30 anos de coleta *in situ* contínua, como o de uma bóia oceanográfica, para o período de 1982 a 2011. Mesmo que o espaço temporal dos monitoramentos por bóias oceanográficas existentes seja limitado, há a possibilidade de que, no futuro, se tenha um conjunto de dados *in situ* de 30 anos, caso haja uma mudança no período base utilizado para a climatologia.

Embora os monitoramentos *in situ* ofereçam uma forma adicional de monitorar fenômenos, eles não são a única ferramenta disponível. Os dados satelitais são essenciais para uma cobertura mais abrangente e contínua. Entretanto, os dados *in situ* têm a vantagem de representar com maior precisão a realidade local, oferecendo medidas diretas e detalhadas que complementam a análise feita por satélites. Além disso, esses dados têm a capacidade de alcançar diferentes profundidades, permitindo uma análise mais completa das ondas de calor marinho em diferentes camadas da coluna d'água.

Os dados analisados mostram que as MHWs têm se intensificado ao longo do tempo, evidenciado por um aumento na frequência e na duração dos eventos. A utilização de diferentes pacotes de análise, como *PyMHW* e *MarineHeatWaves*, ressaltou como a escolha da metodologia pode impactar a detecção e a caracterização das ondas de calor marinhas. Embora ambos os pacotes apresentem resultados qualitativos semelhantes, as diferenças quantitativas ressaltam a importância de uma abordagem cuidadosa na seleção de métodos para garantir a consistência e a comparabilidade dos dados.

A análise sazonal das MHWs revelou padrões interessantes, com eventos ocorrendo não apenas nos meses mais quentes, mas também em períodos mais frios, o que pode ter implicações significativas para o ecossistema marinho. A interação entre a temperatura da superfície do mar e as MHWs sugere que essas ondas de calor podem afetar o recrutamento de espécies marinhas, como algas, que são sensíveis a variações térmicas. Isso destaca a importância de considerar as MHWs em estudos ecológicos e de conservação. Estudos biológicos também são estudos escassos, principalmente quando se trata de impactos relacionados a esses eventos.

A análise de wavelet cruzada entre as MHWs e fenômenos climáticos, como o El Niño, NAO e manchas solares de baixa frequência revelou correlações significativas em diferentes escalas de tempo. Esses resultados enfatizam o que as referências bibliográficas já mostram, que as MHWs estão interligadas a padrões climáticos globais, e a compreensão dessas relações é primordial para prever futuros eventos de aquecimento marinho. A identificação de padrões de interação entre as MHWs e esses fenômenos pode auxiliar na formulação de estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Por fim, é fundamental que futuras pesquisas continuem a questionar e avaliar criticamente as metodologias empregadas na análise das ondas de calor marinhas. A escolha de técnicas estatísticas adequadas e a validação dos resultados são essenciais para garantir a confiabilidade das conclusões. Além disso, a transparência nas abordagens metodológicas permitirá uma comparação mais eficaz entre diferentes estudos, contribuindo para um conhecimento mais sólido. Ao buscar ser o mais fiel possível aos dados e resultados, os pesquisadores podem oferecer respostas significativas sobre as dinâmicas climáticas e seus impactos, fortalecendo assim a base para a formulação de políticas e estratégias de conservação.

8. TRABALHOS FUTUROS

Este estudo demonstra a importância de um aprofundamento de técnicas estatísticas para o monitoramento dos eventos de calor nos oceanos, conhecida como Ondas de Calor Marinhas. Potencialmente, as perspectivas de trabalhos futuros incluem o aprimoramento do pacote *PyMHW*, com melhorias em diversos aspectos matemáticos que incluem técnicas de suavização e a adaptação dinâmica para lidar com dados que apresentem lacunas grandes para a construção da climatologia. Além disso, podemos incluir séries com frequências diversas (por exemplo, mensal) para auxiliar na construção de climatologia, bem como a expansão das análises metodológicas e regionais das ondas de calor marinhas, incorporando dados de diferentes profundidades e planos horizontais, o que permitirá uma compreensão mais abrangente do fenômeno. Outra vertente importante é a integração de dados de correntes marinhas, facilitando a correlação da advecção e contribuição lateral no transporte de calor com as ondas de calor marinhas, e dessa forma enriquecendo a análise e interpretação dos dados. Por fim, há a intenção de ampliar a análise geográfica para outras regiões onde ocorrem MHWs mais intensas, contribuindo para uma compreensão mais ampla das características e implicações dessas ondas em diferentes contextos oceânicos. Esses planos têm por objetivo fortalecer a metodologia atual e ampliar a aplicação dos resultados, proporcionando um entendimento mais profundo das MHWs e suas interações com outros fenômenos climáticos e oceanográficos.

7. REFERÊNCIAS

Alexander, Michael A., Sang−Ik Shin, and David S. Battisti. 2022. “The Influence of the Trend, Basin Interactions, and Ocean Dynamics on Tropical Ocean Prediction.” *Geophysical Research Letters* 49 (3): e2021GL096120. https://doi.org/10.1029/2021GL096120.

Anderson, Donald M., Allan D. Cembella, and Gustaaf M. Hallegraeff. 2012. “Progress in Understanding Harmful Algal Blooms: Paradigm Shifts and New Technologies for Research, Monitoring, and Management.” *Annual Review of Marine Science* 4 (1): 143–76. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081121.

Andrews, S, S Bennett, and T Wernberg. 2014. “Reproductive Seasonality and Early Life Temperature Sensitivity Reflect Vulnerability of a Seaweed Undergoing Range Reduction.” *Marine Ecology Progress Series* 495 (January):119–29. https://doi.org/10.3354/meps10567.

Breitburg, Denise, Lisa A. Levin, Andreas Oschlies, Marilaure Grégoire, Francisco P. Chavez, Daniel J. Conley, Véronique Garçon, et al. 2018. “Declining Oxygen in the Global Ocean and Coastal Waters.” *Science* 359 (6371): eaam7240. https://doi.org/10.1126/science.aam7240.

Cai, Wenju, Guojian Wang, Boris Dewitte, Lixin Wu, Agus Santoso, Ken Takahashi, Yun Yang, Aude Carréric, and Michael J. McPhaden. 2018. “Increased Variability of Eastern Pacific El Niño under Greenhouse Warming.” *Nature* 564 (7735): 201–6. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0776-9.

Caputi, Nick, Mervi Kangas, Ainslie Denham, Ming Feng, Alan Pearce, Yasha Hetzel, and Arani Chandrapavan. 2016. “Management Adaptation of Invertebrate Fisheries to an Extreme Marine Heat Wave Event at a Global Warming Hot Spot.” *Ecology and Evolution* 6 (11): 3583–93. https://doi.org/10.1002/ece3.2137.

Chang, C-P., Zhuo Wang, John McBride, and Ching-Hwang Liu. 2005. “Annual Cycle of Southeast Asia—Maritime Continent Rainfall and the Asymmetric Monsoon Transition.” *Journal of Climate* 18 (2): 287–301. https://doi.org/10.1175/JCLI-3257.1.

Chang, Ping, Rong Zhang, Wilco Hazeleger, Caihong Wen, Xiuquan Wan, Link Ji, Reindert J. Haarsma, Wim-Paul Breugem, and Howard Seidel. 2008. "Oceanic Link between Abrupt Changes in the North Atlantic Ocean and the African Monsoon." *Nature Geoscience* 1 (7): 444–48. https://doi.org/10.1038/ngeo218.

Cheng, Lijing, John Abraham, Zeke Hausfather, and Kevin E. Trenberth. 2019. "How Fast Are the Oceans Warming?" *Science* 363 (6423): 128–29. https://doi.org/10.1126/science.aav7619.

Deser, Clara, Michael A. Alexander, Shang-Ping Xie, and Adam S. Phillips. 2010. "Sea Surface Temperature Variability: Patterns and Mechanisms." *Annual Review of Marine Science* 2 (1): 115–43. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120408-151453.

Di Lorenzo, Emanuele, and Nathan Mantua. 2016. "Multi-Year Persistence of the 2014/15 North Pacific Marine Heatwave." *Nature Climate Change* 6 (11): 1042–47. https://doi.org/10.1038/nclimate3082.

Doney, Scott C., Mary Ruckelshaus, J. Emmett Duffy, James P. Barry, Francis Chan, Chad A. English, Heather M. Galindo, et al. 2012. "Climate Change Impacts on Marine Ecosystems." *Annual Review of Marine Science* 4 (1): 11–37. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-041911-111611.

Ebi, Kristie L., Christopher Boyer, Kathryn J. Bowen, Howard Frumkin, and Jeremy Hess. 2018. "Monitoring and Evaluation Indicators for Climate Change-Related Health Impacts, Risks, Adaptation, and Resilience." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (9): 1943. https://doi.org/10.3390/ijerph15091943.

Emanuel, Kerry. 2005. "Increasing Destructiveness of Tropical Cyclones over the Past 30 Years." *Nature* 436 (7051): 686–88. https://doi.org/10.1038/nature03906.

Evans, Clark, Kimberly M. Wood, Sim D. Aberson, Heather M. Archambault, Shawn M.

Milrad, Lance F. Bosart, Kristen L. Corbosiero, et al. 2017. “The Extratropical Transition of Tropical Cyclones. Part I: Cyclone Evolution and Direct Impacts.” *Monthly Weather Review* 145 (11): 4317–44. https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0027.1.

Frölicher, Thomas L., Erich M. Fischer, and Nicolas Gruber. 2018. “Marine Heatwaves under Global Warming.” *Nature* 560 (7718): 360–64. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0383-9.
Frölicher, Thomas L., and Charlotte Laufkötter. 2018. “Emerging Risks from Marine Heat Waves.” *Nature Communications* 9 (1): 650. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03163-6.

Gedan, Keryn B., Matthew L. Kirwan, Eric Wolanski, Edward B. Barbier, and Brian R. Silliman. 2011. “The Present and Future Role of Coastal Wetland Vegetation in Protecting Shorelines: Answering Recent Challenges to the Paradigm.” *Climatic Change* 106 (1): 7–29. https://doi.org/10.1007/s10584-010-0003-7.

Gray, William M. 1968. “GLOBAL VIEW OF THE ORIGIN OF TROPICAL DISTURBANCES AND STORMS.” *Monthly Weather Review* 96 (10): 669–700. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2.

Grinsted, A., J. C. Moore, and S. Jevrejeva. 2004. “Application of the Cross Wavelet Transform and Wavelet Coherence to Geophysical Time Series.” *Nonlinear Processes in Geophysics* 11 (5/6): 561–66. https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004.

Hartmann, Dennis L., and Marc L. Michelsen. 1989. “Intraseasonal Periodicities in Indian Rainfall.” *Journal of the Atmospheric Sciences* 46 (18): 2838–62. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<2838:IPIIR>2.0.CO;2.

Heidemann, Hanna, and Joachim Ribbe. 2019. “Marine Heat Waves and the Influence of El Niño off Southeast Queensland, Australia.” *Frontiers in Marine Science* 6 (February):56. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00056.

Hobday AJ, Oliver ECJ, Sen Gupta A, Benthuysen JA, Burrows MT, Donat MG, Holbrook

NJ, Moore PJ, Thomsen MS, Wernberg T, Smale DA. 2018. Categorizing and naming marine heatwaves. Oceanography 31, 2. doi: 10.5670/oceanog.2018.205.

Hobday, A.J., L.V. Alexander, S.E. Perkins, D.A. Smale, S.C. Straub, E.C.J. Oliver, J. Benthuysen, M.T. Burrows, M.G. Donat, M. Feng, and others. 2016. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. Progress in Oceanography 141:227–238, https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014.

Hoegh-Guldberg, O., P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell. l. 2007. "Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification." *Science* 318 (5857): 1737–42. https://doi.org/10.1126/science.1152509.

Holbrook, Alistair J., Hillary A. Scannell 3, Alexander Sen Gupta 4,5, Jessica A. Benthuysen 6, Ming Feng 7, Eric C.J. Oliver 1,2,8, Lisa V. Alexander4,5, Michael T. Burrows 9, Markus G. Donat 5,10, Alistair J. Hobday 11, Pippa J. Moore 12, Sarah E. Perkins-Kirkpatrick4,5, Dan A. Smale 13,14, and Sandra C. Straub 14 & Thomas Wernberg 14. 2019. "A Global Assessment of Marine Heatwaves and Their Drivers," 2019.

Holton, James R., and Gregory J. Hakim. 2013. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 5. ed. Amsterdam Heidelberg: Elsevier Academic Press.

Hughes, Terry P., James T. Kerry, Mariana Álvarez-Noriega, Jorge G. Álvarez-Romero, Kristen D. Anderson, Andrew H. Baird, Russell C. Babcock, et al. 2017. "Global Warming and Recurrent Mass Bleaching of Corals." *Nature* 543 (7645): 373–77. https://doi.org/10.1038/nature21707.

Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). 2022. *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1st ed. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157964.

IPCC. 1998. *Decade-to-Century-Scale Climate Variability and Change: A Science Strategy*.

Washington, D.C.: National Academies Press. https://doi.org/10.17226/6129.

———. 2023. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1st ed. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.

Knutson, Thomas R., John L. McBride, Johnny Chan, Kerry Emanuel, Greg Holland, Chris Landsea, Isaac Held, James P. Kossin, A. K. Srivastava, and Masato Sugi. 2010. "Tropical Cyclones and Climate Change." *Nature Geoscience* 3 (3): 157–63. https://doi.org/10.1038/ngeo779.

Lean, Judith L., and David H. Rind. 2008. "How Natural and Anthropogenic Influences Alter Global and Regional Surface Temperatures: 1889 to 2006." *Geophysical Research Letters* 35 (18): 2008GL034864. https://doi.org/10.1029/2008GL034864.

Leslie, Heather M., and Karen L. McLeod. 2007. "Confronting the Challenges of Implementing Marine Ecosystem-Based Management." *Frontiers in Ecology and the Environment* 5 (10): 540–48. https://doi.org/10.1890/060093.

Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, O. K. Baranova, H. E. Garcia, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, et al. 2012. "World Ocean Heat Content and Thermosteric Sea Level Change (0–2000 m), 1955–2010." *Geophysical Research Letters* 39 (10): 2012GL051106. https://doi.org/10.1029/2012GL051106.

Liu, Gang, Scott Heron, C. Eakin, Frank Muller-Karger, Maria Vega-Rodriguez, Liane Guild, Jacqueline De La Cour, et al. 2014. "Reef-Scale Thermal Stress Monitoring of Coral Ecosystems: New 5-Km Global Products from NOAA Coral Reef Watch." *Remote Sensing* 6 (11): 11579–606. https://doi.org/10.3390/rs61111579.

Liu, Zhengyu. 2012. "Dynamics of Interdecadal Climate Variability: A Historical Perspective*." *Journal of Climate* 25 (6): 1963–95. https://doi.org/10.1175/2011JCLI3980.1.

Lutgens, Frederick K., Edward J. Tarbuck, Redina L. Herman, and Dennis Tasa. 2019. *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*. Fourteenth edition. New York: Pearson.

Mallat, S. G. 1999. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. 2nd ed. San Diego: Academic Press.

Mills, Katherine, Andrew Pershing, Curtis Brown, Yong Chen, Fu-Sung Chiang, Daniel Holland, Sigrid Lehuta, et al. 2013. "Fisheries Management in a Changing Climate: Lessons From the 2012 Ocean Heat Wave in the Northwest Atlantic." *Oceanography* 26 (2). https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.27.

Mora, Camilo, Chih-Lin Wei, Audrey Rollo, Teresa Amaro, Amy R. Baco, David Billett, Laurent Bopp, et al. 2013. "Biotic and Human Vulnerability to Projected Changes in Ocean Biogeochemistry over the 21st Century." Edited by Georgina M. Mace. *PLoS Biology* 11 (10): e1001682. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001682.

Mordvinov, Alexander V., Bidya Binay Karak, Dipankar Banerjee, Subhamoy Chatterjee, Elena M. Golubeva, and Anna I. Khlystova. 2020. "Long-Term Evolution of the Sun's Magnetic Field during Cycles 15--19 Based on Their Proxies from Kodaikanal Solar Observatory." https://doi.org/10.48550/ARXIV.2009.11174.

Ng, Adolf K.Y., Shu-Ling Chen, Stephen Cahoon, Ben Brooks, and Zaili Yang. 2013. "Climate Change and the Adaptation Strategies of Ports: The Australian Experiences." *Research in Transportation Business & Management* 8 (October):186–94. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2013.05.005.

Oliver, Eric C. J., Markus G. Donat, Michael T. Burrows, Pippa J. Moore, Dan A. Smale, Lisa V. Alexander, Jessica A. Benthuysen, et al. 2018. "Longer and More Frequent Marine Heatwaves over the Past Century." *Nature Communications* 9 (1): 1324. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9.

Oliver, Eric C.J., Jessica A. Benthuysen, Sofia Darmaraki, Markus G. Donat, Alistair J.

Hobday, Neil J. Holbrook, Robert W. Schlegel, and Alex Sen Gupta. 2021. “Marine Heatwaves.” *Annual Review of Marine Science* 13 (1): 313–42. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032720-095144.

Pauly, Daniel, Villy Christensen, Johanne Dalsgaard, Rainer Froese, and Francisco Torres. 1998. “Fishing Down Marine Food Webs.” *Science* 279 (5352): 860–63. https://doi.org/10.1126/science.279.5352.860.

Pearce, Alan F., and Ming Feng. 2013. “The Rise and Fall of the ‘Marine Heat Wave’ off Western Australia during the Summer of 2010/2011.” *Journal of Marine Systems* 111–112 (February):139–56. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.10.009.

Pearson, Bruce W. 1985. “Editorial.” *Otolaryngology–Head and Neck Surgery* 93 (2): 145–145. https://doi.org/10.1177/019459988509300201.

Percival, Donald B., and Andrew T. Walden. 2000. *Wavelet Methods for Time SeriesAnalysis*. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511841040.

Philander, S. G. H. 1983. “El Niño Southern Oscillation Phenomena.” *Nature* 302 (5906): 295–301. https://doi.org/10.1038/302295a0.

Saha, Suranjana. 2010. “The NCEP Climate Forecast System Reanalysis,” 2010. https://sci-hub.se/10.1175/2010bams3001.1.

Schmittner, Andreas, Andreas Oschlies, H. Damon Matthews, and Eric D. Galbraith. 2008. “Future Changes in Climate, Ocean Circulation, Ecosystems, and Biogeochemical Cycling Simulated for a Business−as−usual CO_2 Emission Scenario until Year 4000 AD.” *Global Biogeochemical Cycles* 22 (1): 2007GB002953. https://doi.org/10.1029/2007GB002953.

Servain, Jacques, Antonio J. Busalacchi, Michael J. McPhaden, Antonio D. Moura, Gilles Reverdin, Marcio Vianna, and Stephen E. Zebiak. 1998. “A Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA).” *Bulletin of the American Meteorological Society* 79 (10):

2019–31. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2019:APRMAI>2.0.CO;2.

Smale, Dan A., Thomas Wernberg, Eric C. J. Oliver, Mads Thomsen, Ben P. Harvey, Sandra C. Straub, Michael T. Burrows, et al. 2019. "Marine Heatwaves Threaten Global Biodiversity and the Provision of Ecosystem Services." *Nature Climate Change* 9 (4): 306–12. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0412-1.

Smith, Neville, William S. Kessler, Sophie Cravatte, Janet Sprintall, Susan Wijffels, Meghan F. Cronin, Adrienne Sutton, et al. 2019. "Tropical Pacific Observing System." *Frontiers in Marine Science* 6 (February):31. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00031.

Solanki, Sami K., Natalie A. Krivova, and Joanna D. Haigh. 2013. "Solar Irradiance Variability and Climate." *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 51 (1): 311–51. https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082812-141007.

Stramma, Lothar, and Matthew England. 1999. "On the Water Masses and Mean Circulation of the South Atlantic Ocean." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 104 (C9): 20863–83. https://doi.org/10.1029/1999JC900139.

Torrence, Christopher, and Gilbert P. Compo. 1998. "A Practical Guide to Wavelet Analysis." *Bulletin of the American Meteorological Society* 79 (1): 61–78. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.

Trenberth, Kevin E. 1997. "The Definition of El Niño." *Bulletin of the American Meteorological Society* 78 (12): 2771–77. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2.

Trenberth, Kevin E., Julie M. Caron, David P. Stepaniak, and Steve Worley. 2002. "Evolution of El Niño–Southern Oscillation and Global Atmospheric Surface Temperatures." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 107 (D8). https://doi.org/10.1029/2000JD000298.

Wallace, John M., and Peter Victor Hobbs. 2006. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. 2nd ed. International Geophysics Series, v. 92. Amsterdam ; Boston: Elsevier Academic Press.

Wang, Chunzai, Clara Deser, Jin-Yi Yu, Pedro DiNezio, and Amy Clement. 2017. "El Niño and Southern Oscillation (ENSO): A Review." In *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific*, edited by Peter W. Glynn, Derek P. Manzello, and Ian C. Enochs, 8:85–106. Coral Reefs of the World. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_4.

Wernberg, Thomas, Dan A. Smale, Fernando Tuya, Mads S. Thomsen, Timothy J. Langlois, Thibaut De Bettignies, Scott Bennett, and Cecile S. Rousseaux. 2013. "An Extreme Climatic Event Alters Marine Ecosystem Structure in a Global Biodiversity Hotspot." *Nature Climate Change* 3 (1): 78–82. https://doi.org/10.1038/nclimate1627.

Xie, Shang-Ping, and James A. Carton. 2013. "Tropical Atlantic Variability: Patterns, Mechanisms, and Impacts." In *Geophysical Monograph Series*, edited by C. Wang, S.P. Xie, and J.A. Carton, 121–42. Washington, D. C.: American Geophysical Union. https://doi.org/10.1029/147GM07.

Apêndice 1 - FIGURAS COMPLEMENTARES

Figura 13A - Médias móveis das séries temporais do PIRATA e OISST ao longo dos meses, com seus respectivos desvios padrões - Estação 0N0E

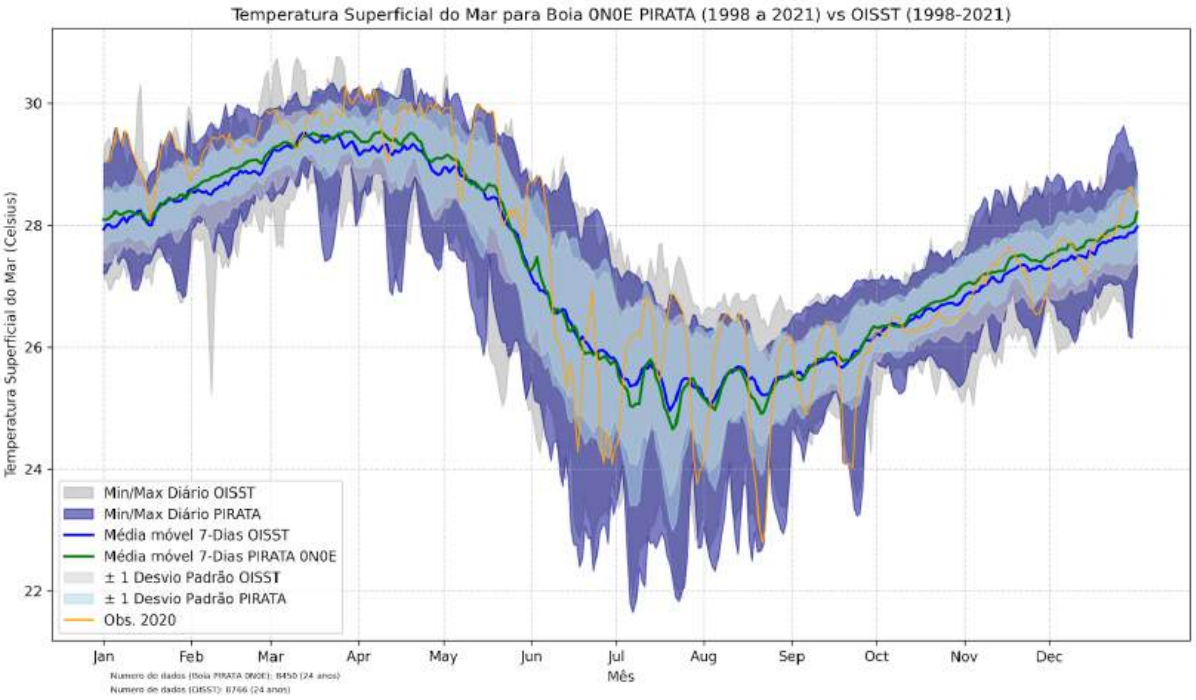


Figura 13B - Médias móveis das séries temporais do PIRATA e OISST ao longo dos meses, com seus respectivos desvios padrões - Estação 0N3W

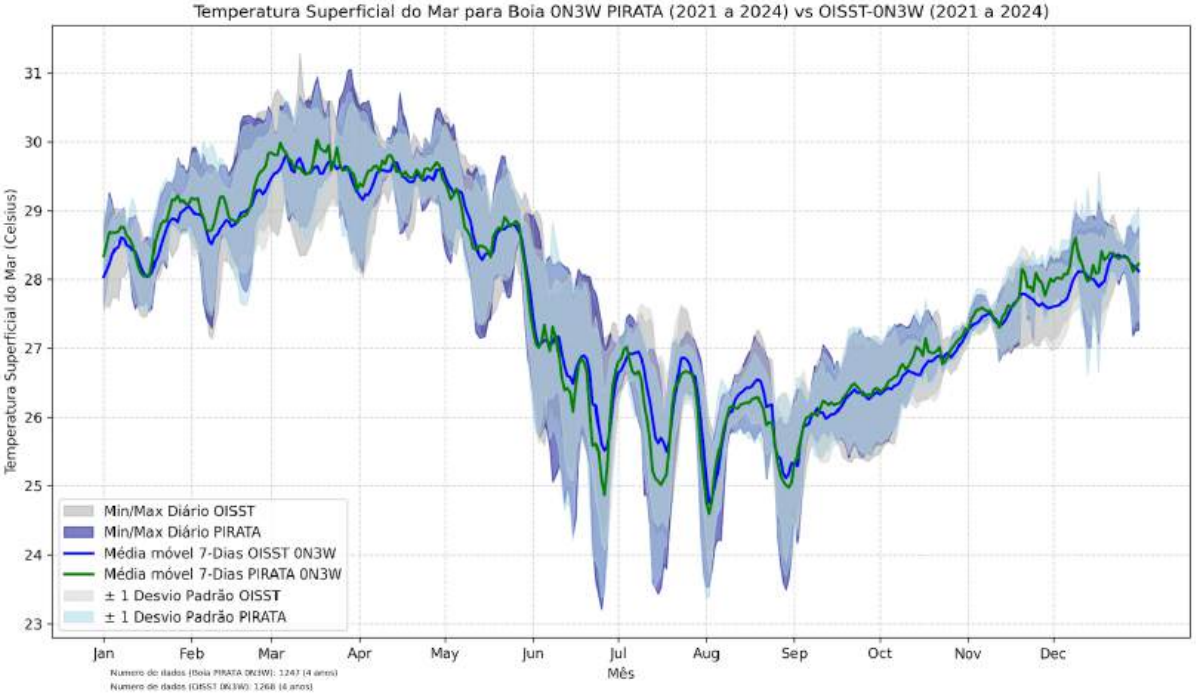


Figura 13C - Médias móveis das séries temporais do PIRATA e OISST ao longo dos meses, com seus respectivos desvios padrões - Estação 0N10W

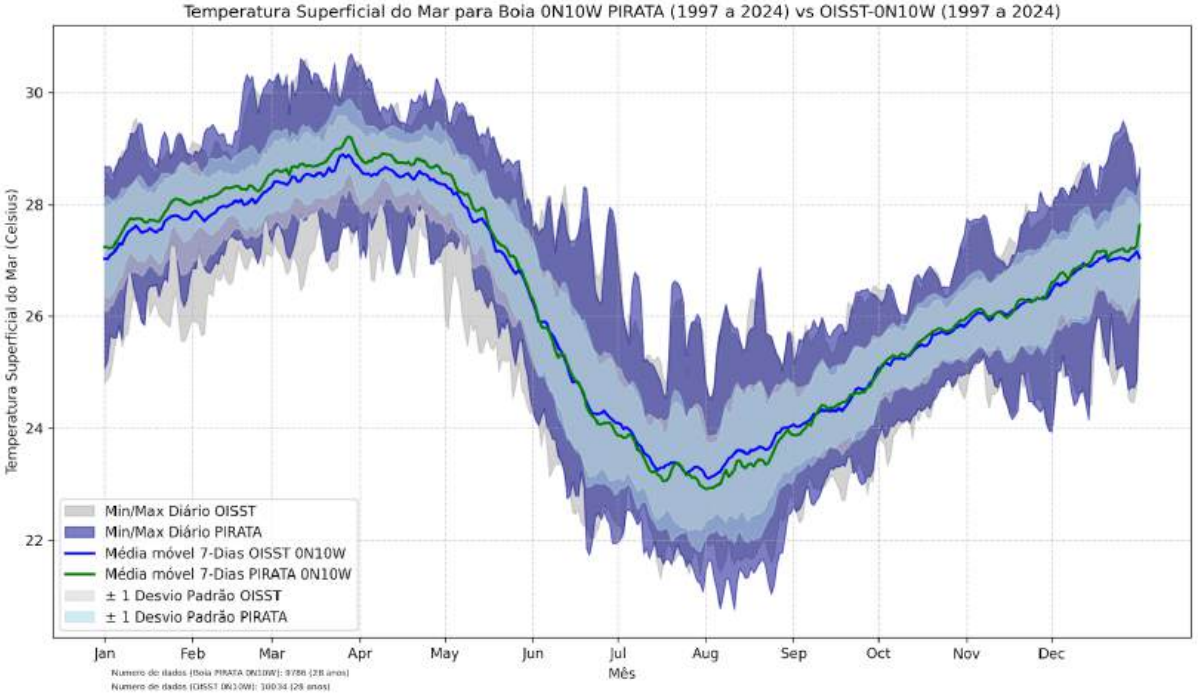


Figura 13D - Médias móveis das séries temporais do PIRATA e OISST ao longo dos meses, com seus respectivos desvios padrões - Estação 0N23W

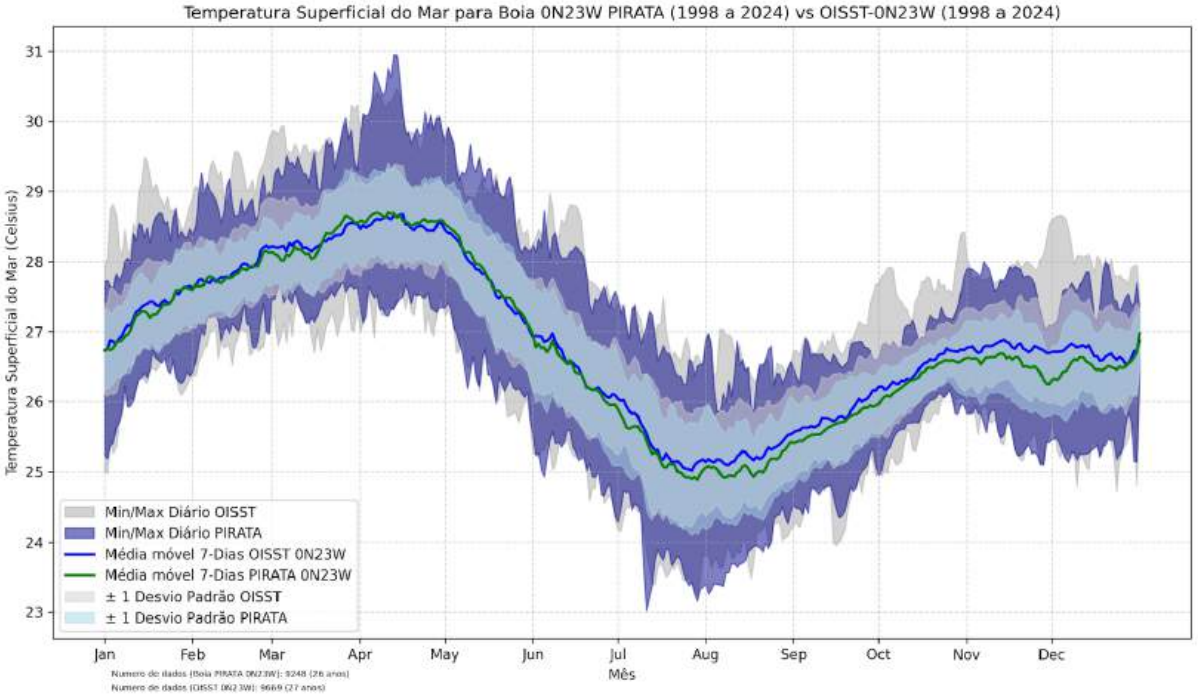


Figura 14A - Resultado da Correlação de Pearson - 0N0E.

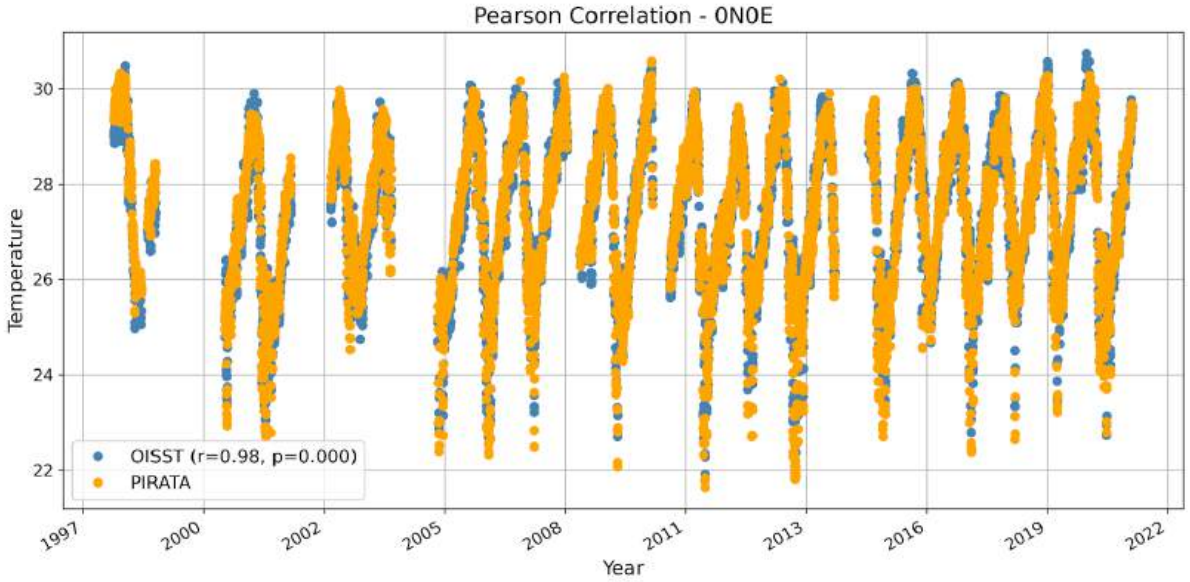


Figura 14B - Resultado da Correlação de Pearson - 0N3W.

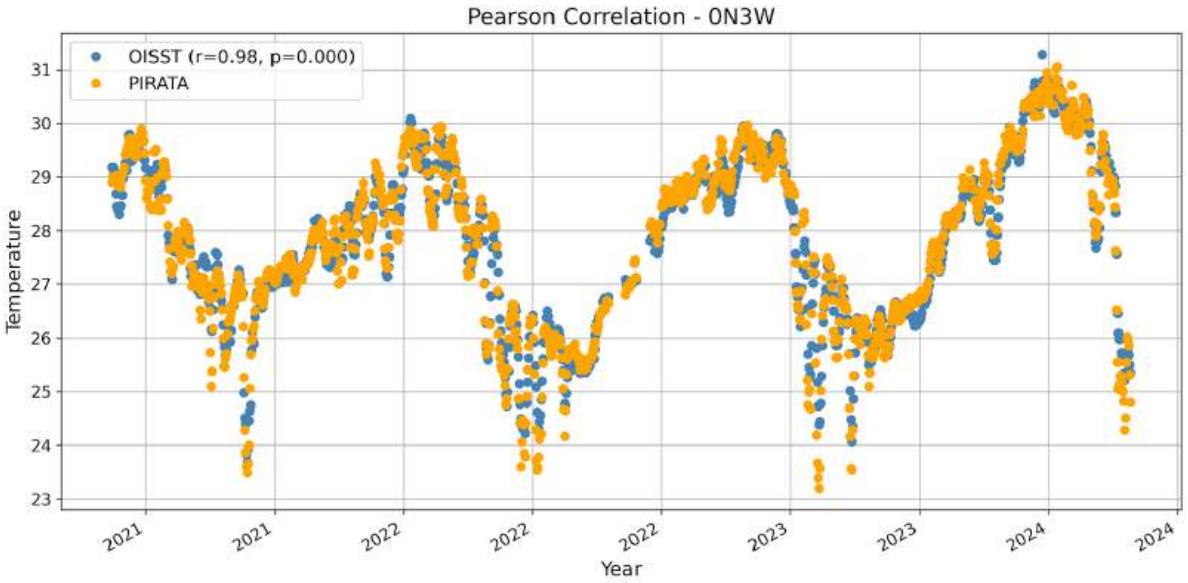


Figura 14C - Resultado da Correlação de Pearson - 0N10W.

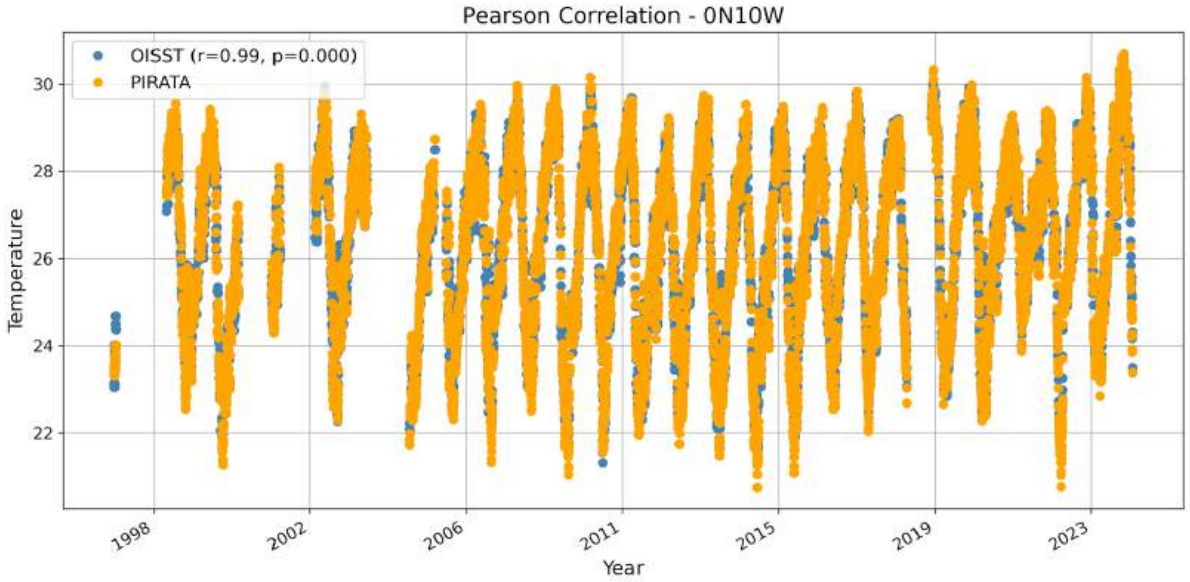


Figura 14D - Resultado da Correlação de Pearson - 0N23W.

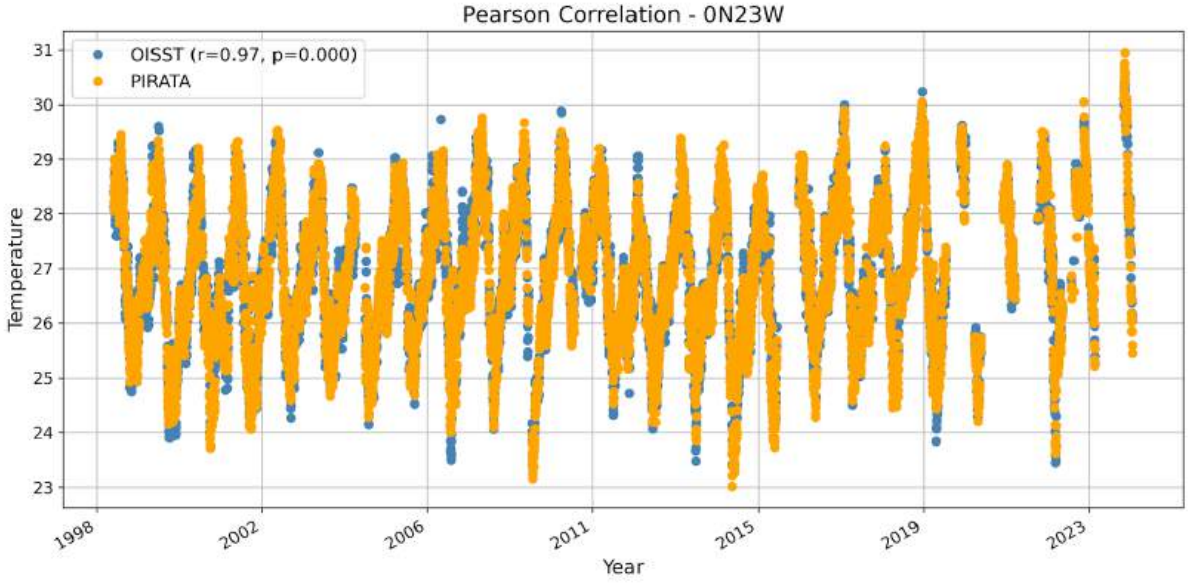


Figura 17A: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote *MarineHeatWaves - 0N3W*

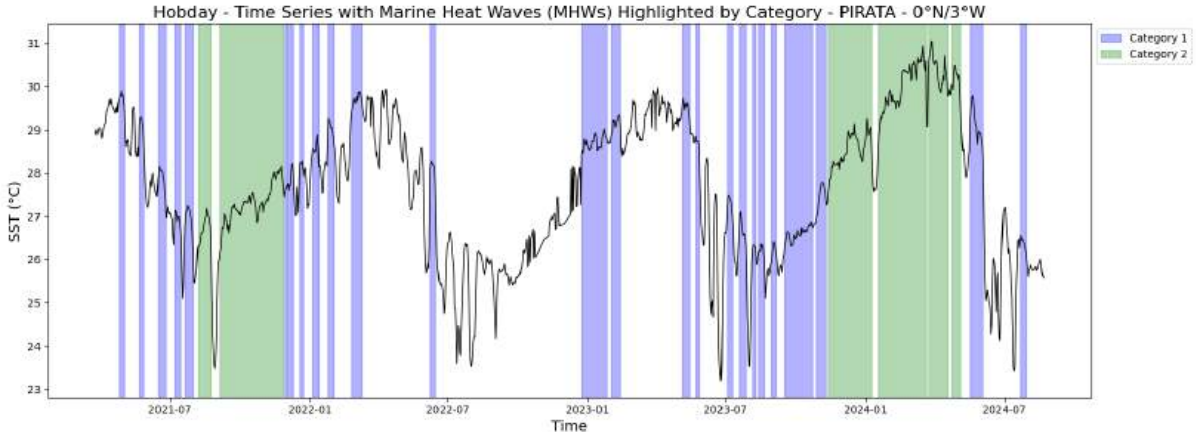


Figura 17B: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote *MarineHeatWaves - 0N10W*.

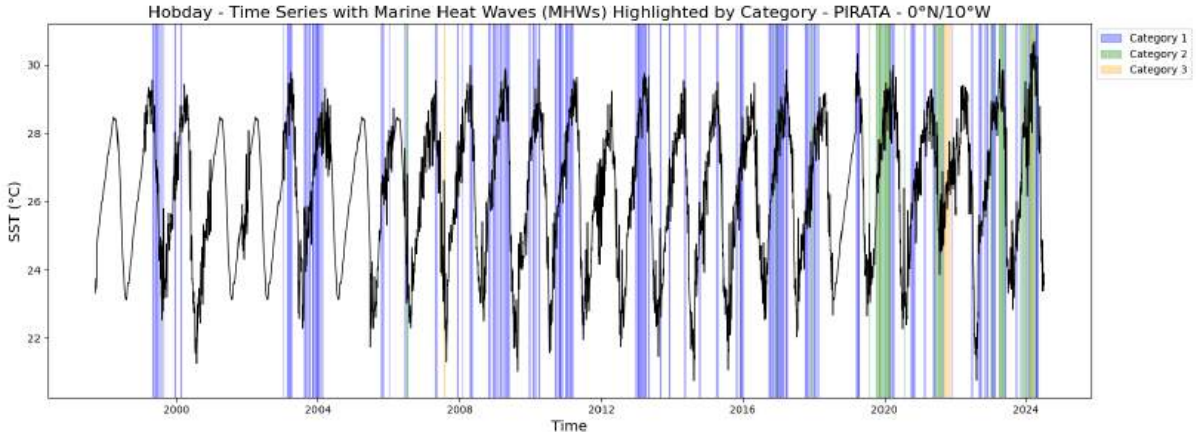


Figura 17C: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote *MarineHeatWaves - 0N23W*.

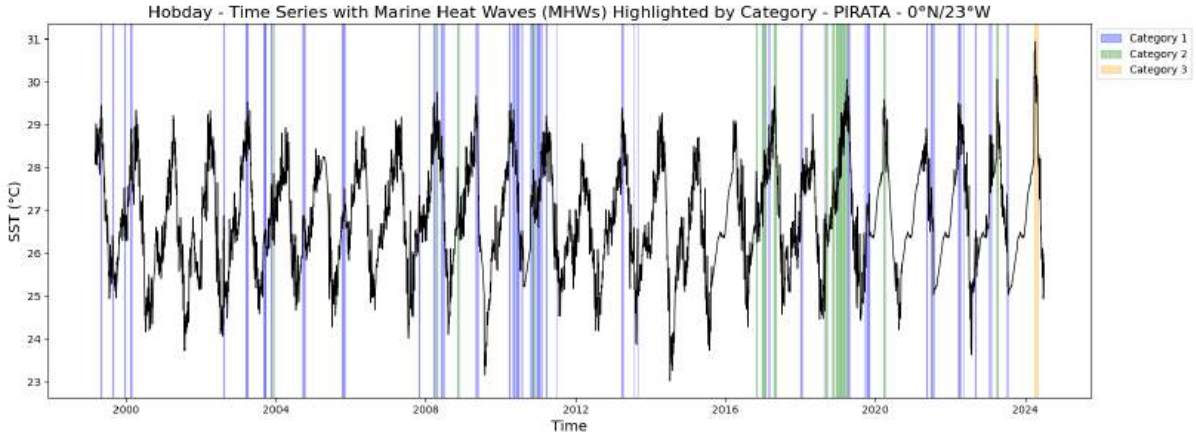


Figura 17D: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote *MarineHeatWaves - 0N35W*.

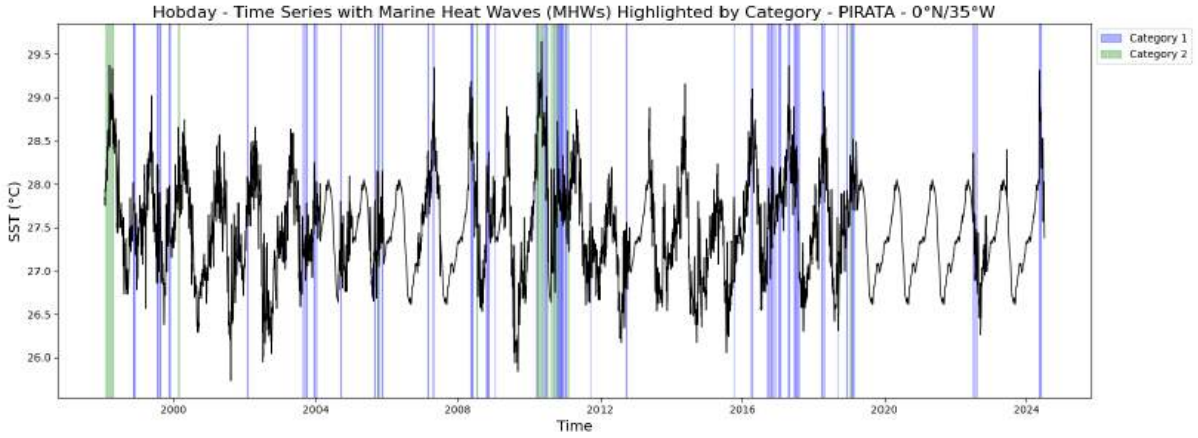


Figura 18A: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote *PyMHW - 0N3W*.

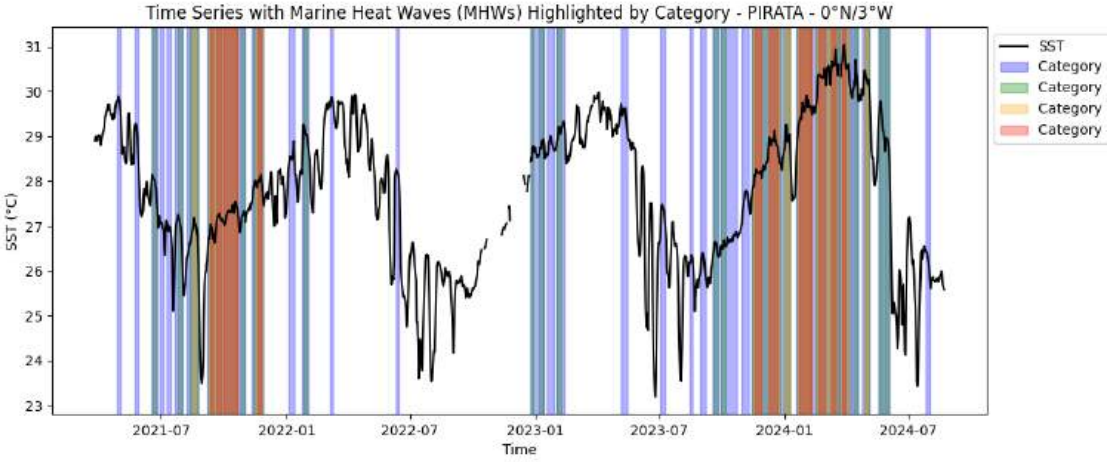


Figura 18B: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote *PyMHW - 0N10W*.

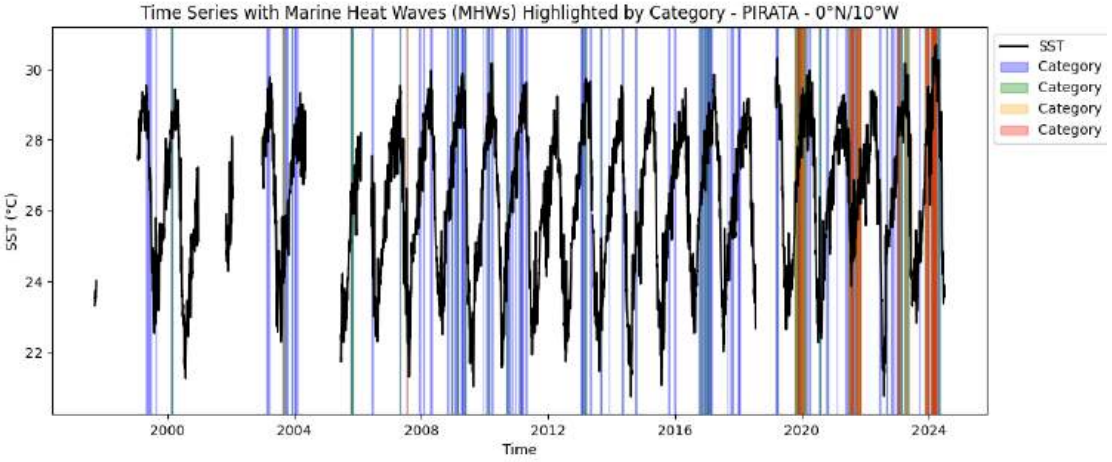


Figura 18C: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote *PyMHW - 0N23W*.

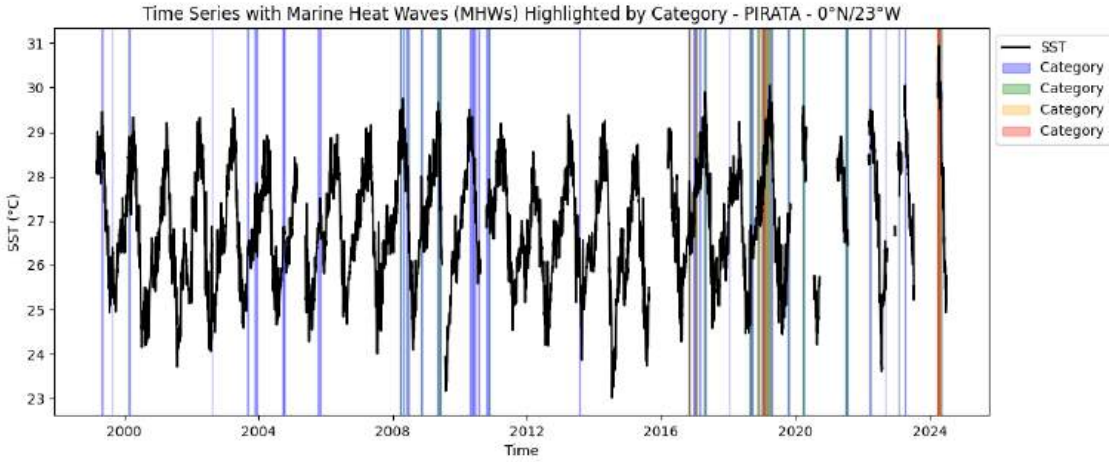


Figura 18D: Série temporal de temperatura com destaque para as categorias das ondas de calor marinhas produzidas pelo pacote *PyMHW - 0N35W*.

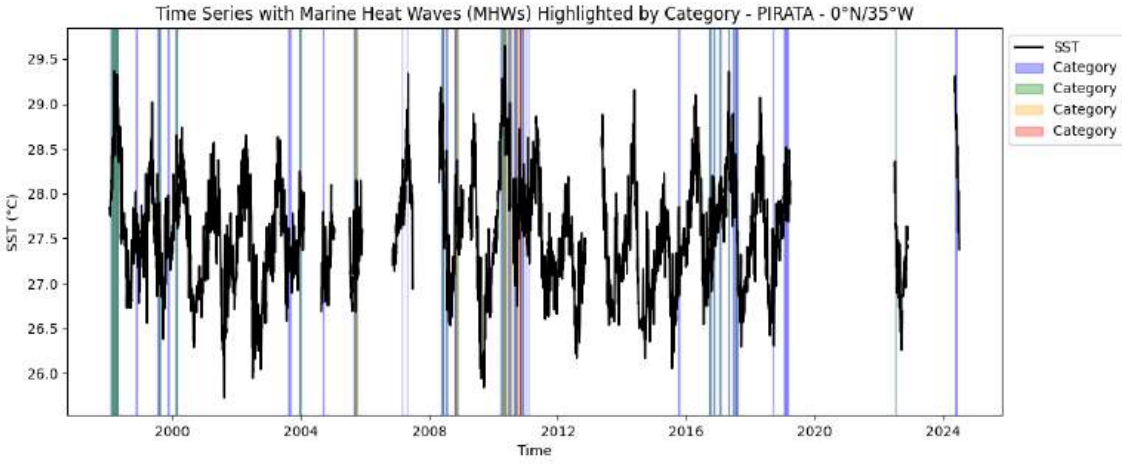


Figura 19A: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo *MarineHeatWaves - 0N3W*.

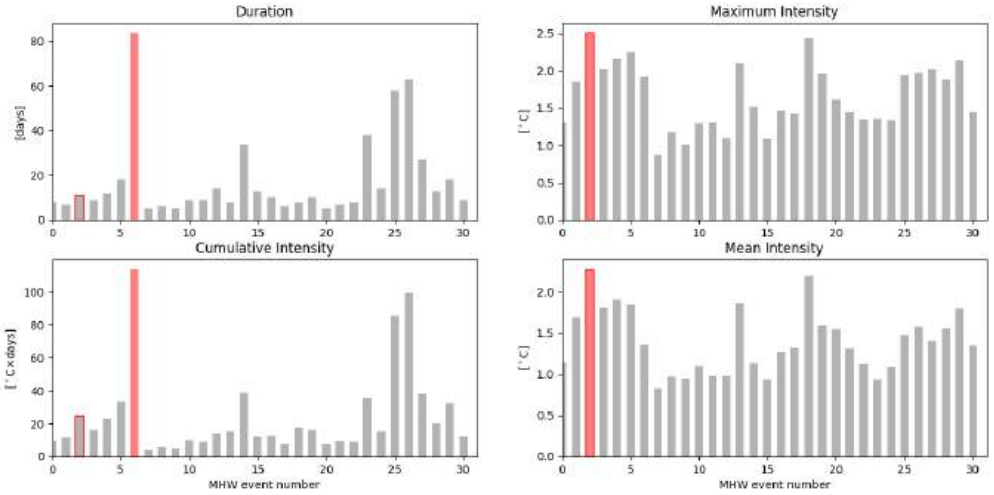


Figura 19B: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo *MarineHeatWaves - 0N10W*.

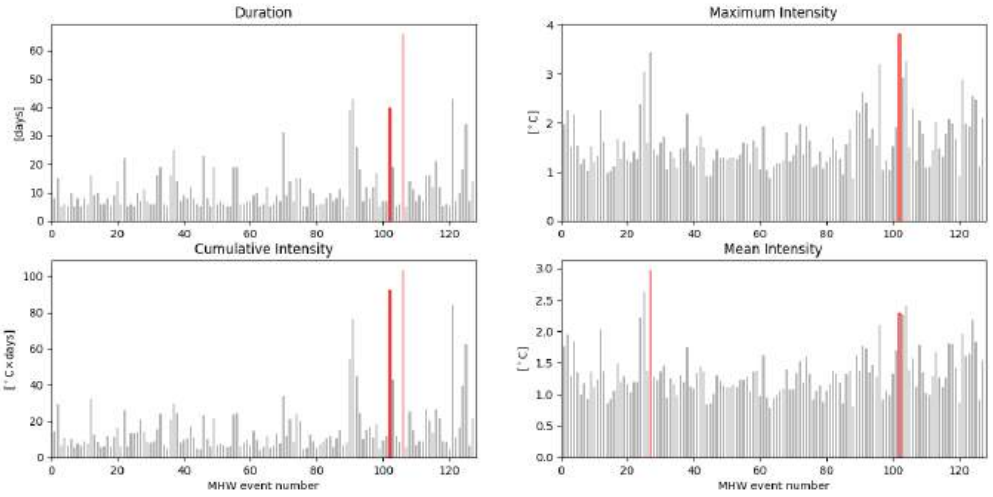


Figura 19C: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo *MarineHeatWaves - 0N23W*.

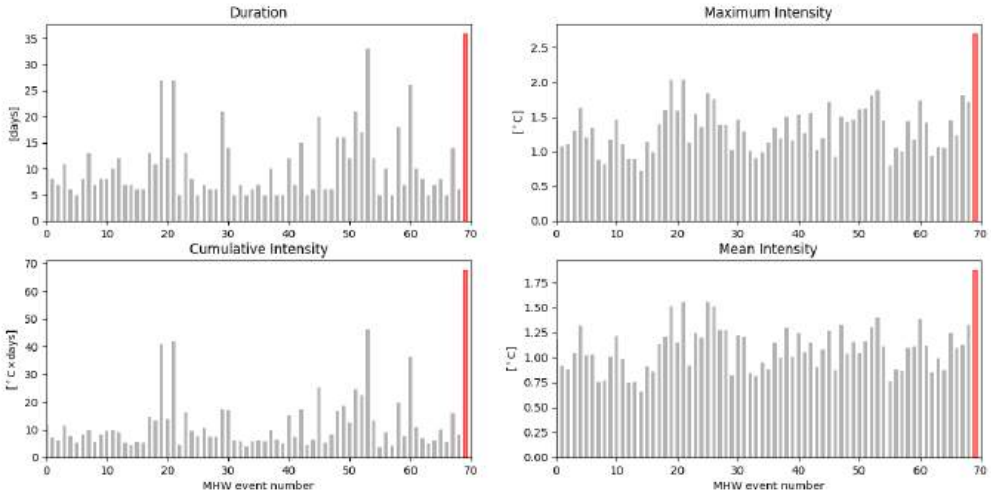


Figura 19D: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo *MarineHeatWaves - 0N35W*.

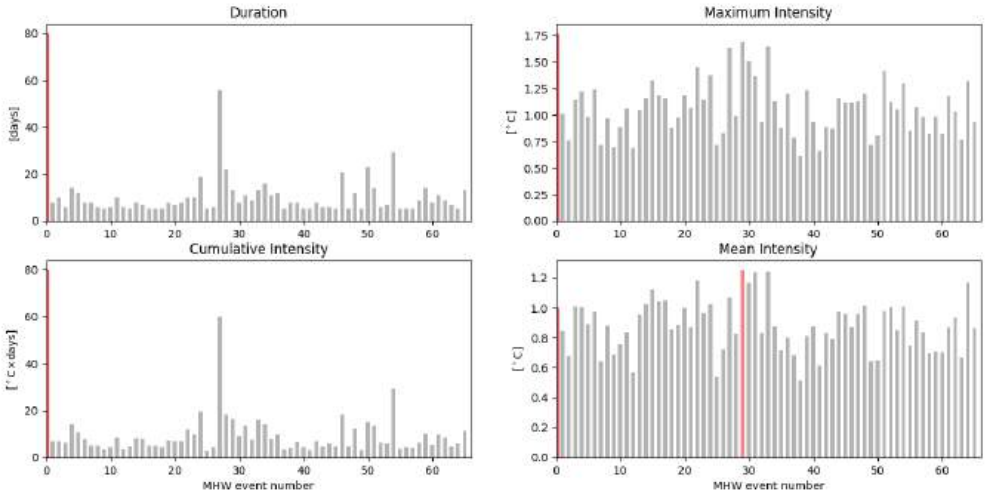


Figura 20A: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo *PyMHW- 0N3W*.

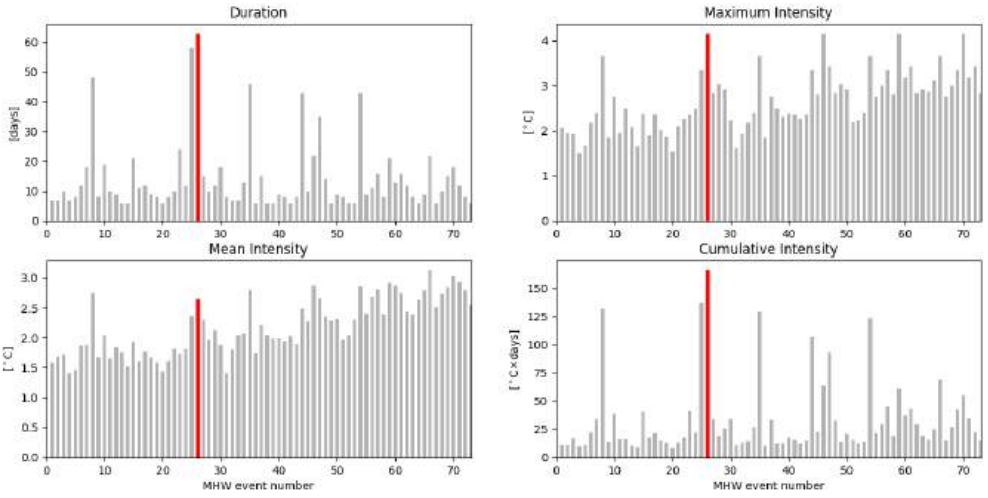


Figura 20B: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo *PyMHW- 0N10W*.

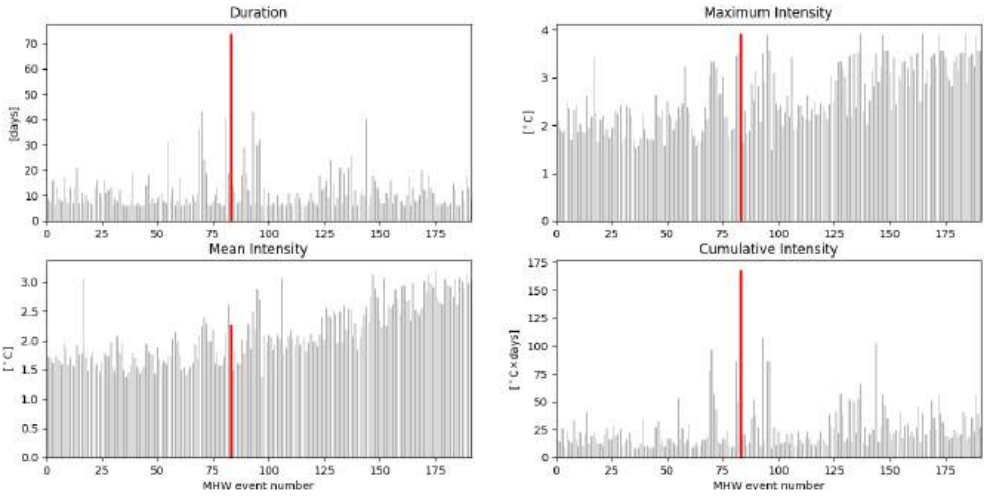


Figura 20C: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo *PyMHW- 0N23W*.

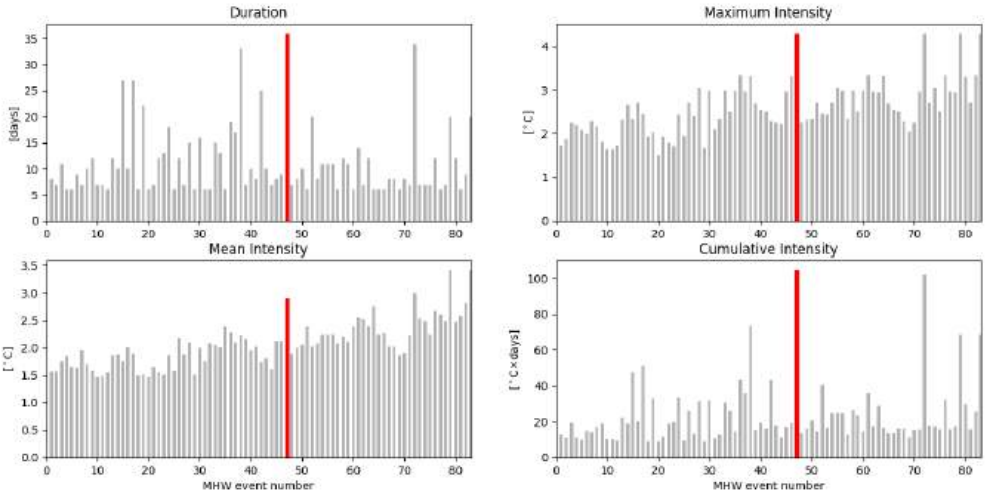


Figura 20D: Representação gráfica de duração e intensidades média, máxima e acumulada de ondas de calor marinhas representadas ordinalmente ao longo da série temporal pelo *PyMHW- 0N35W*.

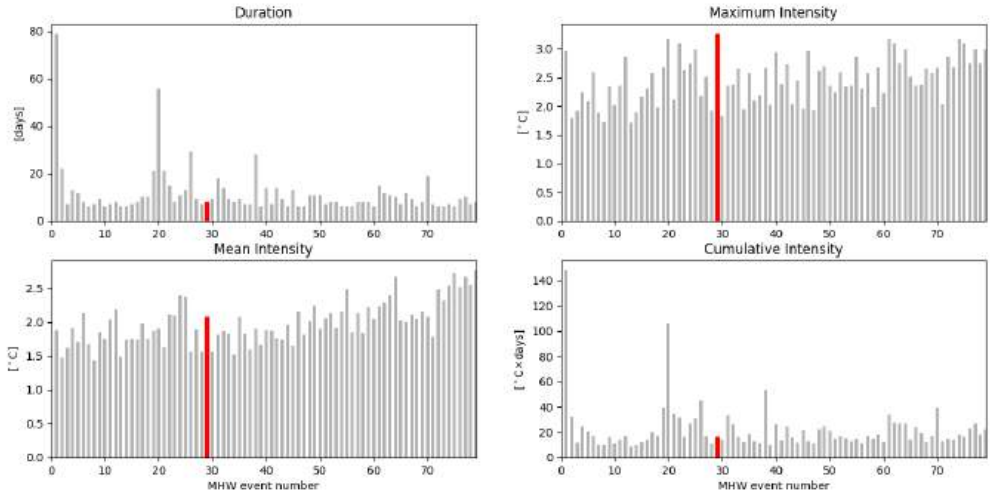


Figura 21: D - Série temporal com os dados de temperatura superficial da água do mar, a climatologia e o limiar calculado a partir do percentil de 90. E - Detalhe do evento de maior intensidade média e máxima de ondas de calor marinhas da série temporal. F - Detalhe do evento mais duradouro e de maior intensidade acumulada de ondas de calor marinhas da série temporal - *0N3W*.

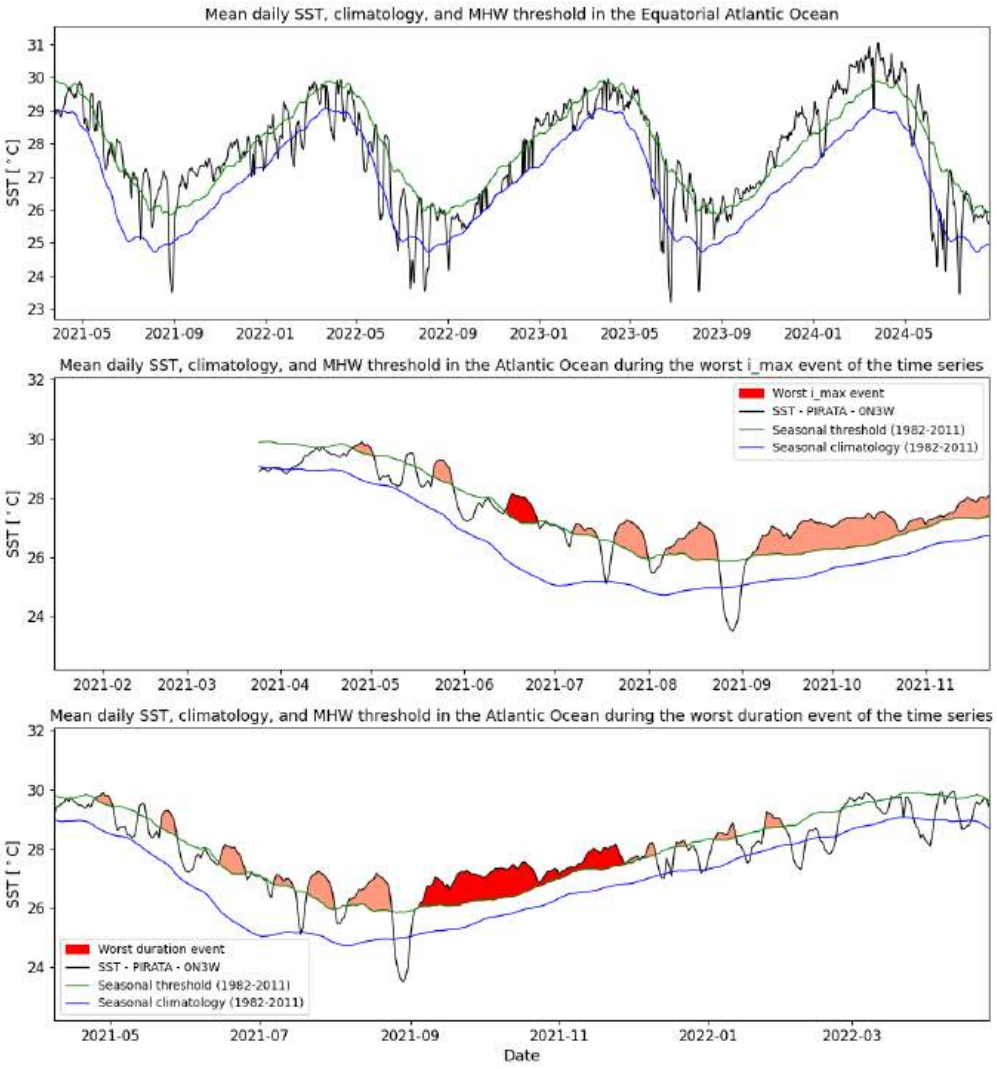


Figura 21: G - Série temporal com os dados de temperatura superficial da água do mar, a climatologia e o limiar calculado a partir do percentil de 90. H - Detalhe do evento de maior intensidade média e máxima de ondas de calor marinhas da série temporal. I - Detalhe do evento mais duradouro e de maior intensidade acumulada de ondas de calor marinhas da série temporal. - *0N10W*.

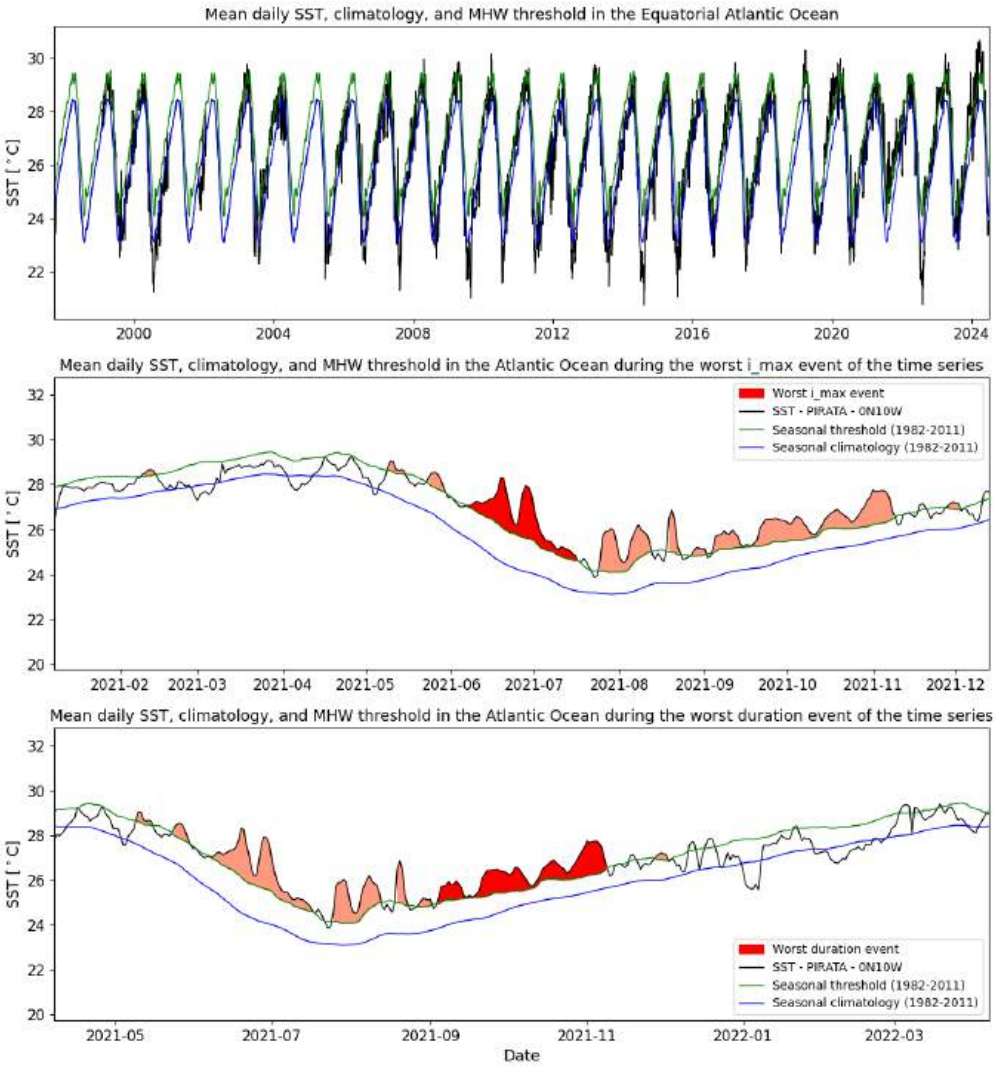


Figura 21: J - Série temporal com os dados de temperatura superficial da água do mar, a climatologia e o limiar calculado a partir do percentil de 90. K - Detalhe do evento de maior intensidade média e máxima de ondas de calor marinhas da série temporal - *0N23W*.

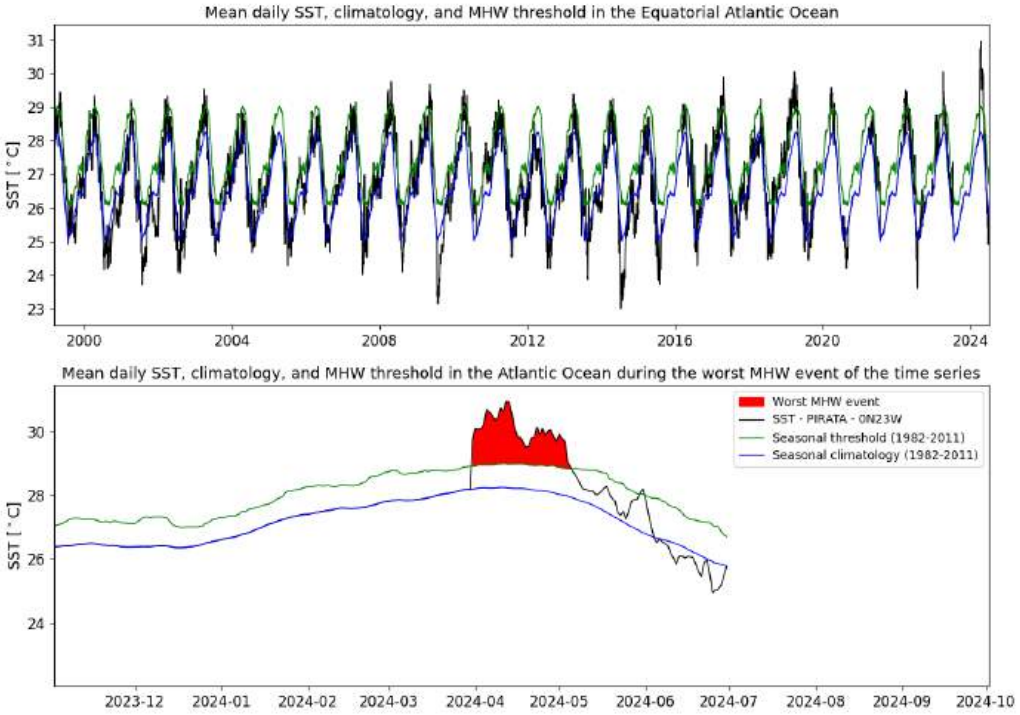


Figura 21: L - Série temporal com os dados de temperatura superficial da água do mar, a climatologia e o limiar calculado a partir do percentil de 90. M - Detalhe do evento de maior intensidade média e máxima de ondas de calor marinhas da série temporal. - *0N23W*.

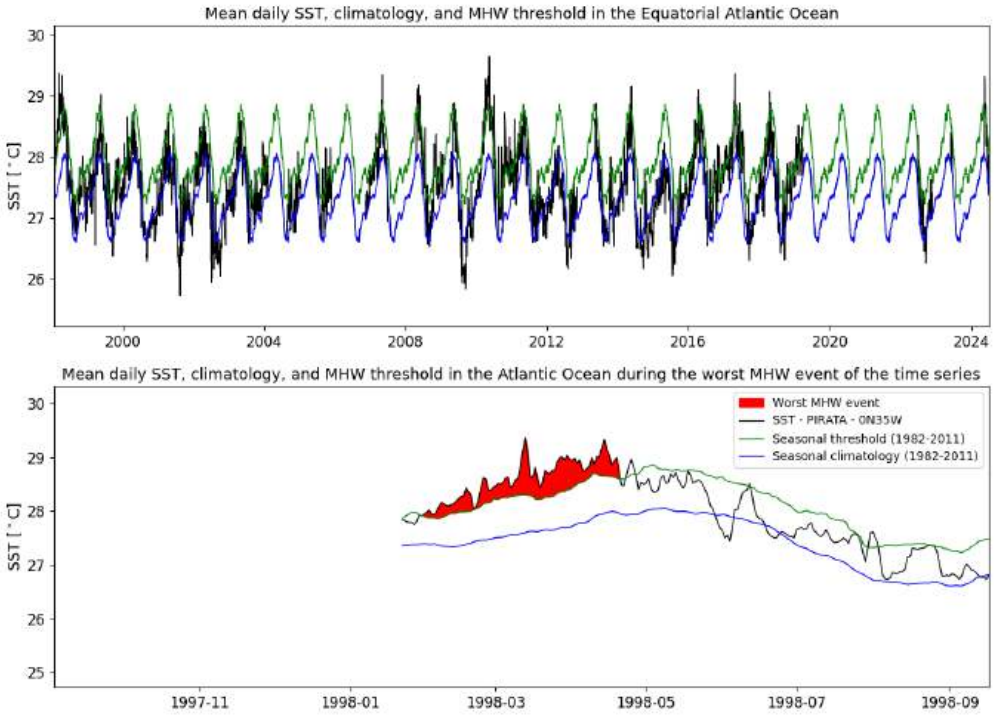


Figura 23A: Distribuição do número de eventos de ondas de calor marinhas calculados a partir dos pacotes *MarineHeatWaves, PyMHW* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N3W

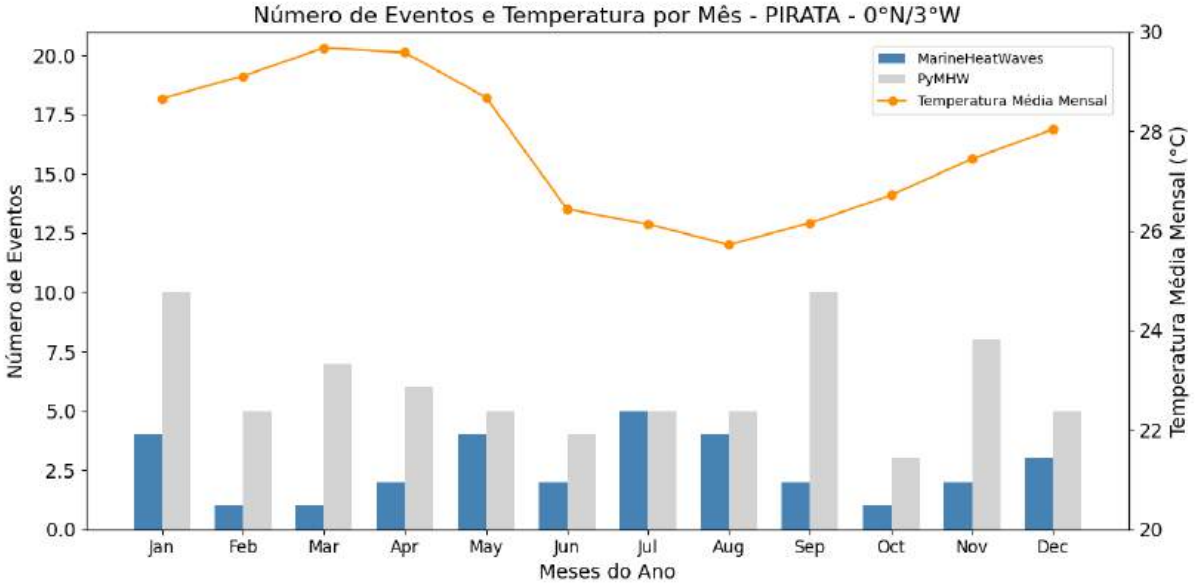


Figura 23B: Distribuição do número de eventos de ondas de calor marinhas calculados a partir dos pacotes *MarineHeatWaves, PyMHW* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N10W

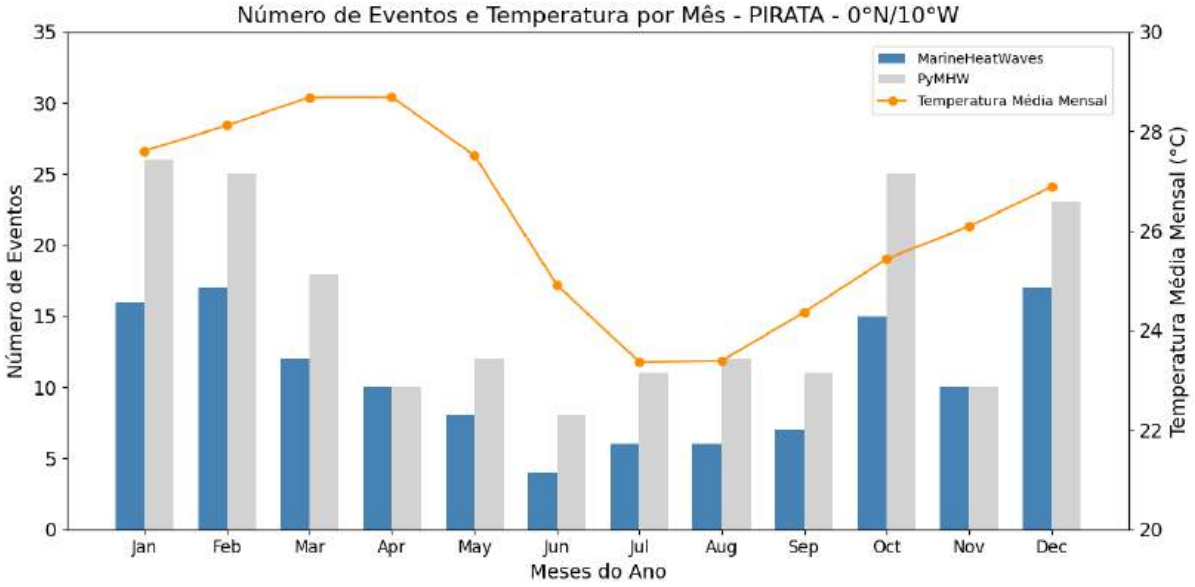


Figura 23C: Distribuição do número de eventos de ondas de calor marinhas calculados a partir dos pacotes *MarineHeatWaves, PyMHW* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N23W

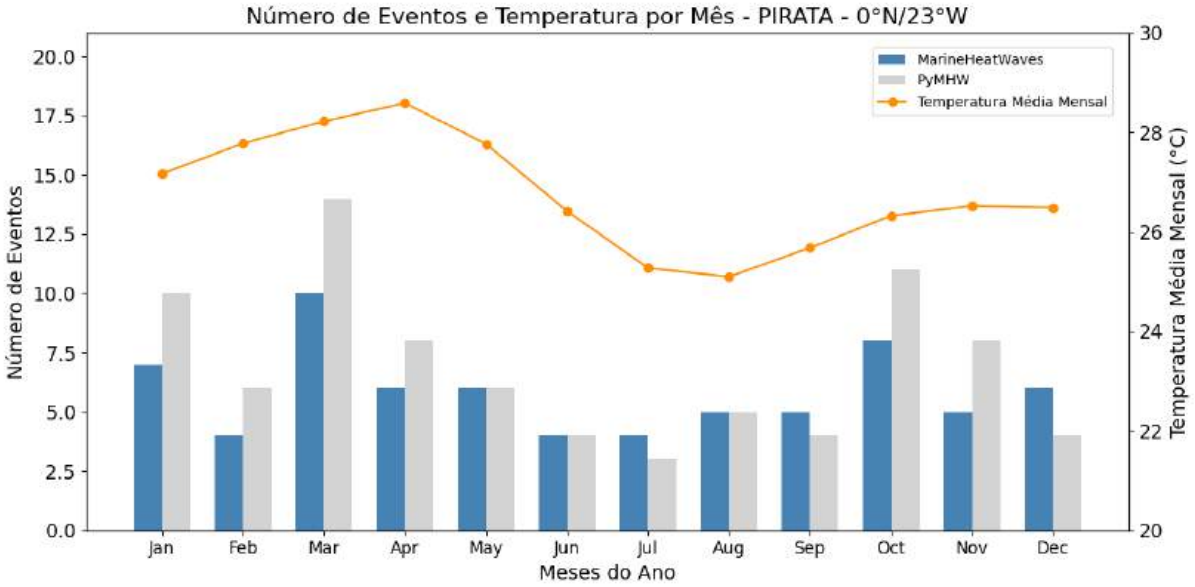


Figura 23D: Distribuição do número de eventos de ondas de calor marinhas calculados a partir dos pacotes *MarineHeatWaves, PyMHW* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N35W

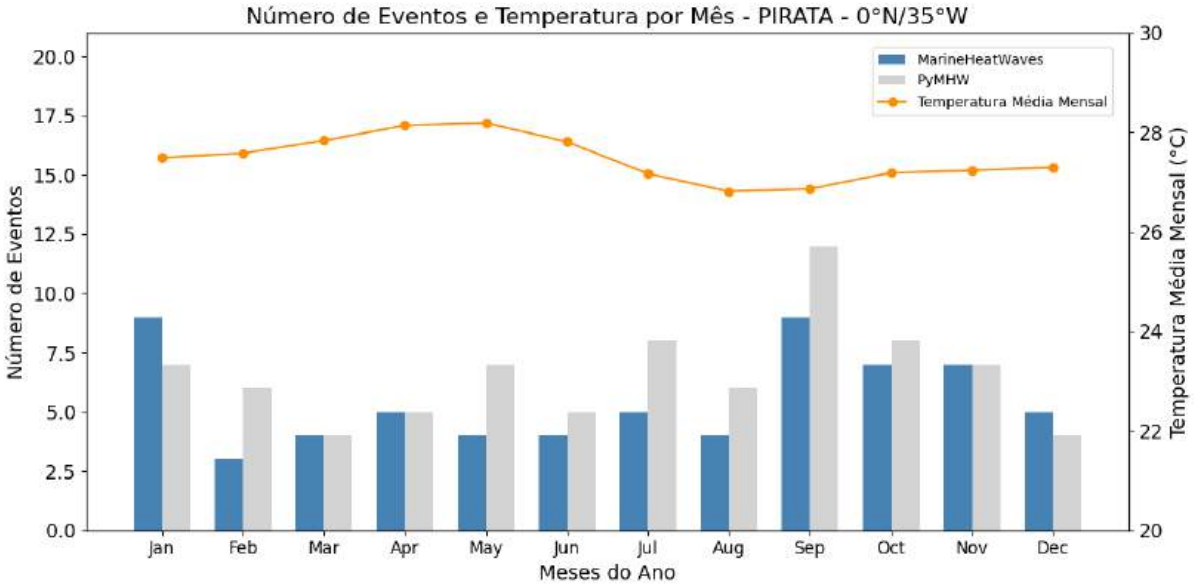


Figura 24A: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote *MarineHeatWaves* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N3W

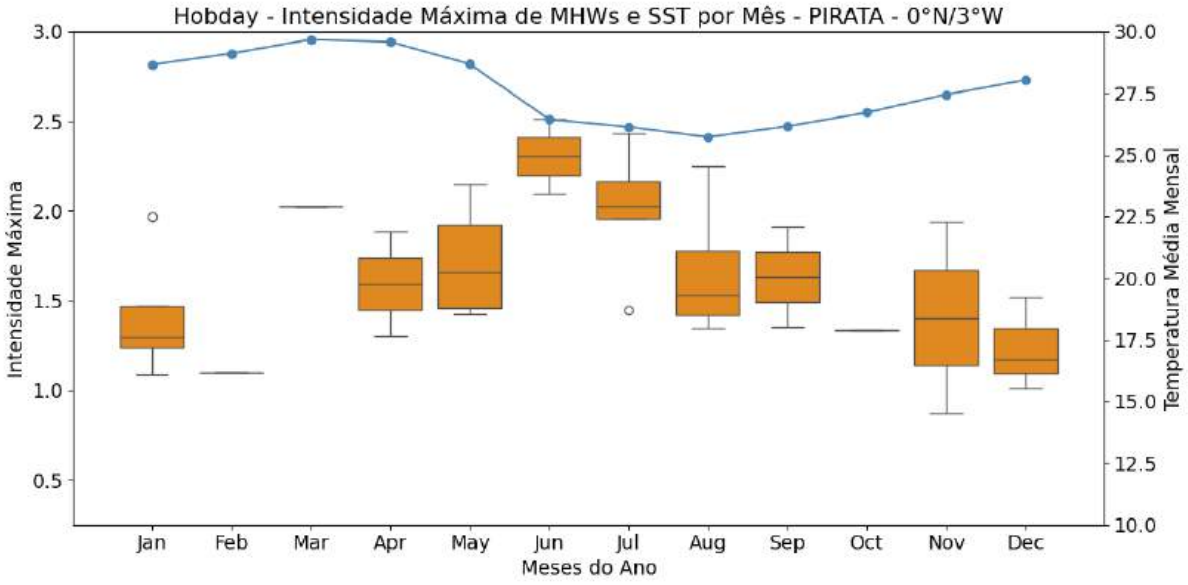


Figura 24B: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote *MarineHeatWaves* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N10W

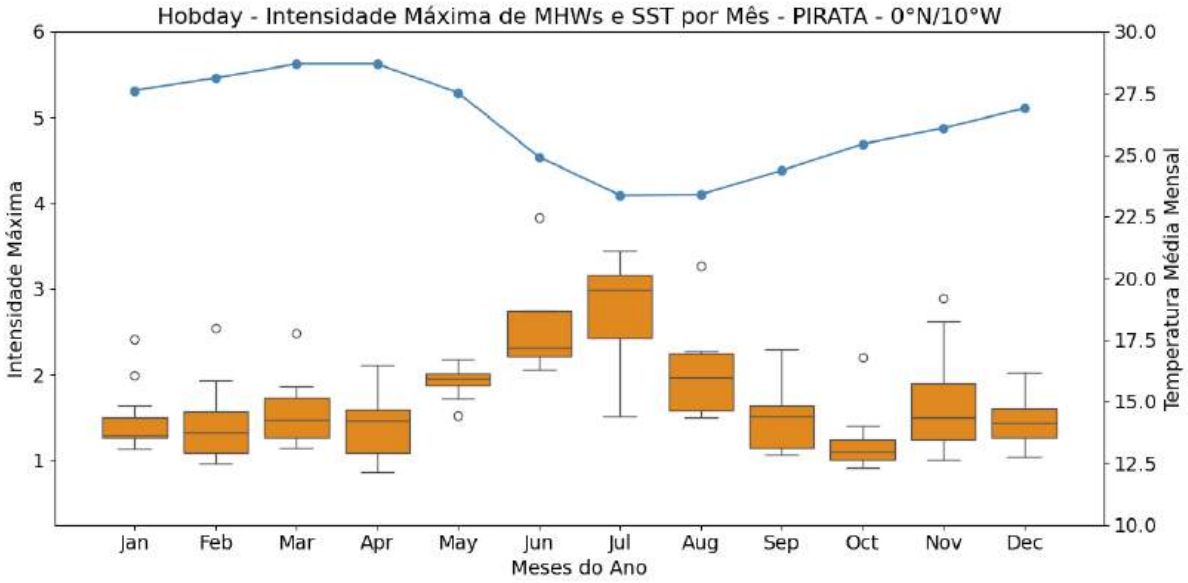


Figura 24C: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote *MarineHeatWaves* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N23W

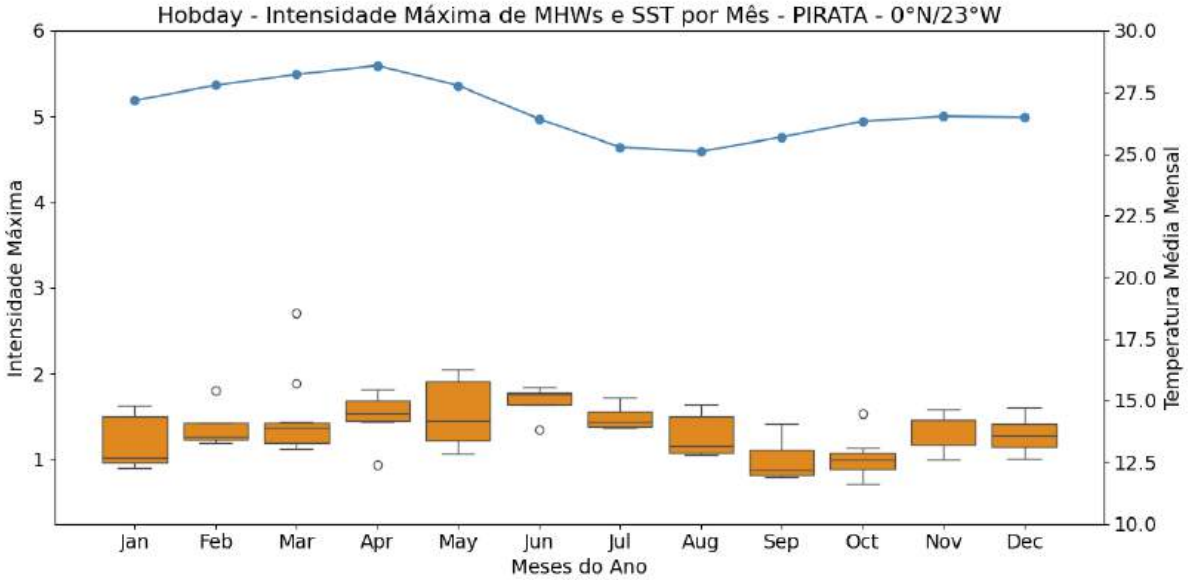


Figura 24D: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote *MarineHeatWaves* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N35W

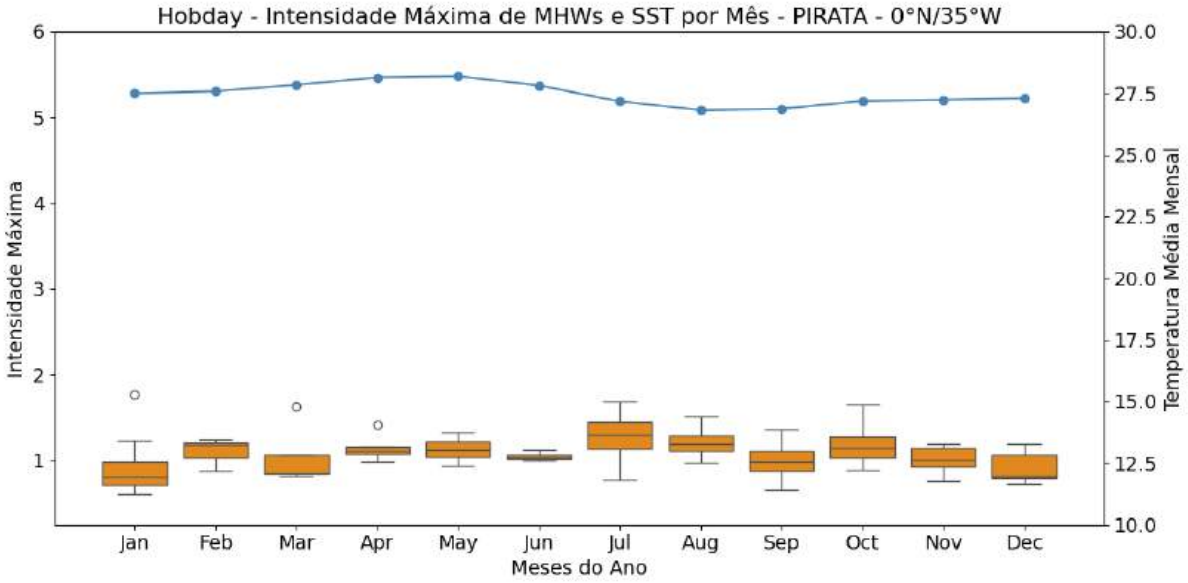


Figura 25A: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote *PyMHW* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N3W

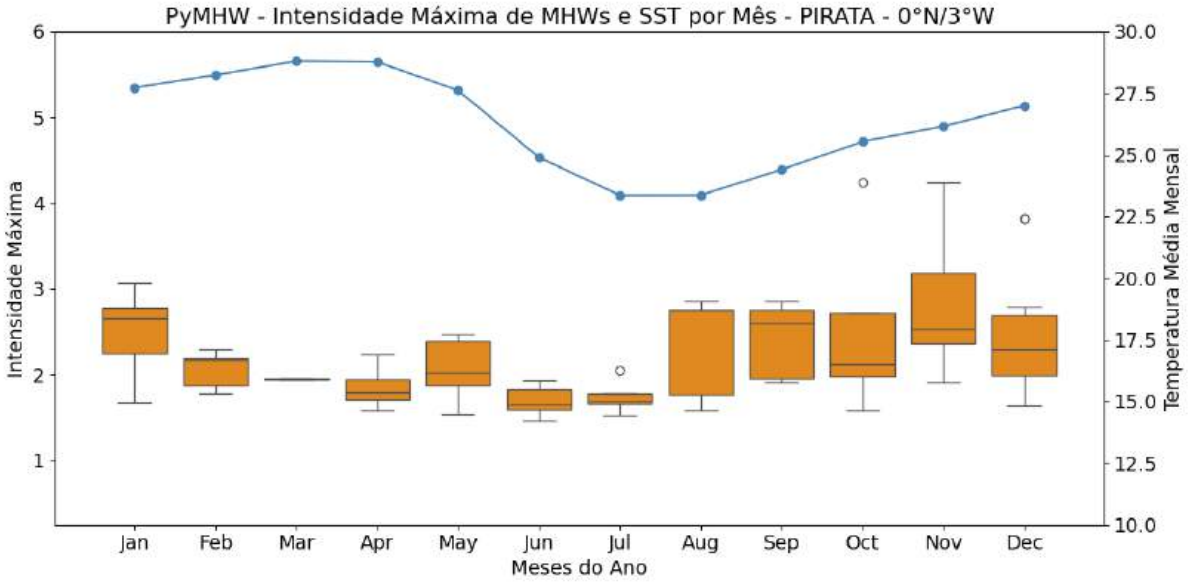


Figura 25B: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote *PyMHW* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N10W

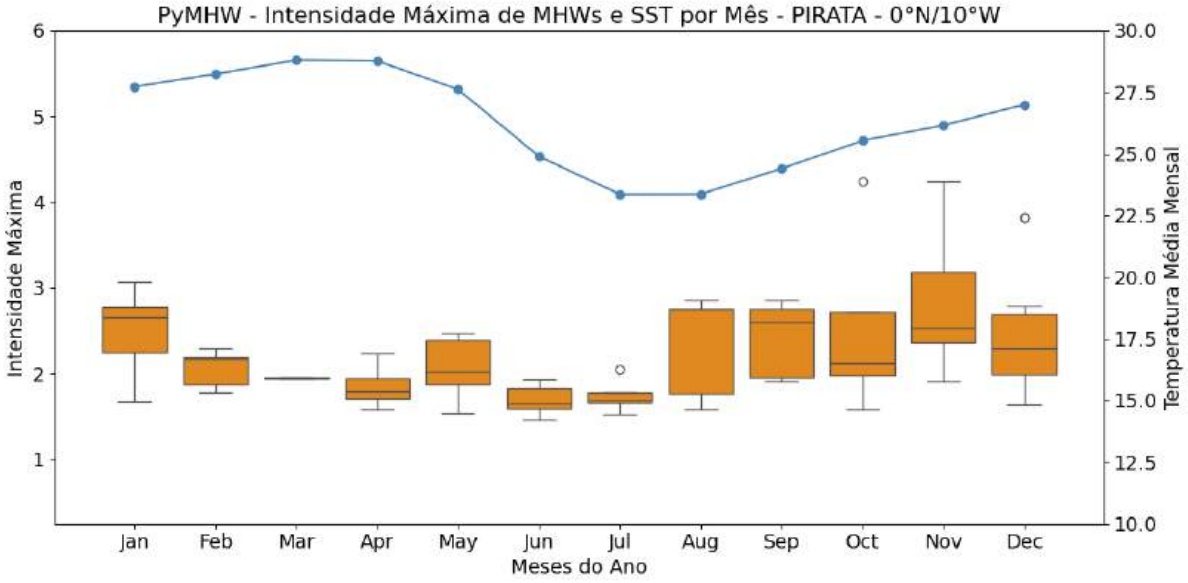


Figura 25C: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote *PyMHW* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N23W

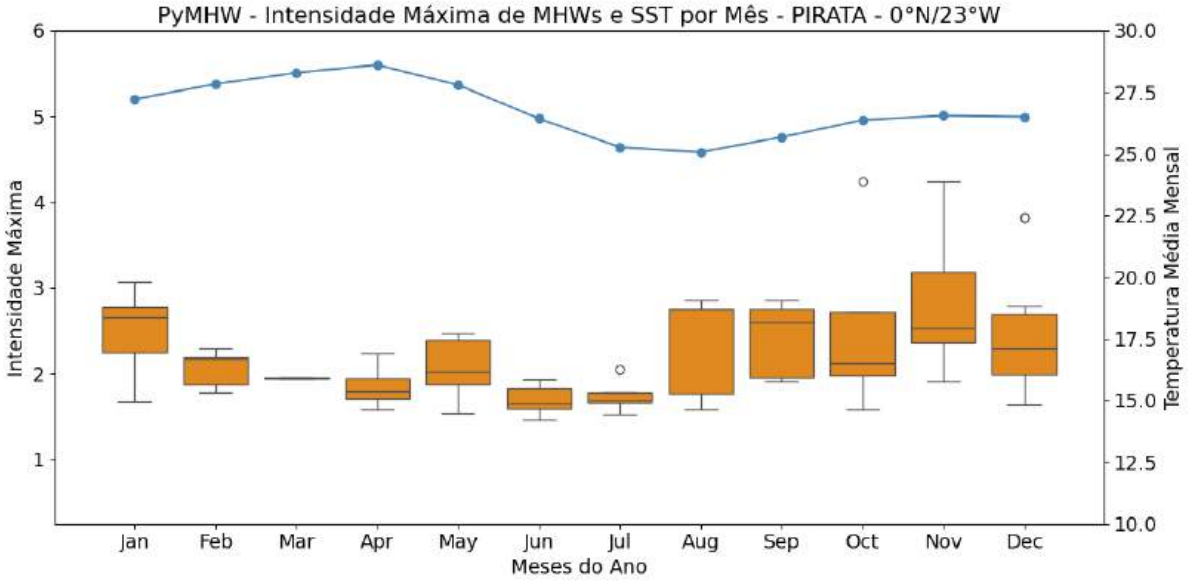
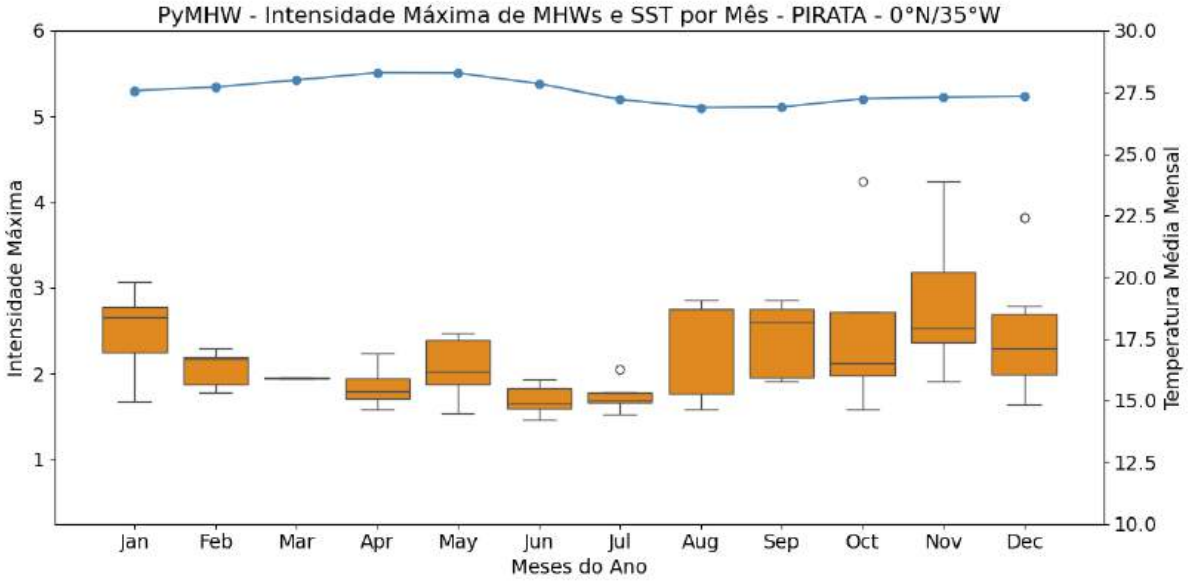



Figura 25D: Distribuição das intensidades máximas calculadas a partir do pacote *PyMHW* e da temperatura média da superfície do mar ao longo dos meses. - 0N35W