



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS REITOR JOÃO DAVID FERREIRA LIMA  
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS  
COORDENADORIA ESPECIAL DE OCEANOGRAFIA  
CURSO DE OCEANOGRAFIA

Mariana Veras de Alencar Zorzo

**A relação entre as ondas de calor marinhas e a ocorrência de vórtices no  
Vazamento das Agulhas**

Florianópolis  
2023

Mariana Veras de Alencar Zorzo

**A relação entre as ondas de calor marinhas e a ocorrência de vórtices no  
Vazamento das Agulhas**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação em Oceanografia do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Oceanografia.

Orientadora: Profa. Dra. Regina Rodrigues

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Zorzo, Mariana Veras de Alencar

A relação entre as ondas de calor marinhas e a ocorrência de vórtices no Vazamento das Agulhas / Mariana Veras de Alencar Zorzo ; orientador, Regina Rodrigues Rodrigues, 2023.

32 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.


1. Oceanografia. 2. Ondas de calor marinhas. 3. Vazamento das Agulhas. 4. Atlântico Sul. I. Rodrigues, Regina Rodrigues. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Oceanografia. III. Título.

Mariana Veras de Alencar Zorzo

**A relação entre as ondas de calor marinhas e a ocorrência de vórtices no  
Vazamento das Agulhas**


Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia e aprovado em sua forma final pelo Curso de Oceanografia.

Florianópolis, 08 de dezembro de 2023.



Coordenação do Curso

**Banca examinadora**



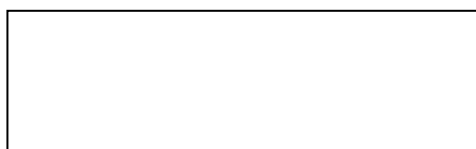
Prof.<sup>a</sup> Regina Rodrigues Rodrigues, Dr.<sup>a</sup>

Orientadora



Prof.(a) Juliana Leonel, Dr.<sup>a</sup>

Universidade Federal de Santa Catarina



Julia Martins de Araujo, Ma.

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2023.

## AGRADECIMENTOS

Passaram-se cinco anos e é maravilhoso chegar aqui hoje. De certa forma, é engraçada a maneira como a vida nos prega peças. Em um momento, os desafios parecem ser superados com facilidade, mas no segundo seguinte, é como se tivéssemos que enfrentar uma grande tempestade no meio do oceano. Sempre gostei de um pouco de turbulência, são nesses momentos que aprendo coisas pelas quais realmente vale a pena estar presente.

Por isso e por muito mais, sou grata a Sulamita e Rodrigo, mãe e pai, pelo acolhimento e empatia durante todos esses anos, principalmente nestes últimos. Só vocês sabem o quão difícil foi me manter de pé. Me inspiro eternamente na resiliência de vocês dois.

À Laura Zorzo, minha irmã, que pegou na minha mão quando tudo parecia impossível e duro demais, você me faz vibrar quando nada mais parece certo. Obrigada por me encorajar e me mostrar que eu posso alcançar tudo que eu sonhar.

Às minhas avós, Cristina e Eliana, a coragem e a determinação de vocês me faz buscar, cada vez mais, o meu espaço como mulher e pesquisadora.

À Prof.<sup>a</sup> Dra. Regina Rodrigues, por mostrar ao mundo o quanto as mulheres e a ciência têm um papel fundamental no futuro do planeta, atuando incansavelmente na luta pela justiça climática.

À Prof. Dra. Juliana Leonel, por ser uma pesquisadora brilhante e pelo acolhimento durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Nubia Carla Domingues, que sem eu sequer pedir, me ajudou a enfrentar as dificuldades que me foram apresentadas, você é excepcional!

Aos meus amigos Vinícius Franke e Juliana Stefanos, que foram essenciais de tantas formas, espero um dia poder retribuir toda bondade e afeto compartilhados.

Aos colegas de laboratório Jhoseny Santos, Piero Bernardo e Julia Martins, vocês são brilhantes (e muito pacientes)!

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por ter sido um ambiente de aprendizagem único e por ter me proporcionado experiências incríveis durante a graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que possibilitou um espaço de pesquisa para realização deste trabalho.

Por fim, agradeço aos professores e professoras incríveis do curso de graduação em Oceanografia da UFSC, que me fizeram enxergar o mundo de outra forma, vocês não fazem ideia de quanto foram importantes nesta jornada!

“O clima está esquentando, os animais estão desaparecendo, os rios estão morrendo, nossas plantações não florescem como antes. A Terra está falando. Ela nos diz que não temos mais tempo. [...] Vamos lutar por um futuro e um presente habitáveis. É necessário sempre acreditar que o sonho é possível. Que a nossa utopia seja um futuro na Terra.”

(Txai Suruí, 2021).

## RESUMO

Ondas de calor marinhas são eventos extremos de temperatura nos oceanos que têm efeitos devastadores para os ecossistemas marinhos. Uma das regiões mais produtivas biologicamente no mundo é o Atlântico Sul leste próximo à ponta da África do Sul, por estar sobre a influência da ressurgência da Benguela. No entanto, nesta região, há entrada de águas mais quentes e salinas provenientes do Oceano Índico, associada à retroflexão da Corrente das Agulhas. O principal mecanismo de entrada dessas águas mais quentes é através de vórtices anticiclônicos que se desprendem quando a Corrente das Agulhas retroflete, chamado de Vazamento das Agulhas. Estudos recentes mostram que o Vazamento das Agulhas aumentou nas últimas décadas. Portanto, o objetivo deste trabalho é determinar se houve um aumento na ocorrência de ondas de calor marinhas e possível relação com a ocorrência de vórtices na região do Vazamento das Agulhas. Para tal foram usados dados de satélite de temperatura do mar para detecção das ondas de calor e de altura do nível do mar para detecção dos vórtices. Constatou-se que houve não só um aumento considerável na frequência das ondas de calor marinhas na região, mas também na intensidade e distribuição espacial. Anos com mais ondas de calor marinhas estão associados a uma maior ocorrência de vórtices anticiclônicos, por trazerem águas quentes do Índico, mas também a uma menor ocorrência de vórtices ciclônicos que tendem a trazer águas mais frias da ressurgência da Benguela. Este estudo mostrou um aumento na ocorrência das ondas de calor marinhas condizente com o aumento do Vazamento das Agulhas nas últimas décadas. Porém, o enfraquecimento da ressurgência da Benguela e menos vórtices ciclônicos também desempenham um papel no aumento das ondas de calor marinhas na região.

**Palavras-chave:** Ondas de calor marinhas; Atlântico Sul; Vazamento das Agulhas.

## ABSTRACT

Marine heatwaves are events of extreme temperature in the oceans and have devastating effects on marine ecosystems. One of the most biologically productive regions in the world is the eastern South Atlantic near the tip of South Africa, as it is under the influence of the Benguela upwelling system. However, in this region, there is the entry of warmer and saline waters from the Indian Ocean associated with the retroflexion of the Agulhas Current. The main mechanism for the entry of these warmer waters is through anticyclonic eddies that are formed when the Agulhas Current retroflects; this is so-called Agulhas Leakage. Recent studies show that the Agulhas Leakage has increased in recent decades. Therefore, the objective of this study is to determine whether there has been an increase in the occurrence of marine heat waves and a possible connection with the occurrence of eddies in the Agulhas Leakage region. To this end, satellite data of sea surface temperature was used to detect marine heatwaves while satellite data of sea surface height was used to detect the eddies. There is not only a considerable increase in the frequency of marine heatwaves in the region, but also in their intensity and spatial distribution. Years with more marine heatwaves are associated with a greater occurrence of anticyclonic eddies since they bring warm waters from the Indian Ocean and with a lower occurrence of cyclonic eddies that tend to bring colder waters from the Benguela upwelling to the region. This study shows that there has been an increase in the occurrence of marine heatwaves consistent with the increase in the Agulhas Leakage in recent decades. However, the weakening of the Benguela upwelling and fewer cyclonic eddies also play a role in the increase in marine heat waves in the region.

**Keywords:** Marine heatwaves; South Atlantic; Agulhas Leakage.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O Sistema das Agulhas e a transferência de águas mais quentes do Oceano Índico para o Atlântico. ....	13
Figura 2 – Estrutura vertical dos vórtices ciclônicos e anticiclônicos no Hemisfério Sul. ....	14
Figura 3 – Fluxograma da metodologia.....	17
Figura 4 – Área de estudo.....	18
Figura 5 – Tendência na TSM (°C) por década para o período de 1982-2021 na região entre 30-50°S e 0-20°L.....	21
Figura 6 – Anomalia média anual de TSM em graus Celsius para o período de 1982-2021...23	
Figura 7 – Tendência na (a) frequência de OCMs (dias por mês por década) e na (b) intensidade acumulada de OCMs (°C-dias por mês por década) para o período de 1982-2021 na região na região entre 30-50°S e 0-20°L. ....	24
Figura 8 – (a) Anomalia de TSM mensal média (°C), (b) frequência mensal de OCMs (dias), (c) intensidade acumulada mensal de OCMs (°C-dias) e (c) taxa de ocupação mensal média das OCMs (%) para o período de 1982-2021 na região entre 30-50°S e 0-20°L. Linhas vermelhas representam a regressão linear para cada variável. ....	26
Figura 9 – Vórtices ciclônicos, anticiclônicos e total na região do Vazamento das Agulhas: (a) Número de vórtices, (b) Velocidade (m/s), (c) Área (%) para o período de 1998-2018.....	27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de correlação de Pearson entre as séries temporais de anomalia de TSM mensal média, frequência mensal de OCMs, intensidade acumulada mensal de OCMs e taxa de ocupação mensal média das OCMs para o período de 1982-2021 na região entre 30-50°S e 0-20°L. Todos os coeficientes são estatisticamente significantes dentro do intervalo de confiança de 95%.....	25
Tabela 2– Coeficientes de correlação de Pearson entre as séries temporais de anomalia de TSM mensal média, frequência mensal de OCMs, intensidade acumulada mensal de OCMs, taxa de ocupação mensal média das OCMs e número, velocidade azimutal e ocupação dos vórtices anticiclônicos, ciclônicos e total para o período de 1982-2021 na região entre 30-50°S e 0-20°L. Apenas os coeficientes destacados em negrito são estatisticamente significantes dentro do intervalo de confiança de 95%. .....	28

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>29</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>30</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O oceano sempre fez parte da história da humanidade desde a sua formação até os dias atuais, desempenhando os mais diversos papéis. Ele é fonte de alimentação, energia, transporte e sobretudo de vida. O desenvolvimento da sociedade vem ocasionando alterações nesse ambiente que é um grande sumidouro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) resultante da queima de combustíveis fósseis, contribuindo decisivamente na remoção de carbono antropogênico presente na atmosfera (SABINE *et al.*, 2004). O relatório IPCC (2022) mostrou que as maiores emissões de CO<sub>2</sub> na história ocorreram entre os anos 2010-2019, intensificando o atual cenário do aumento global de temperatura e a ocorrência de eventos extremos. Neste contexto, as ondas de calor marinhas (OCMs), classificadas como eventos extremos, vem ocorrendo com maior frequência (LAUFKÖTTER; ZSCHEISCHLER; FRÖLICHER, 2020).

Hobday *et al.* (2016), com base na investigação e definição de ondas de calor atmosféricas (PERKINS; ALEXANDER, 2013), definiram hierarquicamente as OCMs como eventos prolongados de temperaturas anômalas descritas por sua duração, intensidade, taxa de evolução e extensão espacial. Para ser considerada um evento prolongado e com temperaturas anômalas, uma OCM precisa ter duração de, no mínimo, 5 (cinco) dias e valores de temperatura acima da linha base estabelecida como o 90º percentil de uma climatologia de, no mínimo, 30 (trinta) anos. Essa definição permite que aplicações específicas sejam realizadas a partir da utilização de diferentes conjuntos de dados para identificação de OCMs, podendo ser empregada em águas de superfície e subsuperfície nas diferentes regiões oceânicas, incluindo estuários e mares fechados.

Oliver *et al.* (2018) verificaram que, entre 1925 e 2016, mudanças na frequência e na duração média global das OCMs resultaram em um aumento anual de 54% no número total de dias de OCMs. Os impactos ocasionados por esse aumento vão desde grandes mudanças na biodiversidade dos ecossistemas marinhos (CAPUTI *et al.*, 2016) até a implicações na pesca (PEARCE; FENG, 2012). Um exemplo dessas mudanças ocorreu no inverno de 2014-2015, período no qual pequenas aves marinhas zooplânctívoras conhecidas como Cassin's Auklets (*Ptychoramphus aleuticus*) que se reproduzem no nordeste do Oceano Pacífico, foram encontradas mortas por inanição em praias da Califórnia à Colúmbia Britânica, no Canadá. Jones *et al.* (2018) mostraram que a causa da morte foi devido a uma alteração na abundância

e na composição do zooplâncton resultante de um evento de OCM que ocorreu entre 2013-2015 no nordeste do Pacífico.

Um grande impacto também foi identificado por Thomson *et al.* (2014) nas pradarias de gramíneas marinhas em Shark Bay após a ocorrência de uma OCM entre 2010-2011, o que ocasionou uma mudança abrupta do ecossistema, afetando principalmente as espécies de base de cadeia e termicamente sensíveis. Hughes *et al.* (2018) mostraram que após a onda de calor marinha recorde na Grande Barreira de Corais em 2016, ocorreu uma grande mortalidade dos corais onde a exposição ao calor excedeu um limite crítico de 3–4 °C durante semanas de aquecimento.

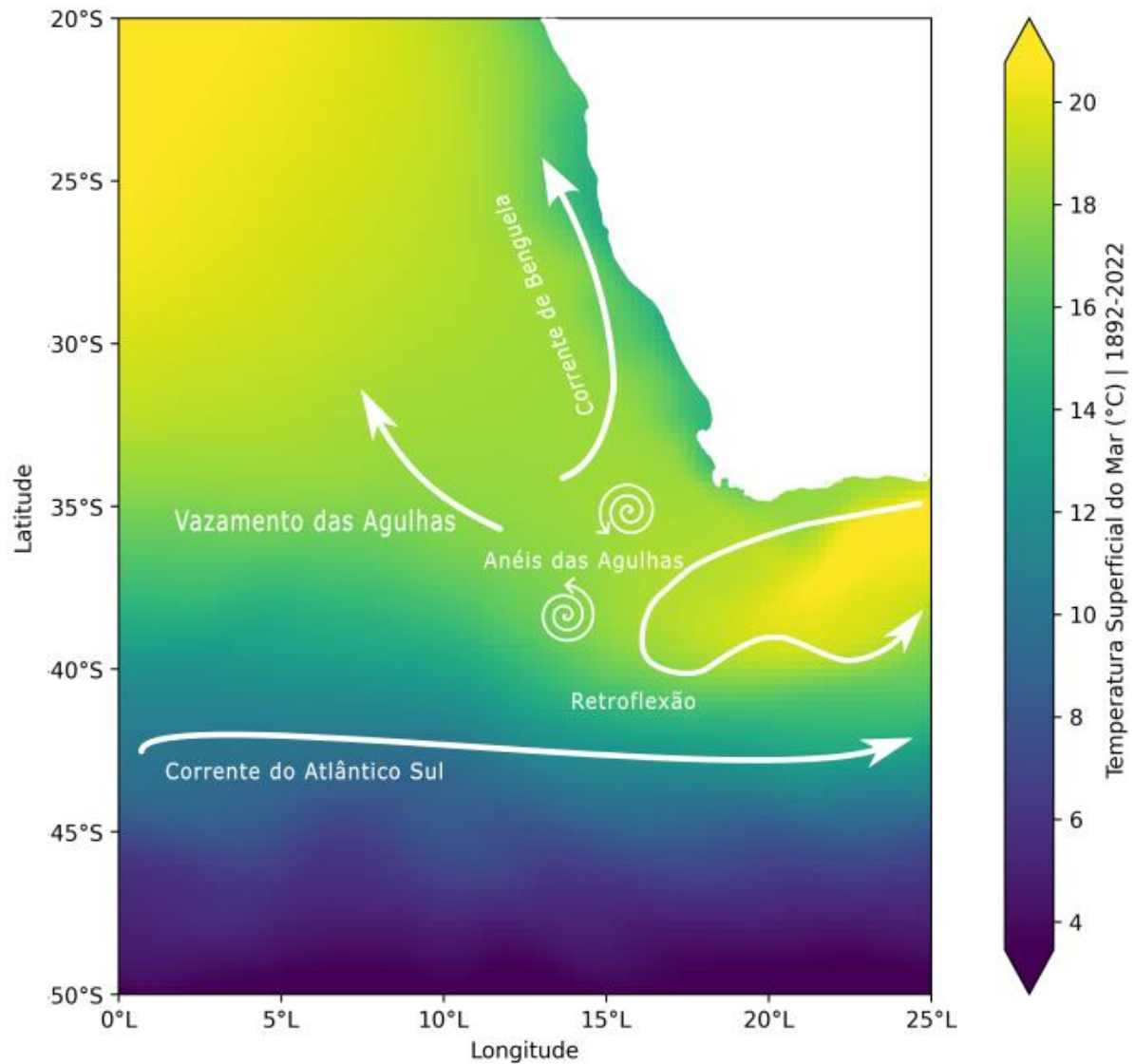
Além dos impactos associados a biota marinha, as OCMs vêm causando consequências econômicas globais da ordem de 800 milhões de dólares em perdas diretas, podendo ultrapassar 3,1 bilhões de dólares por ano em perdas indiretas (SMITH *et al.*, 2021). No entanto, é possível que esses números sejam ainda maiores devido à falta de conhecimento e à subnotificação de diversos impactos socioeconômicos, sobretudo em nações com menor renda.

Atualmente, existem poucos trabalhos voltados para análise da ocorrência e dos impactos associados às OCMs no Oceano Atlântico Sul. Dentre eles, um estudo realizado por Rodrigues *et al.* (2019) identificou uma tendência de aumento na ocorrência, intensidade, duração e extensão espacial desses eventos no Atlântico Sul sudoeste. Além disso, também observaram uma redução na produtividade primária de superfície associada às OCMs entre os anos de 2013-2014, causando implicações para a pesca regional.

No entanto, ainda há uma região muito importante na borda leste do Oceano Atlântico Sul, perto da África do Sul, que carece de estudos relacionados às OCMs. Conhecida como Vazamento das Agulhas, essa região faz parte do Sistema das Agulhas que, por sua vez, tem uma grande importância para a circulação oceânica global, sendo responsável por alimentar o braço superior da Circulação Meridional do Atlântico (AMOC) por meio do vazamento de águas quentes do Oceano Índico para o Atlântico (GORDON *et al.*, 1992). Neste Sistema, a Corrente das Agulhas flui do Oceano Índico, passando pelo Banco das Agulhas no sul da África do Sul para o Atlântico Sul, onde ocorre uma mudança abrupta na sua direção e ela retorna para o Índico como a Corrente de Retorno das Agulhas. A região onde essa mudança ocorre é conhecida como Retroflexão das Agulhas e é caracterizada pela liberação de vórtices que levam as águas mais quentes do Índico para o Atlântico, processo chamado de Vazamento

das Agulhas. A Figura 1 apresenta a região do Vazamento e os valores médios de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ) de 1982 a 2021 para uma área que se estende de  $20^{\circ}\text{S}$  até  $50^{\circ}\text{S}$  e de  $0^{\circ}\text{L}$  até  $25^{\circ}\text{L}$ .

Figura 1 – O Sistema das Agulhas e a transferência de águas mais quentes do Oceano Índico para o Atlântico.

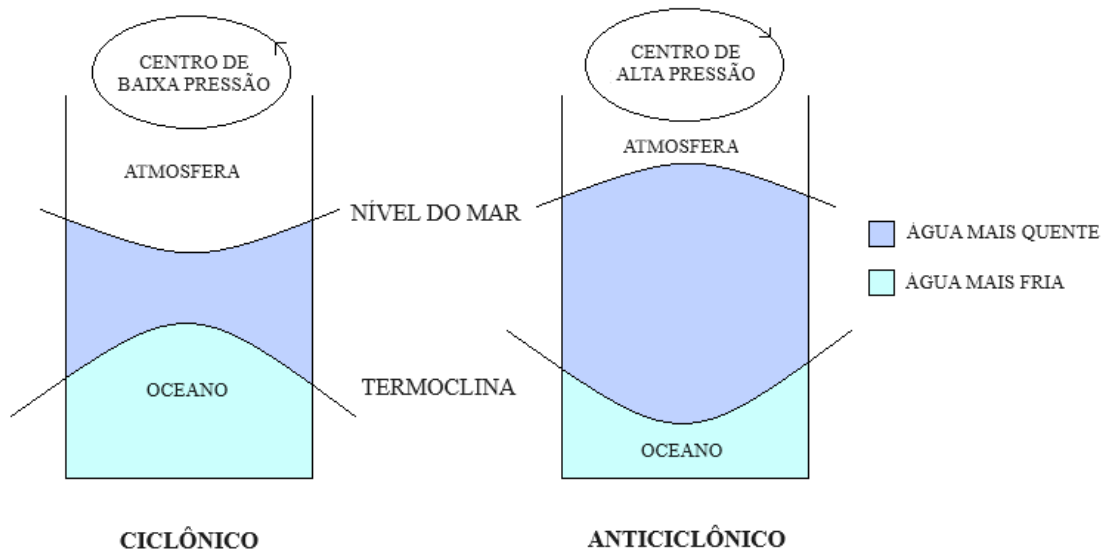


Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os vórtices, geralmente, estão associados às correntes oceânicas de fluxos intensos e são classificados em ciclônicos e anticiclônicos. No Hemisfério Sul, os anticiclones giram no sentido anti-horário, possuem um núcleo mais quente com relação à água exterior e têm centros de alta pressão que geram anomalias positivas na superfície do mar, o que os torna passíveis de serem identificados por sensores de altimetria. Os ciclônicos, por sua vez, possuem sentido horário com um núcleo mais frio e anomalias negativas geradas por centros

de baixa pressão (FREITAS, 2018). A diferença entre a temperatura da água carregada por esses dois tipos de vórtices se dá pela posição da termoclina nos seus respectivos centros, a qual está mais profunda nos anticiclônicos e mais próxima a superfície nos ciclônicos. A Figura 2 representa a estrutura vertical dos vórtices ciclônicos e anticiclônicos.

Figura 2 – Estrutura vertical dos vórtices ciclônicos e anticiclônicos no Hemisfério Sul.



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Sandalyuk e Belonenko (2021) realizaram um estudo detalhado sobre a estrutura tridimensional dos vórtices de mesoescala na região da Retroflexão das Agulhas a partir de dados hidrológicos e altimétricos encontraram anomalias significativas de temperatura, positivas (mais quentes) para os anticiclônicos e negativas (mais frias) para ciclônicos, evidenciando que os vórtices anticiclônicos tem um papel importante no transporte de calor nesta região. A transferência das águas mais quentes do Índico para o Atlântico pode ocorrer na forma de vórtices anticiclônicos – conhecidos como anéis das Agulhas –, vórtices ciclônicos e através de pequenas contribuições de filamentos que tem origem relacionada a Corrente das Agulhas (LUTJEHARMS; COOPER, 1996). Contudo, por conta das características dos anticiclones, grande parte desta transferência de calor ocorre por meio dos anéis das Agulhas.

A trajetória de migração desses anéis do Índico para o Atlântico ocorre ao longo do Corredor das Agulhas (GARZOLI; GORDON, 1996). Próximo a esta região, na costa sudoeste da África, está localizado o Sistema de Ressurgência de Benguela (SRB) onde

ocorre a ressurgência costeira da Corrente de Benguela. Este fenômeno é caracterizado pela ascensão de águas frias de subsuperfície para a superfície, trazendo consigo nutrientes essenciais para a zona eufótica. A SRB está entre os ecossistemas mais produtivos do oceano (RYTHER, 1969), sendo extremamente importante para a manutenção da base da cadeia alimentar e propiciando o desenvolvimento de ecossistemas marinhos (CURRIE, 1953). Tim *et al.* (2018) analisaram a influência da Corrente das Agulhas, bem como do Vazamento das Agulhas durante o período de 1958 a 2009 nas massas de água centrais responsáveis por alimentar a ressurgência no SRB. O estudo mostrou que a variabilidade da ligação entre o Índico e o Atlântico pode alterar o conteúdo de nutrientes, oxigênio, salinidade e temperatura das massas de água na região de ressurgência. De acordo com Beal *et al.* (2011), o agravamento das mudanças climáticas vem causando uma intensificação do vazamento, o que caracteriza uma mudança na ligação entre os oceanos Índico e Atlântico. Essa mudança pode impactar fortemente o ecossistema marinho, diminuindo a produtividade primária na SRB, uma vez que as águas quentes com menos nutrientes chegam em maior quantidade à área da ressurgência.

Baseado no supracitado, é de extrema importância que sejam realizados mais estudos ao longo da região para que os potenciais impactos ambientais, sociais, econômicos e culturais sejam previamente identificados com intuito de criar estratégias de prevenção e adaptação.



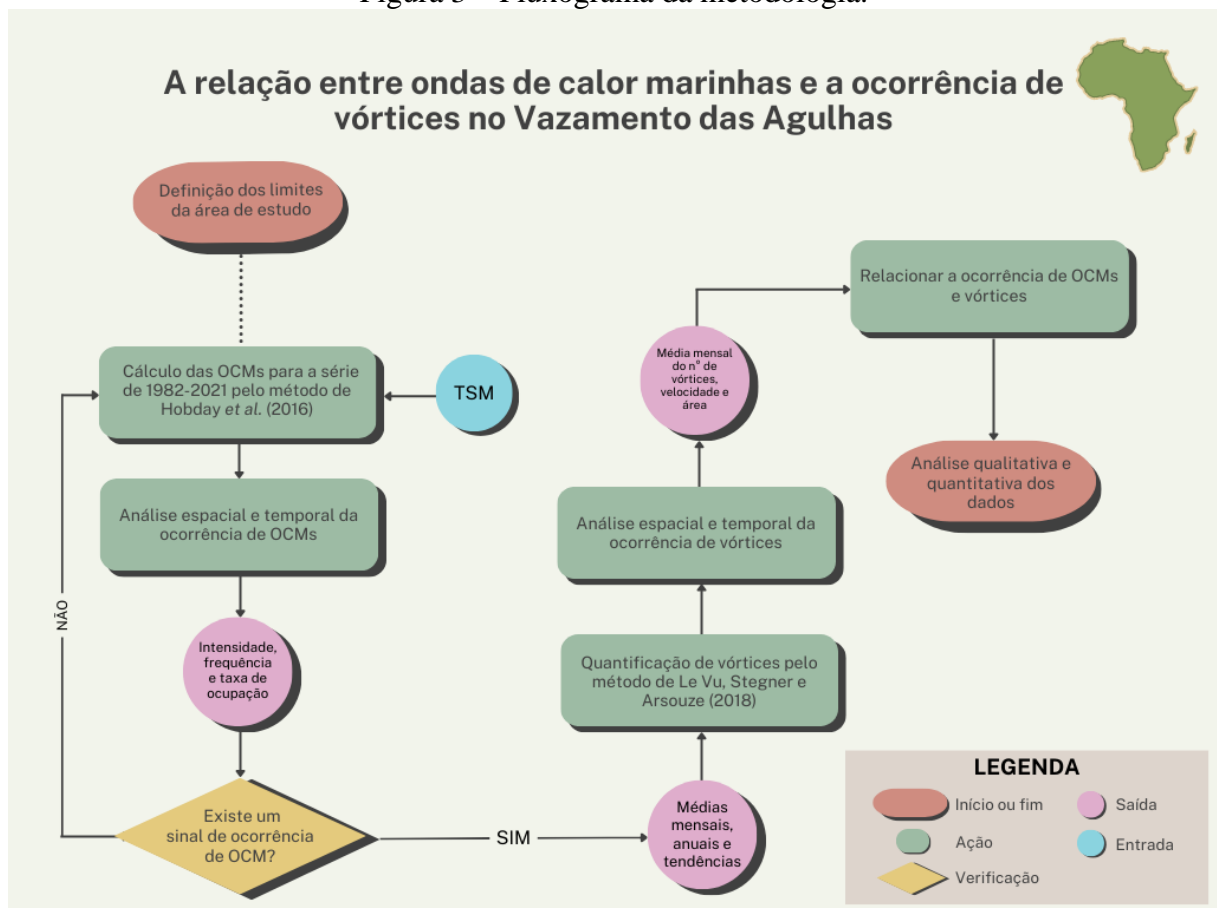
## **2 OBJETIVO**

O presente trabalho propõe determinar se houve aumento na frequência, intensidade e extensão espacial das OCMs para o período de 1982 a 2021 na região do Vazamento das Agulhas e se este aumento está relacionado a maior entrada de águas do Índico via vórtices das Agulhas.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi dividido em duas etapas principais. A primeira consistiu em calcular as métricas das OCMs, utilizando a metodologia de Hobday *et al.* (2016), e a segunda em quantificar as métricas dos vórtices ciclônicos e anticiclônicos no Vazamento das Agulhas, a partir de dados de altimetria de acordo com metodologia de Le Vu, Stegner e Arsouze (2018). Posteriormente, foram geradas séries temporais de OCMs e vórtices para a região do Vazamento das Agulhas, bem com as correlações. A Figura 3 apresenta o fluxograma da metodologia proposta.

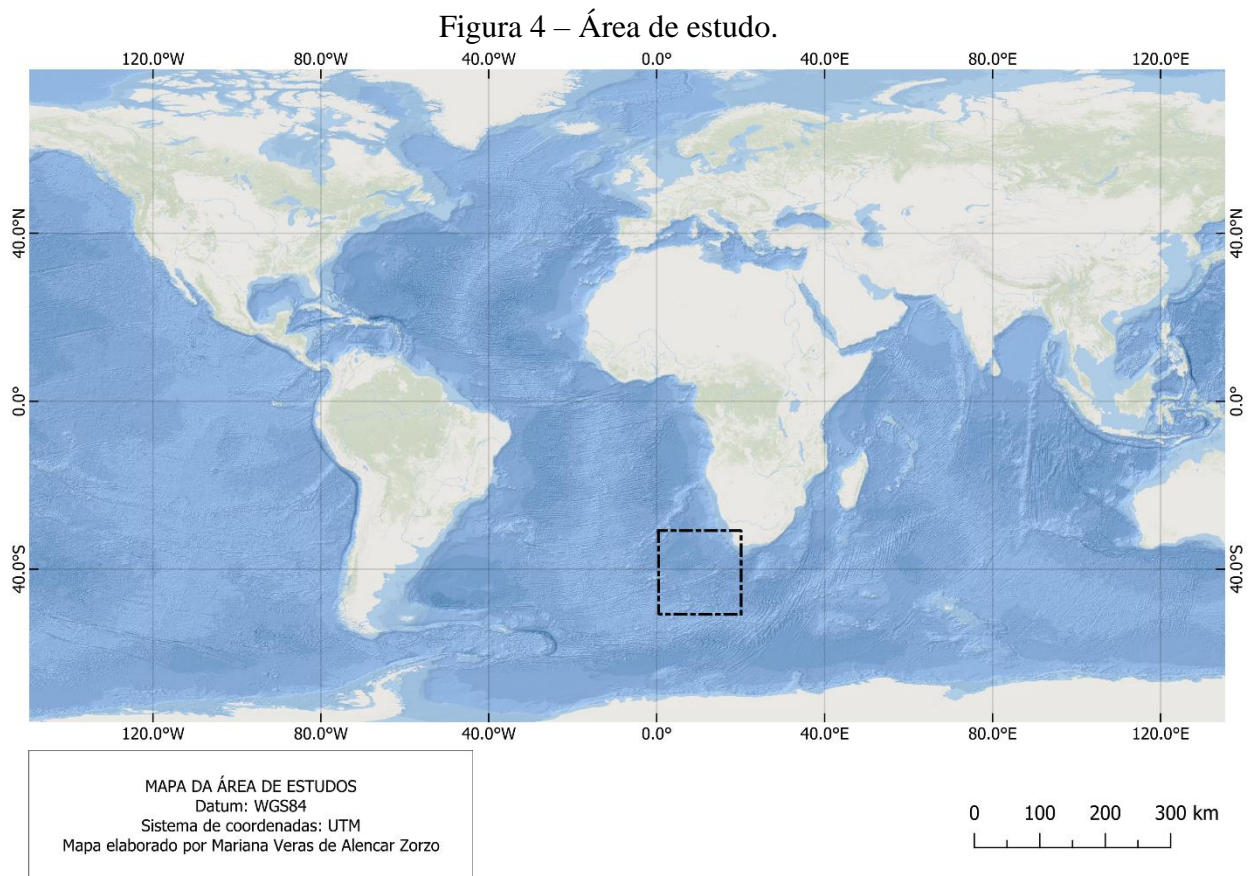
Figura 3 – Fluxograma da metodologia.



Fonte: elaborado pela autora (2023).

A área de estudo (Figura 4) se estende de 50°S até 30°S e de 0°L até 20°L e foi definida com base na localização do Corredor das Agulhas (GARZOLI; GORDON, 1996). A climatologia para a região foi obtida a partir dos dados diários de temperatura da superfície do mar (TSM) do *Optimum Interpolation SST* (OISST) durante o período de 01/01/1982 a

31/12/2021 (Reynolds *et al.*, 2007). Após análise da climatologia, os valores acima do limiar (anomalias de TSM) foram identificados para toda a região e as médias mensais, anuais e a tendência de aumento por década foram calculadas.



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Os dados de OCM foram gerados por meio do algoritmo<sup>1</sup> escrito por Eric C. J. Oliver, implementado em linguagem de programação Python, no qual uma OCM é definida como um evento prolongado (de no mínimo 5 dias) de TSM acima do limite do 90° percentil em relação a uma climatologia de pelo menos 30 anos de dados. No presente trabalho foi utilizada uma climatologia de 40 (quarenta) anos (1982-2021). A partir dos dados de OCMs obtidos foi possível calcular as seguintes métricas: 1) frequência, quantidade de dias com OCMs; 2) intensidade acumulada, somatório das anomalias nos dias de OCMs; e 3) taxa de ocupação, percentagem da área de estudo com a presença de OCMs. O Quadro 1 apresenta as definições das métricas utilizadas.

<sup>1</sup> Disponível no GitHub em <https://github.com/ecjoliver/marineHeatWaves>.

Quadro 1 – Definição das métricas das OCMs com base em Hobday *et al.* (2016).

Métrica (unidade)	Definição
Frequência (dias)	Número de dias de OCM no mês
Intensidade acumulada (°C – dias)	Somatório no mês das anomalias de TSM diárias durante os dias de OCM
Taxa de ocupação (%)	Porcentagem média no mês da área de estudo com OCM

Fonte: elaborado pela autora (2023).

Foram geradas séries temporais para frequência (dias), intensidade acumulada (°C-dias) e taxa de ocupação (%) bem como as tendências lineares usando o método dos mínimos quadrados para identificar se houve aumento ou diminuição das métricas de OCM no período (1982-2021).

A segunda etapa da metodologia utilizou os dados gerados pelo *Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm* (AMEDA)<sup>2</sup> para identificação de vórtices, desenvolvido por Le Vu, Stegner e Arsouze (2018). Este método híbrido registra as posições centrais dos vórtices, bem como os respectivos tamanhos e intensidades, baseando-se em propriedades físicas e geométricas do fluxo. São utilizados os parâmetros *Local Okubo-Weiss* (LOW), que quantificam a importância relativa da rotação em relação à deformação utilizando o campo de velocidade horizontal, e o *Local Normalized Angular Momentum* (LNAM), que permite localizar o centro de um vórtice independente da intensidade e propor um contorno a partir da velocidade radial máxima, baseando-se no momento angular normalizado em uma área local, assumindo o valor +1 (ciclones) ou -1 (anticiclones). Em seguida, são identificados os contornos das linhas de corrente fechadas com velocidade radial máxima para os limites dos vórtices. O algoritmo utilizou como entrada os dados de satélite *Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic Data* (AVISO), dados de altimetria gerados a partir da combinação dos dados do *TOPEX/Poseidon*, *Jason-1* e *Jason-2*, e *Environmental Satellite* (*Envisat*). Os dados de altimetria possuem uma grade de resolução espacial de 0,25° e foram utilizados como sequências de mapas diários de anomalias na superfície do mar (ASM) globais de 1998 a 2018.

A partir dos dados obtidos, realizou-se a quantificação dos vórtices ciclônicos e anticiclônicos, a análise da velocidade ( $m\ s^{-1}$ ) e da área ocupada (%) durante o período de

<sup>2</sup> Disponível no GitHub em <https://github.com/briaclevu/AMEDA>.

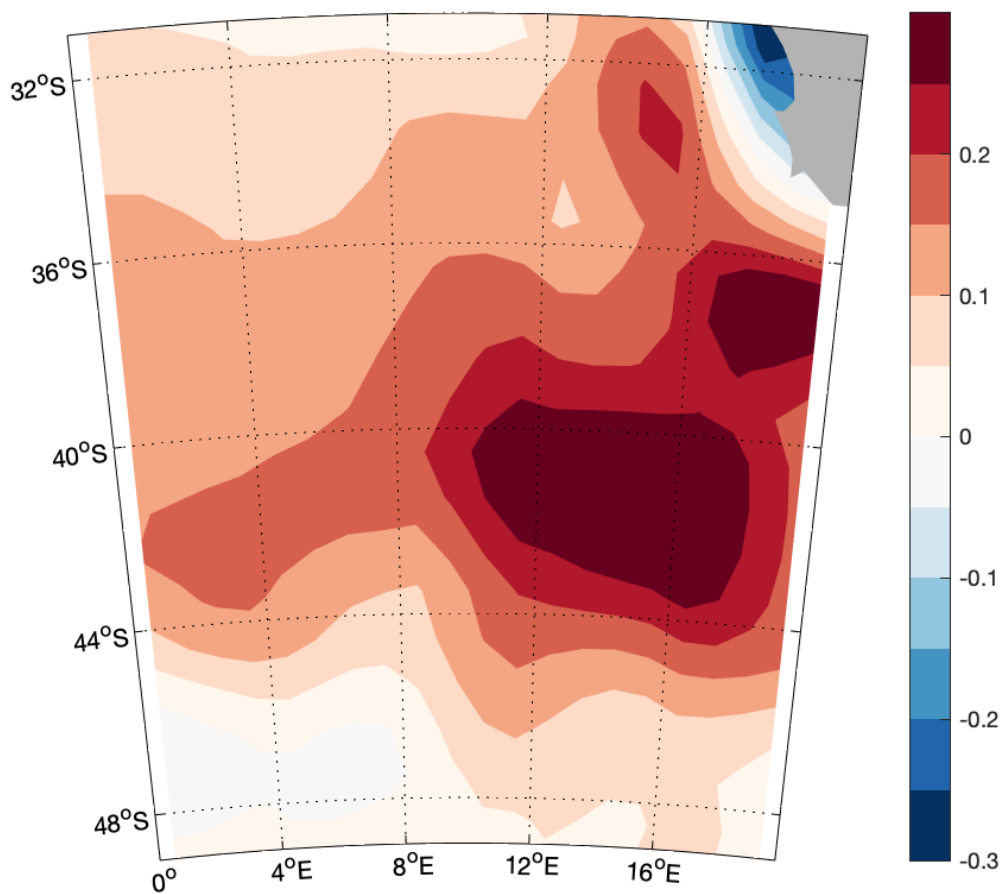
01/01/1998 a 31/12/2018. Para concluir, a fim de analisar no tempo, foram geradas séries temporais de número, velocidade azimutal e área de ocupação dos vórtices ciclônicos, anticiclônicos e totais.

Para avaliar a relação entre as séries temporais das OCMs e as séries temporais dos vórtices, coeficientes de correlação de Pearson foram calculados entre as séries, com um intervalo de confiança de 95%.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos dados diários do OISST, foi analisada a tendência de TSM para o período de 1982-2021 na região de 30°S até 50°S e de 0°L até 20°L (Figura 5). O valor máximo encontrado foi de 0,3°C por década, totalizando 1,2°C em 4 décadas, na região da Retroflexão e do Vazamento das Agulhas. Essa região, de tendências positivas de TSM, é onde ocorre a transferência de águas quentes do Índico para o Atlântico através do Corredor das Agulhas. A ocorrência de fortes tendências nesta região indica um aquecimento da água que migra de um oceano para o outro, apontando um aumento da entrada das águas do Índico. Por outro lado, o valor mínimo registrado foi de -0,3°C por década, totalizando -1,2°C em 4 décadas, próximo da costa da África, na região da ressurgência da Benguela.

Figura 5 – Tendência na TSM (°C) por década para o período de 1982-2021 na região entre 30-50°S e 0-20°L.



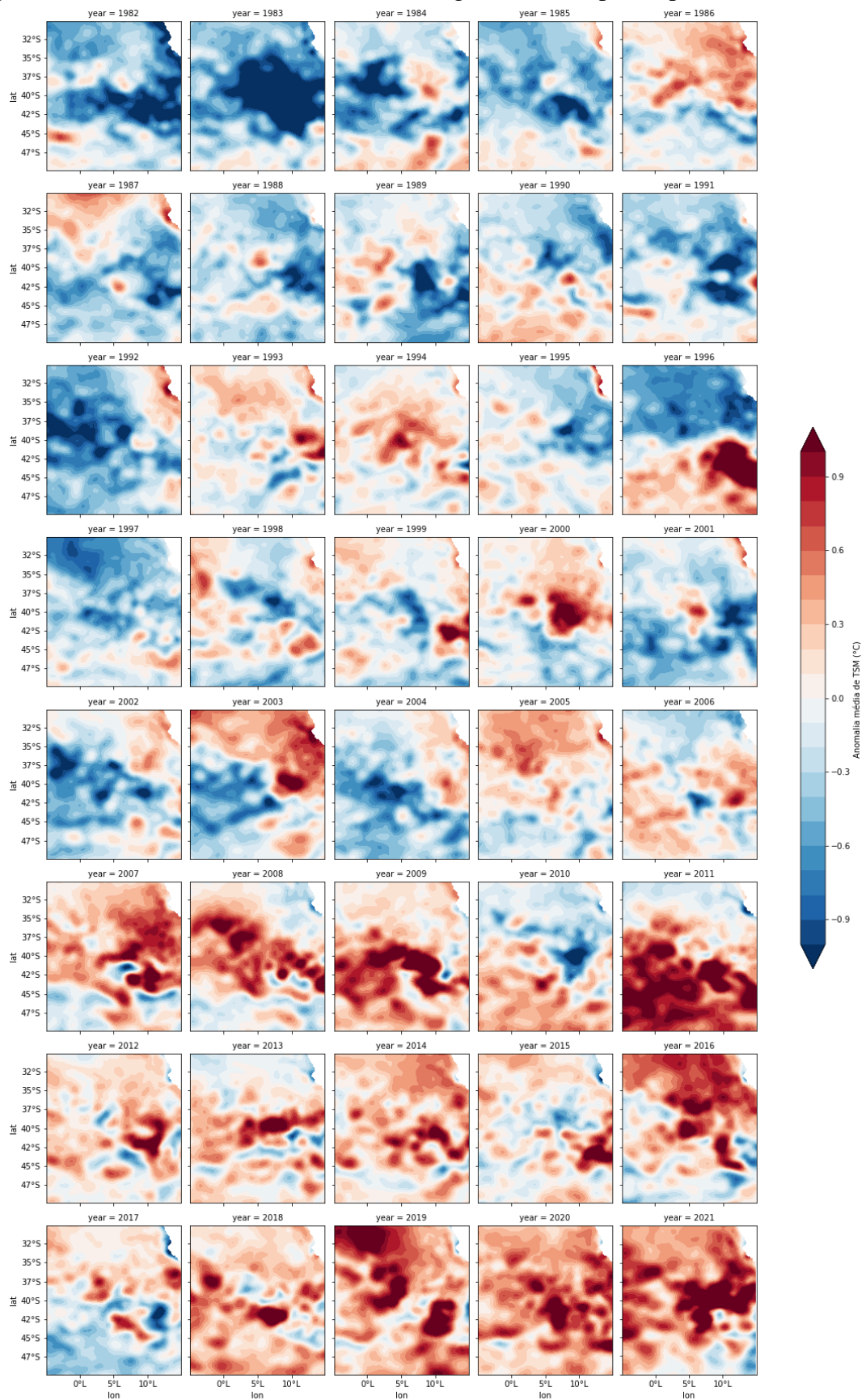
Fonte: elaborado pela autora (2023).

Essas tendências de aquecimento na região podem ser analisadas mais detalhadamente através das anomalias médias de TSM (°C) para cada ano entre 1982 e 2021 (Figura 6). Os resultados mostraram uma grande diferença entre os anos iniciais da análise em comparação com os recentes. A média espacial das anomalias para a região mostrou que, dos 40 anos analisados, 21 (vinte e um) apresentaram valores positivos, ao passo que 19 (dezenove) foram negativos. Dos 21 anos com valores positivos, apenas 4 ocorreram nas primeiras duas décadas de 1982-2000 (1986, 1993, 1994, 2000). Já dos 19 anos com valores negativos médios para a região, apenas 4 ocorreram nas duas últimas décadas de 2001-2021 (2001, 2002, 2004 e 2017).

As mudanças mais notáveis ocorrem a partir do ano de 1993, no qual o oceano começou a apresentar anomalias mais quentes que se intensificaram até 2021. Os valores máximos de anomalia média anual de TSM para região foram de, aproximadamente, -2,36 °C até 2,36 °C ao longo dos 40 anos, sendo o máximo em 2008 e o mínimo em 1983. Comparando o primeiro e o último ano da série, 2021 apresentou valores que chegaram a 2,21 °C, enquanto em 1982 a máxima foi de 0,74 °C, uma diferença de 1,47 °C de anomalia. Garcia-Soto *et al.* (2021) analisaram indicadores das mudanças climáticas nos oceanos durante as últimas décadas, alertando que pequenas alterações na temperatura do mar podem modificar diversos processos. O aquecimento dos oceanos acarreta uma diminuição do pH da água, alterando o equilíbrio e causando um processo denominado acidificação dos oceanos (DONEY *et al.*, 2020). Ao longo dos últimos anos, o aquecimento observado na região pode estar causando, além de acidificação, diversos impactos nos ecossistemas marinhos e na biota associada.

Ainda é possível identificar padrões de concentração dessas anomalias. Na Figura 6 as anomalias se concentram no centro de círculos irregulares no oceano (vórtices), principalmente no corredor de vórtices do Vazamento das Agulhas com anomalias negativas de TSM ora ao sul ora ao norte desse corredor.

Figura 6 – Anomalia média anual de TSM em graus Celsius para o período de 1982-2021.



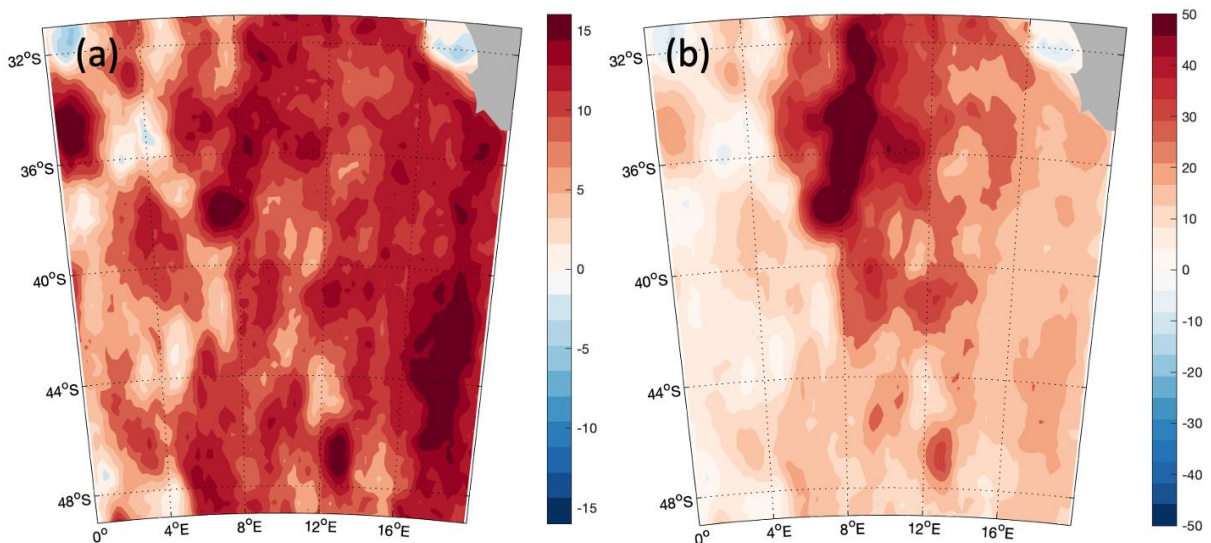
Fonte: elaborado pela autora (2023).



As OCMs também foram identificadas na área de estudo na região entre 30-50°S e 0-20°L. A tendência de aumento do número de dias de OCMs (Figura 7a) chegou a 16 (dezesesseis) dias por mês por década, principalmente na região da Retroflexão das Agulhas, mesmo local onde as tendências positivas de TSM foram identificadas e apresentadas anteriormente (Figura 5). Essa tendência de aquecimento se espalhou para além da retroflexão, adentrando pelo Atlântico Sul via corredor de vórtices do Vazamento das Agulhas como discutido para a Figura 6. Novamente, tendências negativas ocorreram na região da ressurgência costeira de Benguela.

A tendência na intensidade acumulada de OCMs (Figura 7b) apresentou os maiores valores na região do Vazamento das Agulhas entre 32-37°S e 5-15°L, com valores máximos de 50 °C-dias por mês por década. Em contraste com a frequência de OCMs, a intensidade acumulada apresentou valores positivos mais baixos na região da Retroflexão das Agulhas. Tendências negativas fracas de intensidade acumulada foram encontradas próximas à costa sudoeste da África. Com base nestes resultados, é possível observar que águas mais quentes do Índico estão entrando no Atlântico Sul e intensificando o aquecimento no sudeste do Atlântico Sul. Isto tem implicações importantes, pois essas águas alimentam o braço superior da Circulação Meridional de Revolvimento do Atlântico.

Figura 7 – Tendência na (a) frequência de OCMs (dias por mês por década) e na (b) intensidade acumulada de OCMs (°C-dias por mês por década) para o período de 1982-2021 na região na região entre 30-50°S e 0-20°L.



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Agora serão apresentadas as séries temporais mensais de algumas métricas relativas à média espacial para a região entre 30-50°S e 0-20°L (Figura 8) e correlações (Tabela 1). Pode-se observar que à medida que as anomalias de TSM se tornaram positivas para região (Figura 8a), a frequência (Figura 8b), a intensidade acumulada (Figura 8c) e taxa de ocupação (Figura 8d) das OCMs também aumentaram. Com a maior entrada de águas do Índico através do Vazamento das Agulhas, mais frequentes, intensas e maiores se tornaram as OCMs no Atlântico Sul sudeste.

Os valores das tendências lineares (linha vermelha nos painéis) representam um aumento na TSM de 0,19°C por década, na frequência das OCMs de 0,84 dias por mês por década, na intensidade acumulada de 1,6°C-dias por mês por década e de ocupação de 2,4% da área total por mês por década. Além disso, as séries temporais das métricas de OCMs são altamente correlacionadas com a TSM no local, valores em torno de 0,82, estatisticamente significantes, embora a distribuição espacial da anomalia de TSM (Figura 5) e OCMs (Figura 7) varie bastante.

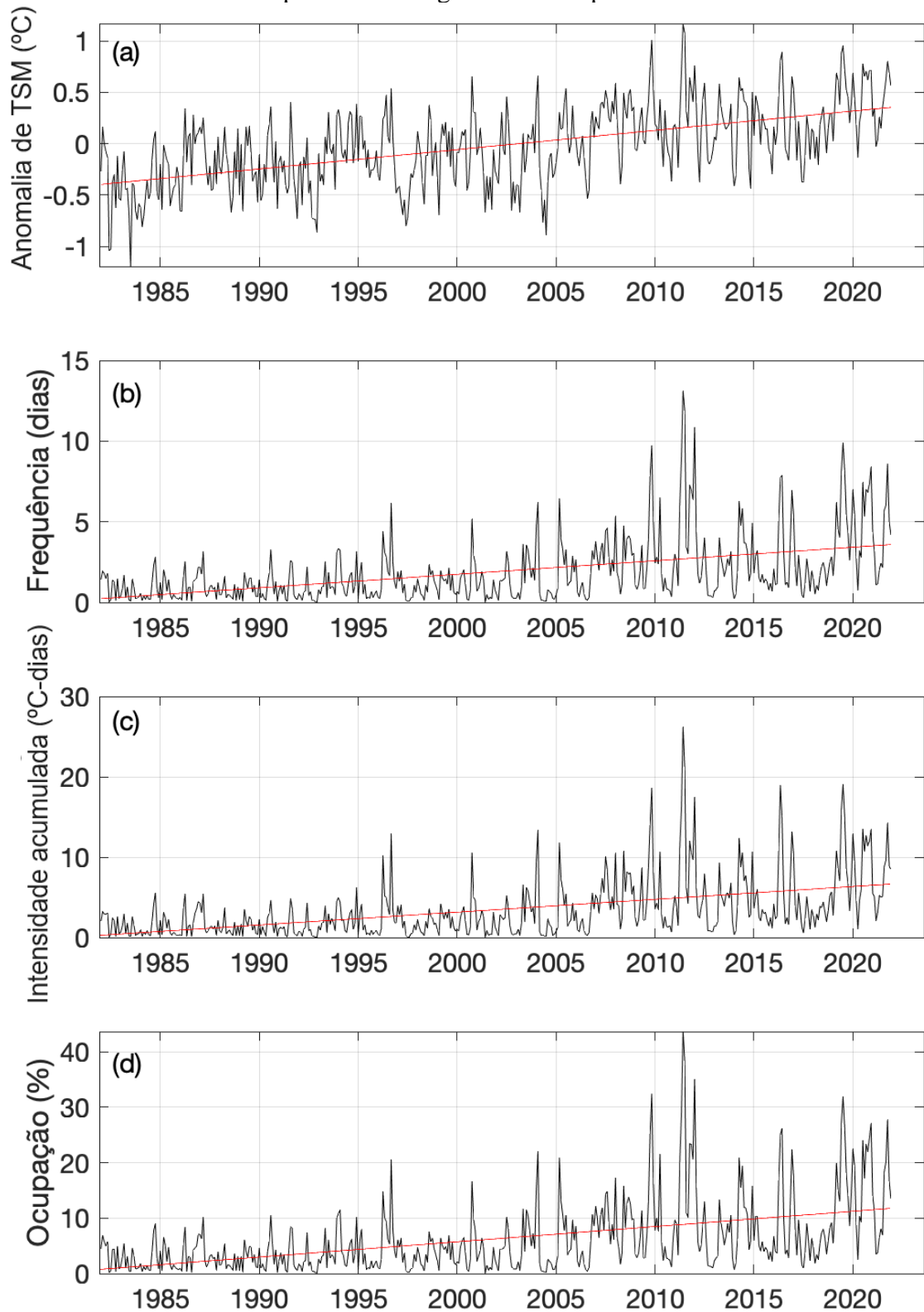
Além disso, similarmente ao apresentado na Figura 6, os maiores valores tanto de frequência quanto de intensidade acumulada, bem como de ocupação, ocorreram nos anos de 2009, 2011, 2019, enquanto os menores ocorreram em 1988, 1995, 2002 (Figura 8). O ano de 2011 se destaca com os maiores valores em um mês de anomalia de TSM com 1.16°C, na frequência das OCMs de 13 dias, na intensidade acumulada de 26°C-dias e de ocupação de 43% da área total. Por outro lado, as anomalias médias de TSM (Figuras 6 e 8a) mostraram que o ano de 1983 teve um padrão bem diferente dos outros anos. Em outras palavras, 1983 foi o período no qual o oceano ficou mais frio, apresentando os maiores valores de anomalias negativas. Isto pode estar relacionado com o El Niño de 1982/83, pois valores baixos de TSM e de ocorrência de OCMs também foram encontrados para outros anos de El Niño, como o de 2004/05 e 2009/10.

Tabela 1 – Coeficientes de correlação de Pearson entre as séries temporais de anomalia de TSM mensal média, frequência mensal de OCMs, intensidade acumulada mensal de OCMs e taxa de ocupação mensal média das OCMs para o período de 1982-2021 na região entre 30-50°S e 0-20°L. Todos os coeficientes são estatisticamente significantes dentro do intervalo de confiança de 95%.

	TSM	Frequência OCM	Int. Acum. OCM	Ocupação OCM
TSM		0,8282	0,8283	0,8291
Frequência OCM			0,9846	0,9994
Int. Acum. OCM				0,9843
Ocupação OCM				

Fonte: elaborado pela autora (2023).

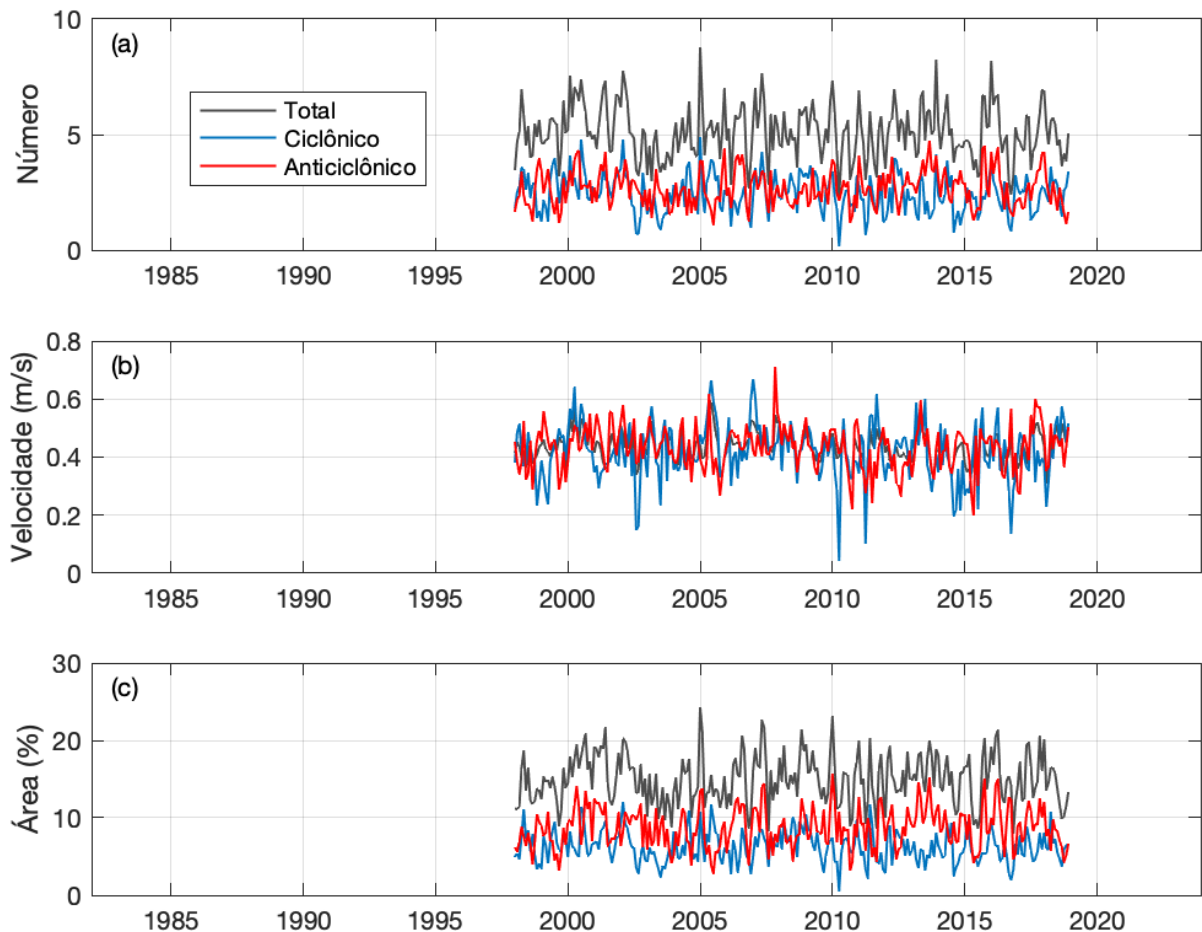
Figura 8 – (a) Anomalia de TSM mensal média ( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) frequência mensal de OCMs (dias), (c) intensidade acumulada mensal de OCMs ( $^{\circ}\text{C}$ -dias) e (d) taxa de ocupação mensal média das OCMs (%) para o período de 1982-2021 na região entre  $30\text{-}50^{\circ}\text{S}$  e  $0\text{-}20^{\circ}\text{L}$ . Linhas vermelhas representam a regressão linear para cada variável.



Fonte: elaborado pela autora (2023).

O principal mecanismo de entrada de águas mais quentes do Oceano Índico no Atlântico é através de vórtices anticiclônicos relacionados a retroflexão das Agulhas. A Figura 9a apresenta as séries temporais de número de vórtices anticiclônicos, ciclônicos e o somatório dos dois (número total). Embora a maioria das séries temporais do número de vórtices não sejam estatisticamente correlacionadas com as séries temporais de OCMs (Tabela 2), é possível notar que anos com mais OCMs estão relacionados à anos com menos vórtices ciclônicos ou a anos com mais vórtices anticiclônicos. Vórtices ciclônicos geralmente são formados na região da ressurgência da Benguela, carregam águas frias e interagem com os vórtices quentes anticiclônicos das Agulhas (FORD *et al.*, 2023). Em outras palavras, vórtices ciclônicos amenizam o aquecimento causado pela retroflexão. Com isso, quanto menos vórtices ciclônicos e mais vórtices anticiclônicos maior o aquecimento na região e ocorrência de OCMs.

Figura 9 – Vórtices ciclônicos, anticiclônicos e total na região do Vazamento das Agulhas: (a) Número de vórtices, (b) Velocidade (m/s), (c) Área (%) para o período de 1998-2018.



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Outro fator que pode explicar a falta de correlação entre as OCMs e vórtices é que, embora os vórtices anticiclônicos sejam um importante mecanismo de vazamento, águas quentes do Índico podem entrar diretamente no Atlântico Sul (RODRIGUES *et al.*, 2010). De maneira geral, o aumento nas OCMs nesta região nas últimas décadas é consistente com o aumento do Vazamento das Agulhas reportados em vários estudos (BIASTOCH *et al.*, 2008, BEAL *et al.*, 2011). Biastoch *et al.* (2008) identificaram que houve um aumento no vazamento das Agulhas nas últimas décadas com a migração para sul dos ventos de oeste (jato atmosférico do Hemisfério Sul). Isto permitiu que a retroflexão das Agulhas entrasse mais no Atlântico Sul. Com isso espera-se ter mais OCMs na região.

Tabela 2– Coeficientes de correlação de Pearson entre as séries temporais de anomalia de TSM mensal média, frequência mensal de OCMs, intensidade acumulada mensal de OCMs, taxa de ocupação mensal média das OCMs e número, velocidade azimutal e ocupação dos vórtices anticiclônicos, ciclônicos e total para o período de 1998-2018 na região entre 30-50°S e 0-20°L. Apenas os coeficientes destacados em negrito são estatisticamente significantes dentro do intervalo de confiança de 95%.

		TSM	Frequência	Int. Acum	Ocupação
Anticiclônicos	Número	0,0422	-0,0512	0,0433	0,0506
	Velocidade	<b>-0,1292</b>	<b>-0,1314</b>	<b>-0,1191</b>	<b>-0,1320</b>
	Ocupação	-0,0307	-0,0373	-0,0175	-0,0367
Ciclônicos	Número	-0,0676	<b>-0,1505</b>	<b>-0,1267</b>	<b>-0,1506</b>
	Velocidade	0,0505	-0,0074	-0,0142	-0,0087
	Ocupação	-0,0788	-0,1150	-0,0848	-0,1140
Total	Número	-0,0781	<b>-0,1447</b>	<b>-0,1220</b>	<b>-0,1443</b>
	Velocidade	-0,0160	-0,0489	-0,0606	-0,0506
	Ocupação	-0,0760	-0,1046	-0,0688	-0,1034

Fonte: elaborado pela autora (2023).

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou 40 anos de TSM diárias na região do Vazamento das Agulhas entre 30-50°S e 0-20°L. Os resultados identificaram que houve um aumento considerável não só na intensidade e frequência, mas também na extensão espacial das OCMs na região, principalmente no corredor de vórtices associado ao Vazamento das Agulhas.

Os resultados descritos neste trabalho são consistentes com estudos na região que mostraram que como consequência das mudanças climáticas, o Vazamento das Agulhas se intensificou, permitindo que mais águas quentes do Índico adentrassem no Atlântico Sul naquela região (BIASTOCH *et al.*, 2008, BEAL *et al.*, 2011). Os vórtices são um mecanismo importante de vazamento, porém não foi encontrada uma relação estatística entre sua ocorrência e as OCMs.

Além disso, uma redução na intensidade da ressurgência da Benguela também poderia ter causado um aumento nas OCMs, uma vez que as águas frias da ressurgência tendem a serem advectadas em direção a região do Vazamento das Agulhas, por via de vórtices ciclônicos e transporte direto (FORD *et al.*, 2023). Desta forma, uma redução na ressurgência da Benguela pode favorecer a ocorrência das OCMs na região do Vazamento das Agulhas.

Portanto, para dar continuidade a este trabalho e obter resultados mais conclusivos, sugere-se fazer um estudo que quantifique o Vazamento das Agulhas, e não só dos vórtices, para correlacioná-los com a ocorrência das OCMs na região. Também será importante investigar as condições atmosféricas na região, pois as OCMs analisadas neste trabalho levam em consideração apenas a TSM e não as águas de subsuperfície, e a TSM é fortemente influenciada pela atmosfera.

## REFERÊNCIAS

- BEAL, Lisa M.; RUIJTER, Wilhelmus P. M. de; BIASTOCH, Arne; ZAHN, Rainer; CRONIN, Meghan; HERMES, Juliet; LUTJEHARMS, Johann; QUARTLY, Graham; TOZUKA, Tomoki; BAKER-YEBOAH, Sheekela. On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate. **Nature**, [S.L.], v. 472, n. 7344, p. 429-436, 27 abr. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/nature09983>.
- BIASTOCH, A.; BÖNING, C.W.; SCHWARZKOPF, F.U.; LUTJEHARMS, J.R.E.. Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies. **Nature**, 462 (7272), 495-498, 2009. <https://doi.org/10.1038/nature08519>.
- CAPUTI, Nick; KANGAS, Mervi; DENHAM, Ainslie; FENG, Ming; PEARCE, Alan; HETZEL, Yasha; CHANDRAPAVAN, Arani. Management adaptation of invertebrate fisheries to an extreme marine heat wave event at a global warming hot spot. **Ecology And Evolution**, [S.L.], v. 6, n. 11, p. 3583-3593, 24 abr. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.2137>.
- CURRIE, Ronald. Upwelling in the Benguela Current. **Nature**, [s. l], v. 171, n. 4351, p. 497-500, 21 mar. 1953.
- DONEY, Scott C.; BUSCH, D. Shallin; COOLEY, Sarah R.; KROEKER, Kristy J.. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. **Annual Review Of Environment And Resources**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 83-112, 17 out. 2020. Annual Reviews. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>.
- FORD, D.J.; TILSTONE, G.H.; SHUTLER, J.D.; KITIDIS, V.; SHEEN, K.L.; DALL'OLMO G.; ORSELLI, I.B. Mesoscale Eddies Enhance the Air-Sea CO<sub>2</sub> Sink in the South Atlantic Ocean. **Geophysical Research Letters**, 50(9), p.e2022GL102137. 2023. <https://doi.org/10.1029/2022GL102137>.
- FREITAS, Ana Carolina Trindade de. **Caracterização Física de Vórtices das Agulhas e Evidências da Presença de Águas Modais do Oceano Índico no seu Interior**. 2018. 88 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2018.
- GARCIA-SOTO, Carlos; CHENG, Lijing; CAESAR, Levke; SCHMIDTKO, S.; JEWETT, Elizabeth B.; CHERIPKA, Alicia; RIGOR, Ignatius; CABALLERO, Ainhoa; CHIBA, Sanae; BÁEZ, Jose Carlos. An Overview of Ocean Climate Change Indicators: sea surface temperature, ocean heat content, ocean ph, dissolved oxygen concentration, arctic sea ice extent, thickness and volume, sea level and strength of the amoc (atlantic meridional overturning circulation). **Frontiers In Marine Science**, [S.L.], v. 8, p. 1-24, 21 set. 2021. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fmars.2021.642372>.
- GARZOLI, Silvia L.; GORDON, Arnold L.. Origins and variability of the Benguela Current. **Journal Of Geophysical Research**. Nova Iorque, p. 897-906. 15 jan. 1996.
- GORDON, Arnold L.; WEISS, Ray F.; SMETHIE JUNIOR, William M.; WARNER, Mark J. Thermocline and Intermediate Water Communication Between the South Atlantic and Indian Oceans. **Journal Of Geophysical Research**. [S. L.], p. 7223-7240. 15 maio 1992.

HOBDAY, Alistair J.; ALEXANDER, Lisa V.; PERKINS, Sarah E.; SMALE, Dan A.; STRAUB, Sandra C.; OLIVER, Eric C.J.; BENTHUYSEN, Jessica A.; BURROWS, Michael T.; DONAT, Markus G.; FENG, Ming. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. **Progress In Oceanography**, [S.L.], v. 141, p. 227-238, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>.

HUGHES, Terry P.; KERRY, James T.; BAIRD, Andrew H.; CONNOLLY, Sean R.; DIETZEL, Andreas; EAKIN, C. Mark; HERON, Scott F.; HOEY, Andrew S.; HOOGENBOOM, Mia O.; LIU, Gang. Global warming transforms coral reef assemblages. **Nature**, [S.L.], v. 556, n. 7702, p. 492-496, abr. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-018-0041-2>.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: **Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge, UK e New York, USA: Cambridge University Press, 2022. doi: 10.1017/9781009157926.

JONES, Timothy; PARRISH, Julia K.; PETERSON, William T.; BJORKSTEDT, Eric P.; BOND, Nicholas A.; BALLANCE, Lisa T.; BOWES, Victoria; HIPFNER, J. Mark; BURGESS, Hillary K.; DOLLIVER, Jane E.. Massive Mortality of a Planktivorous Seabird in Response to a Marine Heatwave. **Geophysical Research Letters**, [S.L.], v. 45, n. 7, p. 3193-3202, 2 abr. 2018. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2017gl076164>.

LAUFKÖTTER, Charlotte; ZSCHEISCHLER, Jakob; FRÖLICHER, Thomas L.. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. **Science**, [S.L.], v. 369, n. 6511, p. 1621-1625, 25 set. 2020. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.aba0690>.

LE VU, Briac; STEGNER, Alexandre; ARSOUZE, Thomas. Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm (AMEDA) and Its Application to Coastal Eddy Formation. **Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology**, [S.L.], v. 35, n. 4, p. 739-762, abr. 2018. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jtech-d-17-0010.1>.

LUTJEHARMS, J.R.E.; COOPER, J. Interbasin leakage through Agulhas current filaments. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, [S.L.], v. 43, n. 2, p. 213-238, fev. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0967-0637\(96\)00002-7](http://dx.doi.org/10.1016/0967-0637(96)00002-7).

OLIVER, Eric C. J.; DONAT, Markus G.; BURROWS, Michael T.; MOORE, Pippa J.; SMALE, Dan A.; ALEXANDER, Lisa V.; BENTHUYSEN, Jessica A.; FENG, Ming; GUPTA, Alex Sen; HOBDAY, Alistair J.. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. **Nature Communications**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 1-12, 10 abr. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9>.

PEARCE, Alan F.; FENG, Ming. The rise and fall of the “marine heat wave” off Western Australia during the summer of 2010/2011. **Journal Of Marine Systems**, [S.L.], v. 111-112, p. 139-156, fev. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.10.009>.



PERKINS, S. E.; ALEXANDER, L. V. On the Measurement of Heat Waves. **Journal Of Climate**, [S.L.], v. 26, n. 13, p. 4500-4517, 1 jul. 2013. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-12-00383.1>.

REYNOLDS, Richard W.; SMITH, Thomas M.; LIU, Chunying; CHELTON, Dudley B.; CASEY, Kenneth S.; SCHLAX, Michael G. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. **Journal Of Climate**, [S.L.], v. 20, n. 22, p. 5473-5496, 15 nov. 2007. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/2007jcli1824.1>.

RODRIGUES, Regina R.; TASCHETTO, Andréa S.; GUPTA, Alex Sen; FOLTZ, Gregory R.. Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic. **Nature Geoscience**, [S.L.], v. 12, n. 8, p. 620-626, 8 jul. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41561-019-0393-8>.

RODRIGUES, R.R.; WIMBUSH, M.; WATTS D.R.; ROTHSTEIN, L.M.; OLLITRAULT, M. South Atlantic mass transports obtained from subsurface float and hydrographic data. **Journal of Marine Research**, 68(6), 819-850, 2010. <http://dx.doi.org/10.1357/002224010796673858>

RYTHER, John H. Photosynthesis and Fish Production in the Sea. **Science**, [S.L.], v. 166, n. 3901, p. 72-76, 3 out. 1969.

SABINE, Christopher L.; FEELY, Richard A.; GRUBER, Nicolas; KEY, Robert M.; LEE, Kitack; BULLISTER, John L.; WANNINKHOF, Rik; WONG, C. S.; WALLACE, Douglas W. R.; TILBROOK, Bronte. The Oceanic Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>. **Science**, [S.L.], v. 305, n. 5682, p. 367-371, 16 jul. 2004. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1097403>.

SANDALYUK, N. V.; BELONENKO, T. V. Three-Dimensional Structure of the mesoscale eddies in the Agulhas Current region from hydrological and altimetry data. **Russian Journal Of Earth Sciences**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 1-19, 27 ago. 2021. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.2205/2021es000764>.

SMITH, Kathryn E.; BURROWS, Michael T.; HOBDAI, Alistair J.; GUPTA, Alex Sen; MOORE, Pippa J.; THOMSEN, Mads; WERNBERG, Thomas; SMALE, Dan A. Socioeconomic impacts of marine heatwaves: global issues and opportunities. **Science**, [S.L.], v. 374, n. 6566, p. 1-11, 22 out. 2021. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.abj3593>.

THOMSON, Jordan A.; BURKHOLDER, Derek A.; HEITHAUS, Michael R.; FOURQUIREAN, James W.; FRASER, Matthew W.; STATTON, John; KENDRICK, Gary A.. Extreme temperatures, foundation species, and abrupt ecosystem change: an example from an iconic seagrass ecosystem. **Global Change Biology**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 1463-1474, 22 ago. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12694>.

TIM, Nele; ZORITA, Eduardo; SCHWARZKOPF, Franziska U.; RÜHS, Siren; EMEIS, Kay-Christian; BIASTOCH, Arne. The Impact of Agulhas Leakage on the Central Water Masses in the Benguela Upwelling System From A High-Resolution Ocean Simulation. **Journal Of Geophysical Research: Oceans**, [S.L.], v. 123, n. 12, p. 9416-9428, dez. 2018. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2018jc014218>.