UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
COORDENADORIA ESPECIAL DE OCEANOGRAFIA
OCEANOGRAFIA

Ronaldo Gabriel Medon Batista

# IMPACTO DAS ONDAS DE CALOR MARINHAS NA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A NO ATLÂNTICO SUL SUDOESTE

Florianópolis
2020

Ronaldo Gabriel Medon Batista

# IMPACTO DAS ONDAS DE CALOR MARINHAS NA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A NO ATLÂNTICO SUL SUDOESTE

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Oceanografia do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia.
Orientadora: Prof.ª Drª. Regina Rodrigues Rodrigues

Florianópolis

2020

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

BATISTA, RONALDO GABRIEL MEDON
IMPACTO DAS ONDAS DE CALOR MARINHAS NA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A NO ATLÂNTICO SUL SUDOESTE / RONALDO GABRIEL MEDON BATISTA ; orientador, REGINA RODRIGUES RODRIGUES, 2020.
43 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. Mudanças climáticas. 3. Variabilidade climática. 4. Ondas de calor marinhas. 5. Impactos ambientais. I. RODRIGUES RODRIGUES, REGINA. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Oceanografia. III. Título.

Ronaldo Gabriel Medon Batista

**IMPACTO DAS ONDAS DE CALOR MARINHAS NA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A NO ATLÂNTICO SUL SUDOESTE**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia pela Universidade Federal de Santa Catarina e aprovado em sua forma final.

Florianópolis, 17 de junho de 2020.

_____

Prof., Dr. Felipe Mendonça Pimenta
Coordenador do Curso de Bacharelado de Oceanografia

**Banca Examinadora:**

_____

Prof.ª, Dr.ª Regina Rodrigues Rodrigues
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

_____

Prof.ª, Dr.ª Olga Tiemi Sato
Universidade de São Paulo

_____

Prof. , Dr. Carlos Alberto Eiras Garcia
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha querida mãe, Alessandra,
que é a mulher mais forte que já conheci.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todxs que passaram pelo meu caminho

A minha mãe, Alessandra, pelo apoio, amor, confiança e ensinamentos. As minhas irmãs queridas , Ana Carolina e Ana Gabriela, e à toda minha família.

A minha amiga Leticia, por me aturar desde o início da graduação e está comigo em todos os momentos.

Aos amigos da minha turma, Lucas, Nandara, Renan, Pedro, Dienifer, Luana, Tamyla, Lua, Hillary, Vitor, Juliana, Balland, Khau, Adriana, Evelyn, Bruna, Henrique, Milena, Gabriela, Fran, Jasmim e Maebara, que foram essenciais para minha trajetória e que eu amo muito.

Aos outros amigos que conheci durante minha morada em floripa, Maria Luiza, Leandro, Lyla, Wilson, Igor, Luiz, Duda, Aline, Diogo, Bento, Guilherme, Rodrigo, Mussi, Millenne, Camila, Ingra, Giuliana, Micael, Bruna, Laura, Natasha, Bianca, Carol, Leila e Felipe por compartilharem comigo desta fase.

Aos professores do curso de oceanografia, por me darem suporte e oportunidades, junto de conselhos que agregaram muito na minha formação.

A maravilhosa professora Alessandra, por sua dedicação e carinho, estando sempre disposta a agregar não só academicamente como humanamente.

A minha orientadora, professora Regina, por disponibilizar todo o suporte do laboratório, os comentários valiosos neste trabalho, e por tudo que aprendi com ela na minha graduação.

Aos professores que compuseram a minha banca, professores Carlos Alberto Garcia e Olga Sato, tenho certeza que suas sugestões enriqueceram e deram um ótimo fechamento para o andamento deste trabalho e para a minha graduação como um todo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio para a realização deste trabalho.

A todos elxs, minha admiração e meu agradecimento.

"*I have a dream that my four little children  will one day live in a nation where they will not be judged by de color of their skin but by the content of their character."*

Martin Luther King, Jr.

"*As rosas da resistência nascem no asfalto. A gente recebe rosas, mas vamos estar com o punho cerrado falando de nossas experiências contra os mandos e desmandos que afetam nossas vidas"*

Marielle Franco.

Presente!

**RESUMO**

Ondas de calor marinhas (OCMs) são eventos caracterizados pelo aumento anômalo da temperatura nos oceanos, que podem ter enormes impactos sobre ecossistemas marinhos. O presente estudo investigou a frequência, intensidade e duração de OCMs no Atlântico Sul sudoeste para o período de 1982-2019 e seu impacto na concentração de Clorofila-a (biomassa fitoplanctônica) para o período de 2002-2017. Para tal foram utilizados os dados diários de temperatura da superfície do mar (TSM) para a detecção e análise das OCMs, e dados diários de concentração de clorofila-a da superfície do mar (CSM). As OCMs foram identificadas e as concentrações de CSM foram analisadas em relação a sua distribuição espacial nos dias de ocorrência das OCMs. Os resultados mostraram que as OCMs identificadas ocorreram em toda a região atingindo intensidades máximas de 4,5°C. A análise de tendências para o período de 1982- 2019 mostrou que houve não só um aumento na frequência, mas também na intensidade e duração dos eventos de OCM para a região de 25-50°S e 20-60°O para todas as estações, principalmente no verão e no inverno austral. Quando os eventos de OCMs são mais frequentes e intensos, há uma redução nas concentrações de CSM nas áreas de oceano aberto, longe da região costeira da pluma do Rio da Prata. Quando as OCMs são menos frequentes e fracas, a CSM tende a aumentar, mas esse impacto não é tão claro. Na região costeira de Cabo Frio, no verão, houve uma redução na concentração de CSM associado a ocorrência de OCMs. Assim, o estudo mostrou que as OCMs ocorreram no Atlântico Sul sudoeste e possivelmente impactam indiretamente ecossistemas marinhos através da redução na concentração da CSM.

**Palavras-chaves:** Mudanças climáticas; variabilidade climática; ondas de calor marinhas; impactos ambientais

**ABSTRACT**

Marine heat waves (MHWs) are events characterized by anomalous increases in ocean temperatures, which can have enormous impacts on marine ecosystems. The present study investigated the frequency, intensity and duration of MHWs in the Southwest Atlantic for the period 1982-2019 and their impact on chlorophyll-a concentration (phytoplankton biomass) for the period 2002-2017. This was done using daily sea surface temperature (SST) data for the detection and analysis of MHWs and daily sea surface chlorophyll-a concentration (SSC) data. The MHWs were identified and the SSC concentrations were analyzed in relation to their spatial distribution on the days of MHWs occurrence. The results showed that the identified MHWs occurred throughout the region reaching maximum intensities of 4.5°C. The analysis of tendencies for the period 1982- 2019 showed that there was not only an increase in the frequency but also in the intensity and duration of MHW events for the region of 25-50°S and 20-60°W for all seasons, mainly in the summer and austral winter. When MHW events are more frequent and intense, there is a reduction in SSC concentrations in the open ocean areas, far from the coastal region of the Rio de la Plata plume. When MHWs are less frequent and weaker, SSC tends to increase, but this impact is not so clear. In the coastal region of Cabo Frio, in the summer, there was a reduction in the concentration of SSC associated with the occurrence of MHWs Thus, the study showed that MHWs occurred in the southwest Atlantic and possibly indirectly impact marine ecosystems by reducing the concentration of SSC.

**Keywords:** Climate change; climate variability; marine heat waves; environmental impacts

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** Imagem do sensor MODIS-Aqua da concentração anual de clorofila-a na superfície oceânica. ..... 16

**Figura 2.** Temperatura da superfície do mar em: dias com OCM (A), dias sem OCM (B) e a diferença entre os dias com OCM e os dias sem OCM. ..... 23

**Figura 3.** Propriedades das OCMs no período de 1982-2019: médias anuais da frequência (A), intensidade (C) e duração (E) e tendência linear de frequência (B), intensidade (D) e duração (F). Os pontos cinzas em B, D e F representam tendências que são estatisticamente significantes para o intervalo de confiança de 95%. ..... 25

**Figura 4.** Frequências e intensidades médias sazonais das OCMs: no verão (A e B), no outono (C e D), no inverno (E e F) e na primavera (G e H) para o período de 1982-2019. ..... 28

**Figura 5.** Tendências sazonais das séries temporais de frequência e intensidade das OCMs: no verão (A e B), no outono (C e D), no inverno (E e F) e na primavera (G e H) para o período de 1982-2019. ..... 29

**Figura 6.** Campos médios de TSM (A) e CSM (B) para o período de 2002-2017. ..... 30

**Figura 7.** Médias anuais de anomalias de CSM em dias de OCMs (A) e em dias sem OCMs (B) para o período de 2002-2017. ..... 31

**Figura 8.** Anomalias de CSM em dias de OCMs no verão (A), no outono (B), no inverno (C) e na primavera (D). Frequência (cores) e intensidade (contornos) das OCMs no verão (E), no outono (F), no inverno (G) e na primavera (H). Intervalos dos contornos de intensidade em 0,5ºC. ..... 32

**Figura 9.** Anomalias de CSM em dias de OCMs no verão (A), no outono (B), no inverno (C) e na primavera (D); E em dias sem OCMs no verão (E), no outono (F), no inverno (G) e na primavera (H). ..... 34

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1.** Porcentagens de OCMs sazonais nas últimas quatros décadas..... 26

## LISTA DE ABREVIATURAS

**OCM** – Onda de Calor Marinha

**OCMs** – Ondas de calor Marinhas

**TSM** – Temperatura da Superfície do Mar

**CSM** – Clorofila-a da Superfície do Mar

**SUMÁRIO**

**1 INTRODUÇÃO ..... 13**

1.1 Objetivos ..... 19

**1.1.1 Objetivo Geral ..... 19**

**1.1.2 Objetivos Específicos ..... 19**

**2 METODOLOGIA ..... 20**

2.1 Determinação das OCMs ..... 20

**2.1.1 Propriedades das OCMs ..... 21**

2.2 Clorofila-a ..... 21

2.3 Processamento dos Dados ..... 22

**3 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 23**

3.1 Aumento da TSM e ocorrência das OCMs ..... 23

3.2 Impacto das OCMs na CSM ..... 30

**4 CONCLUSÕES ..... 35**

**5 REFERÊNCIAS ..... 36**

**APENDICE A.** Imagem da rotina eleborada para a leitura dos dados ..... **42**

**APENDICE B.** Imagem da rotina elaborada para identificação das OCMS e extração sazonal ..... **43**

**APENDICE C.** Imagem da rotina base de calculo da anomalia de CSM nos dias de OCMs **44**

# 1 INTRODUÇÃO

O aquecimento da superfície terrestre vem sendo um tema recorrente devido às mudanças climáticas. De acordo com National Oceanic and Atmosféric Administration (NOAA) desde o início do século XX, uma mudança impulsionada por emissões humanas para a atmosfera, fez com que a temperatura média global aumentasse cerca de 0,8 °C. Os cinco anos mais quentes registrados no período de 1880-2019 ocorreram na última década, com 2016 sendo o ano mais quente já registrado. Este aquecimento recorrente aumenta o risco de impactos em ecossistemas com consequências socioeconômicas e ambientais graves (PACHAURI et al., 2014).

A longo prazo, o aquecimento global deve causar um aumento significativo na ocorrência de eventos extremos na superfície terrestre, como inundações, secas e ondas de calor (PACHAURI et al., 2014). Estes eventos podem causar diversos impactos na sociedade, como por exemplo, o aumento de mortalidades e internações hospitalares associadas a ondas de calor e o aumento de inundações costeiras com perda de terras agrícolas, construções e praias (ADDO et al., 2011; LISS et al., 2017; MARFAI; KING, 2008; WEHNER et al., 2017)

O ambiente marinho vem sofrendo constantemente com os impactos das atividades humanas e, como consequência, ecossistemas podem entrar em declínio e até mesmo colapsar com o aumento desses estressores (HALPERN et al., 2019). A maior parte do desequilíbrio energético da terra, cerca de 93%, é absorvido pelos oceanos resultando em um aumento no seu conteúdo de energia térmica (CHENG et al., 2019) com registro de aquecimento significativo na temperatura superficial do mar (TSM) em diversas regiões do globo nas últimas décadas (OLIVER et al., 2018). O aumento de energia térmica nos oceanos também leva a uma maior ocorrência de eventos extremos marinhos, como as ondas de calor[1] marinhas (OCMs).

As OCMs são eventos semelhantes às ondas de calor atmosféricas e são caracterizadas por temperaturas acima do normal durante um período prolongado. Hobday et al. (2016), seguindo respostas de estudos atmosféricos, definiu uma onda de calor marinha (OCM) como um evento com temperaturas anômalas acima de um limiar, com duração de pelo menos 5 dias em um local específico. As diferenças nas definições das OCMs e das ondas de calor

[1] Embora calor seja definido como energia em trânsito devido à diferença de temperatura entre dois corpos, daqui para frente, a palavra calor possui o mesmo significado de energia térmica.

atmosféricas, como a duração, foram implementadas devido as diferentes escalas temporais de variabilidade oceânica e atmosférica, com a variabilidade oceânica naturalmente mais longa.

Na metodologia empregada por Hobday et al. (2016), para detectar um evento de OCM é preciso utilizar uma climatologia de referência e um período no qual a intensidade, duração e extensão espacial possam ser definidos. O limiar utilizado para detectar as temperaturas anômalas possui uma variação temporal, o que permite que o método seja utilizado em escalas anuais e sazonais. Esta perspectiva também permite que eventos de OCM sejam identificados em locais que possuem temperatura normalmente mais baixas, facilitando a análise de impacto de uma OCM.

A identificação e descrição das OCMs são feitas através da análise de TSM e geralmente sua formação, duração e desaparecimento estão relacionados com os processos que modulam a temperatura na camada de mistura do oceano superior. Assim como as ondas de calor atmosféricas, as OCMs podem ser causadas por diversos processos e fenômenos em uma variedade de escalas temporais e espaciais (HOLBROOK et al., 2019).

Holbrook et al. (2019) avaliaram diversos estudos de caso e seus mecanismos característicos relacionados à formação das OCMs. O estudo dividiu os mecanismos em quatro zonas climáticas oceânicas: latitudes tropicais, latitudes médias e altas, correntes de contorno oeste e correntes de contorno leste. Dentro dessas quatro zonas foram encontrados 30 mecanismos que possivelmente contribuem para a formação das OCMs, entre processos de larga escala e processos locais. O entendimento dos processos que influenciam na formação das OCMs, ajuda no dimensionamento dos eventos e de seus impactos em uma região.

Eventos de temperatura elevada de longa duração podem causar enormes impactos no ambiente marinho, interferindo na diversidade biológica e em questões socioeconômicas, como a pesca regional e a aquicultura (HOLBROOK et al., 2019; WEATHERDON et al., 2016). Diversos estudos já relataram impactos biológicos associados a períodos de temperatura elevada nos oceanos. Em 2013/14 ocorreu uma alta redução nos níveis de concentração de clorofila, na porção subtropical do Pacífico Norte, associados a anomalias de temperatura e vento (WHITNEY, 2015). Hughes et al. (2018) concluíram que o alto estresse causado pelo aquecimento oceânico é um impulsionador no processo de branqueamento de corais. O estudo realizado por Pinsky et al. (2019), com espécies ectotérmicas terrestres e marinhas, mostrou

uma maior frequência de extirpações de espécies no ambiente marinho, devido à temperaturas mais quentes no oceano.

Apesar de estudos ecológicos anteriores relatarem o estresse térmico marinho como anomalias térmicas, nos últimos anos inúmeras OCMs foram identificadas nos oceanos globais, causando impactos biológicos locais. Em 2015/16 no Mar da Tasmânia, Oliver et al. (2017) identificaram uma das maiores OCMs já registrada, com duração de aproximadamente 8 meses (241 dias). Esta OCM teve um grande impacto na biota marinha da região, aumentando a mortalidade do molusco abalone (*Haliotis rubra*) e a doença conhecida como síndrome da mortalidade da ostra do Pacífico. Outro impacto relevante ocorreu nas florestas de algas do Great Southern Reef na Austrália que foram fortemente afetadas após uma OCM que ocorreu na região, chegando a perder aproximadamente 100 km de habitat (WERNBERG et al., 2016). Assim como o ocorrido no verão de 2017/18, em uma associação com uma OCM, em que a espécie de alga *Durvillaea poha* foi extinta do recife de Pile Bay, no porto de Lyttelton, Nova Zelândia (THOMSEN et al., 2019).

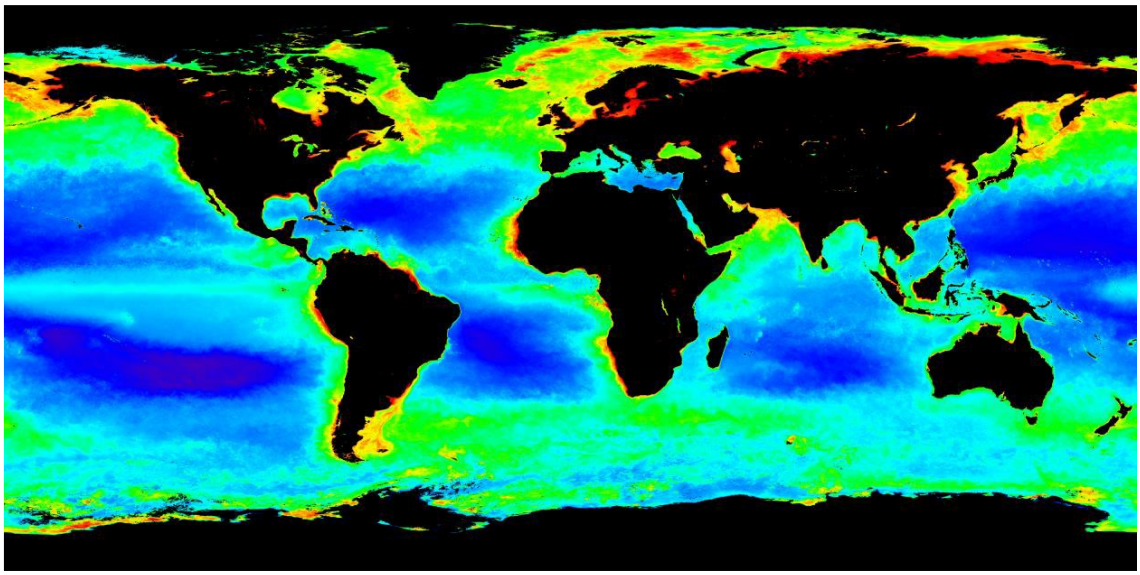
Além de impactos diretos em ecossistemas e espécies, anomalias de temperatura podem causar mudanças em processos biológicos nos oceanos, como a produtividade primária. A produção primária representa o processo de obtenção de energia para a produção de matéria orgânica por organismos autotróficos. Este processo garante a funcionalidade da cadeia trófica, com manutenção biológica do organismo e a disponibilização de energia para níveis tróficos superiores. Nos oceanos, a parte marinha sobre as plataformas continentais é a região com maior taxa de produção primária por unidade de área (BRANDINI, 2015).

A clorofila-a é um dos principais pigmentos fotossintetizantes presente nos organismos fitoplanctônicos, que serve como um parâmetro significativo na estimativa da produtividade primária (GONZALEZ-RODRIGUEZ et al., 2017). A produtividade primária marinha pode ser avaliada a partir da biomassa fitoplanctônica, que é estimada através da clorofila-a. O conhecimento da concentração e distribuição da clorofila-a no ambiente marinho é muito importante para estudos sobre as mudanças climáticas, visto que o fitoplâncton é um componente significativo no ciclo do carbono global (DARECKI; KACZMAREK; OLSZEWSKI, 2005).

A distribuição de clorofila-a na superfície mar (CSM) mostra que as maiores concentrações estão ao longo das regiões costeiras e plataformas continentais, à 45° norte do hemisfério norte, causado pela abundância de nutrientes disponíveis para o fitoplâncton

marinho. Outros locais com concentrações moderadas estão nas regiões equatoriais e leste dos oceanos, associados a processos de ressurgência que disponibiliza nutrientes para camadas superiores nos oceanos, e na zona de convergência subtropical, onde massas de água subantártica frias e ricas em nutrientes se misturam com águas subtropicais quentes e pobres em nutrientes. No entanto regiões no oceano aberto, longe das zonas costeiras, apresentam baixos níveis de CSM (Figura 1).

**Figura 1. Imagem do sensor MODIS-Aqua da concentração anual de clorofila-a na superfície oceânica.**



**Fonte: OceanColor – Nasa**

Em um oceano mais quente a termoclina oceânica tende a ser mais rasa, com uma maior estratificação da coluna d'água, e este processo pode causar uma redução na produtividade primária pela falta de nutrientes disponíveis na zona fótica (LOZIER et al., 2011). Esta associação pode ser demonstrada pelas projeções realizadas para o final do século 21, que mostra uma redução de até 4,5% na produtividade primária no entorno da Nova Zelândia, sudoeste do Oceano Pacífico, considerando o pior cenário de mudanças climáticas do IPCC (RCP8.5), com um aumento significativo na temperatura (+2,5 °C) em uma alta emissão de $CO_2$ (LAW et al., 2018).

Assim, existe indicativos de um aumento na ocorrência de OCMs ao longo do século e um possível impacto desses eventos na produção primária. Entretanto a relação entre as OCMs e a produtividade primária é bastante complexa e podem divergir em diversas escalas. As OCMs, por exemplo, são normalmente relatadas a partir da TSM, que é medida nos primeiros milímetros da coluna d'água nos oceanos, e a produção primária possui uma variação vertical

maior, com a zona de produção (zona fótica) podendo variar de 10 a 100 metros entre regiões costeiras e oceânicas (BRANDINI, 2015). Além disso, altas temperaturas tendem a acelerar o metabolismo de organismos biológicos (MARAÑÓN et al., 2014) e consequentemente, no caso do fitoplâncton, pode aumentar a produção primária em locais com altas concentrações de nutrientes. Neste sentido, a avaliação das mudanças da concentração de Clorofila-a, com e sem a presença de OCMs, se torna essencial para o entendimento da relação entre o aquecimento oceânico e as taxas de produção primária.

A tecnologia de sensoriamento remoto tem sido usada para identificar, monitorar e avaliar as mudanças na superfície oceânica em vários locais usando diferentes técnicas (BLONDEAU-PATISSIER et al., 2014). O funcionamento da tecnologia é baseado na medição de parâmetros a distância, ao invés de in situ, a partir de alguns tipos de sinais, como por exemplo o óptico, o acústico e o de micro-ondas (SCHOWENGERDT, 2006). As fontes de dados convencionais consistem em mapas históricos, fotografias aéreas e medições de in situ repetidas, enquanto as fontes de dados de sensoriamento remoto são obtidas por sensores a bordo de aeronaves ou satélites. O avanço do sensoriamento remoto permite assim, o fornecimento de um monitoramento contínuo da superfície oceânica mundialmente.

O uso de sensoriamento remoto por meio de satélites, para a avaliação da superfície oceânica, permite determinar as concentrações de pigmentos marinhos devido a presença de organismos fitoplânctonicos (SMITH; BAKER, 1978). Esta determinação é realizada a partir das propriedades ópticas do oceano com a derivação das taxas de refletância dos componentes da água, sendo o fitoplâncton o principal componente da cor da água em regiões oceânicas (O'REILLY et al., 1998). A análise da cor da água por satélites vem sendo muito utilizada na medição e distribuição da massa fitoplanctônica nos oceanos, por meio da concentração de CSM (BASEDOW et al., 2019; GARCIA; GARCIA, 2008; HARDING; ITSWEIRE; ESAIAS, 1994; RAITSOS et al., 2013)

O Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) e o Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) são instrumentos utilizados em satélites na obtenção de dados ópticos presentes na água do mar. A CSM é uma das propriedades indiretamente medidas pelos sensores, calculada através de uma relação empírica entre as reflectâncias do sensor, na faixa azul-verde do espectro visível, e medições in situ (FELDMAN, [s.d.]). Entretanto, sensores (a bordo de satélites) que medem propriedades ópticas da camada superficial oceânica, apesar de alcançarem lugares inóspitos, enfrentam um enorme problema com interferências atmosféricas

(GREGG; WOODWARD, 1998). Assim como em regiões costeiras em que o material em suspensão também causa interferência óptica na medição dos sensores, afetando a precisão dos dados de clorofila-a (GARCIA; GARCIA, 2008).

De acordo com O'Reilly et al. (1998), os únicos meios práticos para a observação das variações espaciais e sazonais de organismos fitoplanctônicos na superfície oceânica é por meio da medição de dados ópticos por satélites. Estas análises fornecem informações importantes para a avaliação da produtividade primária, ciclo do carbono global, outros ciclos biogeoquímicos marinhos e até mesmo a produção pesqueira. Entretanto, é importante evidenciar que as medições por satélites são limitadas aos primeiros metros da coluna d'água, e consequentemente a concentração máxima de clorofila-a não pode ser representada (BLONDEAU-PATISSIER et al., 2014).

No Oceano Atlântico, nos últimos anos, diversos estudos vêm sendo relatados sobre o aquecimento da superfície oceânica (CHEN et al., 2014; MILLS et al., 2013; RODRIGUES et al., 2019) e sobre a variabilidade da concentração de clorofila-a na superfície oceânica (MACHADO; BARREIRO; CALLIARI, 2013; XU et al., 2011). Rodrigues et al. (2019) identificaram um evento de OCM no Atlântico Sul, que permaneceu durante todo o verão de 2013/14 em algumas regiões da porção oeste do oceano, atingindo temperaturas máximas de 3°C acima da média e reduzindo as concentrações de clorofila da região.

O estudo dos impactos das OCMs na estrutura dos ecossistemas marinhos é extremamente importante visto que é esperado um aumento na frequência desses eventos extremos (PÖRTNER et al., 2019). Neste trabalho definimos o paradigma de que a ocorrência de OCMs influenciam negativamente as concentrações de CSM no Atlântico Sul sudoeste.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Identificar e descrever as OCMs e seu impacto na concentração de clorofila-a no Oceano Atlântico Sul.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

I. Determinar a frequência, intensidade e duração das OCMs no período de 1982 a 2019 na região sudoeste do Atlântico Sul.

II. Determinar a tendência linear das séries temporais das OCMs no período de 1982 a 2019 para a região sudoeste do Oceano Atlântico Sul.

III. Investigar a influência das OCMs na concentração de clorofila-a na região sudoeste do Oceano Atlântico Sul de 2002 a 2017.

# 2 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em duas partes. A primeira parte na identificação de ocorrência e descrição das OCMs e a segunda parte consistiu em analisar os dados de concentração de clorofila-a e posteriormente relacioná-los às ocorrências das OCMs.

## 2.1 Determinação das OCMs

A metodologia empregada na identificação das OCMs é a de Hobday et al. (2016), que, como dito anteriormente, descreve uma OCM como sendo um evento discreto e prolongado de aumento anômalo da temperatura em um local específico e com duração de 5 ou mais dias, causado por uma combinação de processos atmosféricos e oceânicos. O cálculo para a identificação de uma OCM é realizado a partir de dados diários de TSM, com base em um período de referência, em relação a uma climatologia e um limiar. A climatologia é obtida pela média de pelo menos 30 anos de dados temperatura, já que a distribuição amostral da média é considerada normal a partir de 30 elementos (THOMSON; EMERY, 2014).

Neste estudo para o cálculo da climatologia e do limiar foi utilizado uma janela de 11 dias baseadas no dia de interesse em toda a série temporal. Essa janela garantiu uma amostra suficiente para o cálculo das médias climatológicas e dos limiares de cada dia. Também foi utilizado uma janela de 31 dias (média móvel) para suavização da climatologia e do limiar. Sendo assim, um evento de OCM foi considerado quando o valor da temperatura se manteve por 5 dias ou mais acima do limiar definido como o percentil 90, ou seja, períodos onde as temperaturas diárias ficam acima de 90% das variações de temperatura. Eventos que tiveram intervalo entre si de menos de 3 dias foram considerados um único evento.

Para os cálculos de identificação os dados de TSM foram obtidos a partir do conjunto de dados diários do Optimum Interpolation SST (OISST), da NOAA, com resolução de 1/4° para o período de 1982-2019 (REYNOLDS et al., 2007), entre as latitudes 15-50°S e longitudes 0-60°O do Atlântico Sul. Para o conjunto de dados, a climatologia de linha de base (média climatológica) e o limiar climatológico (percentil 90) foram calculados para o período de 38 anos (1982-2019).

### 2.1.1 Propriedades das OCMs

Para a descrição das OCMs identificadas foram feitos cálculos de frequência (dias de OCM por estação/ano), intensidade (em °C para cada evento) e duração (em dias para cada evento) para toda região, em escalas anuais e sazonais. Na avaliação sazonal, para cada estação, foi selecionado todos os eventos de OCM que começaram e terminaram na respectiva estação (verão, outono, inverno e primavera). Este procedimento foi adotado visto que ocorreram eventos que ultrapassaram mais de duas estações, o que dificultou a sua classificação.

As tendências de longo prazo foram calculadas para as séries temporais de frequência, intensidade e duração, usando a metodologia de regressão linear dos mínimos quadrados, que se trata de uma otimização matemática muito utilizada para minimizar a soma dos quadrados dos resíduos, ajustando o modelo de regressão aos dados observados (THOMSON; EMERY, 2014).

Para saber se as tendências foram estatisticamente significantes, o teste não-paramétrico de Mann-Kendall (MK) foi empregado para o intervalo de confiança de 95% (THOMSON; EMERY, 2014). Este teste avalia cada valor da série temporal em relação aos restantes dos valores para a comprovação da hipótese nula (h0, que os valores não seguem nenhuma tendência, seja ela positiva ou negativa) ou a comprovação hipótese alternativa (h1, que os valores seguem uma tendência no tempo).

## 2.2 Concentração de Clorofila-a

A concentração de CSM (valores em logaritmo da concentração) foi analisada para cada evento de OCM para identificar se houve um aumento ou diminuição da concentração durante os eventos de OCMs dependendo da localidade. As análises foram feitas a partir das anomalias de CSM nos dias de OCMs e nos dias sem OCMs, calculadas com a média dos valores de CSM nos dias com e sem ocorrência de OCMs, subtraindo os valores da climatologia para os mesmos dias. A climatologia foi calculada utilizando uma janela de 11 dias baseadas no dia de interesse em toda a série temporal. Essa janela garantiu uma amostra suficiente para o cálculo das médias climatológicas de cada dia. Também foi utilizado uma janela de 31 dias para suavização da série temporal da climatologia. Para o conjunto de dados, a climatologia foi calculada para o período de 16 anos (2002-2017) e os valores de concentração de CSM foram extraídos nos dias de OCMs.

Na análise de CSM foi utilizado o conjunto de dados da cor da água do mar, do satélite Aqua, da National Aeronautics and Space Administration (NASA), responsável pelo sensor MODIS. Os dados foram do período de 2002-2017, em um regime diário com resolução de 9 km e unidade $mg.m^{-3}$, entre as latitudes 15-50°S e longitudes 0-60°O do Atlântico Sul. A análise foi limitada aos dados do sensor MODIS, a partir de 2002, pois existe diferenças entre as estimativas de outros sensores e do sensor MODIS (ZIBORDI; MÉLIN; BERTHON, 2006). Para o acoplamento dos dados e análise espacial da CSM nos dias OCMs foi feita a interpolação dos dados de clorofila para a resolução de 1/4° da grade de TSM.

## 2.3 Processamento dos Dados

O processamento dos dados foi feito com o software MATLAB®. Para investigação das OCMs foi utilizado a caixa de ferramentas MATLAB para a detecção e análise das OCMs (ZHAO; MARIN, 2019). As análises da TSM e da CSM foram feitas a partir de diversas rotinas criadas para a manipulação dos dados e para a produção dos mapas do trabalho. As rotinas de leitura dos dados, identificação das OCMs e extração sazonal, e a rotina base do cálculo das anomalias medias em dias de OCMs são apresentadas nos apêndices A, B e C, respectivamente.

As estações do ano foram definidas de acordo com os meses do ano, da seguinte forma:

Verão → Dezembro, Janeiro e Fevereiro;

Outono → Março, Abril e Maio;

Inverno → Junho, Julho e Agosto;

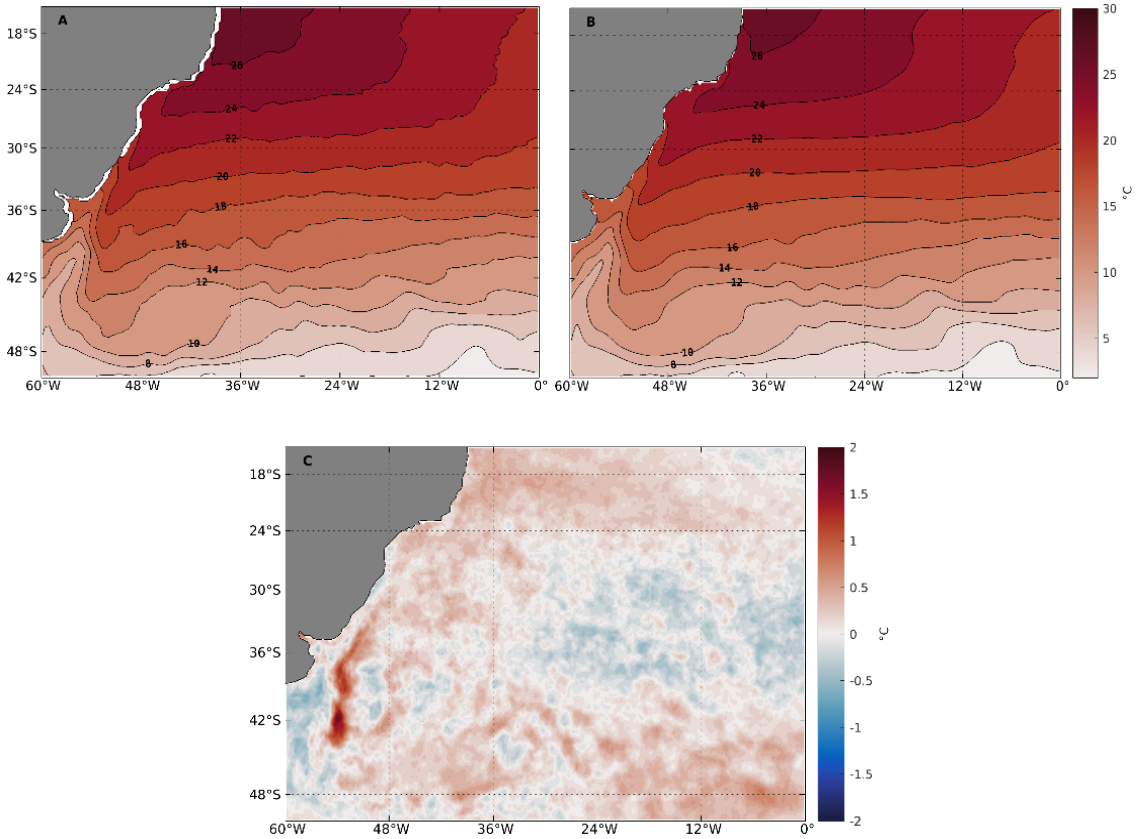
Primavera → Setembro, Outubro e Novembro;

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 3.1 Aumento da TSM e ocorrência das OCMs

A análise da TSM diária entre o período de 1982 e 2019 mostrou a ocorrência de OCMs em toda região de estudo. Na maior parte da área analisada, as diferenças entre temperaturas da superfície do mar nos dias de OCMs (Figura 2A) e nos dias sem OCMs (Figura 2B) foram positivas, com valores médios que chegaram a 1,9°C, indicando temperaturas mais elevadas em períodos de ocorrência de OCMs (Figura 2C). Entretanto, é importante evidenciar que houve locais em que as temperaturas médias nos dias de OCMs foram mais baixas que os dias sem o evento.

**Figura 2. Temperatura da superfície do mar em: dias com OCM (A), dias sem OCM (B) e a diferença entre os dias com OCM e os dias sem OCM.**




**Fonte: Autor.**

Em dias de OCMs também é possível observar o alcance de temperaturas mais elevadas em latitudes mais altas, com o deslocamento gradual em direção ao sul. O alcance de

temperaturas elevadas a latitudes mais altas pode causar o efeito de tropicalização de ecossistemas temperados e interferir no padrão de distribuição de espécies marinhas, levando espécies da região tropical a atingir latitudes maiores. Esta mudança na distribuição latitudinal de espécies já foi relatada no oceano austral e causou impactos locais (ZARCO-PERELLO et al, 2017).

O estudo conduzido por Zarco-Perello et al. (2017) documentou efeitos da tropicalização de recifes temperados no oeste da Austrália, associados a um OCM, que causou a expansão de um herbívoro tropical, o peixe-coelho (*Siganus fuscescens*), sobre os recifes. A presença do peixe-coelho nos recifes aumentou significativamente as taxas de herbivoria em florestas de algas locais, com a redução de 70 % na abundância de algas. Entretanto, a presença de espécies tropicais em altas latitudes pode ser vista como algo benéfico como observado no estudo de Oliver et al. (2017), onde relataram a satisfação de pescadores locais do Mar da Tasmânia com o maior avistamento de espécies encontradas mais ao norte como o peixe-rei (*Seriola lalandi*) e o peixe mahi-mahi (*Coryphaena hippurus)*.

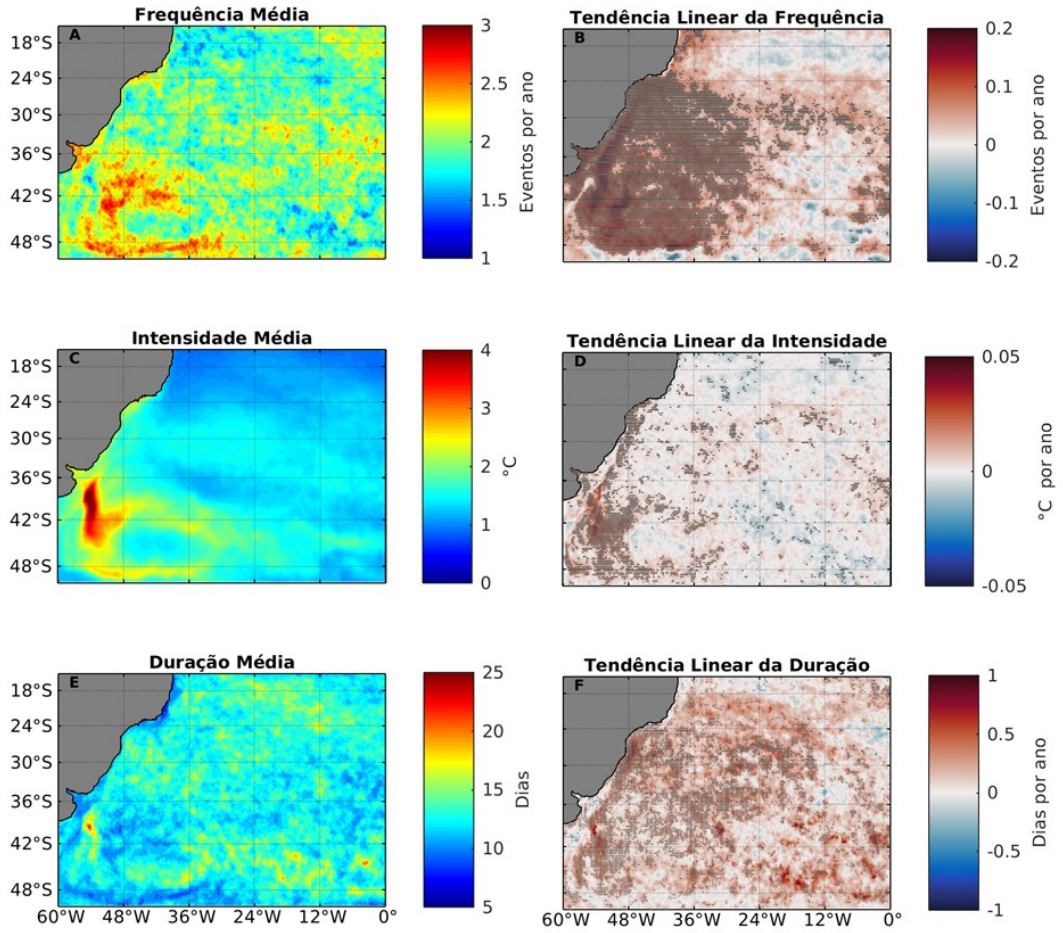
Na análise das variações anuais, as OCMs foram frequentes em toda a região ao longo dos anos, apresentando uma frequência média máxima de 3 eventos por ano, com duração média máxima de 24 dias e intensidade média máxima de 4.5°C (Figura 3). Apesar das OCMs serem frequentes em toda região de estudo, as maiores frequências ocorreram porção sudoeste do oceano, entre 35°S e 50°S, assim como as OCMs mais intensas que também ocorreram entre essas latitudes, seguindo o padrão espacial da frequência de ocorrência (Figura 3A e C). As maiores durações das OCMs não se concentraram em uma área específica, tendo um padrão de distribuição bem amplo em toda região (Figura 3E).

Oliver et al. (2018) em uma avaliação global de OCMs encontraram resultados parecidos, com a frequência média anual chegando a 3 eventos de OCMs e as intensidades atingindo 4°C acima da média para a mesma região. O estudo sugere que a tendência das propriedades das OCMs segue o padrão da tendência da TSM, em grande parte da área de superfície na frequência com 80%, e na intensidade e duração em uma proporção menor, 59% e 53% da área, respectivamente. Neste trabalho, as tendências lineares anuais das séries temporais de frequência, intensidade e duração acompanharam o padrão das médias anuais, com tendências positivas nos locais em que as OCMs foram mais frequentes, mais intensas e mais duradouras, onde as tendências positivas, em sua maioria, foram as que tiveram maior nível de significância,

mostrando que a ocorrência, intensidade e duração as OCMs tendem a aumentar ao longo dos anos (Figura 3B, D e F).

As altas intensidades das OCMs entre as latitudes 35–45°S (Figura 3C) podem estar relacionadas ao fato de que aquela região ser onde ocorre a feição oceânica Confluência Brasil-Malvinas (CBM), que é o encontro da Corrente do Brasil e da Corrente das Malvinas. Nesta região se inicia uma complexa mistura de águas causando uma alta variação de temperatura, visto que a Corrente do Brasil transporta águas mais quentes e a corrente das Malvinas águas mais frias (GARCIA et al., 2004). Holbrook et al. (2019) constatou que as OCMs mais intensas estão associadas a correntes de contorno oeste, que é o caso da Corrente do Brasil, que apesar da região da CBM possuir as maiores frequências e intensidades, a maioria dos eventos não tiveram longas durações (Figura 3E).

**Figura 3. Propriedades das OCMs no período de 1982-2019: médias anuais da frequência (A), intensidade (C) e duração (E) e tendência linear de frequência (B), intensidade (D) e duração (F). Os pontos cinzas em B, D e F representam tendências que são estatisticamente significantes para o intervalo de confiança de 95%.**




**Fonte: Autor.**

A análise das variações sazonais apresentou pequenas diferenças entre as estações no padrão das propriedades das OCMs que ocorreram no Atlântico Sul. As OCMs foram frequentes em toda a região nas estações de verão, outono e inverno, com uma diminuição de ocorrência na primavera (respectivamente, Figura 4A, C, E e G). As intensidades foram maiores na porção sul do oceano, mas com valores acima de 1°C em todas as estações. Quantitativamente, o outono foi a estação que teve o maior número de ocorrências de OCMs, com 493.438 eventos nos 38 outonos analisados, seguido do inverno, verão e primavera com 489.512, 489.126 e 451.920 eventos, respectivamente.

Entretanto a evolução de ocorrências de OCMs nas últimas décadas indicam um maior aumento no número de OCMs no inverno, com 41% dos eventos ocorrendo desde 2010. As outras estações seguiram um padrão de aumento parecido, com 36% das OCMs ocorrendo na última década (Tabela 1). Além disso, por conta da metodologia adotada, cerca de 13% das OCMs totais não foram analisadas sazonalmente, isto porque essas OCMs tiveram períodos que ultrapassaram mais de uma estação (+ 90 dias) o que poderia interferir na análise.

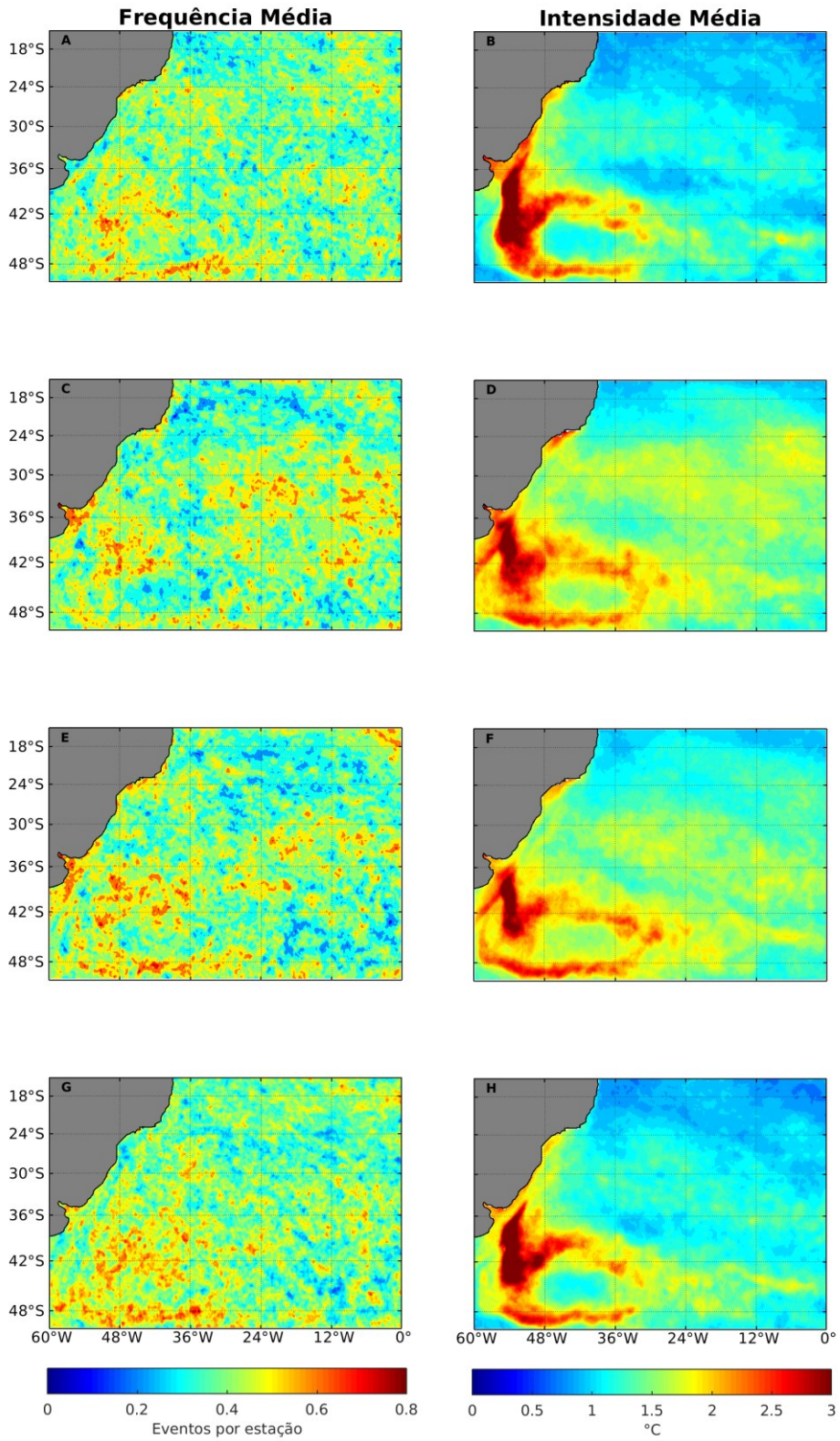
**Tabela 1. Porcentagens de OCMs sazonais nas últimas quatros décadas.**

| N° de OCMs | Verão | Outono | Inverno | Primavera |
|---|---|---|---|---|
| **1982-1989** | 16 % | 18 % | 14 % | 15 % |
| **1990-1999** | 21 % | 18% | 19 % | 21 % |
| **2000-2009** | 27 % | 28 % | 26 % | 28 % |
| **2010-2019** | 36 % | 36 % | 41 % | 36 % |

Na porção ao sul, entre 35°S e 50°S, as OCMs com as maiores intensidades ocorreram no verão, inverno e primavera (Figura 4B, F, H). Nesta região, as OCMs parecem estar associadas a variação latitudinal da CBM, isto é, anos em que a Corrente do Brasil chega mais ao sul levando a CBM mais ao sul, águas mais quentes que o normal, chegam em latitudes mais altas. Note-se que os mínimos de temperaturas centrado em 45°S e 43°W estão associados a Elevação de Zapiola que gera uma circulação anticiclônica na sua volta, não permitindo que águas quentes da Corrente do Brasil cheguem à região (SARACENO; PROVOST; ZAJACZKOVSKI, 2009).

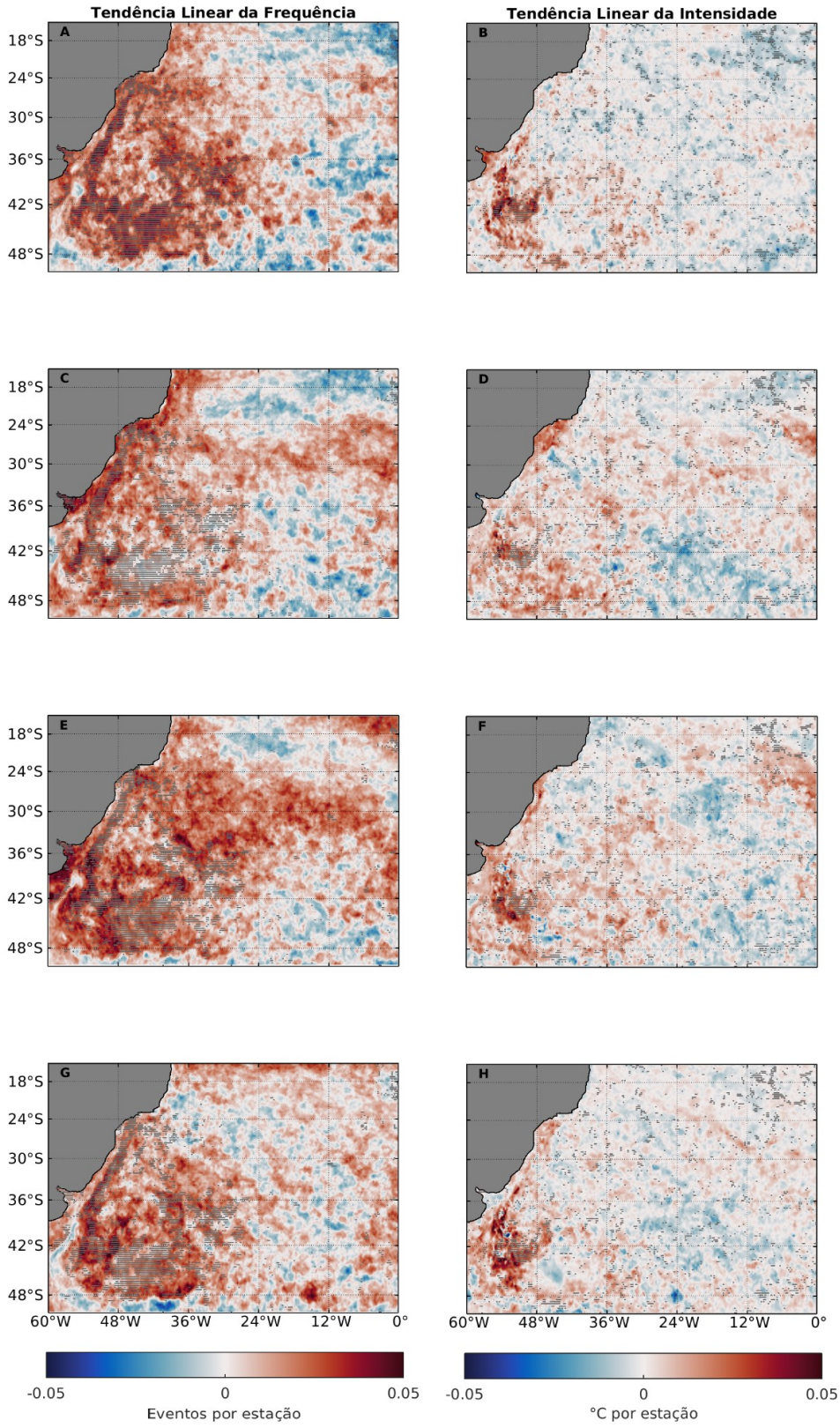
As tendências sazonais de frequência de ocorrência de OCMs seguiram o padrão da tendência anual e as tendências das intensidades médias sazonais não apresentaram valores significativos, exceto na região da CBM entre 50ºO e 60ºO, ao sul de 35ºS (Figura 5). O estudo conduzido por Holbrook et al. (2019) visando compreender as relações entre as ocorrências de OCMs e os possíveis mecanismos para sua formação, apontam os modos de variabilidade climática, como o El Niño-Oscilação Sul (ENSO), e os processos dinâmicos oceânicos como forçantes das OCMs. Estes mecanismos podem estar associados a ocorrência de OCMs em diversas escalas espaciais e temporais. Em um processo de interação oceano-atmosfera, Rodrigues et al. (2019) encontraram associação entre bloqueios atmosféricos no verão de 2013/14 e a ocorrência de OCMs no Atlântico Sul sudoeste no mesmo período. Os bloqueios atmosféricos inibem a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul e ocasiona a falta de chuva levando a um aumento na entrada de energia solar no oceano e consequente aquecimento da superfície oceânica (RODRIGUES; WOOLLINGS, 2016).

**Figura 4. Frequências e intensidades médias sazonais das OCMs: no verão (A e B), no outono (C e D), no inverno (E e F) e na primavera (G e H) para o período de 1982-2019.**




**Fonte: Autor.**

**Figura 5. Tendências sazonais das séries temporais de frequência e intensidade das OCMs: no verão (A e B), no outono (C e D), no inverno (E e F) e na primavera (G e H) para o período de 1982-2019.**



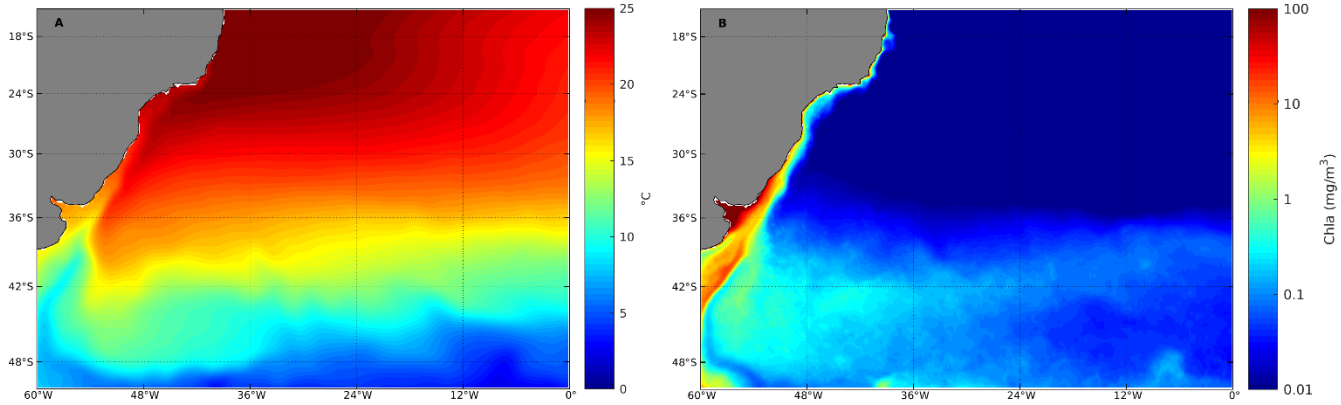

**Fonte: Autor.**

## 3.2 Impacto das OCMs na CSM

A concentração de clorofila-a dá uma estimativa da produtividade primária, que é a base da cadeia alimentar nos oceanos. Os campos médios de TSM e CSM para o período de 2002-2017 apresentam um padrão latitudinal com temperaturas maiores na região tropical, diminuindo em direção ao sul, e concentrações de CSM maiores na porção sul, principalmente nas regiões costeiras (Figura 6).

Naturalmente, as maiores concentrações de CSM tendem a ocorrer em locais com muita mistura de massas d'águas e disponibilidade de nutrientes na superfície oceânica, que favorece a produção primária com o aumento da biomassa fitoplanctônica. Mais especificamente, águas frias são mais ricas em nutriente favorecendo a produtividade primária. Os campos também ilustram os processos físicos da região, com a Corrente das Malvinas levando águas mais frias para latitudes mais baixas, a frente oceânica da CBM e a descarga do Rio da Prata aumentando a produtividade primária naquela região (GARCIA; GARCIA, 2008). Esses resultados também são corroborados por Saraceno, Provost e Zajaczkovski (2009).

**Figura 6. Campos médios de TSM (A) e CSM (B) para o período de 2002-2017.**



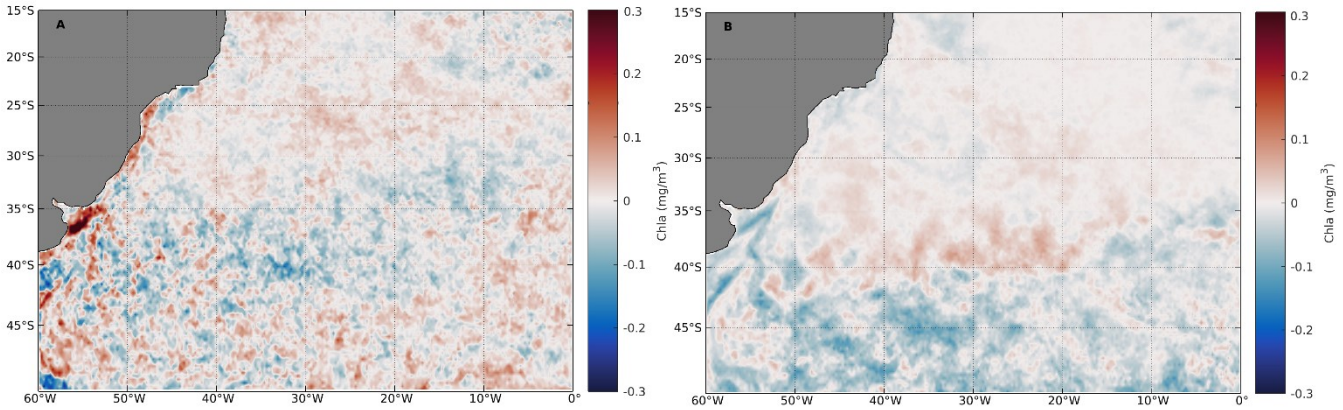

**Fonte: Autor.**

As análises de anomalias de CSM nos dias de OCMs mostram que anomalias positivas mais altas são encontradas ao longo da costa e na desembocadura do Rio da Prata (Figura 7A). Neste local ocorre a entrada de nutrientes com a pluma do Rio da Prata e uma significativa mistura de águas, que podem favorecer a produtividade primária. No entanto, é importante destacar, que nas imediações da desembocadura do Rio da Prata as concentrações de clorofila são superestimadas devido as altas concentrações de materiais em suspensão (GIANNINI et al.,

2013), causando uma falsa impressão em relação aos dados. Na região mais offshore as águas são naturalmente oligotróficas, ou seja, com baixa disponibilidade de nutrientes, o que faz com que as concentrações de CSM sejam mais baixas devido à baixa produção primária (BRANDINI, 2015).

As comparações feitas entre anomalias de TSM e CSM em médias anuais, apontam uma tendência de diminuição na concentração da CSM (Figura 7A) com anomalias quentes de TSM, na região costeira de Cabo Frio (Figura 2C). Nesta região ocorre o processo de ressurgência, que favorece a produção primária com a disponibilização de nutrientes para a zona fótica. No entanto, as anomalias negativas de CSM nesta região são observadas em dias sem a ocorrência de OCMs (Figura 7B), indicando que assim como na região da pluma do Rio da Prata, outros mecanismos são mais importantes para induzir variações na CSM do que a presença ou não de OCMs.

**Figura 7. Médias anuais de anomalias de CSM em dias de OCMs (A) e em dias sem OCMs (B) para o período de 2002-2017.**

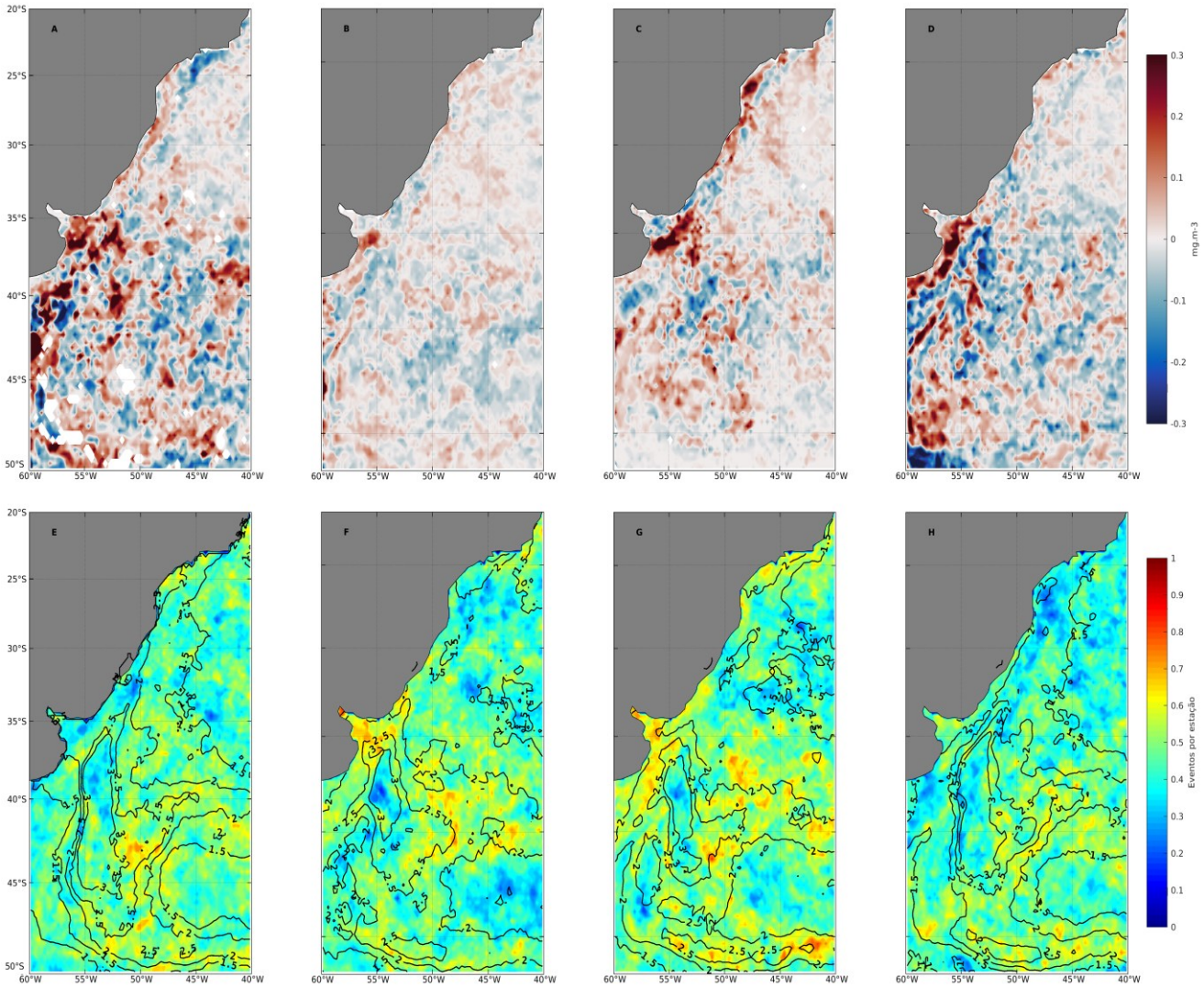



**Fonte: Autor.**

As anomalias de CSM nos dias de OCMs nas quatro estações (Figura 8A-D) apresentaram um padrão de distribuição semelhantes a média anual, com anomalias mais intensas na primavera e verão. Para facilitar a interpretação em relação as OCMs foram plotadas painéis com a frequência e intensidade para cada estação (Figura 8E-H). As linhas de contornos de intensidade média das OCMs, apresentam relações inversas com as anomalias de CSM nas diferentes estações. Em outras palavras, regiões onde a frequência e intensidade das OCMs são

menores, a concentração de CSM é maior que o normal. Este resultado indica uma diminuição nas concentrações de CSM em dias de OCMs, associados a OCMs mais intensas.

**Figura 8. Anomalias de CSM em dias de OCMs no verão (A), no outono (B), no inverno (C) e na primavera (D). Frequência (cores) e intensidade (contornos) das OCMs no verão (E), no outono (F), no inverno (G) e na primavera (H). Intervalos dos contornos de intensidade em 0,5ºC.**




**Fonte: Autor.**

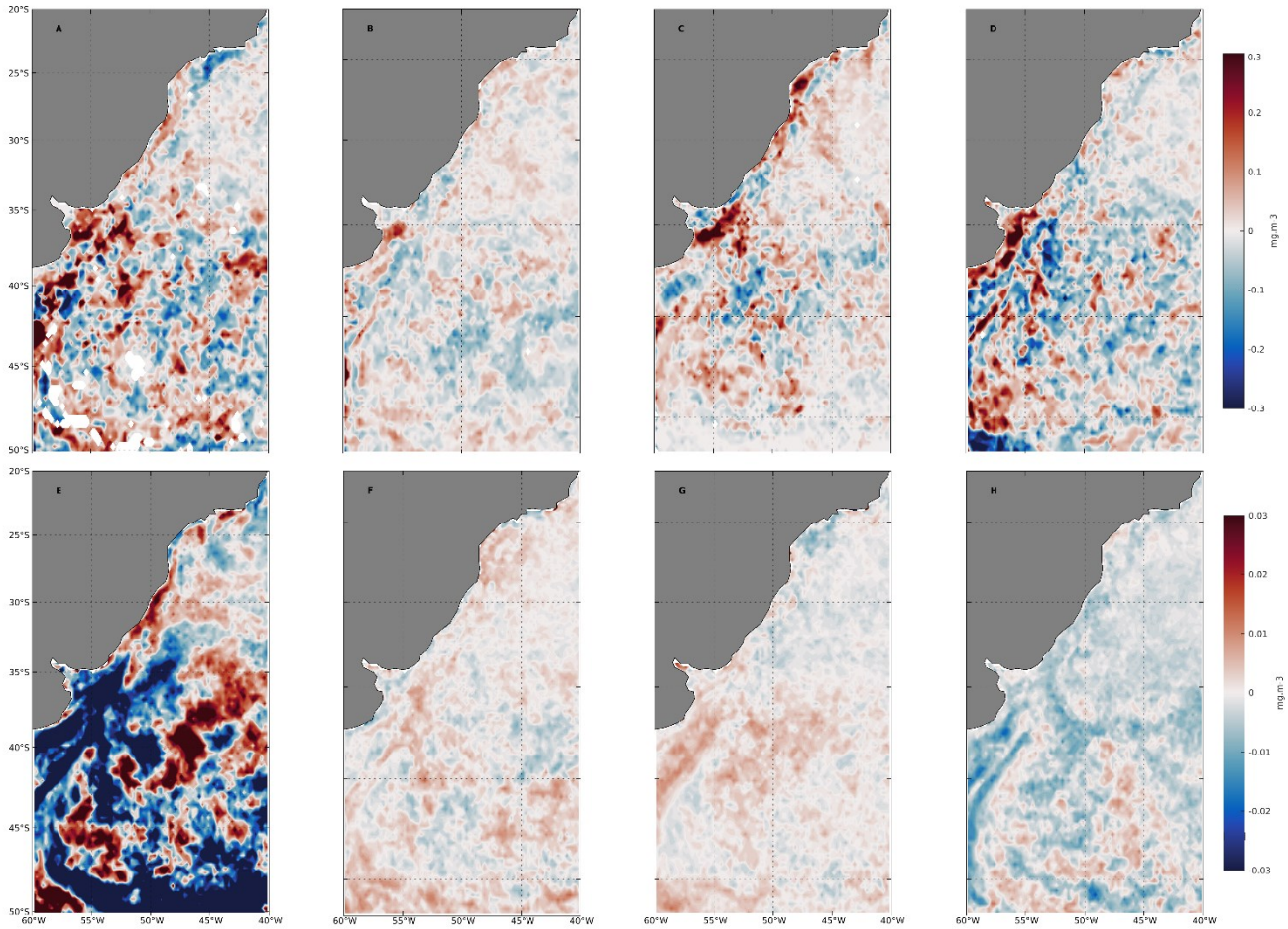
As comparações sazonais entre a variação das anomalias de CSM em dias de OCMs e em dias sem OCMs, apresentam padrões diferentes entre as estações. No verão, entre 35-45°S as anomalias positivas de CSM em dias sem OCMs ocorreram na região mais offshore, enquanto em dias de OCMs as anomalias positivas ficaram confinadas na região costeira (Figura 9A-E).

Na região de Cabo Frio é possível observar anomalias positivas em dias sem a ocorrência de OCMs, provavelmente associado ao processo de ressurgência que ocorre na região (Figura 9A-E). Nesta região há um aumento no incremento de nutrientes devido a uma intensificação do processo de ressurgência causado pelo fortalecimento dos ventos predominantes de nordeste. Como dito anteriormente, segundo Rodrigues et al. (2019), o bloqueio atmosférico é o principal mecanismo de formação de OCMs nessa região do Atlântico Sul sudoeste no verão. Os bloqueios são caracterizados por uma circulação anti-horária no Atlântico Sul sudoeste que fortalece os ventos de nordeste na área de Cabo Frio. Isto favorece o processo de ressurgência resultando em águas mais frias e ricas em nutrientes na região costeira de Cabo Frio. Entretanto, em dias de OCMs as anomalias negativas predominam na região costeira de Cabo Frio, indicando uma redução de CSM associado a ocorrência das OCMs.

No outono e no inverno as variações das anomalias de CSM nos dias de OCMs e nos dias sem OCMs não apresentam um padrão claro na maior parte da região (Figura 9B-F e C-G). Na primavera, em dias de OCMs, ocorre uma intensificação nas anomalias positivas de CSM ao sul de 32°S (Figura 9D), que podem estar associadas a maior estabilidade da coluna d'água durante a estação, que com a alta disponibilidade de nutrientes tende a estimular a produção primária na região (GONZALEZ-SILVERA; SANTAMARIA-DEL-ANGEL; MILLÁN-NÚÑEZ, 2006).

Entretanto é importante notar que em alguns locais, em todas as estações, anomalias positivas de CSM mais intensas ocorrem em dias de OCMs. Nessas áreas outros processos físicos são mais importantes que a presença ou não de OCMs. Como é possível observar na região da desembocadura e pluma do Rio da Prata. No verão a pluma fica confinada ao sul, devido aos ventos predominantes de nordeste. Já no inverno a pluma se estende para norte por conta de ventos fortes do quadrante sul (GARCIA; GARCIA, 2008). Esta configuração pode explicar o padrão observado nas anomalias de CSM em dias de OCMs nestas estações, com anomalias negativas na porção norte durante o verão e positivas durante o inverno.

**Figura 9. Anomalias de CSM em dias de OCMs no verão (A), no outono (B), no inverno (C) e na primavera (D); E em dias sem OCMs no verão (E), no outono (F), no inverno (G) e na primavera (H).**




**Fonte: Autor.**

Além disso, nem sempre águas mais quentes estão associadas com baixa produtividade primária. Chiswell e Sutton (2020) mostrou que nem todas as OCMs afetam a produção primária da mesma forma na região da Nova Zelândia, aproximadamente entre as mesmas latitudes deste trabalho, com OCMs ocasionando aumentos e diminuições de CSM em diferentes períodos, sugerindo que o suprimento de nutrientes controla a produção total e consequentemente as concentrações de CSM. Outra perspectiva é a possível mudança nas taxas evolutivas e consequentemente na tolerância térmica de organismos fitoplanctônicos, que podem ser alteradas em diferentes espécies para se adaptar ao aquecimento do oceano. Schlüter et al. (2014) encontraram essas adaptações em uma espécie de fitoplâncton globalmente conhecida, *Emiliania huxleyi*, que obteve altas taxas de crescimento em temperaturas acima do seu limite, indicando uma resposta benéfica do organismo diante ao aquecimento.

# 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, as propriedades das OCMs foram determinadas para a região do Atlântico Sul sudoeste. Os eventos de OCMs que ocorrem na região podem esta associados aos processos físicos locais, como os bloqueios atmosféricos relatados na porção norte que inibem a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul e a ausência de nuvens leva a uma maior entrada de radiação solar no oceano propiciando a ocorrência das OCMs. Na porção sul, os processos que controlam a ocorrência das OCMs parecem estar associados a variações latitudinais da CBM. Portanto, processos atmosféricos são responsáveis pela geração das OCMs na porção norte enquanto na porção sul processos oceânicos dominam. Além disso, os resultados indicam que nos últimos 10 anos o número de eventos de OCMs aumentou significativamente no Atlântico Sul sudoeste, com o registro de temperaturas elevadas atingindo latitudes mais altas. Isto vai de encontro com a tendência do aquecimento oceânico e a intensificação eventos extremos marinhos, já relatados em outros estudos.

As reduções na concentração de Clorofila-a podem estar associadas aos eventos de OCMs, visto que em dias de OCMs foi constatado anomalias negativas de CSM na região em comparação com a CSM em dias sem OCMs, como o exemplo da região costeira de Cabo Frio que em dias de OCMs as anomalias negativas predominaram. Entretanto, é importante destacar que anomalias positivas de CSM também foram constatadas em dias OCMs principalmente nas regiões da pluma do Rio da Prata, o que indica que nestes locais apenas a ocorrência de OCMs não pode explicar a variabilidade da CSM.

O trabalho permitiu a identificação de ocorrência de OCMs no Atlântico Sul sudoeste, que é uma região com poucos estudos sobre a ocorrência deste tipo de evento. Também foi possível observar uma relação entre as variações da CSM com a ocorrência das OCMs na região. No entanto a continuação das análises de Clorofila-a se faz necessária para determinar se existe uma relação mais clara sobre a redução ou aumento da CSM ligados ao aquecimento do oceano Atlântico Sul sudoeste.

# 5 REFERÊNCIAS

ADDO, K. A. et al. Impacts of coastal inundation due to climate change in a CLUSTER of urban coastal communities in Ghana, West Africa. **Remote Sensing**, v. 3, n. 9, p. 2029–2050, 2011.

BASEDOW, S. L. et al. Remote sensing of zooplankton swarms. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 686, 2019.

BLONDEAU-PATISSIER, D. et al. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans. **Progress in Oceanography**, v. 123, p. 123–144, 2014.

BRANDINI, F. P. Produção Primária Nos Oceanos. In: JORGE P. CASTELLO, L. C. K. (Ed.). . **INTRODUÇÃO ÀS CIÊNCIAS DO MAR**. 1. ed. Pelotas: Editora Textos, 2015. p. 601.

CHEN, K. et al. Diagnosing the warming of the Northeastern U.S. Coastal Ocean in 2012: A linkage between the atmospheric jet stream variability and ocean response. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 119, n. 1, p. 218–227, 2014.

CHENG, L. et al. How fast are the oceans warming? **Science**, v. 363, n. 6423, p. 128–129, 2019.

CHISWELL, S. M.; SUTTON, P. J. H. Relationships between long-term ocean warming, marine heat waves and primary production in the New Zealand region. **New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research**, p. 1–22, 2020.

DARECKI, M.; KACZMAREK, S.; OLSZEWSKI, J. SeaWiFS ocean colour chlorophyll algorithms for the southern Baltic Sea. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 2, p. 247–260, 2005.

FELDMAN, G. C. **Chlorophyll a (chlor_a)**. Disponível em: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/>. Acesso em: 15 set. 2019.

GARCIA, C. A. E. et al. Chlorophyll variability and eddies in the Brazil–Malvinas Confluence region. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 51, n. 1, p. 159–172, 2004.

GARCIA, C. A. E.; GARCIA, V. M. T. Variability of chlorophyll-a from ocean color images in the La Plata continental shelf region. **Continental Shelf Research**, v. 28, n. 13, p. 1568–1578, 2008.

GIANNINI, M. F. C. et al. Effects of low-salinity and high-turbidity waters on empirical ocean colour algorithms: An example for Southwestern Atlantic waters. **Continental Shelf Research**, v. 59, p. 84–96, 2013.

GONZALEZ-RODRIGUEZ, E. et al. BIOMASSA FITOPLANCTÔNICA E PRODUÇÃO PRIMÁRIA * *Gonzalez-Rodriguez, E., Rodrigues, S.V., Marinho, M.M., Carvalho, W.F., Pinto, F.N., Paranhos, R. 2017. Biomassa fitoplanctônica e produção primária. In: Falcão, A.P.C., Moreira, D.L. editores. Ambiente pelá. In: **Ambiente Pelágico**. [s.l: s.n.]. p. 69–87.

GONZALEZ-SILVERA, A.; SANTAMARIA-DEL-ANGEL, E.; MILLÁN-NÚÑEZ, R. Spatial and temporal variability of the Brazil-Malvinas Confluence and the La Plata Plume as seen by SeaWiFS and AVHRR imagery. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 111, n. 6, 2006.

GREGG, W. W.; WOODWARD, R. H. Improvements in coverage frequency of ocean color: Combining data from SeaWiFS and MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1350–1353, 1998.

HALPERN, B. S. et al. Recent pace of change in human impact on the world's ocean. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 11609, 2019.

HARDING, L. W.; ITSWEIRE, E. C.; ESAIAS, W. E. Estimates of phytoplankton biomass in the Chesapeake Bay from aircraft remote sensing of chlorophyll concentrations, 1989–92. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n. 1, p. 41–56, 1994.

HOBDAY, A. J. et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. **Progress in Oceanography**, v. 141, p. 227–238, 2016.

HOLBROOK, N. J. et al. A global assessment of marine heatwaves and their drivers. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 2624, 2019.

HUGHES, T. P. et al. Global warming transforms coral reef assemblages. **Nature**, v. 556, n. 7702, p. 492–496, 2018.

LAW, C. S. et al. Climate change projections for the surface ocean around New Zealand. **New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research**, v. 52, n. 3, p. 309–335, 2018.

LISS, A. et al. Heat-Related Hospitalizations in Older Adults: An Amplified Effect of the First Seasonal Heatwave. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 39581, 2017.

LOZIER, M. S. et al. On the relationship between stratification and primary productivity in the North Atlantic. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 18, p. 1–6, 2011.

MACHADO, I.; BARREIRO, M.; CALLIARI, D. Variability of chlorophyll-a in the Southwestern Atlantic from satellite images: Seasonal cycle and ENSO influences. **Continental Shelf Research**, v. 53, p. 102–109, 2013.

MARAÑÓN, E. et al. Resource supply overrides temperature as a controlling factor of marine phytoplankton growth. **PloS one**, v. 9, n. 6, p. e99312–e99312, 2014.

MARFAI, M. A.; KING, L. Potential vulnerability implications of coastal inundation due to sea level rise for the coastal zone of Semarang city, Indonesia. **Environmental Geology**, v. 54, n. 6, p. 1235–1245, 2008.

MILLS, K. E. et al. Fisheries Management in a Changing Climate. **Oceanography**, v. 26, n. 2, p. 191–195, 30 maio 2013.

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. **Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color.** Data; NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. doi: 10.5067/AQUA/MODIS/L3M/CHL/2018. Acessado em 05/12/2018.

NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2019, published online January 2018, retrieved on May 2, 2018 from https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201913.

O'REILLY, J. E. et al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 103, n. C11, p. 24937–24953, 1998.

OLIVER, E. C. J. et al. The unprecedented 2015/16 Tasman Sea marine heatwave. **Nature Communications**, v. 8, n. 1, p. 16101, 2017.

OLIVER, E. C. J. et al. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1324, 2018.

PACHAURI, R. K. et al. **Climate Change 2014: Synthesis ReportContribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [s.n.].

PINSKY, M. L. et al. Greater vulnerability to warming of marine versus terrestrial ectotherms. **Nature**, v. 569, n. 7754, p. 108–111, 2019.

PÖRTNER, H.-O. et al. **Summary for policymakersIPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. [s.n.].

RAITSOS, D. E. et al. Remote sensing the phytoplankton seasonal succession of the Red Sea. **PloS one**, v. 8, n. 6, p. e64909–e64909, 2013.

REYNOLDS, R. W. et al. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. **Journal of Climate**, v. 20, n. 22, p. 5473–5496, 2007.

RODRIGUES, R. R. et al. Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 8, p. 620–626, 2019.

RODRIGUES, R. R.; WOOLLINGS, T. Impact of Atmospheric Blocking on South America in Austral Summer. **Journal of Climate**, v. 30, n. 5, p. 1821–1837, 2016.

SARACENO, M.; PROVOST, C.; ZAJACZKOVSKI, U. Long-term variation in the anticyclonic ocean circulation over the Zapiola Rise as observed by satellite altimetry: Evidence of possible collapses. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 56, n. 7, p. 1077–1092, 2009.

SCHLÜTER, L. et al. Adaptation of a globally important coccolithophore to ocean warming and acidification. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 11, p. 1024–1030, 2014.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing**. 3. ed. New York: Elsevier, 2006.

SMITH, R. C.; BAKER, K. S. The bio-optical state of ocean waters and remote sensing 1. **Limnology and Oceanography**, v. 23, n. 2, p. 247–259, 1978.

THOMSEN, M. S. et al. Local Extinction of Bull Kelp (Durvillaea spp.) Due to a Marine Heatwave. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, p. 84, 2019.

THOMSON, R. E.; EMERY, W. J. **Data Analysis Methods in Physical Oceanography**. [s.l.] Elsevier Science, 2014.

WEATHERDON, L. V et al. Observed and Projected Impacts of Climate Change on Marine Fisheries, Aquaculture, Coastal Tourism, and Human Health: An Update. **Frontiers in Marine Science**, v. 3, p. 48, 2016.

WEHNER, M. F. et al. Droughts, floods, and wildfires. In: WUEBBLES, D. J. et al. (Eds.). . **Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I**. Washington, DC, USA: U.S. Global Change Research Program, 2017. p. 231–256.

WERNBERG, T. et al. Climate-driven regime shift of a temperate marine ecosystem. **Science**, v. 353, n. 6295, p. 169 LP – 172, 2016.

WHITNEY, F. A. Anomalous winter winds decrease 2014 transition zone productivity in the NE Pacific. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 2, p. 428–431, 2015.

XU, Y. et al. Seasonal variability of chlorophyll a in the Mid-Atlantic Bight. **Continental Shelf Research**, v. 31, n. 16, p. 1640–1650, 2011.

ZARCO-PERELLO, S. et al. Tropicalization strengthens consumer pressure on habitat-forming seaweeds. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 820, 2017.

ZHAO, Z.; MARIN, M. A MATLAB toolbox to detect and analyze marine heatwaves. **Journal of Open Source Software**, v. 4, n. 33, p. 1124, 2019.

ZIBORDI, G.; MÉLIN, F.; BERTHON, J.-F. Comparison of SeaWiFS, MODIS and MERIS radiometric products at a coastal site. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 6, 2006.

# APENDICE A. Imagem da rotina elaborada para a leitura dos dados

```
%% LEITURA DOS DADOS EM EXTENSAO NETCDF E TRANSFORMACAO EM .MAT - TSM
% Abrindo o diretório dos arquivos
cd ('/home/oceano/TCC/MatLab/Tsm/MATLAB_dadostsm1981.2019_NetCDF')
% Montando uma estrutura com os arquivos sequencialmente por ano
arquivos = dir ('sst.day.mean.*.v2.nc');
% Lendo as variaveis de latitude e longitude
lon = ncread(arquivos (1).name, 'lon');
lat = ncread(arquivos (1).name, 'lat');
lon= lon-360; % arrumando a variavel longitude
% Definindo indices com as coordenadas limites da regiao de interesse
indice_lon= lon > -60 & lon < 0;
indice_lat= lat < -15 & lat > -50;
% Matriz lat e lon da regiao
lon=lon(indice_lon);
lat=lat(indice_lat);
% Leitura da TSM
TSM = []; % criando variável para armazenar a temperatura
% Loop para a leitura da TSM e amazenamento em uma unica variavel
for r= 1: size(arquivos,1);
    display (num2str (r));
    sst = ncread(arquivos(r).name, 'sst');
    tsm =sst (indice_lon, indice_lat, :);
    TSM = cat (3, TSM, tsm);
end
%
%% LEITURA DOS DADOS EM EXTENSAO NETCDF E TRANSFORMACAO EM .MAT - CHLOR
% Abrindo o diretorio de resuldados da tsm para pegar as lon e lat de referência
cd ('/media/oceano/Seagate Expansion Drive/TCC/MatLab/Tsm/Resultados')
load 'lat_lon.mat' % Abrindo as variaveis de lon e lat de TSM
% Abrindo o diretorio com os arquivos de clorofila-a diaria do MODIS
cd ('/home/oceano/TCC/MatLab/Clorofila/dados_clorofila/arquivo/chlor_a_nc_dados_base/Clorofila_modis');
% Montando uma estrutura com os arquivos sequencialmente por dia
arquivos1 = dir ('A*_chlor_a_9km.nc'); % Montando estrutura com os arquivos sequenciados
% Lendo as variaveis de latitude e longitude
lon_chlor = ncread('S1998001.L3m_DAY_CHL_chlor_a_9km.nc', 'lon');  % Lendo a lon da clorofila
lat_chlor = ncread('S1998001.L3m_DAY_CHL_chlor_a_9km.nc', 'lat');  % Lendo a lat da clorofila
% Definindo indices com as coordenadas limites da regiao de interesse
indice_lon = lon_chlor <= 0 & lon_chlor >= -60;
indice_lat = lat_chlor <= -15 & lat_chlor >= -50;
% Matriz lat e lon da regiao
lon_chlor= lon_chlor(indice_lon);
lat_chlor=lat_chlor(indice_lat);
% Criando MeshGrid para interpolar os dados de clorofila para a grade de TSM
[lon_tsm, lat_tsm] = meshgrid(lon, lat);
[lon_chlor1, lat_chlor1]= meshgrid(lon_chlor, lat_chlor);
% Leitura da TSM
chlor_a = []; % criando variável para armazenar a clorofila
% Loop    para ler a clorofila ja recortada na regiao de interesse e depois
% interpolar para a grade de tsm
for rr= 1:size(arquivos2);
    display (num2str (rr));
    chlor2 = ncread (arquivos2(rr).name, 'chlor_a', [1441 1261], [720 420]);
    clorofila_interp2= interp2(lon_chlor1, lat_chlor1, chlor2', lon_tsm, lat_tsm, 'nearest', 500);
    chlor_a = cat (3, chlor_a, clorofila_interp2);
end
%
%
```

# APENDICE B. Imagem da rotina elaborada para identificação das OCMS e extração sazonal

```
%%  DETECCAO DAS ONDAS DE CALOR MARINHAS

% Deteccao das ondas de calor marinhas no sudoeste do atlântico sul do
% período de 1982 - 2018.

cd ('/home/oceano/TCC/MatLab/Tsm')


[MHW,mclim,m90]=detect_mhw(tsm,datenum(1982,1,1):datenum(2019,12,31),...
    datenum(1982,1,1),datenum(2019,12,31),datenum(1982,1,1),datenum(2019,12,31));
%
% Saidas:
%  MHW = Tabela com colunas de data de inicio do evento, data de fim,
%  duracao, intensidade máxima, media, variacao em cada evento e acumulada, lon e lat
% mclim =  matriz com uma serie de climatologia para cada lat lon
% m90 = matriz com uma serie de limiar para cada lat lon
%
%% EXTRACAO E SEPARACAO SAZONAL
% **As analises sazonais serao realizadas apenas com o s eventos
%   que iniciaram e terminaram em uma unica estacao do ano
%
% Tornando a tabela de identificacao de OCM em uma matriz
MHW1=MHW{:,:};
% Criando dois vetores com todas as datas de inicio e todas as datas de fim de cada evento de OCM
start_mhw=datevec(num2str(MHW1(:,1)),'yyyymmdd');
end_mhw=datevec(num2str(MHW1(:,2)),'yyyymmdd');
% EXTRACAO VERAO
% Criando indice para achar os meses de verao
djf=  find (start_mhw(:,2) >= 12 | start_mhw(:,2) <= 2 & end_mhw(:,2) >= 12 | end_mhw(:,2) <= 2);
% Extraindo as mhw que ocorreram nos periodos de verao
mhw_verao= MHW1(djf,:);
% EXTRACAO OUTONO
% Criando indice para achar os meses de outono
mam=  find (start_mhw(:,2) >= 3 & start_mhw(:,2) <=5 & end_mhw(:,2) >= 3 & end_mhw(:,2) <=5);
% Extraindo as mhw que ocorreram nos periodos de outono
mhw_outono= MHW1(mam,:);
% EXTRACAO INVERNO
% Criando indice para achar os meses de inverno
jja=  find (start_mhw(:,2) >= 6 & start_mhw(:,2) <=8 & end_mhw(:,2) >= 6 & end_mhw(:,2) <=8);
% Extraindo as mhw que ocorreram nos periodos de inverno
mhw_inverno= MHW1(jja,:);
% EXTRACAO PRIMAVERA
% Criando indice para achar os meses de primavera
son=  find (start_mhw(:,2) >= 9 & start_mhw(:,2) <=11 & end_mhw(:,2) >= 9 & end_mhw(:,2) <=11);
% Extraindo as mhw que ocorreram nos periodos de primavera
mhw_primavera= MHW1(son,:);
%
%
```

# APENDICE C. Imagem da rotina base de cálculo da anomalia de CSM nos dias de OCMs

```
%% CLOROFILA NOS DIAS DE OCMS
% Criando vetor tempo diario com o periodo de analise
time= (datenum(2002,07,04):datenum(2017,12,31))';
% Definindo o tamnaho das dimensões
[x,y,~]=size(chlor_a);
% Criando dois vetores com todas as datas de inicio e todas as datas de fim de cada evento de OCM
start_mhw=datevec(num2str(MHW1(:,1)),'yyyymmdd');
end_mhw=datevec(num2str(MHW1(:,2)),'yyyymmdd');
% Criando indice para a extracao das OCMS no periodo analisado
serie=  find (start_mhw(:,1) >= 2002 & start_mhw(:,2) >= 7 & start_mhw(:,3) >= 4 & end_mhw(:,1) <= 2017);
% Extraindo as OCMs no periodo analisado
mhw_periodo_chlor= MHW1(serie,:);
% Criando variaveis para sabar os resultaddos
Chlor_mhw=NaN(x,y); % Anomalia de chlor para cada lat/lon
% Loop para pegar o dado de chlor no dia de OCM  e subtrair a climatologia
% do mesmo dia
for m=1:size(loc);
    loc_=loc(m,:); % Definindo lat/lon de analise
    % Pegando todas as OCMS do ponto
    MHW_=mhw_periodo_chlor(mhw_periodo_chlor(:,8)==loc_(1) & mhw_periodo_chlor(:,9)==loc_(2),:);
    if MHW_ >0; % Garantindo que o ponto teve OCM identificada
        for i=1:size(MHW_,1); % Loop para percorrer evento por evento
            event=MHW_(i,:); % Definindo evento analisado
            ind_start= find( time == datenum(num2str(event(1,1)),'yyyymmdd'));% indice para a data inicial do evento
            ind_end= find(time ==datenum(num2str(event(1,2)),'yyyymmdd'));% indice para a data final do evento
            clim_event= clim_chlor(loc_(2),loc_(1),ind_start:ind_end); % Pegando a climatologia para cada dia do evento
            metric_chlor_= chlor_a(loc_(2),loc_(1),ind_start:ind_end); % Pegando a chlor para cada dia do evento
            % Organinzando as dimensoes
            clim_event=squeeze(clim_event);
            metric_chlor_=squeeze(metric_chlor_);
            % Loop para pegar a chlor de cada dia do evento e subtrair a
            % climatologia do mesmo dia
            for rr=1:size(metric_chlor_,1)
                metric_chlor_event(rr)= metric_chlor_(rr)- clim_event(rr);
            end
            metric_chlor_event=nanmean(metric_chlor_event'); % media da anomalia do evento

            Metric_(loc_(2),loc_(1),i)= metric_chlor_event; % variavel com todas as anomalias do ponto
        end
        chlor_event= squeeze(Metric_(loc_(2),loc_(1),:)); % tirando as dimensoes desnecessarias
        Chlor_mhw(loc_(2),loc_(1))= nanmean(chlor_event); % media das anomalias do ponto
    else

    end
end
```