



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Dissertação de Mestrado em Oceanografia Aplicada

**CAMPOS DE VENTO E CIRCULAÇÃO OCEÂNICA NO CANAL DE
MOÇAMBIQUE: PERSPECTIVAS A PARTIR DE DIFERENTES
ESTIMATIVAS**

Autora

Carlota Alves Emílio



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Dissertação de Mestrado em Oceanografia Aplicada

Campos de Vento e Circulação oceânica no Canal de Moçambique: perspectivas a partir de diferentes estimativas

Supervisor

Doutor Avelino A. A. Langa

Quelimane, Outubro de 2020

Dedicatória

Ao Omnipotente e a minha família.

Agradecimentos

Agradeço ao senhor Omnipotente por me iluminar e conduzir pelos caminhos certos.

Meus profundos agradecimentos endereço ao meu supervisor, Doutor Avelino Ângelo Adolfo Langa que com profissionalismo deu o seu apoio incansável e incondicional para a elaboração desta dissertação;

Ao Doutor Helder Arlindo Machaieie que esteve sempre perto para perceber a essência do trabalho e apoiar no que podia rumo a efetivação do mesmo, obrigada;

Ao meu esposo Delfim Emílio Eugênio e a minha filha, Lory da Elisabet Emílio Eugênio pelo amor e força que me têm dado e por terem permitido que eu lhes faltasse para que pudesse chegar ao fim desta caminhada; muito obrigada;

A minha mãe Maria de Fátima Gulibena, minha irmã Goreth Alves Emílio e aos meus irmãos Emílio Alves Emílio e Luís Alves Emílio pelo carinho e apoio moral que sempre tive deles, obrigada;

Aos meus sobrinhos, Guida, Maria de Fátima, Hulk, Denilson e a Keyse, muito obrigada pelo carinho;

Aos meus colegas do curso, Anabela Cafermane, Banito Magestade, Esmael Marimo, Cristecio Mundulai e Humberto Mabota pelo apoio que demo-nos neste longo percurso, obrigada;

Aos colegas de trabalho, em especial a Sara Tembe, Noca Furaca, Eulália Mugabe, Rosa Simbine e Paula Milice pela força que recebi de vocês, muito obrigada;

Para todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, obrigada.

Declaração de honra

Eu, **Carlota Alves Emílio**, declaro por minha honra que esta dissertação nunca foi apresentada a uma outra Universidade para obtenção de qualquer grau académico e que ela constitui o resultado do meu labor individual. Cada ideia trazida de outros trabalhos foi devidamente citada e referenciada. Esta dissertação é apresentada na sequência do cumprimento dos requisitos para obtenção do grau de Mestrado em Oceanografia Aplicada, na Universidade Eduardo Mondlane.

(Carlota Alves Emílio)

Resumo

A dinâmica superficial das águas oceânicas é principalmente atribuída ao comportamento dos ventos locais e regionais. Como forma de melhor entender a dinâmica dos oceanos, os campos de ventos e correntes oceânicas, como também a temperatura e salinidade são empregues como condições iniciais e de fronteira nos modelos hidrodinâmicos. Com o avanço da tecnologia e do aumento da capacidade computacional existe enorme quantidade de dados disponíveis em diversas escalas de espaço e tempo que podem ser utilizados para forçar modelos numéricos. Contudo, existem incertezas na utilização de dados provenientes de diversos produtos dos ventos, correntes, temperatura e salinidade que possam representar com fiabilidade a dinâmica de uma determinada região oceânica. Neste trabalho, fez-se a avaliação espaço-temporal dos campos de vento, correntes superficiais, temperatura e salinidade no Canal de Moçambique a partir de três diferentes produtos como escaterômetros (ventos), altímetro (correntes) e reanálises (ventos, correntes, temperatura e salinidade). De um modo geral, o Canal de Moçambique é dominado por um ciclo semi-anual e anual dos campos de ventos, contudo existem diferenças na magnitude da velocidade do vento em escala local entre os três diferentes produtos analisados. Por exemplo, o stress do vento é maior nas estimativas do CCMP e QSCAT e menor no ASCAT, apenas para a região Norte. Entretanto, no centro, O CCMP é análogo ao ASCAT enquanto o QSCAT não denota nenhuma sazonalidade. O que sugere que o CCMP representa melhor os campos do vento ao nível de todo o canal. Em relação às correntes superficiais, os três produtos apontam para correntes mais intensas durante o inverno nos limites Norte e Sul do canal, contudo SODA e NCEP tendem a sobrestimar a sua magnitude, sendo melhor o SODA. Os perfis verticais da temperatura apontam para uma camada de mistura mais espessa durante o inverno, nos três produtos (CARS2009, SODA e NCEP), todavia o SODA compara-se melhor à climatologia CARS2009. A salinidade mostrou consideráveis diferenças entre os três produtos, sobretudo nos primeiros 200 metros de profundidade. Estas diferenças nos campos dos ventos, correntes, temperatura e salinidade dos produtos analisados podem ter implicações na representação de processos oceanográficos em modelos numéricos em escalas locais e regionais.

Palavras-chave: campos de vento, correntes superficiais, temperatura, salinidade, Canal de Moçambique

Wind field estimations in the Mozambique Channel: several contrasts from scatterometer and reanalysis

Abstract

The ocean surface circulation depends on the local or regional wind regime. Hydrodynamic models usually apply wind field, ocean currents, as well as temperature and salinity data as initial and boundaries conditions. Nowadays, there are several datasets available, which can be used for forcing regional oceanic models. However, accurate wind fields, ocean currents, temperature and salinity datasets are required, to enable the proper representation of these processes by the model. In this study, an assessment is made for three different datasets derived from scatterometers (wind), altimetry (currents) and reanalyzes (wind, currents, temperature and salinity) in the Mozambique Channel. It is found that, Mozambique Channel is dominated by semiannual and annual wind field cycles, but on a local scale there is noticeable differences in the magnitude of wind velocity between the three analyzed datasets. For instance, in the Northern region of the Mozambique Channel the estimated magnitude of wind stress is higher for CCMP and QSCAT than the ASCAT. In the central part of Mozambique Channel, the seasonal pattern of the wind stress is similar for CCMP and ASCAT while QSCAT does not show any seasonal variation, suggesting that CCMP represents better the wind field in the Mozambique Channel. For the surface current, the analyzed datasets show strong currents during the winter in the Northern and Southern limits of the Mozambique Channel but SODA and NCEP underestimate the magnitude of the current, although SODA have a better representation of the surface circulation than NCEP. The vertical profiles of temperature indicate a deeper mixed layer during the winter season for all dataset (CARS2009, SODA and NCEP), but SODA is in agreement with climatology dataset derived from CARS2009. Differences were noted on salinity vertical profiles between three datasets, mainly within the first 200-meter depth. These differences found in wind field, currents, temperature and salinity may have implications in numerical models of oceanic processes.

Keywords: wind fields, surface currents, temperature, salinity, Mozambique Channel.

Lista de Figuras

Figura 1: Padrão dos ventos nos períodos das Monsões do Verão (a) e do Inverno (b)2

Figura 2: Padrão das correntes durante as monções do Verão (a) e do Inverno (b).....2

Figura 3: Mapa mostrando a localização do Canal de Moçambique. As áreas quadriculadas no interior do Canal indicam as áreas Norte (North), Centro (Center) e Sul (South), onde foram feitas amostras para diversas análises deste trabalho.....7

Figura 4: Representação sazonal da magnitude da componente meridional (v) do vento (barra de cores) para os produtos, QSCAT, ASCAT e CCMP. As setas indicam a direcção do vento.....15

Figura 5: Representação das diferenças da magnitude e velocidade do vento meridional (v) entre os produtos.....16

Figura 6: Stress do vento na componente zonal nas regiões Norte [(a) North], Centro [(b) Center] e Sul [(c) South]. As cores, vermelha, azul e preta, representam o comportamento do stress do vento dos produtos CCMP, QSCAT e ASCAT, respetivamente.....17

Figura 7 : Stress do vento na componente meridional (v) nas regiões Norte [(a) North], Centro [(b) Center] e Sul [(c) South] apartir dos dados disponibilizados pelas bases de dados Quikscat, CCMP e Ascet, representados pelas cores, azul, vermelha e preta, respetivamente.....18

Figura 8: Mapas da variabilidade sazonal da magnitude do wind stress curl dos três produtos, QSCAT, ASCAT e CCMP durante o verão (a, b & c) e o inverno (d, e & f). Os valores negativos indicam o downwelling e os positivos o upwelling.....19

Figura 9: Representação da diferença do wind stress curl entre os produtos QSCAT-ASCAT e QSCAT-CCMP.21

Figura 10: Variabilidade do bombeamento de Ekman durante o verão (a, b & c) e inverno (d, e & f) dos produtos QSCAT, ASCAT e CCMP. Os valores negativos do bombeamento do Ekman indicam downwelling e os positivos upwelling.....22

Figura 11: Análise wavelet do stress do vento para a região Norte do Canal de Moçambique para as bases de dados Quikscat, Ascet e CCMP. A linha vermelha mostrada na figura a, b & c representam o nível de confiança que é de 95%. Nas figuras d, e & f, a linha tracejada indica a significância global do espetro.23

- Figura 12:** Espectro da energia wavelet na região Centro do Canal de Moçambique dos produtos Quikscat, Ascat e CCMP é mostrado nas figuras a, b & c, com um nível de confiança de 95% (linha vermelha). O espectro global é mostrado pela linha vermelha não tracejada.....24
- Figura 13:** Espectro da potência do wavelet, figuras a, b & c, o nível de confiança de 95% é representado pela parábola positiva de cor vermelha em cada uma das figuras na região Sul do Canal de Moçambique. . O espectro global de energia da análise wavelet, é mostrado pela linha vermelha não tracejada nas figura d, e & f para os produtos QSCAT, ASCAT e CCMP.....25
- Figura 14:** Padrão sazonal das correntes no Canal de Moçambique a partir dos produtos CMEMS, SODA e NCEP. A direção das correntes é representada pelas setas.....26
- Figura 15:** Diferenças de correntes no Canal de Moçambique obtidas a partir dos produtos CMEMS-SODA e CMEMS-NCEP.....27
- Figura 16:** Perfis verticais de temperatura dos três produtos, SODA, CARS2009 e NCEP nas três regiões de amostragem no Canal de Moçambique. A linha vermelha indica o perfil durante o verão e a azul durante o inverno..28
- Figura 17:** Perfis verticais da salinidade nos três produtos, SODA, CARS2009 e NCEP no intervalo de 0 aos 600 metros de profundidade, o verão é representado pela cor vermelha e inverno pela azul.....29

Lista de Tabelas

Tabela 1: Principais características dos dados usados no presente trabalho para os campos de vento.....8

Tabela 2: Produtos usados para análises das correntes superficiais.....11

Tabela 3: Produtos usados para análises das propriedades oceanográficas.....13

Abreviaturas

C_d – Coeficiente de arrasto

τ_x -tensão zonal

τ_y – tensão meridional

APDRC - *Asia-Pacific Data-Research Center*

ASCAT - *Advanced Scatterometer*

CARS – *CSIRO Atlas of Regional Seas*

CCMP - *Cross-Calibrated Multi-Platform*

CMEMS – *Copernicus Marine Environmental Monitoring Service*

f – Parâmetro de Coriolis

$kg\ m^{-3}$ - Quilogramas por metro cubico

km^2 – Quilómetros ao quadrado

$m\ s^{-1}$ – Metros por segundo

N^2/m^4 – Newton ao quadrado por metro a quarta

NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*

° E – Graus de longitude Este

° S – Graus de latitude Sul

°C – Graus Celcius

PSU – *Practical Salinity Unit* - Partes por mil

QSCAT – *Quick Microwave Scatterometer*

SODA – *Simple Ocean Data Assimilation*

Θ – Latitude local

Ω – Frequência de rotação da terra

W - Magnitude do vento na componente zonal e meridional

Índice

1. Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Problematização e justificativa.....	4
2. Objetivos.....	6
2.1 Objetivo geral	6
2.2 Objetivos específicos.....	6
3. Metodologia.....	7
3.1. Área de Estudo.....	7
3.2. Material de métodos	8
3.2.1. Campos de vento	8
3.1.2. Correntes superficiais, temperatura e salinidade	11
4. Resultados.....	14
4.1. Velocidade e magnitude do vento	14
4.2. Variabilidade sazonal do <i>Stress</i> do Vento	17
4.3. Wind stress Curl	19
4.4. Variabilidade sazonal do Bombeamento de Ekman	21
4.5. Variabilidade interannual do <i>stress</i> do vento	23
4.6. Magnitude e sazonalidade das correntes superficiais	26
4.7. Perfis verticais de Temperatura e da Salinidade.....	27
5. Discussão.....	30
6. Conclusões	32
7. Referências bibliográficas.....	33

1. Introdução

1.1 Contextualização

Os ventos são considerados os principais forçantes da circulação oceânica. Este facto, faz com que a circulação oceânica possa ser interpretada com base no padrão dos ventos atuantes na sua superfície. Na medida em que o vento atua na camada superficial do oceano, as águas tendem a se movimentar na direção do mesmo. Contudo, numa visão de larga escala, o efeito de Coriolis desvia as águas para o sentido horário no Hemisfério Norte e anti-horário no Hemisfério Sul (Servais et al., 2014). O Oceano Índico tem uma circulação complexa devido ao regime dos ventos, principalmente no Hemisfério Norte, onde as correntes oceânicas estão sujeitas aos ventos monçônicos, que mudam de direção e magnitude sazonalmente (Schott et al., 2009).

Os ventos monçônicos atuam de Sul a Sudeste durante o Inverno Austral atingindo velocidades de até 12 m s^{-1} , mudando de direção no Verão Austral, passando para ventos de Norte a Nordeste com velocidades de cerca de 5 m s^{-1} , na região dos $0\text{-}10^\circ\text{N}$ (Collins, 2012). Um exemplo de circulação oceânica devido aos ventos monçônicos é a Corrente da Somália (**Figuras 1**). Durante as monções do Inverno Austral, a Corrente de Somália sofre uma enorme intensificação e devido ao seu alinhamento com a costa, condiciona um intenso *upwelling* costeiro na região (Schott, 1983; Woodberry et al., 1989;). A estas fortes correntes estão também associadas à geração de vórtices de mesoescala (Schott et al., 2009). Este cenário reverte-se no Verão Austral quando a Corrente da Somália flui para o Sul, (**Figuras 2**). Neste período, Corrente da Somália converge com Corrente Costeira do Leste Africano (EACC) aos $2\text{-}4^\circ\text{S}$ de latitude, formando a Contra Corrente Sul Equatorial (SECC) que flui para o leste (Schott et al., 2009).

Campos de Vento e Circulação oceânica no Canal de Moçambique: perspectivas a partir de diferentes estimativas

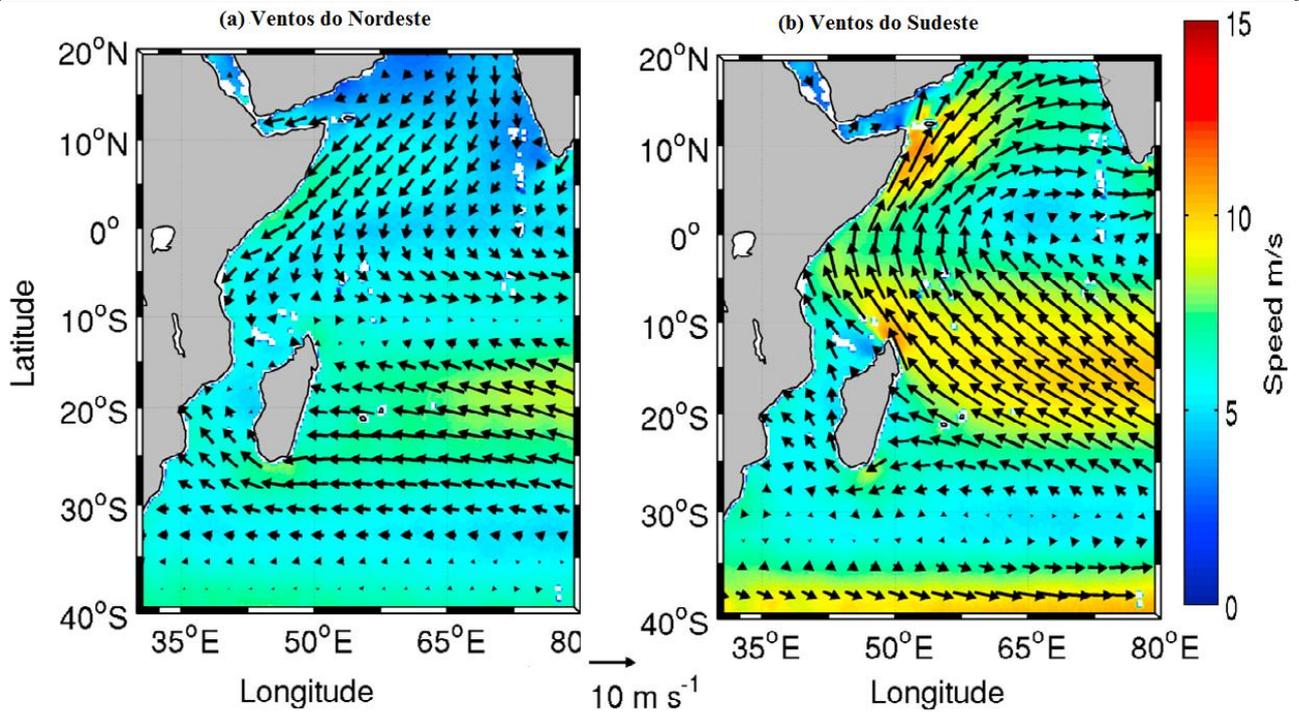


Figura 1: Padrão dos ventos nos períodos das Monsões do Verão (a) e do Inverno (b) (Collins, 2012).

Os ventos monçônicos também influenciam a Corrente Sul Equatorial (SEC) no limite norte do Canal de Moçambique (localizado a cerca de 10°S de latitude), com velocidades que atingem mais de 1.5 m s^{-1} durante o Inverno Austral quando os ventos são mais fortes (Saetre, 1985). No Verão Austral, as velocidades da SEC raramente atingem a velocidade de 1 m s^{-1} . Nos 10°S de latitude, a SEC ramifica-se, formando a EACC dirigindo-se para o Norte e torna-se fonte da Corrente de Moçambique direcionada para o Sul (Figura 2). A região Norte do Canal de Moçambique também está sob influência dos ventos monçônicos que se estendem até aos 18°S de latitude (Saetre, 1985).

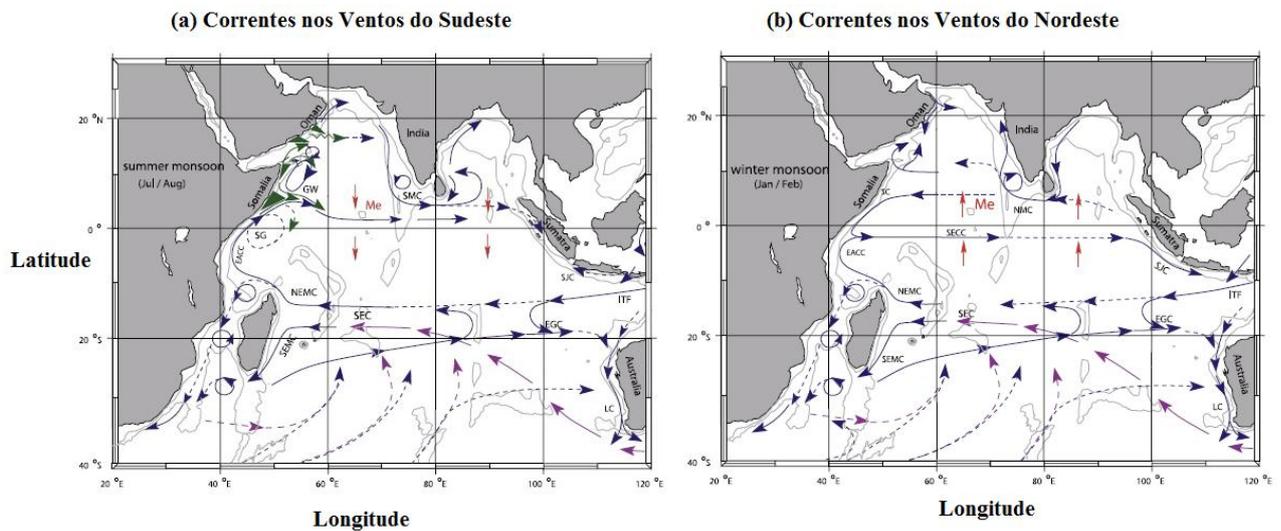


Figura 2: Padrão das correntes durante as monções do Verão (a) e do Inverno (b) (Schott et al., 2009).

Na região Norte do Canal de Moçambique, a cerca de 17°S de latitude, também verifica-se ressurgência costeira associada aos ventos de Norte a Nordeste durante o verão (Malauene et al., 2014). No interior do Canal de Moçambique a circulação é dominada pelos vórtices de mesoescala, com escala espacial aproximada a 300-350 km, observados num período médio 5-6 anos. Estes vórtices são originados na região norte pelas instabilidades barotrópicas e baroclínicas da SEC (Collins et al., 2012), antes de se desenvolverem no centro e dissiparem no sul do canal (Halo, et al., 2014a). Alguns dos vórtices de mesoescala tem a origem no centro do canal, contudo a sua força geradora ainda não é conhecida (Halo, et al., 2014a).

Na região Sul do Canal de Moçambique regista-se um *upwelling* localizada em Delagoa Bight, que é associado aos vórtices (Lamont, et al., 2010). *Upwelling* é definido como sendo um processo oceanográfico caracterizado pela ascensão de água fria e rica em nutrientes do fundo à superfície (Boje & Tomczak, 1980). No limite sul do Canal de Moçambique os vórtices de mesoescala provenientes do interior do Canal associam-se aos vórtices de mesoescala com origem na Corrente do Sudeste de Madagascar para alimentar a Corrente das Agulhas (Swart et. al., 2010 & Machu et al., 2004). Tanto os vórtices de mesoescala como o *upwelling* costeiro desempenham um papel fundamental nos ecossistemas marinhos a nível local e regional.

A dinâmica costeira é principalmente governada pelo *stress* do vento que atua localmente. O vento também desempenha um papel fundamental na circulação à escala regional e planetária. Com a avanço da tecnologia, atualmente os estudos da dinâmica costeira e oceânica têm se servido de dados remotos devido a sua vantagem em termos de cobertura sinóptica, isto é, escala de espaço e tempo relativamente maiores. Associados ao sensoriamento remoto estão também os dados de reanálises que são utilizados para entender os processos oceânicos e atmosféricos. Tanto os dados do sensoriamento remoto como as reanálises têm sido empregues em modelos numéricos para simular e entender processos físicos em escala local, regional ou global.

Maior parte dos modelos numéricos servem-se de dados climatológicos providenciados pelos *scatterometers* e reanálises como condições de fronteira e contorno (Capet et al., 2004). Os dados dos ventos estimados pelos *scatterometers* usados em modelos configurados para estudos no Canal de Moçambique estão limitados a 25 km da linha de costa (José et al., 2014 & Collins et al., 2012). Esta limitação dos ventos devido à resolução espacial pode ser ineficiente em representar os processos simulados na zona costeira. Outro sim, está associado ao facto do QuickSCAT que é conhecido por fornecer dados fiáveis para esta região (Collins et al., 2012) estar fora do activo. Estas constatações fazem com que haja necessidade de se analisar outros dados de vento provenientes de outros *scatterometers* e reanálises que estão ativos e disponíveis.

O presente estudo tem como principal intuito avaliar os dados de vento, correntes superficiais, temperatura e salinidade oferecidos por diferentes *scatterometers* e reanálises em termos da sua representação sazonal e espacial no Canal de Moçambique. Para o vento, foram usados três produtos, ASCAT (*Advanced Scatterometer*), QuikSCAT (*Quick Scatterometer*), e CCMP (*Cross-Calibrated Multi-Platform*). Os resultados do ASCAT e do CCMP foram comparados aos do QuikSCAT, sendo o QuikSCAT considerado o produto de referência. Os dados das correntes superficiais analisados foram os disponibilizados pelos SODA (*Simple Ocean Data Assimilation*), NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) e comparados aos do CMEMS (*Copernicus Marine Environmental Monitoring Service*). Em relação a temperatura e salinidade, foram usados os dados do SODA, NCEP e CARS 2009 (*CSIRO Atlas of Regional Seas*), onde o CARS 2009 foi considerado o produto de referência.

Este trabalho é relevante pois irá determinar as potencialidades dos campos dos ventos e propriedades oceanográficas de diversos produtos que podem ser considerados como forçantes e condições de fronteira em estudos envolvendo modelos numéricos no Canal de Moçambique.

1.2 Problematização e justificativa

Recentemente os dados climatológicos de *scatterometers* e reanálises tem sido amplamente aplicados em modelos numéricos como forçantes superficiais e condições de fronteira, com intuito de entender processos ligados a circulação oceânica, tais como, vórtices de mesoescala, ocorrência de ressurgências; e processos biológicos nomeadamente a produtividade primária, distribuição de larvas, entre outros.

Com o avanço da tecnologia e do aumento da capacidade computacional existe enorme quantidade de dados disponíveis em diversas escalas de espaço e tempo que podem ser utilizados para forçar os modelos numéricos. Estudos apontam para diferentes respostas em função do uso de diversas condições de contorno em modelos numéricos. Por exemplo, Caceres-Soto et al., 2019, considera o ERA-Interim em comparação ao NCEP-CFSR e NCEP-FNL como sendo o produto com dados mais precisos para expressar os ventos superficiais da região central do Chile quando aplicado no modelo WRF (*Weather Research Forecast Model*).

As diferenças de *stress* e o *wind stress curl* observadas na comparação entre o QuikSCAT e as reanálises do ERA-Interim e o JRA 55 na parte oriental costeira do sistema de *upwelling* mostraram que os dados do ERA-Interim são negativamente influenciados pelo vento que atravessa a região costeira da parte oriental do sistema de *upwelling*, contrariamente aos do JRA 55 que mostraram uma resposta mais próxima da realidade (Bonino et al., 2019).

Apesar de existir uma similaridade na representação dos ventos com velocidades menores que 6 m s^{-1} até ventos intermediários os produtos QuikSCAT, CCMP e CFSR quando comparados aos NCEP *Reanalysis II* (*National Centers for Environmental Prediction reanalysis*), ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), ERA-Interim (re-analysis), (MERRA) (*Modern-Era Retrospective-analysis for Research and Applications*), NCEP, CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) mostram-se mais precisos na representação do vento para a região Sul da baía de Biscay (Alvarez et al 2014).

Para além do vento, os modelos numéricos têm se servido dos dados de temperatura e salinidade como condições de fronteira. À semelhança dos ventos, o uso de diferentes condições de contorno como a temperatura, salinidade e os campos de velocidades em modelos numéricos pode resultar em distintas caracterizações oceanográficas. Echevin et al., (2011), considerou o uso de três forçantes, temperatura, salinidade e campos de velocidade (gerados por OCCAM, SODA e ORCA) inseridos no modelo geral de circulação (*OGCM - Ocean General Circulation Models*) e conclui que as correntes superficiais e sub-superficiais são em grande parte condicionadas pelas condições de fronteiras impostas no modelo.

Sendo o vento o principal forçante das correntes superficiais do oceano, torna-se indispensável o uso do mesmo nos modelos de circulação. Estudos de comparação entre diversos escaterómetros revelam que o QuicksCAT oferece dados que melhor expressam o comportamento dos campos do vento na superfície do oceano (Caceres-Soto et al., 2020 & Collins et al., 2012). O QuicksCAT está fora do ativo e ainda o facto de este escaterómetro possuir medições com limitações nas zonas costeiras (até 25 km) faz com que haja necessidade de explorar outros produtos mais recentes e com elevada resolução espacial e temporal. Deste modo, há necessidade de analisar as potencialidades e limitações dos diversos produtos dos ventos e propriedades oceanográficos para auxiliar na interpretação dos fenómenos a eles associados.

2. Objetivos

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar os campos de ventos e circulação oceânica no Canal de Moçambique a partir de diferentes escaterómetros e reanálises.

2.2 Objetivos específicos

Para a materialização do objetivo principal deste trabalho, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Comparar o *stress*, *Curl* do vento e o bombeamento de Ekman entre escaterómetros e reanálises no Canal de Moçambique;
- Analisar a variabilidade interanual do stress do vento no Canal de Moçambique;
- Diferenciar o padrão de correntes a partir do altímetro e reanálises na região de estudo;
- Fazer a análise espaço-temporal dos perfis verticais da temperatura e salinidade entre reanálises e climatologias observacionais no Canal de Moçambique.

3. Metodologia

3.1. Área de Estudo

O presente estudo foi feito no Canal de Moçambique. O Canal de Moçambique localiza-se no Sul do Oceano Índico, entre as costas de Moçambique e Madagáscar (**Figura 3**).

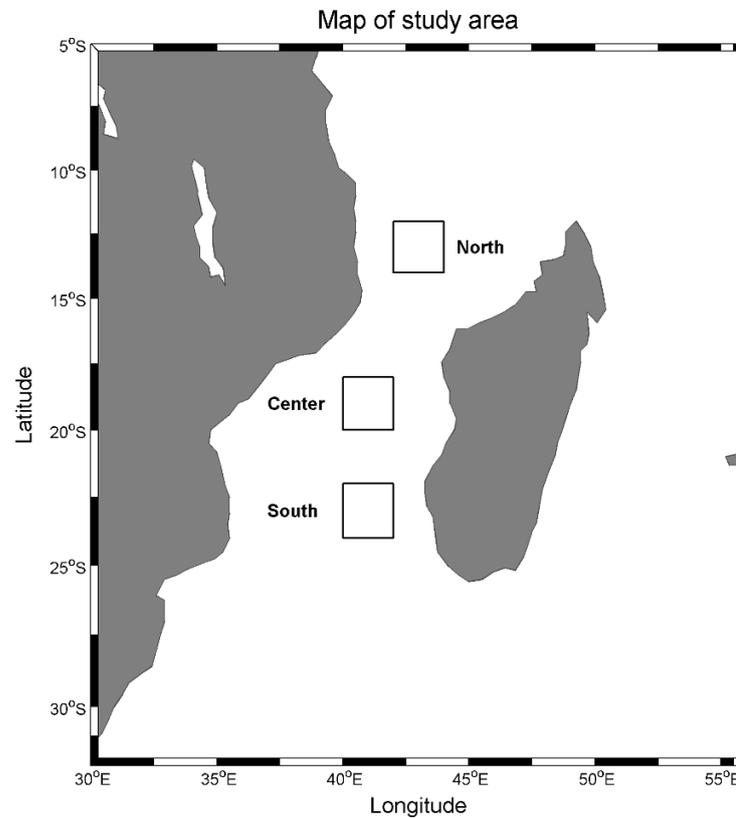


Figura 3. Mapa mostrando a localização do Canal de Moçambique. As áreas quadriculadas no interior do Canal indicam as áreas Norte (*North*), Centro (*Center*) e Sul (*South*), onde foram feitas amostras para diversas análises deste trabalho.

A hidrodinâmica do Canal de Moçambique é caracterizada pela ocorrência de intensos vórtices de mesoscala, maioritariamente anti-ciclónicos. Esta hidrodinâmica, confere a esta região uma elevada importância ecológica local, regional e global pois os vórtices de mesoscala são conhecidos por tornarem as zonas oligotróficas do oceano aberto em áreas produtivas através da injeção de nutrientes trazidos do fundo e/ou da advecção das águas costeiras (Malauene et al., 2014). Os vórtices de mesoscala no Canal de Moçambique também desempenham um papel fundamental na regulação do clima global, através da transferência de calor da zona tropical do Índico para o Oceano Atlântico (Halo et al., 2014a).

3.2. Material de métodos

Neste estudo foram usados dados atmosféricos e oceanográficos de que incluem os estimados remotamente por satélites, reanálises (combinação de dados observacionais e modelos) e também dados *in situ* (climatológicos). A descrição detalhada dos dados utilizados neste trabalho é efetuada em seguida.

3.2.1. Campos de vento

Neste estudo foram usados 3 (três) diferentes produtos, nomeadamente QuikSCAT (*Quick Scaterometer*), CCMP (*Cross Calibrated Multi-Platform*), ASCAT (*Advanced Scaterometeer*). Os três produtos tem a mesma resolução espacial ($1/4^\circ$), contudo a sua resolução temporal é difm as estimativas no continente, ao contrário do ASCAT e QSCAT (QuikSCAT) que providencia dados do mar apnaserente. O CCMP tem maior resolução temporal (em cada 6 horas), seguido do ASCAT (*diário*) e por último o QSCAT (*em cada três dias*). Para além da elevada resolução temporal, o CCMP inclui. O resumo dos dados utilizados neste trabalho encontra-se na Tabela 1.

Para cada produto foram utilizados dados correspondentes a um período de 9 anos. Foram usados dados do ASCAT (2008-2016) com período diferente do QSCAT e CCMP (2000-2008) porque o ASCAT entrou em operação a partir de 2008. Todos os dados do vento foram adquiridos em Asia-Pacific Data-Research Center (APDRC, <http://apdrc.soest.hawaii.edu>). Os dados correspondem a direcção, sentido e magnitude do vento, com estimadas efetuadas a 10 m em relação à superfície do mar.

Tabela 1: Principais características dos dados usados no presente trabalho para os campos de vento

Produtos	Resolução Espacial	Resolução temporal	Período em análise
QuikSCAT	($0.25^\circ \times 0.25$)	Média de três dias	2000-2008
CCMP	($0.25^\circ \times 0.25$)	De 6 em 6 horas	2000-2008
ASCAT	($0.25^\circ \times 0.25$)	Diário	2008-2016

QuikSCAT (*Quick Microwave Scatterometer*, QSCAT)

QuikSCAT (QSCAT) é um satélite equipado por escaterómetro capaz de registrar dados de vento que atuam na superfície dos oceanos. O satélite foi lançado a 19 de Junho de 1999, operou em órbita síncrona ao sol, a uma altitude de 803 km em relação a superfície da Terra, com um período orbital de 101 minutos (Risien & Chelton 2008). Estas características permitiram que o QSCAT fornecesse dados diários numa área de cerca de 90% dos oceanos (Collins et al., 2012). O QSCAT tinha a capacidade de captar dados em vários ângulos podendo inferir sobre a magnitude, direção e stress do vento (Chelton & Freilich, 2004). As diferenças médias de velocidade e direção do vento encontradas na comparação entre dados colhidos *in situ* e os estimados pelo QSCAT na região do Oceano Índico foram de 0.37 m s^{-1} e 5.8° , respetivamente; o desvio padrão entre o QSCAT e as medições *insitu* foi de 1.57 m s^{-1} e 44.1° correspondente a um coeficiente de correlação de 0.87 e 0.75 respetivamente (Satheesan et al., 2007).

ASCAT (*Advanced Scatterometer*)

O ASCAT é um sensor de microondas ativo concebido para monitorar ventos atuantes na superfície dos oceanos com objetivo de forçar modelos numéricos e na previsão de ocorrência ondas no oceano (Wagner et al., 2012 & Chou et al., 2013). O ASCAT foi lançado em outubro de 2006 pela agência europeia do espaço (*European Space Agency*) e monitorado pela Organização de Exploração de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) (Chou et al., 2013, & Lin et al., 2013). Os dados de velocidade e direção do vento oferecidos pelo ASCAT tem uma resolução espacial de 25 km^2 numa em faixas de 550 km de largura, e estes dados quando comparados aos dados oferecidos pelas boias localizada na costa dos Estados Unidos da América, têm uma diferença de raiz quadrada de 1.72 m.s^{-1} de velocidade e 18° de direção (Lin et al., 2013).

***Cross-Calibrated Multi-Platform* (CCMP)**

O *Cross-Calibrated Multi-Platform* (CCMP) corresponde a dados de reanálise do vento resultantes da combinação de dados estimados pelo escaterómetro, observados e modelados. A versão dos dados usados neste trabalho (V2.0), resultam da combinação do radiómetro RSS-V7, escaterómetros QSCAT, ASCAT, boias ancoradas, e dados do modelo ERA-Interim.

Cálculo do *stress* do vento, *wind stress curl* e bombeamento de Ekman

Com as velocidades do vento foram calculados o *stress* do vento, *wind stress curl* e o bombeamento de Ekman, para cada produto no Canal de Moçambique. Considerou-se a fórmula de Bulk para o cálculo do *stress* do vento (Equação 1).

$$\tau(\tau_x, \tau_y) = \rho_a C_d |W|(x, y) \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

τ_x e τ_y representam respectivamente o stress zonal e meridional;

ρ_a é a densidade do ar, foi considerada como sendo igual a 1.2754 kg m^{-3} ;

C_d é o coeficiente de arrasto igual a 1.25×10^{-4} (sem dimensões); e

W é a magnitude do vento, x (zonal) e y (meridional) em $m s^{-1}$.

Em seguida, os valores do *stress* do vento foram usados para calcular o *wind stress curl* (Equação 2).

$$Curl_{\tau} = \left(\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right) \quad \text{(Equação 2)}$$

Os valores do *wind stress curl* foram usados para o cálculo do bombeamento de Ekman (Equação 3).

$$w_e = \frac{1}{\rho_f} \left(\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right) \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde: ρ é a densidade média da água do mar (neste trabalho foi usado o valor de 1025 kg m^{-3}); e

f é o parâmetro de Coriolis ($f=2\Omega \sin(\theta)$).

Onde:

Ω é a frequência de rotação da Terra.

O presente estudo usa o wavelet para detetar a amplitude e a frequência da variabilidade do vento ao longo da série temporal em análise. Para efeito comparativos, foram selecionadas as regiões Norte, Centro e Sul do Canal de Moçambique para a análise da série temporal da componente meridional do stress do vento provenientes de cada uma das três bases de dados, QSCAT, ASCAT e CCMP.

3.1.2. Correntes superficiais, temperatura e salinidade

Depois da análise dos ventos, neste ponto foi feita a comparação das correntes superficiais no Canal de Moçambique, com vista a aferir o nível de representação da circulação das reanálises em relação às estimativas pelo Altimetro. Os dados usados para a análise das correntes superficiais são provenientes do SODA, NCEP CMEMS. Neste estudo o CMEMS foi usado como produto de referência, por serem dados estimados pelo sensoriamento remoto. Os campos analisados do CMEMS, SODA e NCEP correspondem às correntes superficiais.

Também foram considerados os parâmetros oceanográficos como a temperatura e salinidade das reanálises providenciadas pelo SODA e NCEP que foram comparados aos dados climatológicos *in situ* provenientes do CARS2009.

Em seguida apresenta-se a descrição dos dados correspondentes as correntes superficiais, os perfis verticais da temperatura e salinidade de cada base de dados utilizadas neste trabalho.

Tabela 2: *Produtos usados para análises das correntes superficiais.*

Produtos	Resolução Espacial	Resolução temporal	Período em análise
SODA	(0.25° X 0.25°)	Mensal	2000-2010
NCEP	(1° X 1°)	Mensal	2000-2010
CMEMS	(0.25° X 0.25°)	Mensal	2000-2010

Simple Ocean Data Assimilation (SODA)

O *Simple Ocean Data Assimilation* (SODA) corresponde à dados de reanálise que integra campos hidrodinâmicos como por exemplo a temperatura, salinidade e as componentes zonal e meridional (u e v) da velocidade. Os dados do SODA são obtidos através do modelo de circulação oceânica denominado *Parallel Ocean Program* simulados a uma resolução horizontal média de 0,25°X0,4° e 40 níveis verticais (Carton et al., 2005; & Carton and Giese, 2008). Os dados do SODA usados

neste estudo correspondem à versão 2.2.4 com a resolução espacial de $0,5^{\circ} \times 0,4^{\circ} \times 40$ a uma resolução temporal mensal. Os dados foram acessados em <http://apdrc.soest.hawaii.edu/>.

National Centers for Environmental Prediction (NCEP)

Dados oceanográficos do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) usados neste trabalho são provenientes do *Global Ocean Data Assimilation System* (GODAS), denominado também por NCEP-GODAS. O NCEP foi concebido para proporcionar dados que possam ser aplicados como condições de fronteira para o sistema global de previsão climática. Os dados usados neste trabalho tem a resolução de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, tem 40 níveis com até 10 metros de resolução nos 200 metros da superfície (Behringer and Leetmaa, 1998; Behringer and Xue, 2004). Os dados do NCEP da temperatura, salinidade e velocidades superficiais analisados no presente estudo foram disponibilizados pelo APDRC (<http://apdrc.soest.hawaii.edu/>).

Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)

Copernicus é um programa que providencia dados com 0.25° de resolução espacial. Estes dados são resultantes da combinação de correntes geostróficas estimadas pelo AVISO, as correntes de Ekman modeladas usando dados de *stress* do vento do ECMWF ERA-Interim e ainda os dados *in situ* provenientes das boias do Argo. Estes dados são amplamente aplicados na gestão ambiental e no monitoramento das mudanças climáticas. Os dados do CMEMS estão disponíveis para a superfície do oceano (0m) e a uma profundidade de 15 metros (Rio et al., 2014).

Csiro Atlas of Regional Seas (CARS)

Para a análise dos perfis verticais da temperatura e da salinidade foi considerada o CARS2009. CARS é uma base de dados médios climatológicos de propriedades do oceano com variabilidade sazonal. Os dados providenciados pelo CARS têm uma resolução espacial de 0.5° , usa como base a *World Ocean Database 2005* (WODO5), *WOCE Global Hydrographic Programa* (v3.0), *surface-pressure-corrected Argo global* entre outras bases de dados. Estes dados são produzidos a partir de todas as medições históricas das propriedades dos oceanos disponíveis, que incluem dados adquiridos por navios de investigação oceanográfica e boias *in situ* (www.cmar.csiro.au/cars).

Tabela 3: *Produtos usados para análises das propriedades oceanográficas.*

Produtos	Resolução espacial	Resolução temporal	Período em análise
SODA	0.25°	Mensal	2000-2010
NCEP	1°	Mensal	2000-2010
CARS2009	0.5°	Mensal	Climatologia

4. Resultados

Os resultados apresentados neste capítulo, são referentes as variabilidades sazonais dos campos de vento, análise da variabilidade interanual do *stress* do vento, correntes superficiais e análise da sazonalidade dos perfis verticais de temperatura e salinidade. Os resultados relacionados ao vento provenientes do QSCAT e CCMP, nomeadamente, velocidade do vento na componente meridional, a magnitude do *stress* do vento para a componente zonal e meridional, *wind stress Curl* e bombeamento de Ekman compreendem o período de 2000-2008. Enquanto para o vento do ASCT foram usados dados referentes ao período compreendido entre 2008 e 2016.

A variabilidade sazonal das correntes superficiais e dos perfis verticais de temperatura e salinidade foi obtida a partir de dados providenciados pelo SODA, NCEP, CMEMS correspondentes ao período de 2000-2010 e a climatologia CARS2009. O CMEMS e o CARS2009 foram usados como produtos de referência respetivamente para as correntes superficiais e para os perfis verticais de temperatura e da salinidade. A análise sazonal dos perfis verticais de temperatura e salinidade, bem como a variabilidade do *stress* do vento foi efetuada com base em amostras, localizadas nas regiões Norte, Centro e Sul do Canal de Moçambique.

4.1. Velocidade e magnitude do vento

A análise sazonal da velocidade e magnitude do vento consistiu na comparação do período do verão com o inverno em toda a região do Canal de Moçambique. Para este estudo, foram considerados os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro para o verão, e os meses de Junho, Julho e Agosto para o inverno.

A comparação entre os três produtos, nomeadamente QSCAT, ASCAT e CCMP referente à sazonalidade da magnitude do vento da componente meridional (v) é mostrada na **Figura 4**. De um modo geral, os três produtos mostram existir uma sazonalidade evidente, com destaque para a região Norte do Canal de Moçambique, caracterizada por ventos do Norte à Nordeste durante o verão (**Figura 4 a, c & e**) e por ventos do Sudeste durante o inverno (**Figura 4 b, d & f**). Esta mudança na direcção do vento é típica dos ventos monçônicos que atuam com maior influência no Norte do Oceano Índico. Nas regiões Centro e Sul do Canal de Moçambique, os ventos não tem sazonalidade aparente e são caracterizados por ventos dos Sul a Sudeste. Contudo, nota-se uma ligeira mudança de direcção do vento no extremo Sul do Canal de Moçambique (25 e 30°E), soprando de Leste para o Oeste durante o verão passando a ser ventos do Nordeste no inverno.

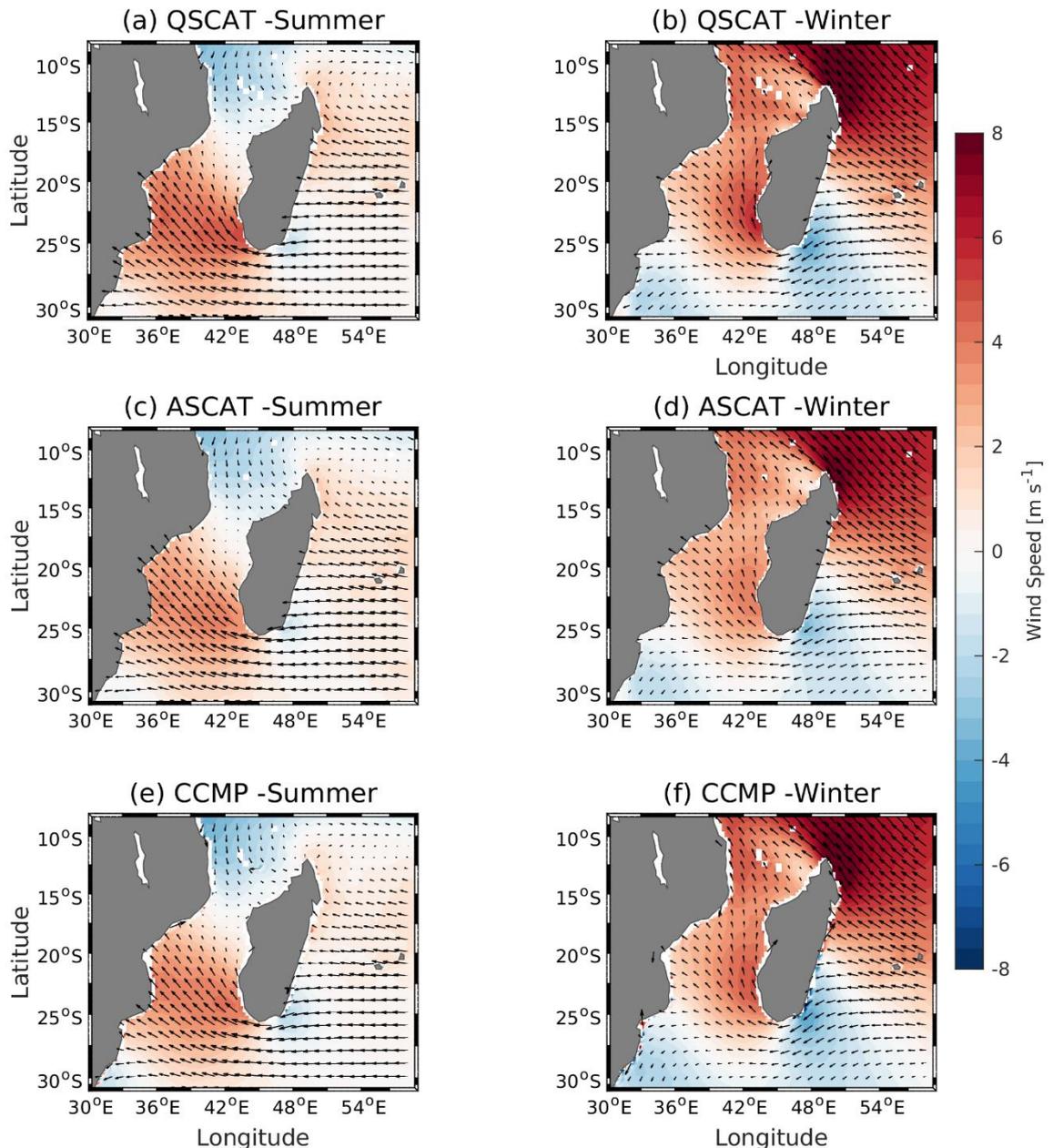


Figura 4: Representação sazonal da magnitude da componente meridional (v) do vento (barra de cores) para os produtos, QSCAT, ASCAT e CCMP. As setas indicam a direcção do vento.

Em relação a magnitude do vento, nota-se uma relativa diferença entre os três produtos. Por exemplo, a magnitude do CCMP é semelhante a do QSCAT, embora os valores da velocidade do vento do CCMP sejam relativamente maiores que os do QSCAT. Entretanto, o ASCAT tem valores menores em comparação aos outros dois produtos (**Figura 5**). Por exemplo, entre os 25 e 30°S próximo da costa de Moçambique verifica-se diferenças da magnitude de $< 2 m s^{-1}$ para o CCMP

que é similar ao QSCAT durante o inverno. Em contrapartida, a magnitude do ASCAT no mesmo local é ligeiramente menor (Figura 4). Contudo, o ASCAT mostra velocidades de vento mais próximo ao QSCAT na mesma região durante o verão. Importa referir que neste trabalho usou-se o QSCAT como produto de referência para efeito de comparação com os dois mais recentes produtos.

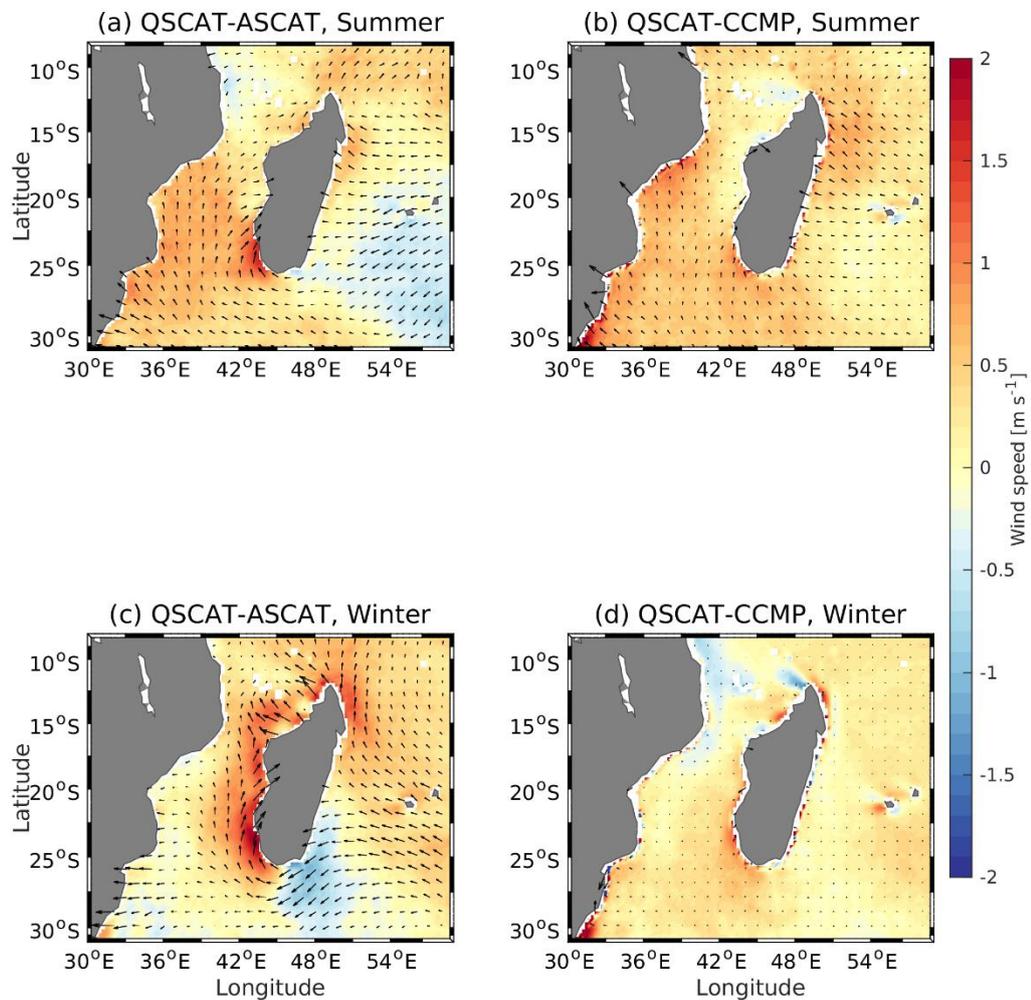


Figura 5: Representação das diferenças da magnitude e velocidade do vento meridional (v) entre os produtos.

4.2. Variabilidade sazonal do *Stress* do Vento

A análise da sazonalidade do *stress* do vento foi feita na base das médias mensais do *stress* do vento correspondente ao período 2000-2008 para o QSCAT e CCMP enquanto para o ASCAT o período de análise foi de 2008-2016. Esta análise foi feita em três locais de amostragem (**Figura 1**) nomeadamente as regiões Norte [(a) North], Centro [(b) Center] e Sul [(c) South] do Canal de Moçambique.

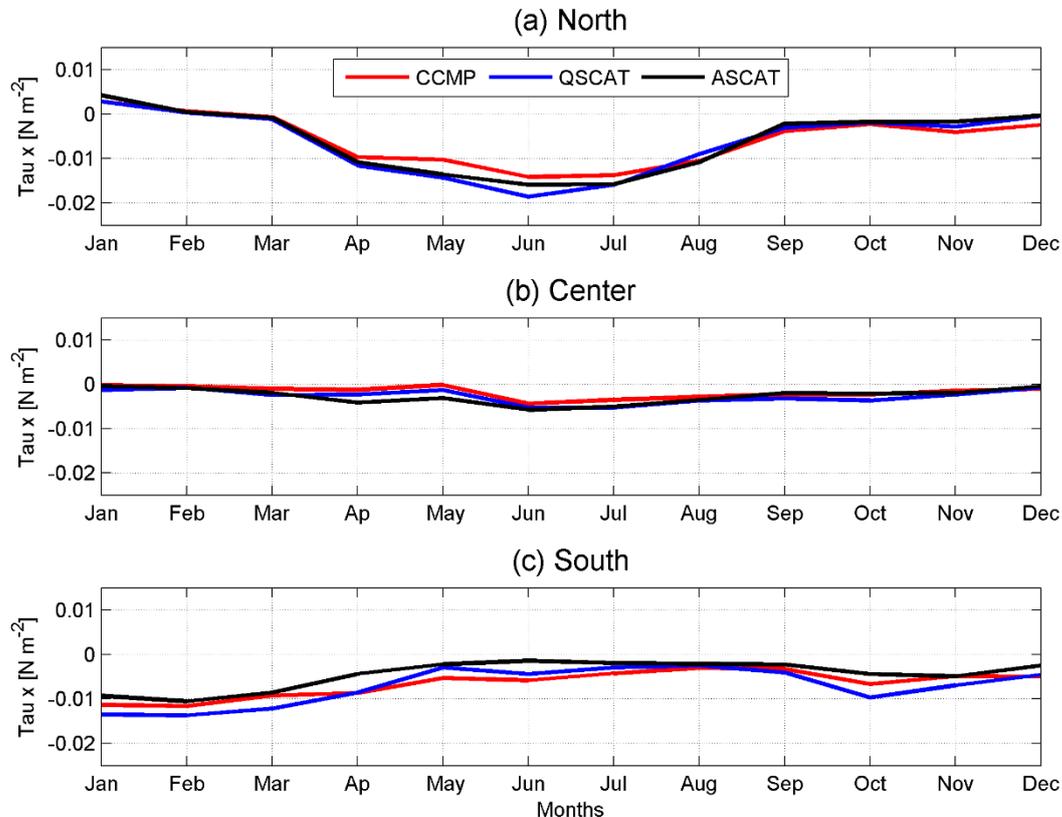


Figura 6: *Stress* do vento na componente zonal nas regiões Norte [(a) North], Centro [(b) Center] e Sul [(c) South]. As cores, vermelha, azul e preta, representam o comportamento do *stress* do vento dos produtos CCMP, QSCAT e ASCAT, respetivamente.

De um modo geral as três bases de dados, CCMP, QSCAT e ASCAT mostram a mesma tendência de *stress* do vento na componente zonal (u) durante o período de análise para as regiões Norte, Centro e Sul (**Figura 6**). Esta tendência é caracterizada por uma clara sazonalidade no Norte do Canal de Moçambique onde verificam-se valores positivos [$0- 0.01 N m^{-2}$] do *stress* do vento nos meses de verão e valores negativos ($\sim -0.02 N m^{-2}$) durante os meses de inverno. Nas outras duas regiões (Centro e Sul), o *stress* do vento tem uma sazonalidade aparente, caracterizada por uma ligeira variabilidade do verão para o inverno. Contudo, a região Sul do Canal de Moçambique a

variação do stress do vento é mais pronunciada (0 a $-0.01 N m^{-2}$), quando comparada à zona Centro onde o stress do vento varia de 0 a $> -0.01 N m^{-2}$.

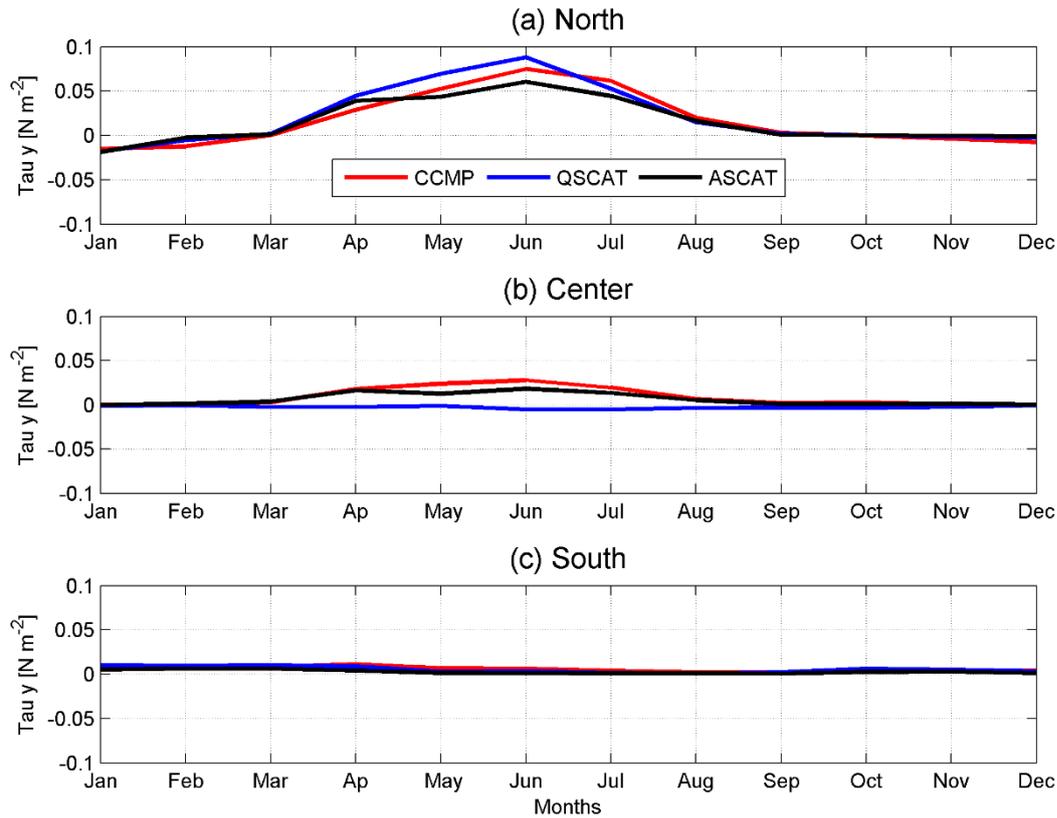


Figura 7: Stress do vento na componente meridional (v) nas regiões Norte [(a) North], Centro [(b) Center] e Sul [(c) South] a partir dos dados disponibilizados pelas bases de dados Quikscat, CCMP e Ascet, representados pelas cores, azul, vermelha e preta, respectivamente.

Para a componente meridional (v), os produtos analisados mostram que existe uma clara sazonalidade somente na região Norte, caracterizada por valores de *stress* do vento de $\sim -0.02 N m^{-2}$ no verão e $\sim 0.09 N m^{-2}$ no inverno.

Em termos de tendência existe uma concordância na representação do *stress* do vento das três bases de dados excepto na região Centro. Na região central do Canal de Moçambique, ao contrário do QSCAT que mostra fraca variabilidade ao longo do ano, o CCMP e o ASCAT tendem a assinalar um ligeiro aumento dos valores do stress do vento durante o inverno. Os valores do *stress* do vento estimados pelo CCMP e pelo ASCAT durante o inverno são de $\sim 0.025 N m^{-2}$ e $\sim 0.020 N m^{-2}$, respetivamente. Por outro lado, os valores estimados pelo QSCAT são quase constantes ao longo do ano ($\sim 0 N m^{-2}$).

No Sul do Canal de Moçambique, todos os produtos mostram fraca variabilidade do *stress* do vento ao longo do ano. Todavia, os valores de *stress* do vento são relativamente maiores nos meses do verão quando comparados ao período de inverno.

4.3. Wind stress Curl

Foi feita a comparação da variabilidade sazonal do *wind stress curl* dos três produtos, QSCAT, ASCAT e CCMP para toda a região do Canal de Moçambique (**Figura 8**). Em analogia à análise efetuada com a velocidade e magnitude do vento, para o verão foi calculada a média do *wind stress curl* de três meses nomeadamente Dezembro, Janeiro e Fevereiro, e para o inverno a média dos meses de Junho, Julho e Agosto.

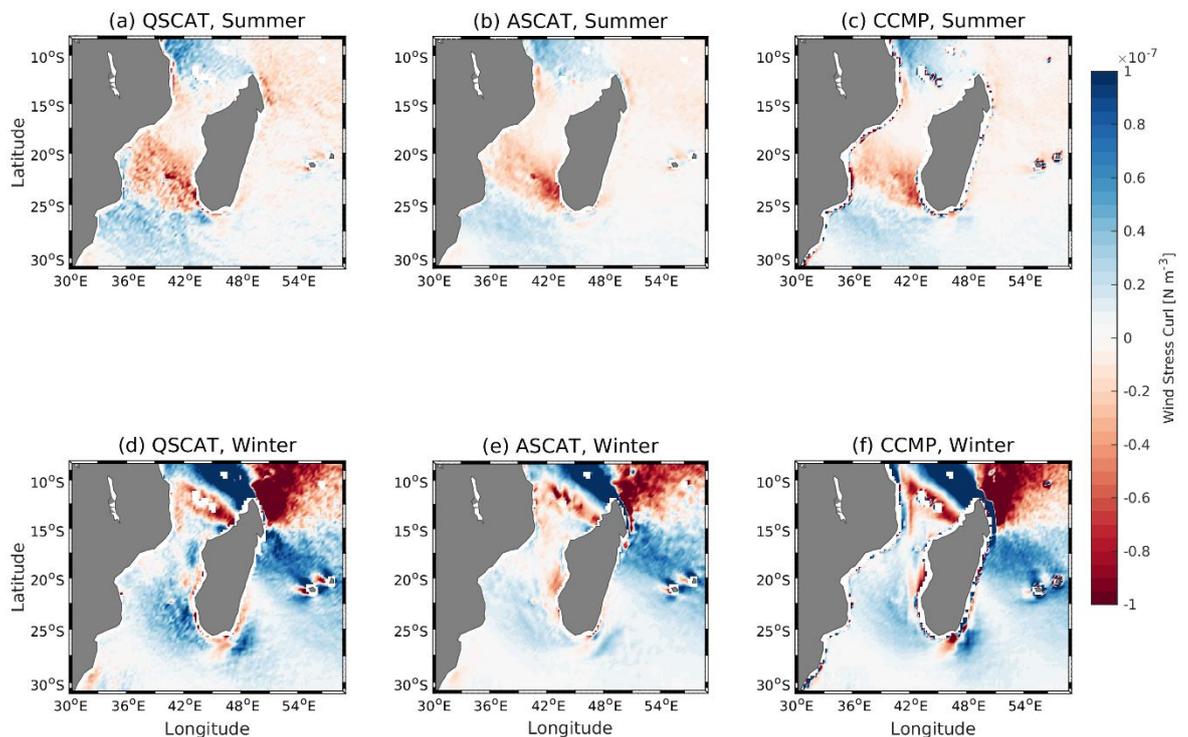


Figura 8: Mapas da variabilidade sazonal da magnitude do *wind stress curl* dos três produtos, QSCAT, ASCAT e CCMP durante o verão (a, b & c) e o inverno (d, e & f). Os valores negativos indicam o *downwelling* e os positivos o *upwelling*.

No geral, verifica-se uma clara sazonalidade nos três produtos ao longo de todo o Canal de Moçambique. Na maior parte da região Norte, a sazonalidade do *wind stress curl* é caracterizada por valores positivos (*upwelling*) durante o verão, mudando para valores negativos (*downwelling*) no período de inverno. Contrariamente da região Norte, no Centro do Canal de Moçambique os valores do *wind stress curl* são maioritariamente negativos (*downwelling*) durante o verão e positivos (*upwelling*) durante o inverno. À semelhança do que se verifica na região Central, também verifica-se valores negativos (*downwelling*) do *wind stress curl* durante o verão e os valores positivos (*upwelling*) no inverno. Contudo, a diferença da magnitude do verão para o inverno é maior na região Sul do Canal de Moçambique.

Importa salientar que apesar da similaridade no padrão da sazonalidade do *wind stress curl* mostrados pelos três produtos no Canal de Moçambique, os valores estimados pelo CCMP e ASCAT são menores quando comparados com o QSCAT (**Figura 9**). Entretanto, a magnitude do *wind stress curl* estimada pelo CCMP é mais próxima do QSCAT.

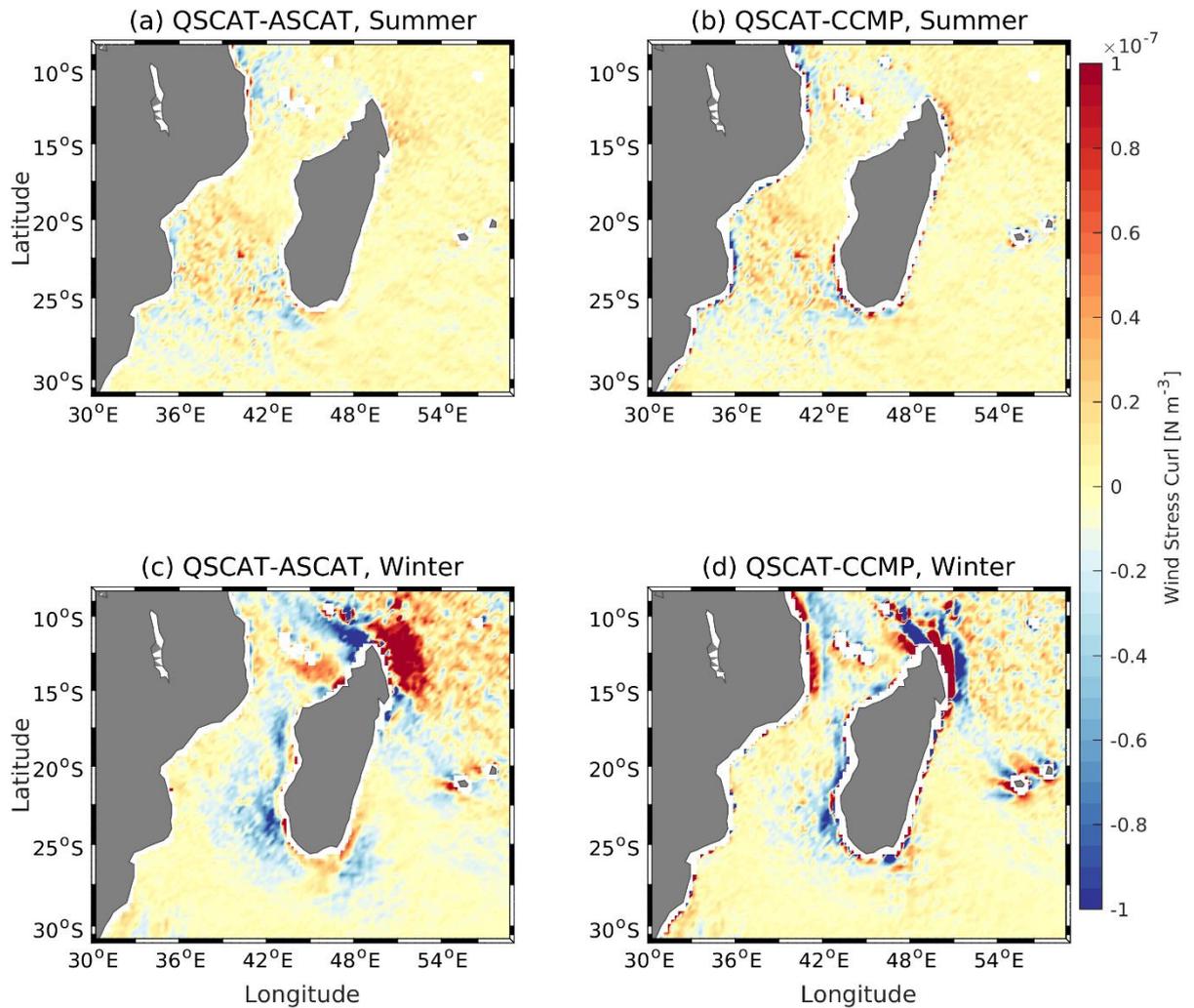


Figura 9: Representação da diferença do wind stress curl entre os produtos QSCAT-ASCAT e QSCAT-CCMP.

4.4. Variabilidade sazonal do Bombeamento de Ekman

Paralelamente ao *wind stress curl*, também foi analisada a variabilidade espacial e temporal do bombeamento de Ekman no Canal de Moçambique. As análises consistiram na comparação do *wind stress curl* a partir de dados provenientes do QSCAT, ASCAT e CCMP (**Figura 10**).

De um modo geral, o bombeamento de Ekman no Canal de Moçambique é sazonal, caracterizado por valores positivos durante o verão no interior do canal alterando o padrão de distribuição espacial

Campos de Vento e Circulação oceânica no Canal de Moçambique: perspectivas a partir de diferentes estimativas

para valores negativos no inverno. A variabilidade espacial do bombeamento de Ekman sugere a ocorrência de *upwelling* durante o verão na maior parte do interior do canal. Todavia, no mesmo período, observam-se valores negativos (*downwelling*) nos limites Sul e Norte do Canal de Moçambique. Nota-se também que o Norte do Canal é dominado por um *upwelling* intenso durante o inverno.

Ao contrário do verão, durante o inverno o interior do canal, são observados valores negativos (*downwelling*). Destaca-se no limite Norte um intenso *downwelling* quando comparado às regiões Centro e Sul do canal.

Em termos comparativos entre as três bases de dados, a magnitude do bombeamento de Ekman estimada pelo CCMP é similar ao produto de referência QSCAT. O ASCAT apresentou valores relativamente inferiores ao QSCAT e CCMP.

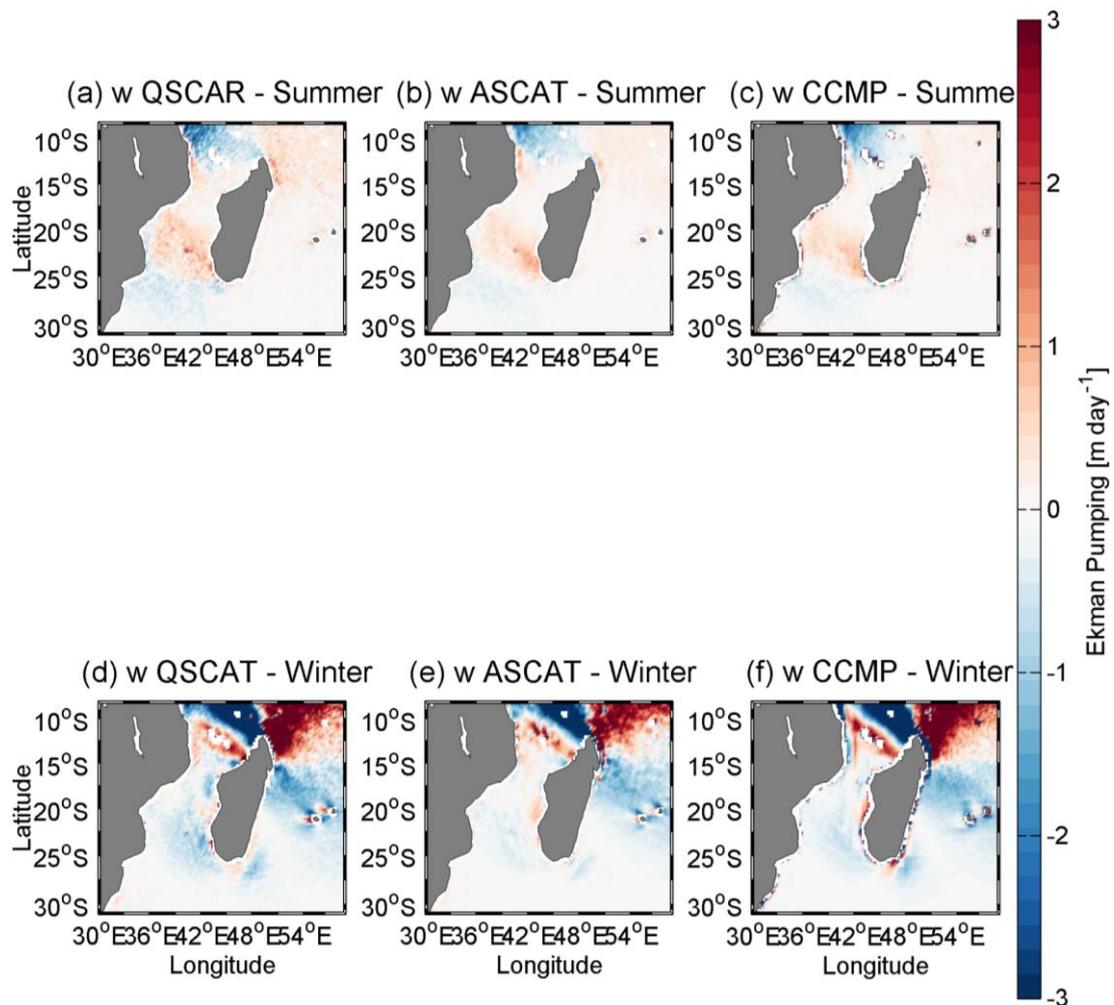


Figura 10: Variabilidade do bombeamento de Ekman durante o verão (a, b & c) e inverno (d, e & f) dos produtos QSCAT, ASCAT e CCMP. Os valores negativos do bombeamento do Ekman indicam *downwelling* e os positivos *upwelling*.

4.5. Variabilidade interanual do *stress* do vento

Para análise da série temporal da componente meridional do *stress* do vento no Canal de Moçambique foi aplicado o wavelet. Neste trabalho, o wavelet foi aplicado para decompôr a série temporal do *stress* meridional do vento estimado pelo QSCAT, ASCAT e CCMP, indicando a frequência temporal (em anos) e a variabilidade significativa (em meses) com que o vento actua nas regiões Norte, Centro e Sul do Canal de Moçambique. Os resultados mostram a variância da série temporal local referente ao espectro de energia do wavelet (**wavelet power spectrum, subplots a-c das figuras 11-12**) e o espectro de variância global (**global wavelet spectrum, subplots d-f das figuras 11-12**), com nível de significância de 95%. Note que a análise diferenciada da variabilidade significativa é efetuada apenas entre o QSCAT e CCMP pois tem o mesmo período de análise (2000 a 2008), e os dados do ASCAT (2008-2016) nesta análise servem apenas para deteção de semelhanças na frequência temporal.

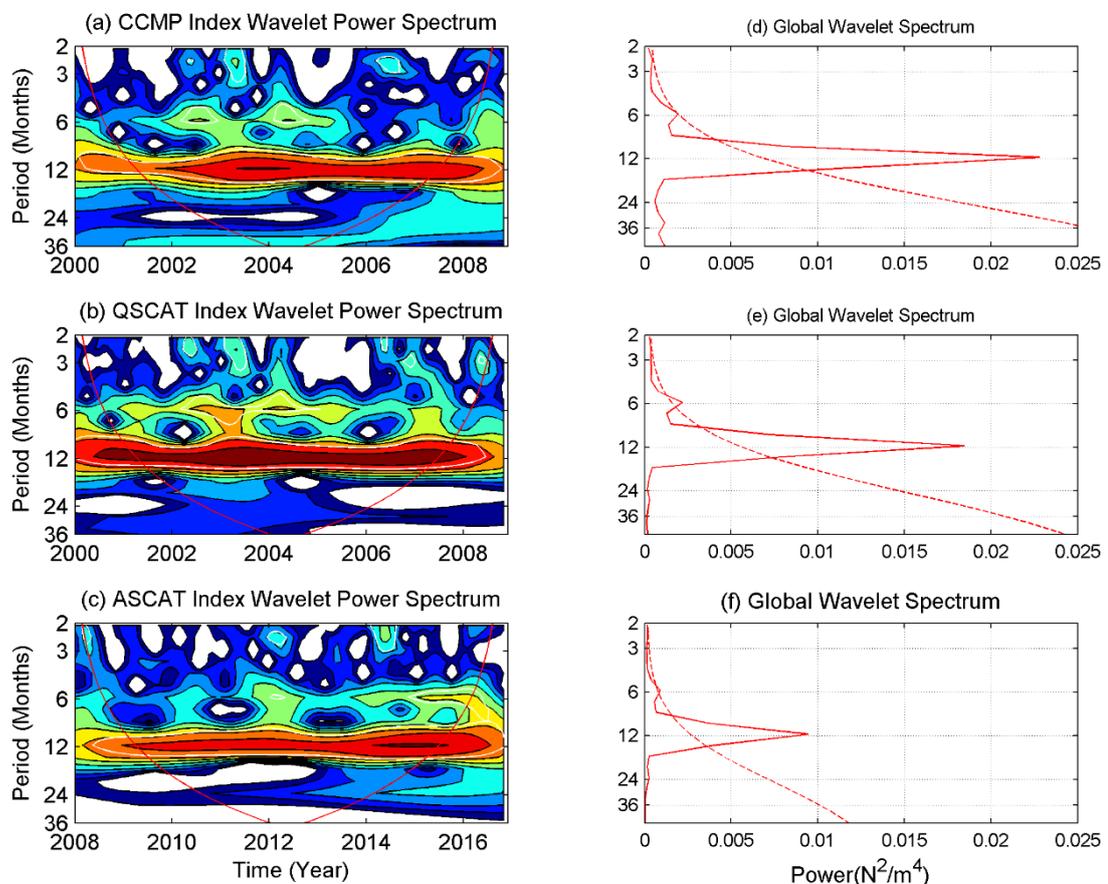


Figura 11: Análise wavelet do *stress* do vento para a região Norte do Canal de Moçambique para as bases de dados Quikscat, Ascata e CCMP. A linha vermelha mostrada na figura a, b & c representam o nível de confiança que é de 95%. Nas figuras d, e & f, a linha tracejada indica a significância global do espectro.

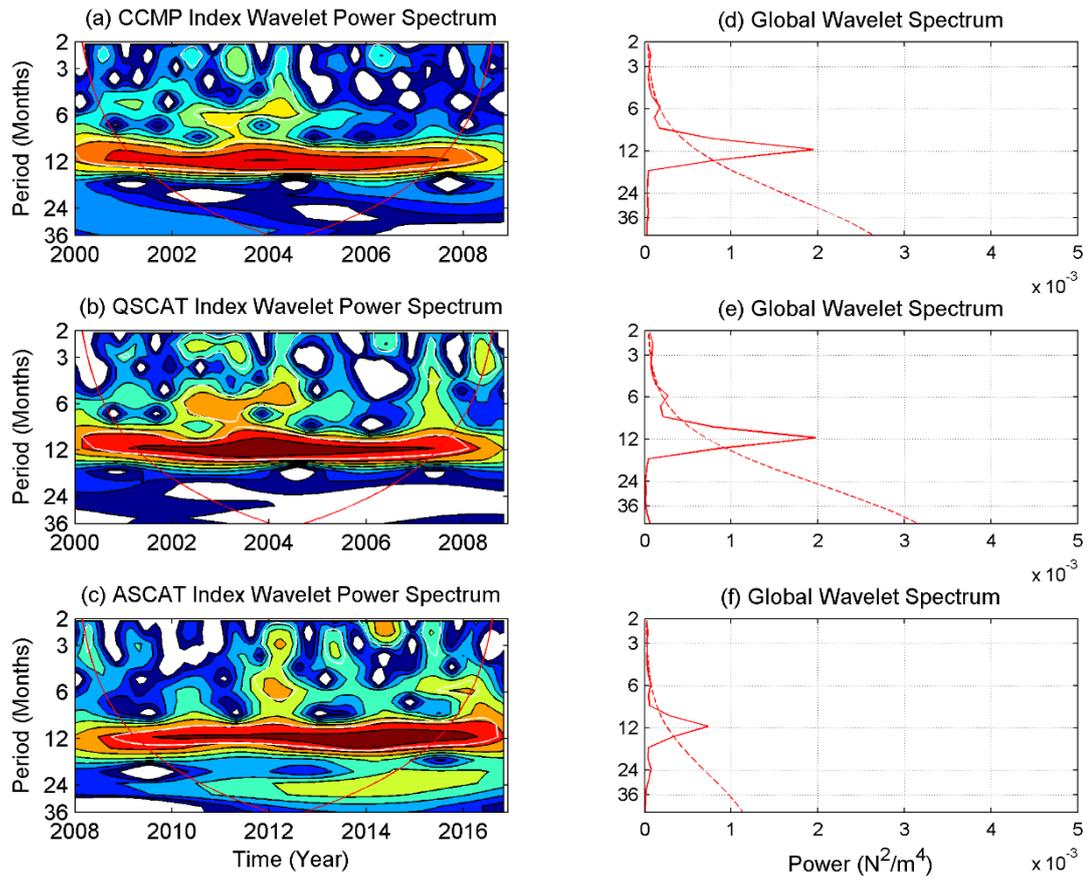


Figura 12: Espectro da energia wavelet na região Centro do Canal de Moçambique dos produtos Quikscat, Ascet e CCMP é mostrado nas figuras a, b & c, com um nível de confiança de 95% (linha vermelha). O espectro global é mostrado pela linha vermelha não tracejada.

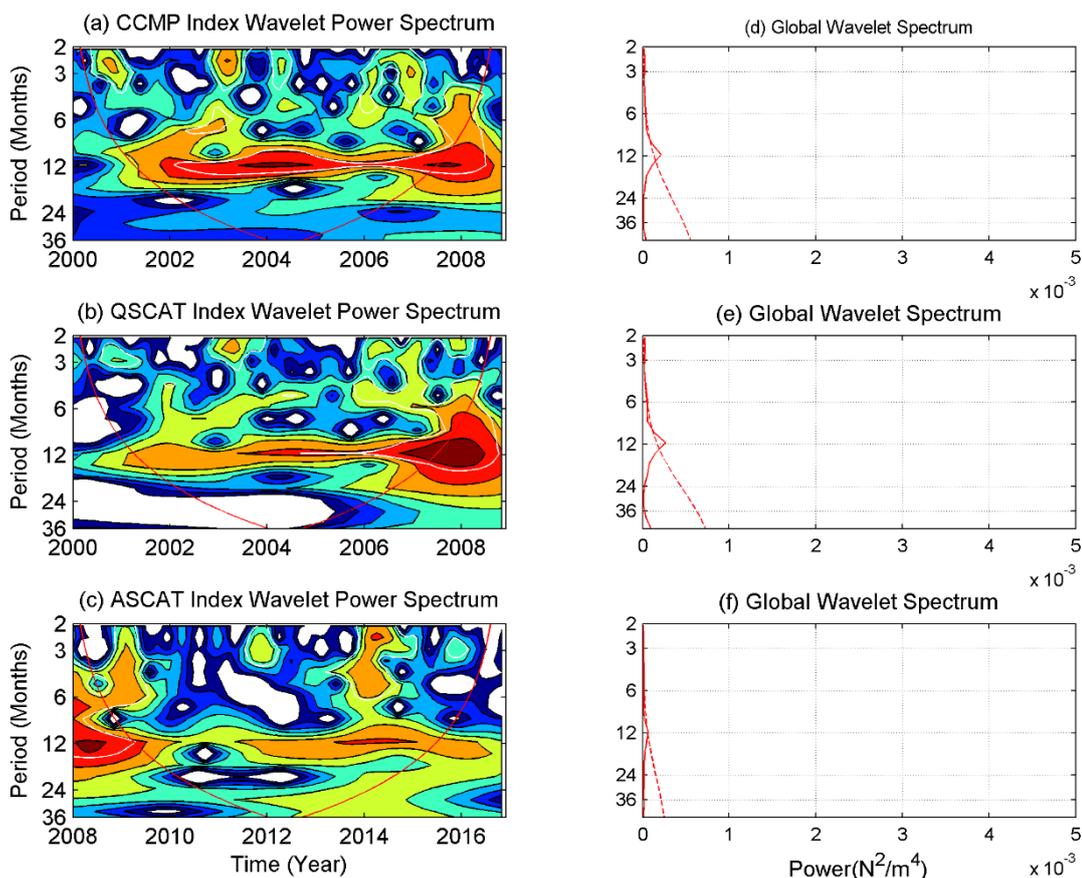


Figura 13: Espectro da potência do wavelet, figuras a, b & c, o nível de confiança de 95% é representado pela parábola positiva de cor vermelha em cada uma das figuras na região Sul do Canal de Moçambique. . O espectro global de energia da análise wavelet, é mostrado pela linha vermelha não tracejada nas figura d, e & f para os produtos QSCAT, ASCAT e CCMP.

No geral, todos os três produtos mostram uma variabilidade significativa do stress do vento meridional similar em escala temporal semianual (6 meses) bem como anual (12 meses), para as três regiões do Canal de Moçambique. Contudo, a frequência temporal dos dois produtos considerados para esta análise, CCMP e QSCAT, é diferente. Por exemplo, nas regiões Norte e Centro do canal a frequência temporal do QSCAT é mais intensa e estende-se por todo período de análise (2000-2008) em comparação com o CCMP, que se restringe apenas ao ano de 2004. Ao contrário das regiões Norte e Centro do canal, no Sul a frequência temporal é mais intensa nas estimativas do CCMP no ano de 2004.

Em termos de espectro de energia do wavelet, a região Norte é que mostra energia mais intensa e de seguida a zona Central. A zona Sul do Canal de Moçambique, o espectro de energia é menor. O que significa que os ventos têm maior variabilidade na região Norte, seguindo a região central e por fim a região Sul.

4.6. Magnitude e sazonalidade das correntes superficiais

Os ventos locais têm influência nas correntes oceânicas. Depois de analisados os campos dos ventos, neste subcapítulo, faz-se análise sazonal das correntes superficiais em toda a região do Canal de Moçambique. Para a análise sazonal, foram efetuadas as médias considerando para o verão os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro, e os meses de Junho, Julho e Agosto para o inverno.

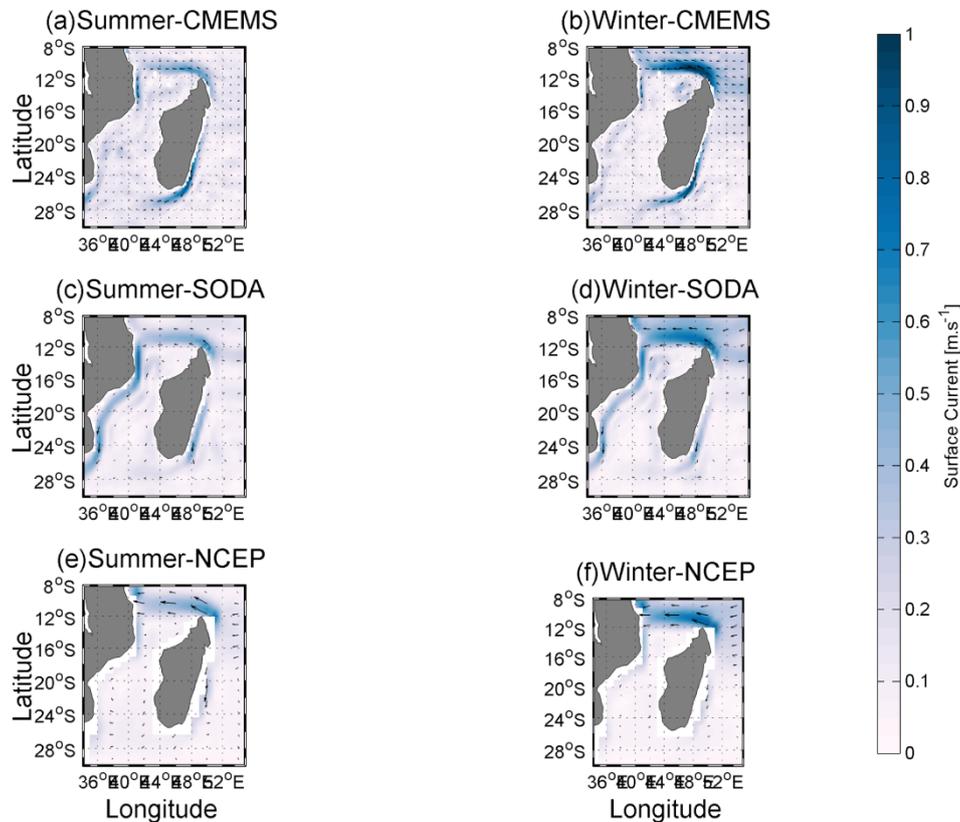


Figura 14: Padrão sazonal das correntes no Canal de Moçambique a partir dos produtos CMEMS, SODA e NCEP. A direcção das correntes é representada pelas setas.

A **Figura 14** faz a comparação sazonal e da magnitude das correntes superficiais no Canal de Moçambique. No limite Norte do Canal de Moçambique verifica-se que a Corrente Sul Equatorial (SEC) é mais intensa durante o inverno em relação ao período de verão tanto para as velocidades estimadas pelo satélite (CMEMS) bem como para as velocidades dos dois produtos de reanálises, SODA e NCEP. Porém, os dois produtos de reanálises subestimam as velocidades quando comparados com o satélite. Em termos de localização geográfica, a SEC que se limita em torno dos 10°S no CMEMS, é mais extensa no SODA e NCEP chegando a alcançar a latitude de 8°S. Na região costeira de Moçambique, nota-se a Corrente de Moçambique é contínua no SODA, ao contrário do CMEMS e do NCEP onde a corrente é fragmentada. No CMEMS e no SODA verifica-se a presença de correntes no interior do Canal que devem estar associadas a vórtices persistentes.

Mais a sul, verifica-se uma clara sazonalidade da Corrente Sul Equatorial de Madagáscar (SMEC) no CMEMS, entretanto o SODA mostra mesma corrente sem aparente sazonalidade.

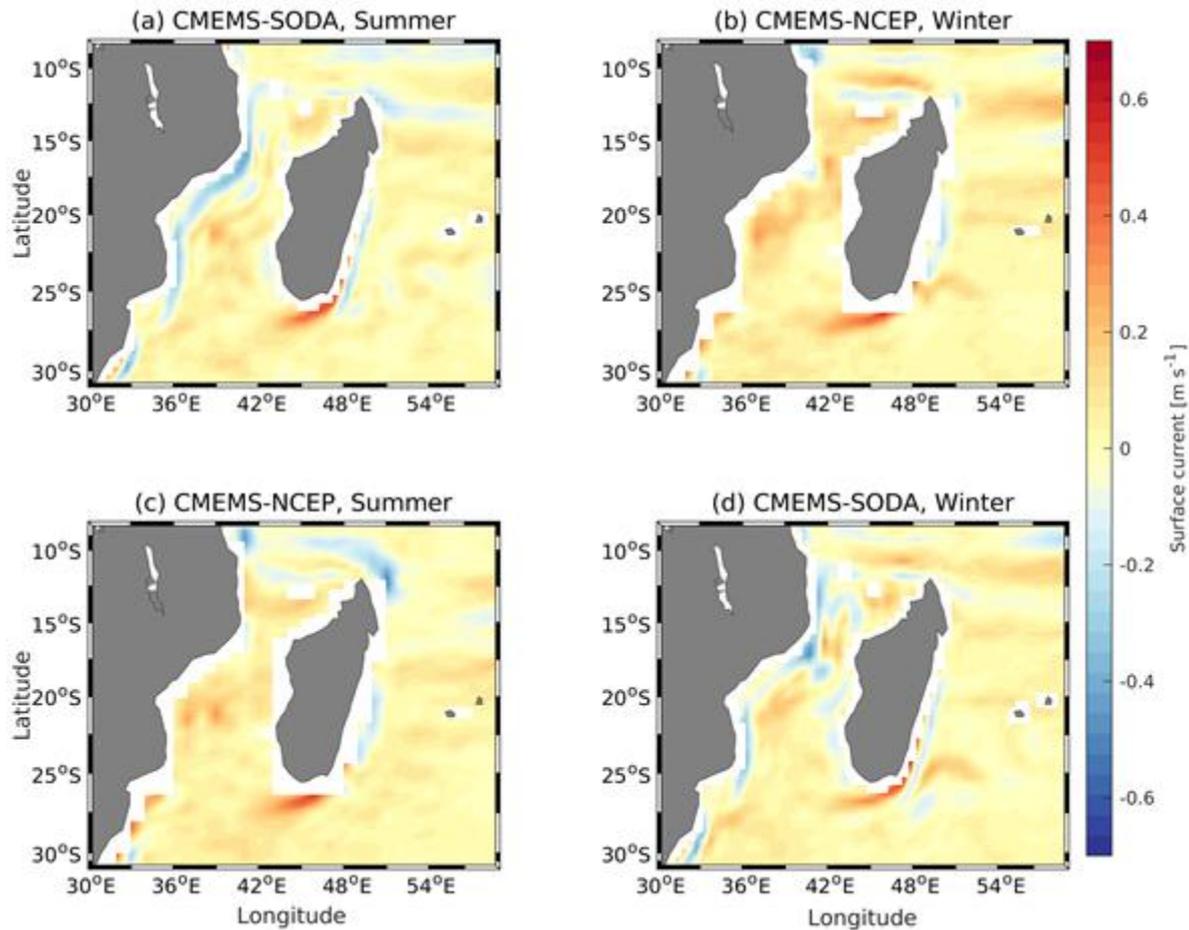


Figura 15: Diferenças de correntes no Canal de Moçambique obtidas a partir dos produtos CMEMS-SODA e CMEMS-NCEP.

4.7. Perfis verticais de Temperatura e da Salinidade

Para analisar a sazonalidade dos perfis de temperatura e da salinidade fez-se a comparação dos perfis do período do verão (Dezembro, Janeiro e Fevereiro) com os do período do inverno (Junho, Julho e Agosto) nas regiões de amostragem do Norte, Centro e Sul do Canal de Moçambique. Nesta análise foi considerada a variabilidade dos 0 a 600 metros de profundidade para ambos períodos e parâmetros. Para análise dos perfis da temperatura e salinidade no Canal de Moçambique, foram consideradas as mesmas bases de dados, CARS2009, SODA e NCEP. Para estas análises, o CARS2009 foi considerado como o produto de referência.

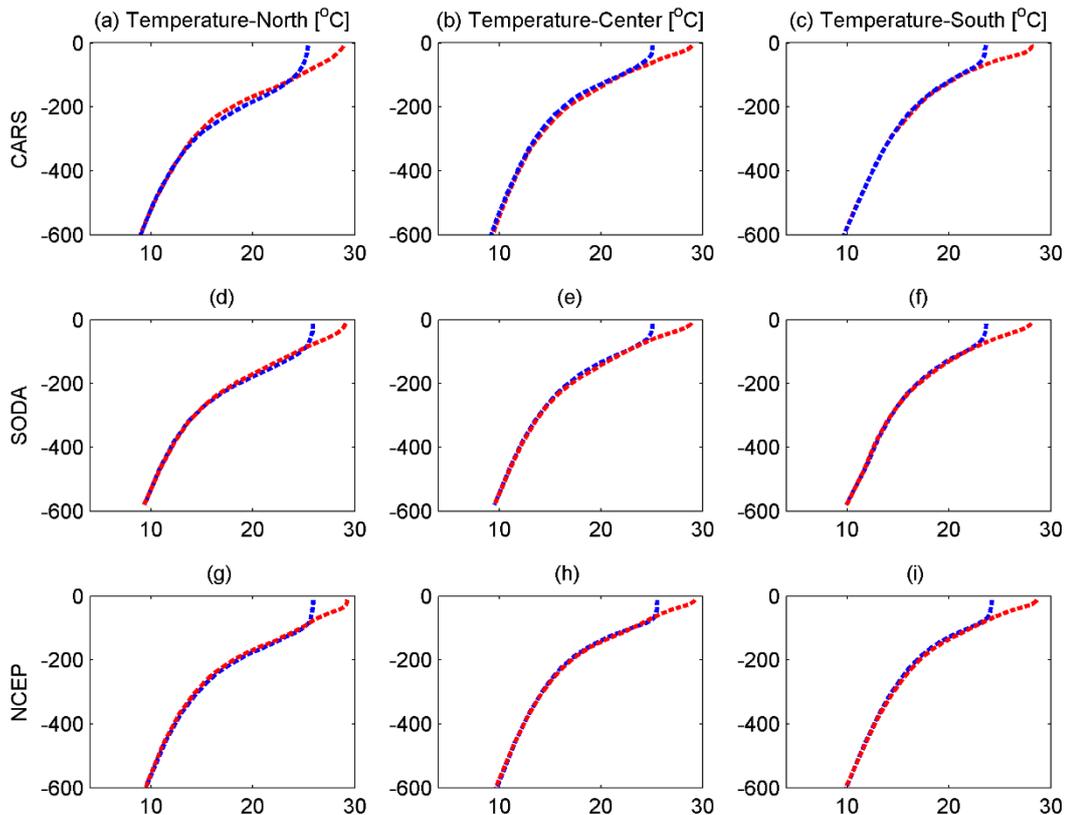


Figura 16: Perfis verticais de temperatura dos três produtos, SODA, CARS2009 e NCEP nas três regiões de amostragem no Canal de Moçambique. A linha vermelha indica o perfil durante o verão e a azul durante o inverno.

Os perfis de temperatura em profundidade dos produtos analisados mostram uma sazonalidade evidente em todas as regiões. Tanto o SODA como o NCEP, apresentam o mesmo perfil de variabilidade da temperatura e similar ao CARS2009, com os valores máximos na superfície de aproximadamente 28°C no verão, e valores mínimos na superfície de cerca de 24°C no inverno. As diferenças de temperatura entre os três produtos nas três regiões são ínfimas.

Todos os produtos mostram uma clara sazonalidade da camada de mistura que é maior no inverno e menor no verão. Contudo, há ligeiras diferenças na espessura da camada de mistura. Diferentemente do SODA, o NCEP mostra ser o produtos que melhor expressa a espessura da camada de mistura na região Norte do Canal de Moçambique.

Na análise da profundidade da termoclina, verifica-se uma sazonalidade parcial da termoclina em todos os produtos e regiões. Os produtos SODA e NCEP indicam uma profundidade de termoclina que varia no intervalo aproximado de 100 a 300 metros, em concordância com a referência (CARS2009). Todavia, particularmente o NCEP é que melhor ilustra o gradiente vertical dos perfis de temperatura nas regiões Centro e Sul em comparação do SODA.

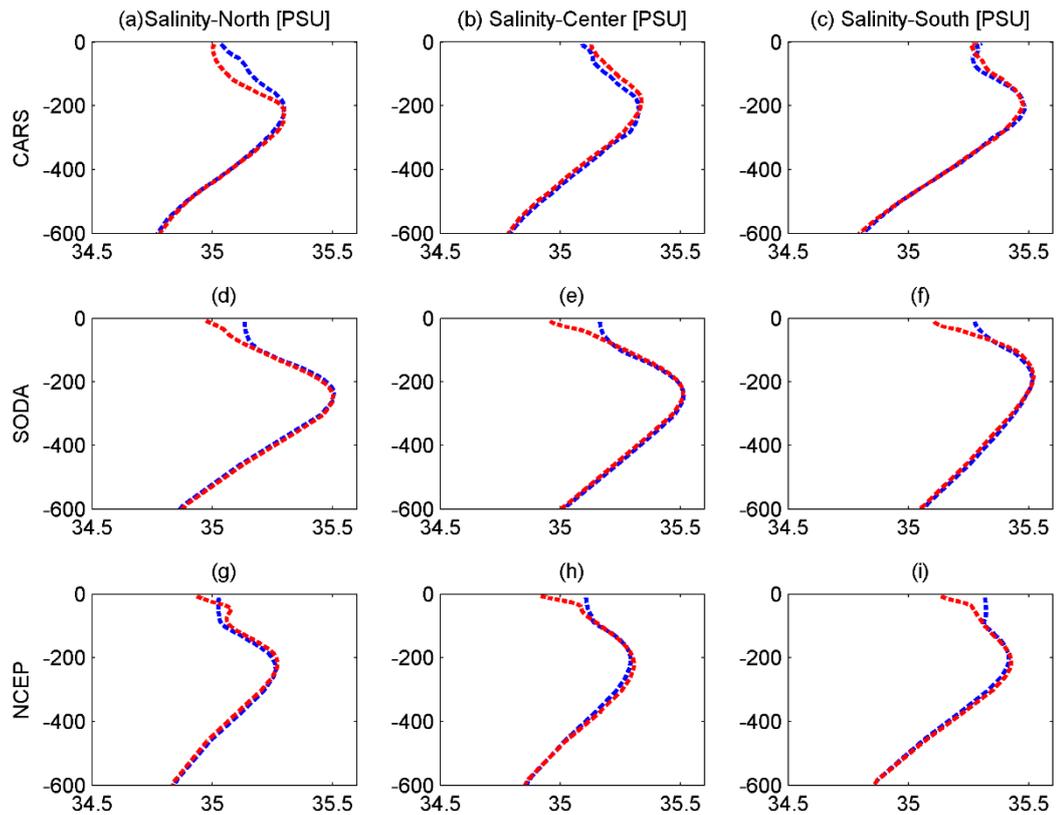


Figura 17: Perfis verticais da salinidade nos três produtos, SODA, CARS2009 e NCEP no intervalo de 0 aos 600 metros de profundidade, o verão é representado pela cor vermelha e inverno pela azul.

De um modo geral, os perfis verticais da salinidade obtidos pelo CARS2009 apontam para a inexistência de sazonalidade deste parâmetro em todas as regiões em análise, Norte, Centro e Sul do Canal de Moçambique. Ao contrário do SODA e NCEP que sugerem uma ligeira sazonalidade dos perfis verticais da salinidade. A fraca sazonalidade é caracterizada por valores baixos de salinidade na superfície durante o verão e valores relativamente maiores de salinidade durante o período de inverno. O SODA destaca-se como sendo a base de dados que apresenta uma sazonalidade permanente com uma diferença aproximada de 0.1 PSU do verão para o inverno.

Nota-se também que os primeiros 100 m a salinidade tem um padrão diferente entre os três produtos, principalmente na região Norte do Canal de Moçambique, como por exemplo a existência de um máximo de salinidade aos ~ 70 metros no NCEP, que o CARS2009 e SODA não mostram. Todavia, todos os perfis mostram a existência de um máximo de salinidade, localizado entre os 200 e 300 metros de profundidade, para todas as regiões do Canal de Moçambique.

5. Discussão

No presente estudo foram utilizados dados atmosféricos do vento e oceanográficos como temperatura, salinidade e correntes superficiais provenientes das estimativas remotas com recurso aos satélites bem como as reanálises (combinação de dados observacionais e modelos) e também dados *in situ* (climatológicos), com intuito de aferir sobre a representação sazonal e espacial destes parâmetros no Canal de Moçambique.

Inicialmente, foram analisados os campos de vento que incluiu variabilidade espacial e temporal da velocidade e magnitude do vento, *Stress* do Vento, *wind stress Curl* e do Bombeamento de Ekman. Para os campos de vento, foram usados dados de QSCAT, CCMP e ASCAT para efeitos comparativos. Note que o QSCAT é um produto amplamente usado para análises da dinâmica oceânica em escalas locais, regionais e globais (Collins et al., 2012; Collins et al., 2014, Jose et al., 2014), por este motivo foi considerado como produto de referência. Entretanto, o QSCAT não está operacional. O que torna importante a análise de outras bases de dados para efeitos estudos da dinâmica oceânica no geral e particularmente no Canal de Moçambique, com conhecimentos das potencialidades dos mesmos.

Nas comparações feitas, de um modo geral o CCMP mostra ser a melhor base de dados para representar os campos de vento no Canal de Moçambique quando comparado ao ASCAT. Contudo, em termos locais, na região sul do Canal, os três produtos tem o mesmo padrão de variabilidade sazonal dos campos analisados, velocidade e magnitude do vento, *stress* do vento, *wind stress Curl* e do Bombeamento de Ekman. Na região central do canal por exemplo, tanto o CCMP como o ASCAT apresentam valores relativamente superiores dos campos dos ventos em relação ao produto de referência (QSCAT). Uma das razões para estas diferenças é o facto de o QSCAT apresentar dificuldades em estimar os ventos em condições extremas do oceano (Hoffman & Leidner, 2004; Chelton et al., 2005; Alvarez et al., 2013). Concorre para a robustez dos campos do vento do CCMP em relação ao ASCAT entre outros fatores, o facto de as suas estimativas serem resultantes da combinação de dados modelados e observados, incluindo os dados provenientes do QSCAT e do ASCAT (Atlas et al., 1996).

Depois da análise dos campos de vento, fez-se de seguida a comparação sazonal das correntes superficiais do Canal de Moçambique a partir dos dados de NCEP, SODA e CMEMS. O CMEMS foi considerado como o produto de referência nesta análise. O CMEMS é resultado da combinação de dados *in situ*, estimados pelos satélites e modelos numéricos (Rio et al., 2014). Os dados do CMEMS foram testados estatisticamente e revelaram estar próximo dos padrões de circulação superficial dos oceanos (Ravdas et al., 2018).

Em comparação com o SODA, as correntes do NCEP mostram concordância com o padrão de circulação estimado pelo CMEMS no Canal de Moçambique, como por exemplo na representação descontínua da Corrente de Moçambique. A existência de uma corrente contínua nesta região é questionada pelos mais recentes estudos que sugerem a presença de vários vórtices de mesoescala (Seatre & da Silva, 1982 & Lutjeharms et al., 2000).

Por último, foram analisados os perfis de temperatura e da salinidade a partir de dados fornecidos pelo SODA, NCEP e CARS2009. O CARS2009 foi usado como produto de referência pelo facto de por serem produzidos pela combinação de dados de todas as medições históricas das propriedades dos oceanos disponíveis, como de navios de investigação oceanográfica e boias *in situ* (www.cmar.csiro.au/cars). Os perfis verticais da temperatura do NCEP mostram o padrão de distribuição similar ao CARS2009, caracterizado por uma camada de mistura e termoclina bem definidos. As diferenças na representação dos perfis entre o NCEP e o SODA devem ser associadas aos dados de entrada das duas reanálises.

Em relação aos perfis verticais da salinidade, o SODA destaca-se como sendo a base de dados que apresenta uma sazonalidade permanente com uma diferença aproximada de 0.1 *PSU* do verão para o inverno à semelhança do CARS2009. Nota-se todavia que todos produtos mostram a existência de um máximo de salinidade, localizado entre os 200 e 300 metros de profundidade, para todas as regiões do Canal de Moçambique.

6. Conclusões

O presente trabalho analisou os campos de vento provenientes de três diferentes produtos, nomeadamente QSCAT, ASCAT e CCMP. Foram de seguida efetuadas análises correspondentes à variabilidade espacial e temporal do vento bem como a velocidade e magnitude, *stress* do vento, *wind stress Curl* e do bombeamento de Ekman. Por fim, fez-se a avaliação da circulação oceânica, as propriedades da temperatura e salinidade no Canal de Moçambique a partir de duas reanálises SODA e NCEP, estas reanálises foram comparadas às estimativas do altímetro CMEMS e ainda à climatologia CARS2009. Depois das análises feitas permitiu concluir que:

- O CCMP mostra ser a melhor base de dados para representar os campos de vento, nomeadamente, a velocidade e magnitude, *stress* do vento, *wind stress Curl* e do bombeamento de Ekman, quando comparado ao ASCAT.
- Em comparação com o SODA, as correntes do NCEP mostram concordância com o padrão de circulação estimado pelo CMEMS.
- Os perfis verticais da temperatura do NCEP mostram o padrão de distribuição similar ao CARS2009, no Canal de Moçambique.

7. Referências bibliográficas

- Alvarez, I., Gomez-Gesteira, M., DeCastro, M., & Carvalho, D., (2013). Comparison of different wind product and buoy wind data seasonality and interannual climate variability in the southern bay of Biscay (2000-2009). *Deep-Sea Research II*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.09.028i>, 38-48.
- Atlas, R., R. N. Hoffman, S. C. Bloom, J. C. Jusem, and J. Ardizzone, 1996: A multiyear global surface wind velocity data set using SSM/I wind observations. *American Meteorological Society*. 77, 869–882.
- Behringer, D. W., and Y. Xue, (2004). Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: The Pacific Ocean. Eighth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface, AMS 84th Annual Meeting, Washington State Convention and Trade Center, Seattle, Washington, 11-15.
- Behringer, D. W., M. Ji, & A. Leetmaa, (1998). An improved coupled model for ENSO prediction and implication for ocean initialization. Part I: The ocean data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1013-1021.
- Bentamy, A., Croize-Fillon, & D. Perigaud C. (2008). Characterization of ASCAT measurements based on buoy and QuikSCAT wind vector observations. *Ocean Science*. 4, 265–274, 2008.
- Bonino, G., Masina, S., Iovino D., Storto A. & Tsujino H. (2019). Eastern Boundary Upwelling Systems response to different atmospheric forcing in a global eddy-permitting ocean model. *Journal of Marine Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.05.004>, 103178.
- Cáceres-Soto, M., Sepúlveda H.H., Munoz-Mellado K. & Artal, O. (2019). Comparison of QuikSCAT, WRF and bouy ocean surface wind data off Valparaiso Bay, Chile. *Journal of Marine Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103263>, 103263
- Capet X. J., Marchesiello, P., & McWilliams, J. C. (2004). Upwelling response to coastal wind profiles. *Geophysical Research Letters*, vol. 31, L13311, doi:10.1029/2004GL020123, 2004.
- Carton, J. A. & Giese (2008). A Reanalysis of Ocean Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Mon. Weather Rev.*, 136, 2999-3017.
- Carton, J. A., G. A. Chepurin, & L. Chen (2016). An updated reanalysis of ocean climate using the Simple Ocean Data Assimilation version 3 (SODA3), manuscript in preparation. [Version 3.3.1]
- Carton, J. A., Giese, B. S., & Grodsky S. A. (2005). Sea level rise ond the warming of the oceans in the SODA ocean reanalysis. *J. Geophys. Res.*, 110, art10.1029/2004JC0.

- Carton, J.A. & Giese, B. S. (2005). SODA: A Reanalysis of Ocean Climate. *Journal of Geophysical Research:Oceans*. Vol.110, doi:10.1029/2004JC002817, 2005.
- Chelton, D. B. & Freilich M. H. (2004). Scatterometer-Based Assessment of 10-m wind Analyses from the Operational ECMWF and NCEP Numerical Weather Prediction Models. *American Meteorological Society*. 409–429.
- Chelton, D. C., Freilich M. H. Sienkiewicz, J. M. & Von Ahn, J. M. (2005). On the Use of QuikSCAT Scatterometer Measurements of Surface Winds for Marine Weather Prediction. *American Meteorological Society*.
- Chou, K., Wu, C., & Lin S. (2013). Assessment of the ASCAT wind error characteristics by global dropwindsonde observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, 9011–9021, doi:10.1002/jgrd.50724.
- Cirano, M., Mata, M. M., Campos, E. J. D. & Deiro, N. R. (2006). A circulação oceânica de larga-escala na região oeste do atlântico sul com base no modelo de circulação global OCCAM. *Revista Brasileira de Geofísica* (2006) 24(2): 209-230.
- Collins, C., Hermes, J. C. & Reason, C. J. C. (2014). Mesoscale activity in the Comoros Basin from satellite altimetry and a high-resolution ocean circulation model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 119, doi:10.1002/2014JC010008, 4745–4760.
- Collins, C., Reason, C. J. C. & Hermes, J. C. (2012). Scatterometer and reanalysis wind products over the western tropical Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, C03045, doi:10.1029/2011JC007531.
- Echevin, V., Colas, F., Chaigneau, A. & Penven, P. (2011). Sensitivity of the Northern Humboldt Current System nearshore modeled circulation to initial and boundary conditions. *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, C07002, doi: 10.1029/2010JC006684, 2011.
- Halo, I., Backeberg, B., Penven, P., Ansorge, I., Reason, C. & Ullgren, J. E. (2013). Eddy properties in the Mozambique Channel: A comparison between observations and two numerical ocean circulation models. *Deep-Sea Research II*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.10.015>, 38-53.
- Hoffman, R. N. & Leidner, S. M. (2004). An Introduction to the Near–Real–Time QuikSCAT Data. *Atmospheric and Environmental Research*. Vol. 20, 476–493.
- José, Y. S., Aumont, O., Machu, E. Penven, P., Moloney, C.L. &Maury, O. (2014). Influence of mesoscale eddies on biological production in the Mozambique Channel: Several contrasted examples from a coupled ocean-biogeochemistry model. *Deep-Sea Research II*. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.10.018>, 79-93.

- Lamont, T., Roberts M. J., Barlow, R. G., & Berg, M. (2010). Circulation patterns in the Delagoa Bight, Mozambique, and the influence of deep ocean eddies. *African Journal of Marine Science*. doi: 10.2989/1814232X.2010.538147.
- Lutjeharms, J. R. E., Cooper, J. & Roberts, M. (2000). Upwelling at the inshore edge of the Agulhas Current. *Continental Shelf Research*. 20 (2000) 737-761.
- Machua, E., Biastoch, A., Oschlies, A., Kawamiyab, M., Litjeharms J. R. E. & Garc-ona, V. (2004). Phytoplankton distribution in the Agulhas system from a coupled physical–biological model. *Deep-Sea Research I*. 52 (2005) 1300–1318.
- Malauene, B. S., Shillington, F. A., Roberts, M. J. & Moloney, M. J. (2008). Cool, elevated chlorophyll-a waters off northern Mozambique. *Deep-Sea Research II*. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.10.017>, 68-78.
- Ravdas, M., Zacharioudaki, A. & Korres G. (2018). Implementation and validation of a new operational wave forecasting system of the Mediterranean Monitoring and Forecasting Centre in the framework of the Copernicus Marine Environment Monitoring Service. *Natural Hazards Earth System Sciences*. 18, 2675–2695, 2018.
- Rio, M. H., Mulet, S. & Picot, N. (2014). Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents, *Geophys. Res. Lett.* doi:10.1002/2014GL061773, 8918-8925.
- Risien, C. M., & Chelton D. B. (2008). A Global Climatology of Surface Wind and Wind Stress Fields from Eight Years of QuikSCAT Scatterometer Data. *Journal of Physical Oceanography*. doi: 10.1175/2008JPO3881, 2379-2413.
- Saetre, R. & Da Silva, A. J. (1982). Water masses and Circulation of the Mozambique Channel. *Revista de Investigação Pesqueira*. 3, pp. 1-83.
- Saetre, R. (1985). Surface currents in the Mozambique Channel. *Deep-Sea Research*. Vol 32. No 12. pp 1457 to 1477. 1985.
- Servais, T., Danelian, T., Harper, D. A. T & Munnecke, A. (2014). Possible oceanic circulation patterns, surface water currents and upwelling zones in the Early Palaeozoic. *GFF*, Vol. 136 (Pt. 1, March), pp. 229–233. Geologiska Foreningen. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/11035897.2013.876659>.
- Schott, F. (1983). Monsoon Response of the Somali Current and Associated Upwelling. *Prog Oceanog*. 1983, Vol 12, 357-381.
- Schott, F. A., Xie, S. P. & McCreary Jr, J. P. (2009). Indian Ocean circulation and climate variability, *Rev. Geophys.*, 47, RG1002, doi:10.1029/2007RG000245, 777-780.

- Swart, S., Speich, S. Ansoorge, I. J. & Lutjeharms J. R. E. (2010). An altimetry-based gravest empirical mode south of Africa: 1. Development and validation. *J. Geophys. Res.*, 115, C03002. doi:10.1029/2009JC005299.
- Boje, R. & Tomczak, M.(1980). Upwelling Ecosystems. Researchgate. doi: 10.1007/978-3-642-66985-9_4.
- Wagner, W., Hahn, S., Kidd, R., Melzer, T., Bartalis, Z., Hasenauer, S., Figa-Saldana J., De Rosnay P., Jann, A., Schneider S., Komma J., Kubu, G., Brugger K., Aubrecht C., Zuger J.,Garhard K., Brugger K., Aubrecht, C., Zuger, J., Gangkofner U., Kienberger S., Brocca L., Wang Y., Bloschl, G., Eitzinger, J., Steinnocher, K., Zeil P. & Rubel F. (2012). The ASCAT Soil Moisture Product: A Review of its Specifications, Validation Results and Emerging Applications. *Open Access Article*. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 22, No. 1, 5–33.
- Woodberry, K. E., Luther, M. E., & O'Brien J. J. (1989). The Wind-Driven Seasonal Circulation in the Southern Tropical Indian Ocean. *Marine Science Faculty Publications*. 499. https://scholarcommons.usf.edu/msc_facpub/499 .
- http://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/soda_2.2.4.php
- http://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/godas_monthly.php
- www.cmar.csiro.au/cars