

EFEITO DO VENTO E DO FLUXO DE CALOR NO CICLO ANUAL DA CLOROFILA NO NORTE DO CANAL DE MOÇAMBIQUE

Avelino Ângelo Adolfo Langa

*Tese apresentada como parte dos requisitos
para a obtenção do Título de Doutor
no Programa de Pós-graduação em Oceanografia
Física, Química e Geológica-PPOFQG.*

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Rezende Calil

Durante o desenvolvimento deste trabalho o autor recebeu auxílio financeiro da
CAPES/PGCD.

Rio Grande, Março de 2018

EFEITO DO VENTO E DO FLUXO DE CALOR NO CICLO ANUAL DA CLOROFILA NO NORTE DO CANAL DE MOÇAMBIQUE

Tese apresentada como parte dos requisitos
para a obtenção do Título de Doutor
no PPOFQG.

'All the river run into the sea,
yet the sea is not full.' - Ecclesiastes, 1.7

EFEITO DO VENTO E DO FLUXO DE CALOR NO CICLO ANUAL DA CLOROFILA NO NORTE DO CANAL DE MOÇAMBIQUE

Esta versão da tese contém as correções e alterações sugeridas pela Comissão avaliadora durante a defesa da versão original do trabalho, realizada em 28/03/2018. Uma cópia da versão original está disponível na Secretaria no Programa de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica-PPOFQG, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande.

Banca examinadora:

- Prof. Dr. Paulo Henrique Rezende Calil (orientador) - FURG
- Prof. Dr. Ricardo de Camargo - USP
- Prof. Dr. João Sarkis Yunes - FURG
- Prof. Dr. José Luíz Lima de Azevedo - FURG

Agradecimentos

Gostaria de expressar meu profundo agradecimento ao Prof. Paulo Calil por me oferecer a oportunidade de integrar o grupo do Laboratório de Dinâmica de Modelagem Oceânica (DinaMO) como seu orientado. Os três anos passados no DinaMO foram um marco importantíssimo do ponto de vista pessoal e profissional. O que aprendi neste curto tempo não tem palavras de apreço que me ajudem a descrever.

O meu apreço vai também para o Programa de Pós-graduação Ciência para o Desenvolvimento (PGCD) do Instituto Gulbenkian de Ciência pela bolsa de estudos na primeira fase do programa em Cabo-Verde. E também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos referente à segunda fase do PGCD no Brasil. A concessão da bolsa foi primordial para a materialização dos meus objetivos.

Porque a concretização deste sonho também contou com o apoio de outras individualidades, gostaria de estender o meu agradecimento em seguida:

Ao 'mestre' Rodrigo Mogollón pela dicas fundamentais do ROMS e no processamento de dados.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica que contribuíram para o trabalho durante as aulas e nos seminários.

Aos professores João Sarkis Yunes, José Luíz Lima de Azevedo e Fabrício Sanguinetti pela contribuição no trabalho através de fornecimento de literatura adicional durante o exame de qualificação.

À todos os meus colegas do DinaMO em especial o Rafael Ávila, Flávia Delcourt, Fernanda Telles, Fabrício Lapoli, Juan Gabriel, Ricardo Aruda, Átila Torres e Claus Toledo pelos mementos de convivência dentro e fora do laboratório durante a minha estadia no Rio Grande.

Às minhas colegas de turma Bárbara Jung e Priscila Orosco pela troca de experiências durante as aulas e no laboratório.

À Maria Helena António faltam palavras para ti. Os momentos de convivência que passamos serão eternamente guardados na minha mente.

À direção da Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras (ESCMC) particularmente ao Professor António Hogueane pelo apoio prestado no meu percurso académico desde a licenciatura.

Ao meus amigos Rosa Simbine, Samuel Chiau e Pita Francisco por terem estado próximo da minha família nos momentos que foram necessários.

Aos meus familiares que sempre me apoiaram e me incentivaram a seguir os meus intuitos, especialmente aos meus pais Adolfo e Patrícia, aos meus irmãos Emília, Hélio, Inês, Carolina e Patrícia.

À minha esposa Mindinha e às minhas filhas Láquila e Amélia Patrícia pela paciência durante a minha ausência e por acreditarem na importância desta causa para a minha vida profissional.

Aos professores Ricardo de Camargo, João Sarkis Yunes e José Luíz Lima de Azevedo por aceitarem fazer parte da banca avaliadora deste trabalho e por terem contribuído com sugestões e correções no trabalho final.

Resumo

LANGA, A. A. A. **Efeito do stress do vento e do fluxo de calor no ciclo anual da clorofila no norte do Canal de Moçambique**. 2018. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2018.

A concentração clorofila superficial no norte do Canal de Moçambique é sazonal, caracterizada por um máximo durante os meses de inverno e por menores concentrações nos restantes meses do ano. Os processos físicos que modulam esta variabilidade temporal da clorofila carecem de estudos mais aprofundados. No presente estudo, recorre-se ao modelo hidrodinâmico regional acoplado ao modelo biogeoquímico configurado para o Canal de Moçambique, para investigar os processos que controlam a sazonalidade da clorofila na região. O máximo (mínimo) da clorofila superficial no Canal de Moçambique coincide com a maior (menor) intensidade do stress do vento e com os valores negativos (positivos) do fluxo de calor, o que sugere um efeito combinado das duas forçantes na modulação da camada de mistura e na sazonalidade da clorofila superficial. A simulação climatológica é comparada a uma série de experimentos de sensibilidade envolvendo variantes do stress vento e o fluxo de calor com o intuito de aferir a importância de cada uma das duas forçantes na profundidade da camada de mistura e na sazonalidade da clorofila superficial. Os resultados indicam que além do stress do vento, o fluxo de calor é fundamental para a sazonalidade da clorofila superficial no norte do Canal de Moçambique. O fluxo de calor condiciona o 'timing' do máximo da clorofila superficial durante o inverno, devido a sua influência na redução da estratificação da coluna de água. Por sua vez, o vento é responsável pela magnitude da clorofila superficial através das velocidades verticais que intensificam o transporte vertical de nutrientes (nitrato) e da clorofila sub-superficial para a superfície. Também foi analisada a produção primária em todo o canal, onde o aumento do nitrato na zona eufótica estimulou a nova produção primária durante o inverno, tendo contribuído com cerca de metade da produção primária (f -ratio 0.5). Na comparação entre o efeito do vento e do fluxo de calor nas três regiões do Canal de Moçambique, o vento mostrou ser mais relevante para a produção primária durante o inverno no norte devido à sua ampla magnitude. Por outro lado, no centro e sul do canal onde o vento tem menor variabilidade ao longo do ano o fluxo de calor aparenta ser mais relevante para o

suprimento de nutrientes para a nova produção primária. A introdução dos ventos diários aumentou a produção primária em até 70% no oceano aberto, quando comparada com a simulação com ventos mensais. O aumento na produção primária na simulação diária deveu-se à intensa mistura vertical causada pela intensificação das velocidades.

Palavras-chave: Clorofila superficial, Canal de Moçambique, sazonalidade, vento e fluxo de calor, camada de mistura, nutrientes.

Abstract

LANGA, A. A. A. **On the effect of wind stress and heat fluxes on the annual cycle of surface chlorophyll in the northern Mozambique Channel**. 2018. Doctoral Thesis - Programa de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2018.

Surface chlorophyll in the Northern Mozambique Channel is characterized by higher concentrations in austral winter than in austral summer. The physical processes that modulate this seasonal variability are not fully understood. In this study, we use a regional hydrodynamical model coupled to a biogeochemical model applied to the Mozambique Channel to investigate the processes that drive chlorophyll variability in the region. A simulation forced with monthly climatological fields is compared to a suite of sensitivity experiments with the wind stress and heat fluxes in order to evaluate their relative importance on the mixed layer depth and surface chlorophyll concentrations. Our results show that the surface chlorophyll concentrations in the Northern Mozambique Channel are strongly modulated by the temporal variability of the mixed layer depth. The winter chlorophyll maxima at the surface is because of the increased deepening of mixed layer as a consequence of strong wind stress and heat loss in the surface ocean. The low chlorophyll concentrations at the surface during summer is due to shallower mixed layer which results from strong solar heating and relatively weak wind stress. The model also indicate that vertical velocity associated with wind stress is responsible for the intense magnitude of surface chlorophyll, while the heat fluxes control the timing of the winter bloom. We also analyzed the primary production in the whole channel where new primary production during the winter, contributing with about half of the primary production (f -ratio 0.5). Wind stress seems to have a major influence on the new production during winter in the northern part when compared to central and southern parts of the channel. Conversely, net heat flux appear seems to stimulate the new production in center and south where heat loss is larger, allowing entrainment of nutrients. The use of synoptic forcing in the model show that the primary production increase in about 70%, when compared with the production rate from the model simulated by monthly wind data. The daily wind experiment have greater influence on primary production in the oligotrophic ocean. This increase in primary production in daily is due to enhanced vertical mixing as a result of

intensification of the mean currents.

Keywords: Seasonal cycle, surface chlorophyll, wind stress and heat fluxes, nutrients, mixed layer depth, Mozambique Channel.

Sumário

Lista de Abreviaturas	ix
Lista de Figuras	xi
1 Introdução	1
1.1 Vento e fluxo de calor	3
1.2 Variabilidade da Clorofila	5
1.3 Questões de pesquisa	6
1.4 Objetivos	8
1.5 Organização do Trabalho	9
2 On the role of physical processes on the surface chlorophyll variability in the Northern Mozambique Channel	11
2.1 Abstract	11
2.2 Introduction	12
2.3 Methods	13
2.3.1 Model description	13
2.3.2 Data products	15
2.4 Results and Discussion	16
2.4.1 Model Validation	16
2.4.2 The role of wind stress and net heat flux on the seasonal cycle of chlorophyll	23
2.5 Concluding remarks	27
3 Seasonal and spatial variability of primary production in the Mozambique Channel	31
3.1 Abstract	31
3.2 Introduction	32
3.3 Methods	33
3.3.1 Model description	33
3.3.2 Data products	33
3.4 Results and discussion	34

3.4.1	Model Validation	34
3.4.2	Seasonal variability of new production and primary production . . .	37
3.4.3	Phytoplankton and grazing by zooplankton	40
3.4.4	Driving mechanism of the spatial variability of PP	42
3.4.5	Effects of eddies on the temporal variation of phytoplankton	43
3.4.6	Conclusion and remarks	45
4	The Impact of Daily wind stress on the primary production in the Mozambique Channel	49
4.1	Abstract	49
4.2	Introduction	50
4.3	Methods	50
4.3.1	Model description	50
4.3.2	Data products	51
4.3.3	Results and discussion	52
4.3.4	Annual Mixed Layer Depth (MLD) and SST	56
4.3.5	Increased primary production by synoptic forcing	58
4.3.6	Comparison between new and regenerated production	59
4.3.7	Conclusions	60
5	Conclusões	63
5.1	Sugestões para Pesquisas Futuras	64
A	Apêndice	65
A.1	Modelo Hidrodinâmico	65
A.2	Modelo Biogeoquímico	66
A.3	Validação do Modelo	69
A.3.1	Salinidade superficial	69
A.3.2	Temperatura superficial	70
A.3.3	Clorofila superficial	72
	Referências Bibliográficas	75

Lista de Abreviaturas

AC	Corrente das Agulhas (<i>Agulhas Current</i>)
CARS	<i>Commonwealth Atlas of Regional Seas</i>
CLM	<i>Climatological run</i>
DCM	<i>Deep Chlorophyll Maximum</i>
COADS	<i>Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set</i>
DOC	<i>Dissolved Organic Carbon</i>
EACC	Corrente costeira da África Oriental (<i>East Africa Coastal Current</i>)
EKE	<i>Eddy Kinetic Energy</i>
GEBCO	<i>GEneral Bathymetry Chart of the Oceans</i>
MC	Corrente de Moçambique (<i>Mozambique Current</i>)
MLD	Profundidade da camada de mistura (<i>Mixed Layer Depth</i>)
NMEC	Corrente Equatorial do Norte de Madagascar (<i>Northern Madagascar Equatorial Current</i>)
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NMC	Norte do Canal de Moçambique (<i>Northern Mozambique Channel</i>)
NP	<i>New Production</i>
NW	<i>Northwest</i>
PIB	<i>Produto Interno Bruto</i>
PISCES	<i>Pelagic Interactions Scheme for Carbon and. Ecosystem Studies</i>
POM	Matéria Orgânica Particulada (<i>Particulate Organic Matter</i>)
PP	Produção Primária (<i>Primary Production</i>)
PSU	Unidade de Salinidade Prática (<i>Practical Salinity Unit</i>)
QSCAT	<i>Quik Scatterometer</i>
ROMS	<i>Regional Ocean Modeling System</i>
SMEC	Corrente Sul Equatorial de Madagascar (<i>Southern Madagascar Equatorial Current</i>)
SNHF	<i>Surface Net Heat Flux</i>
SODA	<i>Simple Ocean Data Assimilation</i>
SST	Temperatura Superficial do Mar (<i>Sea Surface Temperature</i>)
SW	<i>Southwest</i>
WOA	<i>World Ocean Atlas</i>
VGPM	<i>Vertical Generalized Primary production Model</i>

Lista de Figuras

1.1	A figura mostra a representação esquemática da circulação e da batimetria na região do Canal de Moçambique. O Canal de Moçambique é limitado por dois países, nomeadamente Moçambique no Oeste e Madagascar no leste, e ainda pelas correntes South Equatorial Current (SEC) e Southeast Equatorial Madagascar Current (SEMC), respectivamente no Norte e no Sul. No interior do canal predominam os vórtices de mesocala (Mozambique Channel Eddies, MEC) Fonte: <i>Schouten et al. (2003)</i>	2
1.2	A figura é referente ao <i>Stress</i> e velocidade do vento, mostrando as diferenças na direção e magnitude do vento entre os meses de (a) Janeiro e (b) Junho. Os dados foram obtidos da climatologia QSCAT.	4
1.3	Distribuição do fluxo de calor no Canal de Moçambique obtido da climatologia COADS mostrando valores positivos em (a) Janeiro e negativos em (b) Junho.	5
1.4	Concentrações da clorofila superficial no Canal de Moçambique referente à climatologia MODIS para os meses de (a) Janeiro e (b) Junho.	6
2.1	(a) GEBCO Bathymetry 30 arc-sec interpolated into ROMS for parent grid and child grid (box). The contours represents isobaths of 500 and 2500 m. (b) Annual mean surface currents derived from ROMS indicating the SEC (South Equatorial Current), SEMC (Southern Equatorial Madagascar Current), EACC (East African Coastal Current), MC (Mozambique Current), AC (Aguilhas Current) following schematic representation by <i>Schouten et al. (2003)</i> . The boxes in (b) indicates the geographic limits of the sampling areas used in our analysis.	14
2.2	Annual mean values of Eddy Kinetic Energy (EKE) representing the surface circulation in the Mozambique Channel, characterized by interaction between anti-cyclonic and cyclonic eddies. The data corresponds to EKE derived from: (a) AVISO; (b) parent domain; and (c) child domain.	17

2.3	Comparison of principal oceanic properties between observations and model in the Northern Mozambique Channel. The figure shows annual means of Temperature (a,d,g); Salinity (b,e,h); and Nitrate (c,f,i) obtained from zonal vertical profiles at 13 °S section.	18
2.4	Vertical section of annual averaged vertical nitrate flux in the Northern Mozambique Channel for parent (a) and child (b) domains.	20
2.5	Time-latitude evolution of surface chlorophyll correspondent to the boxes representing the three subregions of the Mozambique Channel (see Fig. 2.1b) for: MODIS (a-c); parent domain (d-f); and child domain (g-i). Both MODIS and model shows a peak in chlorophyll concentrations in winter and minimum values during summer.	21
2.6	Profile of annual mean concentrations of surface chlorophyll at 13°S of latitude between the coastal areas of Mozambique and Madagascar in the Northern Mozambique Channel, showing the spatial trends of MODIS (circle/line), child (solid line) and parent (dashed line).	22
2.7	Seasonal variability of (a) Meridional wind stress (Tauy, black line) and surface net heat flux (SNHF, blue line). Both forcing were averaged over the box in the Northern Mozambique Channel. Colored panels show a time-latitude variation of Mixed Layer Depth averaged over the longitude in the NMC region for: (b) observations by de Boyer Montégut product; and (c) child domain.	24
2.8	Time-depth evolution of chlorophyll (colored), MLD (solid line), and nitra-cline (dashed line) for: (a) Control run; (b) 'NOWIND' stress experiment; and (c) 'NOHEAT' experiment. The effect of net heat flux in the sensitivity experiments is highlighted by the pattern of MLD and surface chlorophyll signal which is similar to control run.	25
2.9	Model diagnostics of nitrate averaged over the MLD: (a) horizontal advec-tion; (b) vertical mixing term; (c) vertical advection; and (d) entrainment rate. Legend: CTL (solid line), 'NOWIND' Stress run (dashed line) and 'NOHEAT' run (circle-dotted line).	27
2.10	Vertical section at 13 °S for: nitrate in the upper panel - (a) CTL, (b) 'NOWIND' and (c) 'NOHEAT' simulations; and temperature in the lower panels - (d) CTL, (e) 'NOWIND' stress and (f) 'NOHEAT' simulations.	28
3.1	Depth-integrated primary production (PP) in the Mozambique Channel derived from Generalized Primary production Model (VGPM). The PP in the domain is characterized by higher production rates in winter (c) and lower in summer(a). The intermediate values are in fall (b) and spring (d).	34
3.2	Maps showing the spatial distribution of primary production in the Mo-zambique Channel, in (a) summer; (b) fall; (c) winter: and (d) spring.	36

3.3	Same as figure 3.2, but for new primary production. The lines and stars in (a) indicate sites where data is sampled for our analysis in this chapter.	37
3.4	Vertical profiles of dissolved oxygen obtained at 13°S (a-b); 18°S (c-d); and 24°S (e-f), representing respectively the northern, central and southern regions of the Mozambique Channel (See figure 3.3).	38
3.5	Seasonal evolution of new and primary production (a-c), f -ratio (e-f) and vertical and horizontal terms of nitrate (g-i) in the three regions of the Mozambique Channel.	39
3.6	Time-depth evolution of nitrate (colored) overlaid by Mixed Layer Depth (m) representing the (a) north, (b) center, (c) south parts of the Mozambique Channel.	40
3.7	Temporal evolution of two classes/groups of phytoplankton in the Mozambique Channel. The data corresponds to (a) diatoms (dia); (b) nanophytoplankton (nano); (c) total phytoplankton (dia+nano) ; and (d) grazing on phytoplankton by zooplankton at the surface. The data is taken from north (continued), center (dashed) and south (circle-dotted) parts of the Mozambique Channel.	41
3.8	Relative difference (%) between CLIM and NOWIND experiment (CLIM-NOWIND/CLIM*100), showing the spatial and seasonal distribution of the wind contribution to depth-averaged PP in the Mozambique Channel.	43
3.9	Same as figure 3.8, but for the net heat flux experiment (NOHEAT).	44
3.10	2Days snapshot showing the time-evolution of surface phytoplankton biomass, EKE and Nitrate in the northern Mozambique Channel.	45
3.11	Same as figure 3.10, but for the central part of the Mozambique Channel.	46
3.12	Same as figure 3.10, but for the southern part of the Mozambique Channel.	47
4.1	Comparison between surface forcing at Monthly (doted-blue) and Daily (continued-black) temporal resolution. The data correspond to wind stress derived from QuikSCAT for the year 2007, respectively in northern (a), central (b) and southern (c) parts of the Mozambique Channel (see, Fig. 3.3a).	52
4.2	Annual mean maps of Eddy Kinetic Energy (EKE, cm^2s^{-2}) derived for (a) AVISO; (b) & (d) Parent, respectively for Monthly and Daily; and (c) & (e), for Monthly and Daily, respectively.	53
4.3	Annual maps of surface velocity in the Mozambique Channel correspondent to (a-b) Monthly run and (c-d) Daily run.	54
4.4	Vertical profiles of meridional velocity (v) obtained at 13°S (a-b); 18°S (c-d); and 24°S (e-f), representing respectively the northern, central and southern parts of the Mozambique Channel.	55
4.5	Annual Mixed Layer Depth (m) derived from (a) climatological dataset of de Boyer Montégut, (b) ARGO, (c-d) Monthly and (e-f) Daily experiments.	57

4.6	Annual maps of SST in the Mozambique Channel obtained from: (a) MODIS; (b &c) Monthly run; and (d & e) Daily run.	58
4.7	Distribution of primary production in the Mozambique Channel obtained from Vertically Generalized Production Model (VGPM, a), Monthly run (b &d), and Daily run (c &e).	60
4.8	Spatial distribution of nitrate concentrations in the Mozambique Channel. Upper panels corresponds to the Monthly experiment. The lower panels are derived from the Daily simulation. The data is taken from 40 m depth.	61
4.9	Distribution of f -ratio in the Mozambique Channel. The figure show values of f -ratio integrated over the euphotic layer zone derived from Monthly run (a-b) and the Daily run (c-d).	62
A.1	Representação esquemática do PISCES. Na figura mostra-se apenas a parte do ecossistema sem incluir o ciclo de carbono e o oxigênio. Os elementos modelados explicitamente pelo modelo estão indicados no canto superior esquerdo de cada compartimento. Adaptado de (Aumont e Bopp, 2006).	67
A.2	Distribuição espacial da salinidade superficial no Canal de Moçambique nos períodos de verão (summer), outono (fall), inverno (winter) e primavera (spring). As figuras de cima correspondem ao ROMS (a-d) e as de baixo são relativas aos dados observacionais da <i>Hydrobase</i> (e-h).	70
A.3	Distribuição espacial da SST no Canal de Moçambique nos períodos de verão (summer), outono (fall), inverno (winter) e primavera (spring). As figuras de cima são referentes ao ROMS (a-d) e as de baixo são relativas ao MODIS (e-h).	71
A.4	Diferença na SST no Canal de Moçambique nos períodos de verão (summer), outono (fall), inverno (winter) e primavera (spring). Valores positivos indicam que o modelo superestima a SST e valores negativos indicam que a temperatura é sobrestimada pelo ROMS.	72
A.5	O mesmo que a figura A.3, mas para a clorofila superficial.	73
A.6	O mesmo que a figura A.4, mas para a clorofila superficial.	74

Capítulo 1

Introdução

O Canal de Moçambique situa-se no ocidente do Oceano Índico, entre Moçambique e a Ilha de Madagascar (Fig. 1.1). No norte, o Canal de Moçambique é limitado pela Corrente Equatorial Sul (SEC) que bifurca-se no continente aos 11°S de latitude, formando a Corrente costeira da África Oriental (EACC) em direção ao Equador e a Corrente de Moçambique (MC) na direção sul (Schouten *et al.*, 2003). As instabilidades da SEC originam vórtices de mesoescala na região norte, de onde se deslocam em direção ao centro do canal (Backeberg e Reason, 2010). Os vórtices de mesoescala na região do norte do Canal de Moçambique são anti-ciclônicos e localizados próximo à costa moçambicana. Do outro lado do canal, próximo à costa de Madagascar, predominam os vórtices ciclônicos que se deslocam para o continente interagindo com os vórtices anti-ciclônicos antes de se dirigir para o centro do canal (Collins *et al.*, 2014). Próximo à zona costeira, os vórtices interagem com a MC produzindo correntes de mais de 1.5 m s^{-1} (Ullgren *et al.*, 2016). Na região central do canal os vórtices tem maior energia cinética associada ao seu diâmetro maior, com a média de 300 km em comparação com a média de 100 km no norte (Halo *et al.*, 2014). Caraterizados por trens alternados de vórtices ciclônicos e anti-ciclônicos na região central do canal, estes vórtices interagem com as águas costeiras provenientes dos rios, antes de diminuírem a intensidade da sua energia cinética ao se deslocar para o sul (Omta *et al.*, 2009; Quartly e Srokosz, 2004). Já no limite sul do canal de Moçambique os vórtices provenientes do interior do canal associam-se aos originários do sul de Madagascar aos 28°S, formando posteriormente a Corrente das Agulhas (AC) (de Ruijter *et al.*, 2004).

Os vórtices desempenham um papel fundamental na redistribuição de propriedades como massa, calor e nutrientes (DiMarco *et al.* (2002)), tornando o Canal de Moçambique rico em biodiversidade marinha. São exemplos de biodiversidade marinha os extensivos recifes de coral e diversos habitats para espécies em vias de extinção como dugongos e baleias (McCLANAHAN *et al.* (2011); Samoilys *et al.* (2011)). Aliada a esta enorme biodiversidade estão as importantes pescarias que ocorrem ao longo de todo o canal. O Banco de Sofala é um exemplo de destaque em termos de pescarias em Moçambique

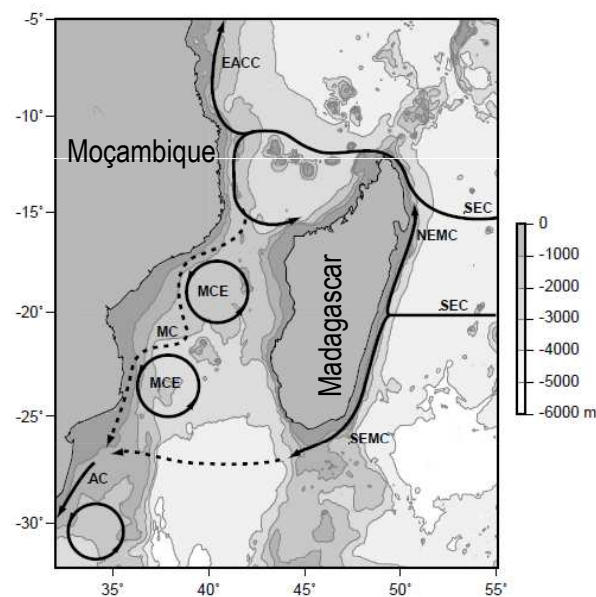


Figura 1.1: A figura mostra a representação esquemática da circulação e da batimetria na região do Canal de Moçambique. O Canal de Moçambique é limitado por dois países, nomeadamente Moçambique no Oeste e Madagascar no leste, e ainda pelas correntes South Equatorial Current (SEC) e Southeast Equatorial Madagascar Current (SEMC), respectivamente no Norte e no Sul. No interior do canal predominam os vórtices de mesoescala (Mozambique Channel Eddies, MCE).
Fonte: Schouten *et al.* (2003)

(Brinca *et al.*, 1980), contribuindo com 5% do PIB e cerca de 28% de divisas externas (Fanaian *et al.*, 2015). Apesar desta relativa importância ecológica e sócio-económica do Canal de Moçambique, estudos envolvendo fatores físicos que determinam o ciclo anual da clorofila são escassos, sobretudo no norte do canal de Moçambique. Como indicador de produção primária, estudos envolvendo a clorofila constituem um pré-requisito para o gerenciamento da biodiversidade marinha, tornando relevante o melhor entendimento de processos físicos que determinam a sua variabilidade sazonal.

Os vórtices de mesoescala são os que receberam maior atenção no que diz respeito a estudos recentes envolvendo interações biofísicas no Canal de Moçambique. Alguns exemplos de estudos de interações biológicas apontam para elevadas concentrações da clorofila superficial associadas aos vórtices de mesoescala (Jose *et al.*, 2014; Omta *et al.*, 2009), que por conseguinte influenciam outras cadeias tróficas desde a abundância do zooplankton (Lebourges-Dhaussy *et al.*, 2014) até aos predadores de topo da cadeia trófica (Kai e Marsac, 2010). Devido à sua frequência que é de 4 a 5 vórtices/ano (de Ruijter *et al.*, 2002; Schouten *et al.*, 2003) e sem sazonalidade aparente (Omta *et al.*, 2009), os vórtices

no Canal de Moçambique devem apenas contribuir para elevadas concentrações de clorofila de forma localizada e temporal, apontando deste modo para outros mecanismos que determinam o ciclo anual da clorofila nesta região.

A clorofila superficial tem a sazonalidade evidente, caracterizada por elevadas concentrações de clorofila superficial durante o inverno e por baixas concentrações nos restantes meses do ano (Koné *et al.*, 2009; Tew-Kai e Marsac, 2009). Esta variabilidade temporal da clorofila superficial no Canal de Moçambique é associada à sazonalidade do vento cujo pico da sua intensidade ocorre durante o inverno (Lévy *et al.*, 2007). Entretanto, estudos mais recentes apontam para o decréscimo em cerca de 20% na concentração da clorofila no norte do Oceano Índico, apesar da intensificação do vento nas últimas décadas, fato atribuído ao aumento da temperatura superficial (Roxy *et al.*, 2016). Numa outra análise, Marsac (2014) verificou que a concentração superficial da clorofila decresceu entre os anos de 2006 e 2010, altura em que a temperatura superficial (SST) registou um ligeiro aumento, sem contudo avançar as causas. Sugerindo deste modo que processos físicos associados à sazonalidade da clorofila no Canal de Moçambique estejam além da variabilidade do *stress* do vento. Mais ainda, estudos apontam para relações contraditórias entre a SST e a clorofila superficial, sendo que o uso da SST como indicador da estratificação possa ser ambíguo (Martinez *et al.*, 2011). Tendo em consideração a forte interação mútua entre a SST e o fluxo de calor latente ($\sim 15 \text{ W m}^{-2} (\text{°C})^{-1}$) na região tropical do Oceano Índico (Kumar *et al.*, 2017), o fluxo de calor é uma forçante importante na camada de mistura. Esta, por sua vez, é importante para a concentração da clorofila superficial.

O presente trabalho visa essencialmente identificar os principais processos físicos que modulam a sazonalidade da clorofila no norte do Canal de Moçambique. Em seguida, é feita uma revisão do *stress* do vento e do fluxo de calor no Canal de Moçambique como as possíveis forçantes que regulam a camada de mistura e por conseguinte a sazonalidade da clorofila superficial na região.

1.1 Vento e fluxo de calor

O regime do vento no Canal de Moçambique é sazonal marcado por valores elevados do *stress* do vento no inverno, cerca de 0.1 N m^{-2} , baixando para valores de aproximadamente de -0.04 N m^{-2} no período de verão (Fig. 1.2). Em comparação, a região norte do Canal de Moçambique difere das regiões centro e sul devido ao fato de o norte estar sob influência das monções (Saetre e Da Silva, 1982).

As monções são caracterizadas pela mudança sazonal da direção do vento, atuando do quadrante norte a nordeste durante o verão (Setembro-Março) e do quadrante sul a sudoeste no inverno (Abril-Agosto). O sistema das monções que influencia o norte do

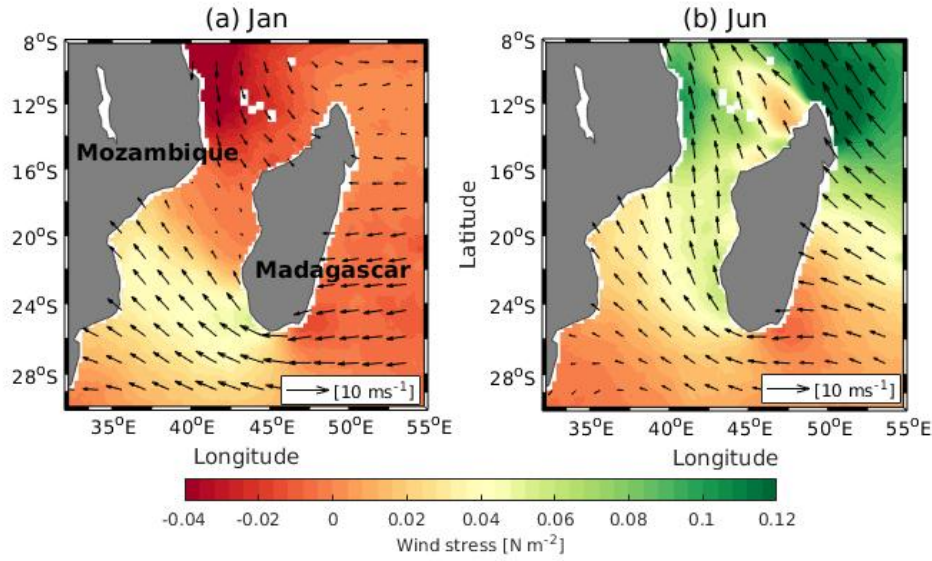


Figura 1.2: A figura é referente ao *Stress* e velocidade do vento, mostrando as diferenças na direção e magnitude do vento entre os meses de (a) Janeiro e (b) Junho. Os dados foram obtidos da climatologia QSCAT.

Canal de Moçambique até aos 18°S de latitude (Fig. 1.2-a) é uma extensão das ventos monçônicos do norte do Oceano Índico descrito anteriormente por Saetre e Da Silva (1982) e Biastoch e Krauss (1999). As regiões central e sul do Canal de Moçambique são influenciadas por ventos do quadrante sul a sudeste, prevalecendo nesta direção durante todo o ano. O *stress* do vento nas duas regiões do centro e sul é inferior a 0.1 N m^{-2} e com pouca variabilidade sazonal.

À semelhança do *stress* do vento, o fluxo de calor no Canal de Moçambique também é sazonal (Fig. 1.3). Durante o verão o fluxo de calor é positivo em toda área do Canal de Moçambique. Em contrapartida, no inverno a área é totalmente influenciada pelo fluxo de calor negativo. A amplitude do fluxo de calor do período de inverno para o verão é de mais de 100 W m^{-2} , com a maior diferença verificando-se no sul do canal.

Sabe-se que vento e o fluxo de calor são responsáveis pela modulação da camada de mistura. Ventos mais fortes e em associação ao fluxo de calor negativo teriam como consequência uma camada de mistura mais profunda. Por outro lado, um fluxo de calor positivo juntamente com um vento fraco a moderado resultariam numa coluna de água estratificada e a camada de mistura mais rasa. Os ciclos de mistura e estratificação tem um enorme impacto no crescimento do fitoplâncton pelo fato de controlarem a intensidade do fluxo de nutrientes e na distribuição da luz (Simpson *et al.*, 1990).

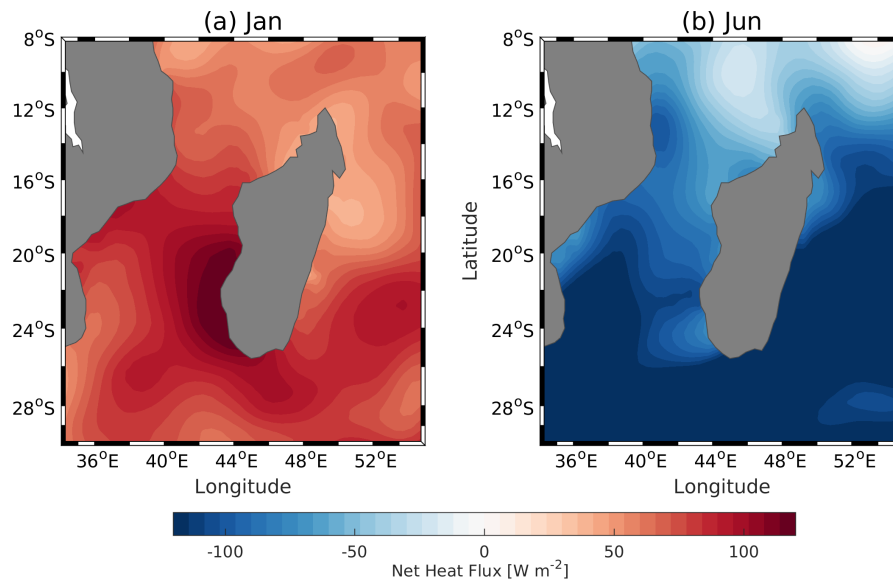


Figura 1.3: Distribuição do fluxo de calor no Canal de Moçambique obtido da climatologia COADS mostrando valores positivos em (a) Janeiro e negativos em (b) Junho.

As implicações para a abundância do fitoplâncton devido ao aumento da camada de mistura podem ser contrárias. Por exemplo, a coluna de água mais misturada resultaria no aumento da concentração da clorofila devido ao aumento de nutrientes na zona eufótica, mas também pode resultar no decréscimo na concentração da clorofila devido à sua diluição da clorofila na coluna de água (e.g. Echevin *et al.* (2008)) ou devido à redução na intensidade da luz (e.g. Resplandy *et al.* (2009)). Com a camada de mistura mais rasa, menos nutrientes estariam disponíveis na camada eufótica o que resultaria na redução das concentrações da clorofila superficial. Dada a importância da mistura e estratificação da coluna de água na produção biológica na superfície oceânica, espera-se que para além do vento, o fluxo de calor seja fundamental no ciclo regular da clorofila superficial no Canal de Moçambique.

1.2 Variabilidade da Clorofila

Dados climatológicos indicam que as concentrações da clorofila no Canal de Moçambique aumentam de $0.15 \text{ mg Chl m}^{-3}$ no verão para cerca de $0.30 \text{ mg Chl m}^{-3}$ no inverno, na maior parte do oceano aberto (Fig. 1.4). Em comparação com as regiões centro e norte, o sul do canal de Moçambique é onde se verifica o maior aumento da concentração da clorofila na mudança de estação, sobretudo próximo à costa de Moçambique onde durante o inverno se verifica o triplo das concentrações da clorofila obtidas no verão. Ao contrário do oceano aberto, a região costeira de Moçambique mostra pouca variabilidade sazonal na concentração da clorofila, onde os valores são de $\sim 0.5 \text{ mg Chl m}^{-3}$ durante os dois

períodos. No lado da costa malgaxe, nota-se um ligeiro aumento nas concentrações da clorofila do verão para o inverno, sobretudo no extremo sul da ilha.

Medições *in situ* apontam para concentrações da clorofila superficial variando entre 0.06 e 1.26 mg Chl m⁻³ na zona costeira de Moçambique (Mordasova, 1980). Dados mais recentes apontam para a existência de uma considerável variabilidade da clorofila no interior do canal, com concentrações entre os 0.04 e 0.4 mg Chl m⁻³, chegando aos 0.84 mg Chl m⁻³ nas frentes oceânicas (Barlow *et al.*, 2014). As concentrações da clorofila estimadas pelo sensoriamento remoto apresentam uma ótima correlação ($r=0.80$) com as medições *in situ* efectuadas no interior do canal (Zubkov e Quartly, 2003). O que confere um ótimo nível de confiança às estimativas da concentração da clorofila superficial pelo sensoriamento remoto na região. A produção primária no Canal de Moçambique obedece o padrão de distribuição espacial da clorofila, variando de 0.26-0.5 g C m⁻² day⁻¹ no oceano aberto para 1-3 g C m⁻² day⁻¹ na zona costeira (Ryther *et al.*, 1966).

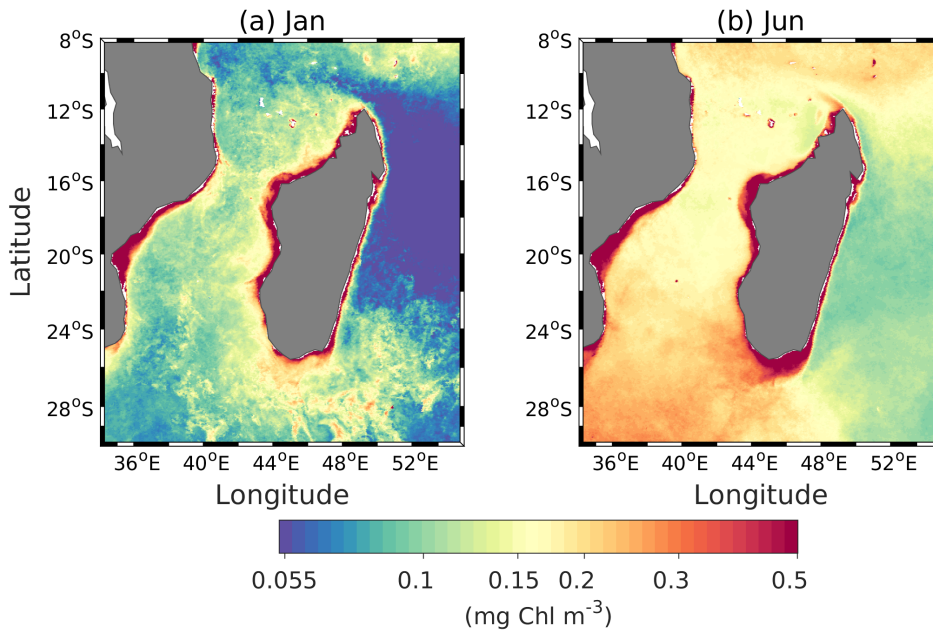


Figura 1.4: Concentrações da clorofila superficial no Canal de Moçambique referente à climatologia MODIS para os meses de (a) Janeiro e (b) Junho.

1.3 Questões de pesquisa

O período do inverno em que se verifica o máximo da concentração da clorofila superficial no Canal de Moçambique (Fig. 1.4) coincide com elevados valores do *stress* do vento (Fig. 1.2) como também com valores negativos do fluxo de calor (Fig. 1.3), e vice-versa. O

que sugere que o ciclo anual da clorofila superficial no Canal de Moçambique é regulado pelo efeito combinado entre o *stress* vento e o fluxo de calor através da modulação da camada de mistura. Para o presente estudo, foram elaboradas as questões a seguir:

- Qual é a importância relativa do *stress* do vento e/ou do fluxo de calor no ciclo anual da clorofila superficial no norte do Canal de Moçambique?
- Que mecanismos controlam a sazonalidade espaço-temporal da produção primária nas regiões norte, centro e sul do Canal de Moçambique?
- Como a produção primária modelada responde à introdução dos ventos sinóticos no Canal de Moçambique?

1.4 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal investigar o efeito do *stress* do vento e do fluxo de calor na variabilidade sazonal da clorofila superficial no Canal de Moçambique.

Para a concretização do objetivo principal foram elaboradas os objetivos específicos seguintes:

- Analisar a importância da resolução horizontal do modelo na reprodução das concentrações da clorofila superficial e da produção primária no Canal de Moçambique.
- Medir a sensibilidade do *stress* do vento e do fluxo de calor na variação temporal da camada de mistura e a sua relação com o ciclo anual da clorofila superficial no Norte do Canal de Moçambique;
- Analisar a influência dos ventos sinóticos na distribuição espacial da produção primária no Canal de Moçambique.

1.5 Organização do Trabalho

Em seguida apresenta-se a estrutura do trabalho que está organizado em quatro capítulos e um apêndice. No Capítulo 2, aborda-se o efeito do *stress* do vento e do fluxo de calor na variabilidade sazonal da clorofila superficial no Norte do Canal de Moçambique. No Capítulo 3 faz-se a análise dos mecanismos que regulam a variabilidade espaço-temporal da produção primária no Canal de Moçambique. A influência dos ventos de alta frequência na produção primária no Canal de Moçambique é apresentada no Capítulo 4. No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões obtidas neste trabalho. Finalmente no Apêndice A, apresentam-se informações adicionais sobre os modelos empregues para o presente estudo, nomeadamente o ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) e o PISCES (*Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies*) e ainda as diferenças entre as soluções do modelo e dados observacionais.

Capítulo 3

Seasonal and spatial variability of primary production in the Mozambique Channel

3.1 Abstract

The surface circulation in the Mozambique Channel changes from the northern part, where the system is under dominance of the monsoons, to the central and southern parts, where mesoscale eddies are more frequent. Despite these differences in the physics between the three regions, satellite-based primary production shows that the whole region is characterized by similar seasonal variability of primary production, in which winter is the most productive season of the year. A coupled physical-biogeochemical model configuration applied for the Mozambique Channel is used to investigate the seasonal and spatial variability of new and primary production in the Mozambique Channel. Integrated primary production over the euphotic zone shows highest value of $> 0.3 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ during winter and the lowest value of $\sim 0.1 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ during summer. The integrated new production follows the same seasonal variability of primary production, with the higher value of $\sim 0.15 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ during winter, yielding an average f -ratio of 0.5 in the entire region. New production in winter results from vertical advection and entrainment of nitrate from below the euphotic zone mainly because of stronger wind stress in the north and negative heat flux in the center/south. During the rest of the year, the system depends on remineralization of organic matter, which sustains phytoplankton growth at the subsurface. Grazing on phytoplankton by zooplankton increases in proportion with phytoplankton increase, despite the deepening of MLD during winter and intensification of the mean currents by mesoscale eddies, suggesting that phytoplankton abundance in the region is mainly controlled by the biology grazing.

Keywords: Seasonal, MLD, nitrate, new production, primary production, Mozambique

Channel

3.2 Introduction

The Mozambique Channel is located between the countries of Mozambique in mainland and the Island of Madagascar. The main water masses that characterize the upper layers are the Tropical Surface Waters (TSW, $< 25 \text{ kg m}^{-3}$) and Subtropical Surface Water (STSW, 25.8 kg m^{-3}) (Ullgren *et al.*, 2012). To the north, warm and less saline surface waters of the TSW are brought into the area by the South Equatorial Current (Saetre e Da Silva, 1982). The transition zone between TSW and STSW occurs in the central part of the channel at around 22°S , where vertical and horizontal mixing modifies the two water masses. STSW enters the Mozambique Channel from the south, where salinity increases due to larger evaporation which exceeds precipitation, turning into a subsurface salinity maximum when these waters subduct below the low-salinity water (Wyrski, 1973).

The flow in the region is dominated by mesoscale eddies moving from north to south, instead of a continuous current located near the coast of Mozambique (de Ruijter *et al.*, 2002; Lutjeharms *et al.*, 2000; Saetre e Da Silva, 1984). With a diameter of about 300 km and moving at 3 to 6 km day^{-1} (Schouten *et al.*, 2003), these eddies interact with the coastal waters and advect properties into the mid-channel (Quartly e Srokosz, 2004). Due to nutrient rich deeper water upwelled by mesoscale eddies, these features are known to significantly increase the biological activity in the open sea (Franks *et al.*, 1986; Longhurst, 2001; McGillicuddy Jr e Robinson, 1997).

Recently, the Mozambique Channel has received considerable attention in terms of physical oceanography, however, the analysis of primary production is still to be investigated. Primary production in the Mozambique Channel varies from 0.11 to 0.50 $\text{g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ in the open ocean to $> 1.0 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ in the shelf (Ryther *et al.*, 1966). The main mechanisms proposed for the primary production variability in the area are the wind field (Machu *et al.*, 2002) and mesoscale eddies (Jose *et al.*, 2014). In the previous chapter (2.4.2), results indicates that vertical velocity associated with wind stress leads to a deeper mixed layer depth due to heat loss during winter, thus inducing vertical transport of nutrients in the Northern Mozambique Channel. It is unknown, however, how the mixing processes affect new and primary production in the Mozambique Channel.

The major difference in physical processes between the north and the other parts of the channel is the presence of intense mesoscale eddies in the central and southern regions while in north the circulation is strongly influenced by the monsoons. Satellite-based primary production obtained from Vertically Generalized Production Model (VGPM,

Behrenfeld e Falkowski (1997)) indicates a similar seasonal variation of primary production in the Mozambique Channel, characterized by higher rate in winter than in the other seasons (Fig. 3.1). Thus, in the present chapter we investigate the mechanisms driving the seasonal and temporal variability of new and primary production in the whole region.

3.3 Methods

3.3.1 Model description

The Regional Ocean Modeling System (ROMS; Shchepetkin e McWilliams (2005)) coupled to Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies (PISCES; Aumont e Bopp (2006); Aumont *et al.* (2003)) is used to investigate the seasonal variability of new production and primary production in the Mozambique Channel. The model configuration applied for the Mozambique Channel is described in chapter 2.3. The analysis in this chapter corresponds to results from the high-resolution configuration (child), except in the subsection 3.4.5, where the model at lower resolution (parent) is also included in the analysis.

3.3.2 Data products

Observational datasets are used to assess our model solutions in the Mozambique Channel. The observational data include, Vertical Generalized Primary production Model (VGPM) for depth-integrated primary production and Atlas of Regional Seas (CARS) for dissolved oxygen. Vertically Generalized Production Model (VGPM, Behrenfeld e Falkowski (1997)) is widely used as an estimation of global primary production. It uses variables such as temperature, surface chlorophyll and photosynthetically active radiation, all obtained from satellite measurements. VGPM provides primary production integrated over the euphotic layer depth and the data is available at <http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity>. Modeled dissolved oxygen is compared to climatological data from the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) CARS. CARS is an atlas dataset generated from all available oceanographic data and consists of global climatological data on a $1/2^\circ$ horizontal resolution and on 79 standard vertical levels (www.cmar.csiro.au/cars).

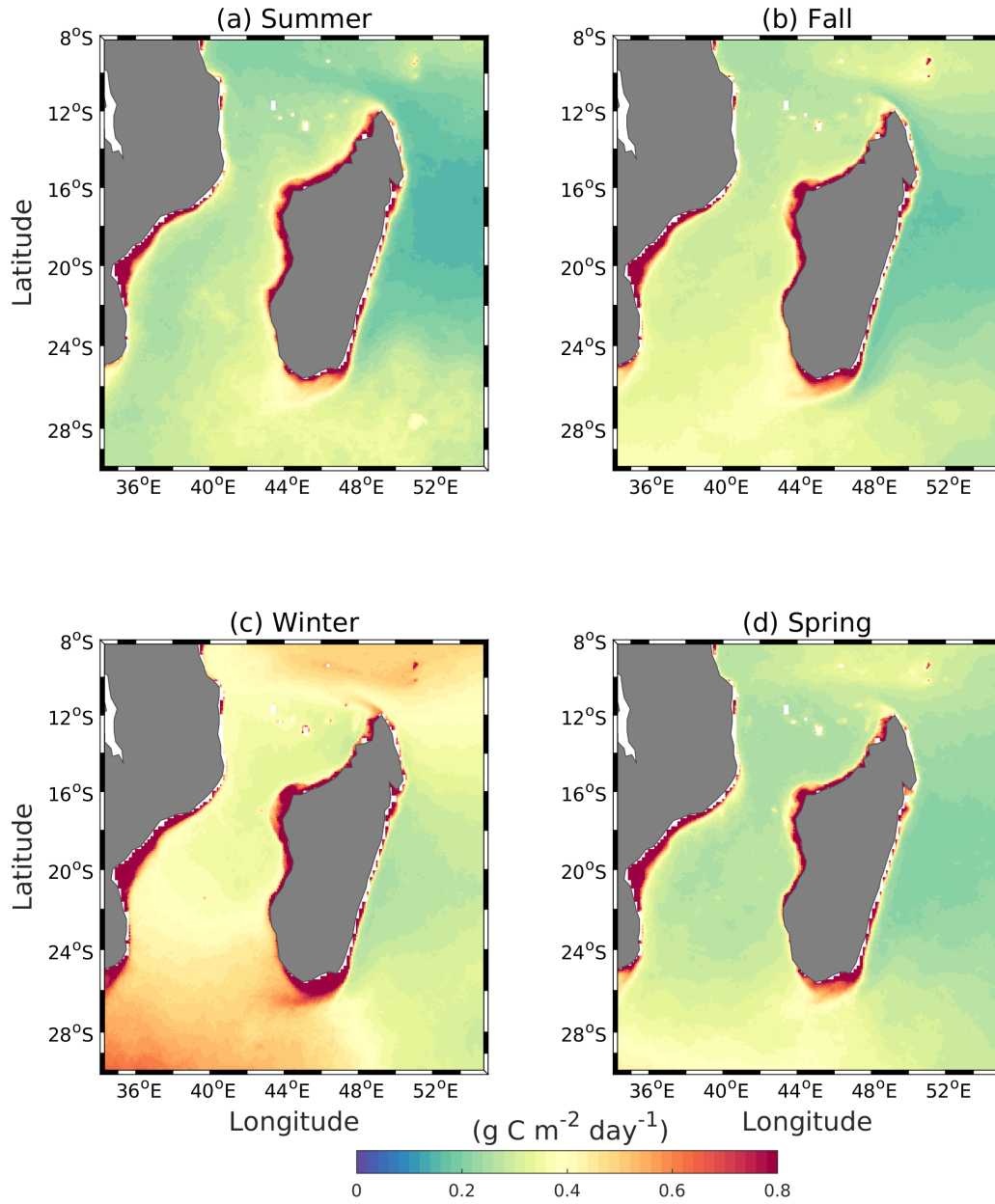


Figure 3.1: Depth-integrated primary production (PP) in the Mozambique Channel derived from Generalized Primary production Model (VGPM). The PP in the domain is characterized by higher production rates in winter (c) and lower in summer(a). The intermediate values are in fall (b) and spring (d).

3.4 Results and discussion

3.4.1 Model Validation

Modeled physical and biological properties have been validated in the previous chapter (2.4). Here, the comparison between observational data and the model results focuses only on primary production and dissolved oxygen.

Primary Production

Modeled Primary Production (PP) integrated over the euphotic zone in the Mozambique Channel indicates a clear seasonal cycle in the region, with higher production rates in winter, followed by intermediate rates in spring and fall and a minimum production rates in summer (Fig. 3.2). There are slightly differences in PP values between the northern part and rest of the channel, where the central and southern parts the PP values are almost double of what is seen in north. These differences might be associated with intense mesoscale activity in the central region (Fig. 2.2). As these mesoscale features propagate poleward, they interact with land exchanging nutrients that are further advected offshore and utilized to enhance the biological production (Jose *et al.*, 2014).

Our model captures much of the spatial distribution of PP in the entire domain showing good agreement with the depth-integrated primary production derived from VGPM, but with slightly differences, particularly near coastal areas where our model underestimates PP (Fig. 3.1). These differences in the magnitude of PP near coastal areas are partially attributed to the absence of nutrients from river discharge which are not included in our model. Nutrients input from rivers significantly contributes to sustain biological production in the Mozambique Channel. Sofala Bank (18-20°S) is an example of a productive area where biological activity depends strongly on the Zambezi river flow (da Silva, 1986). The model also underestimates the production rate during summer which can be attributed to the wind field used to force the model. The short temporal variability of wind stress which are fundamental for mixing oceanic properties such as nutrients are not captured in the climatology forcing used in the model.

New Production (NP) integrated over the euphotic zone in the Mozambique Channel also displays the same signal of PP from our model solutions as well as PP from VGPM (Fig. 3.3). New nitrate-based primary production accounts for about half of the PP in the vast area of the Mozambique Channel. The close relationship between NP and PP highlights the importance of nitrate availability in the seasonal variability of biological production in the system.

Dissolved oxygen

Dissolved oxygen concentrations derived from CARS dataset are compared against results from the model at 13°, 18° and 24°S vertical sections (Fig. 3.3a), representing respectively the regions in north, center and south of the Mozambique Channel (Fig. 3.4). Vertical profiles of dissolved oxygen obtained from observations and the model are identical at the first tens meters, but there is a slight difference with respect to the model which shows an oxygen concentrations maxima at approximately 50-80 m depth. This

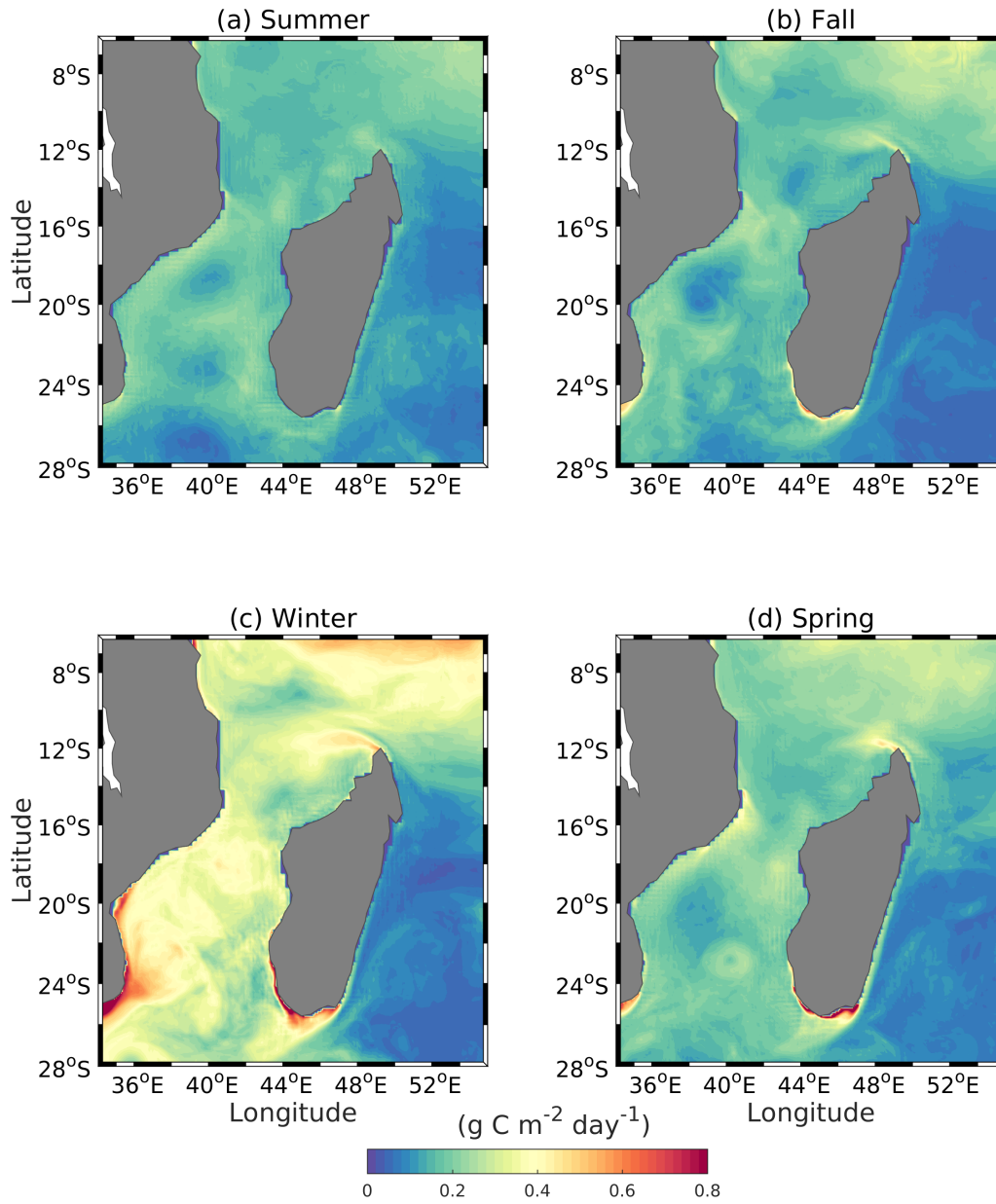


Figure 3.2: Maps showing the spatial distribution of primary production in the Mozambique Channel, in (a) summer; (b) fall; (c) winter; and (d) spring.

subsurface oxygen maxima is due to higher concentrations of nitrate in the model (not shown) which increased phytoplankton biomass at this depth.

The depth-horizon (100-300 m) of the subsurface oxygen minimum in the model is similar as the observations obtained from CARS in the three regions, which is clearly notable by the rapid decrease of oxygen concentrations, particularly in the northern and central parts. In the southern part the weaker subsurface oxygen minimum verified in CARS is hardly noticeable in the model, where oxygen concentrations decrease slightly with depth. The model also underestimate oxygen concentrations below the depth of

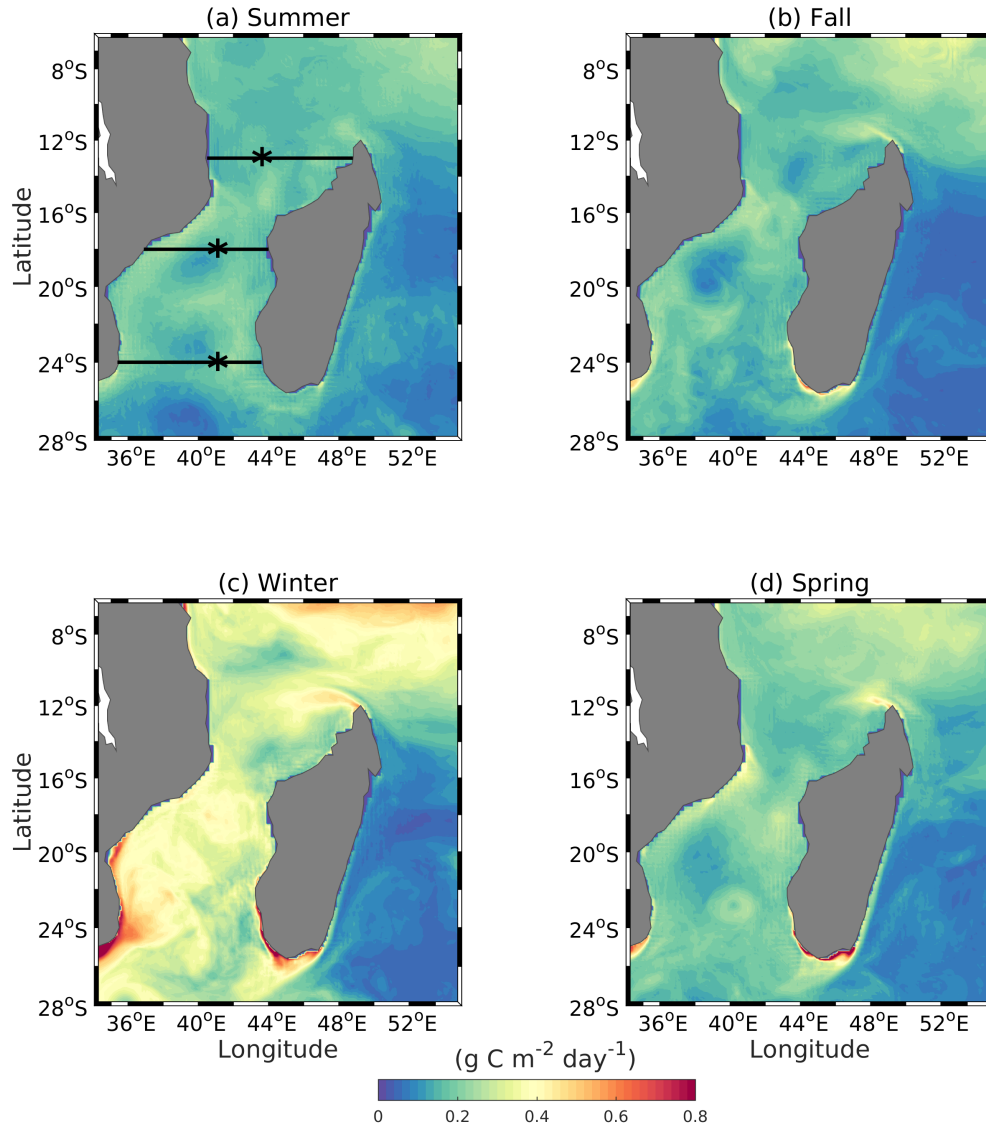


Figure 3.3: Same as figure 3.2, but for new primary production. The lines and stars in (a) indicate sites where data is sampled for our analysis in this chapter.

subsurface oxygen minimum. This difference could be induced by the global circulation intruded at the boundary conditions of the main domain.

3.4.2 Seasonal variability of new production and primary production

In order to understand the mechanisms that drive the seasonal and spatial variability of primary production in the Mozambique Channel over the euphotic zone, we analyze new production, f -ratio and the vertical and horizontal advection terms of nitrate in north, center and south regions of the channel (Fig.3.5). New and regenerated production differ one from another by the dominant nutrient source used to synthesize the organic

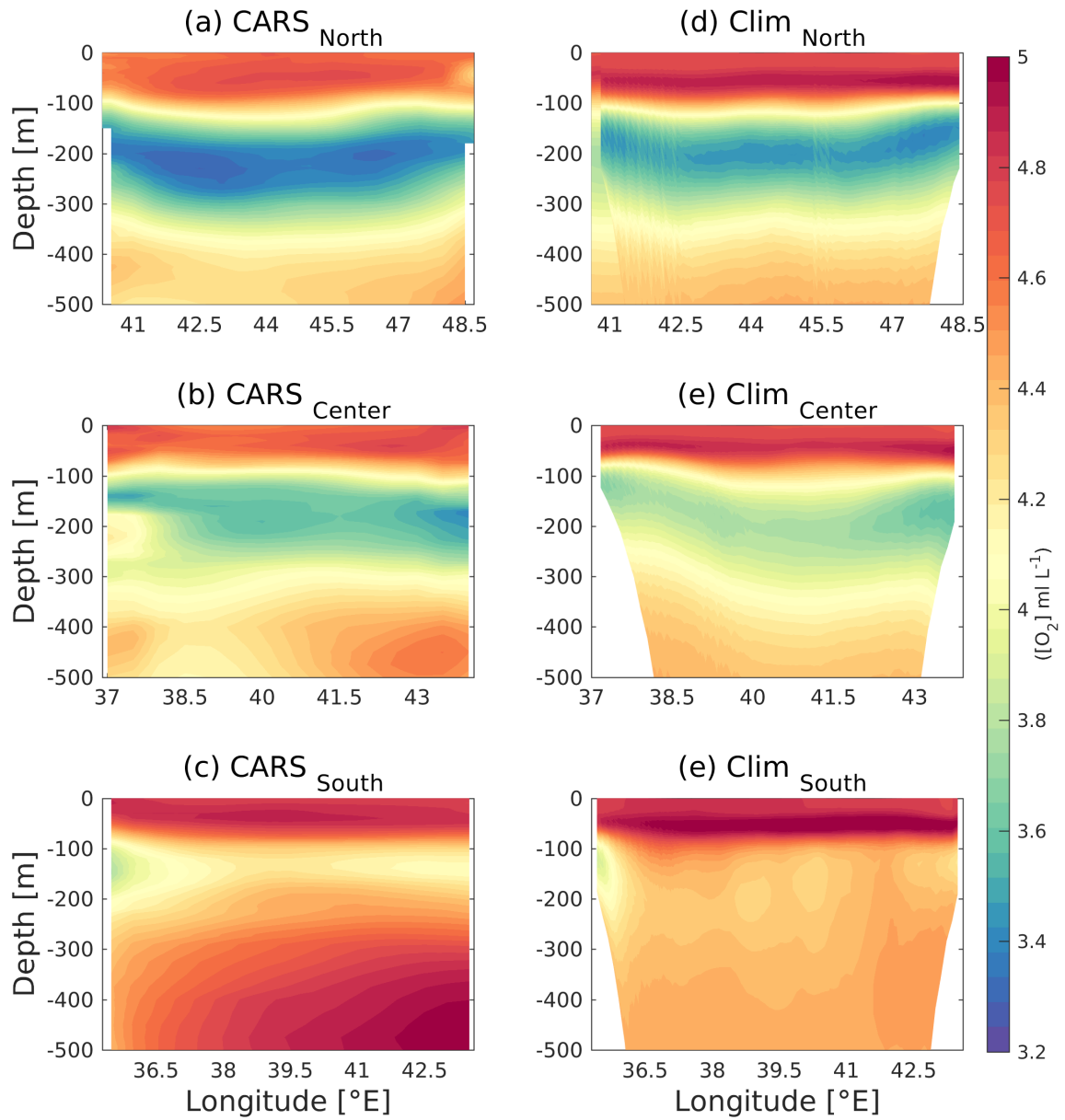


Figure 3.4: Vertical profiles of dissolved oxygen obtained at 13°S (a-b); 18°S (c-d); and 24°S (e-f), representing respectively the northern, central and southern regions of the Mozambique Channel (See figure 3.3).

compound. f -Ratio (Eppley e Peterson, 1979), is the ratio between new and total production, used to distinguish whether the primary production is based on nitrate (new) or ammonium (regenerated). The horizontal advection terms of nitrate correspond to the sum of meridional and zonal components.

The vertical and horizontal advection terms of nitrate are high during winter in the three regions of the Mozambique Channel. The peak of f -ratio coincide with the verti-

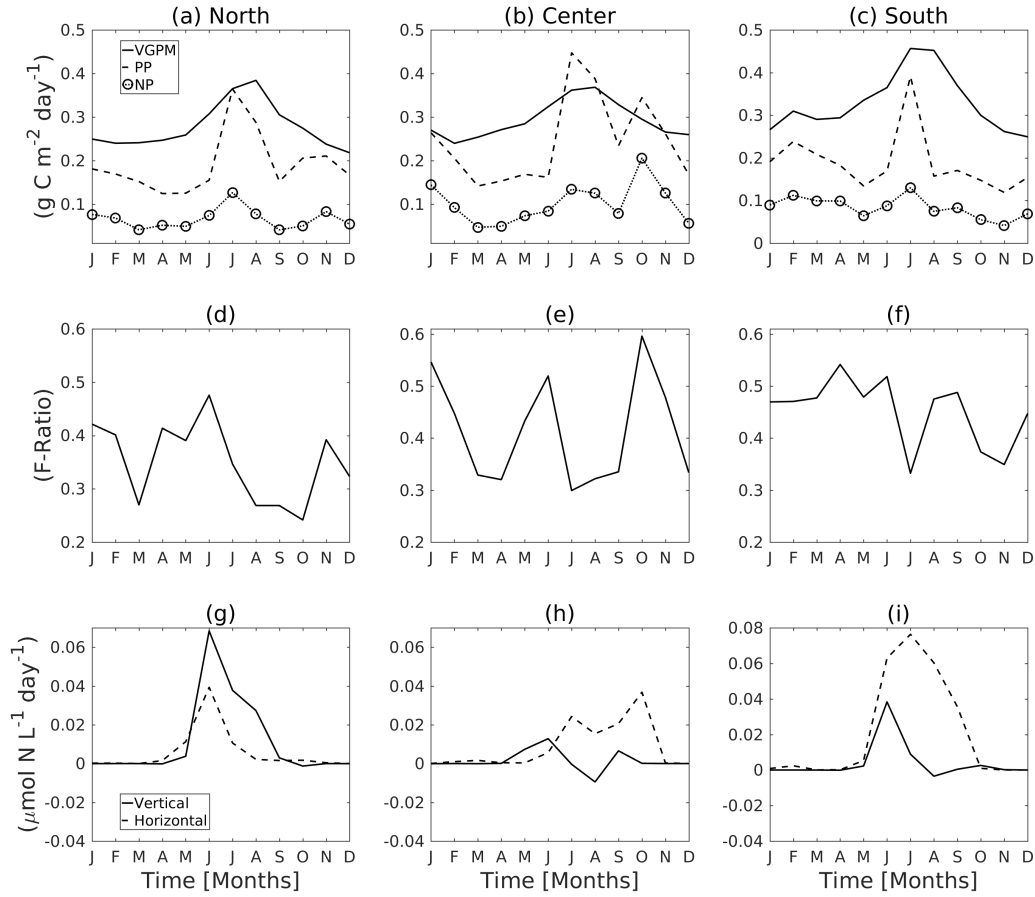


Figure 3.5: Seasonal evolution of new and primary production (a-c), f-ratio (e-f) and vertical and horizontal terms of nitrate (g-i) in the three regions of the Mozambique Channel.

cal advection term indicating that the primary production in the Mozambique Channel during winter is modulated by vertical nitrate advection. However, the vertical advection term of nitrate in the central part is weaker when compared to north and south, suggesting that other factors such as entrainment due to deepening of mixed layer may also contribute to supply nutrients into the euphotic zone (Fig. 3.6-b).

High values of f -ratio in winter are verified in the three regions indicating that the system shifts from ammonium based primary production in fall to nitrate based primary production in winter. In the south, f -ratio is also high in winter, but it appears to be more influenced by horizontal advection. Conversely, small amount of nutrients occur in the summer which increases slightly the NP values with focus to the northern part of the Mozambique Channel. The lateral input of nutrients by mesoscale processes may also occur and change the nutrients dependence in the system. For example, horizontal advection resulted in nitrate supply during October which enhanced NP and PP (Fig. 3.5e).

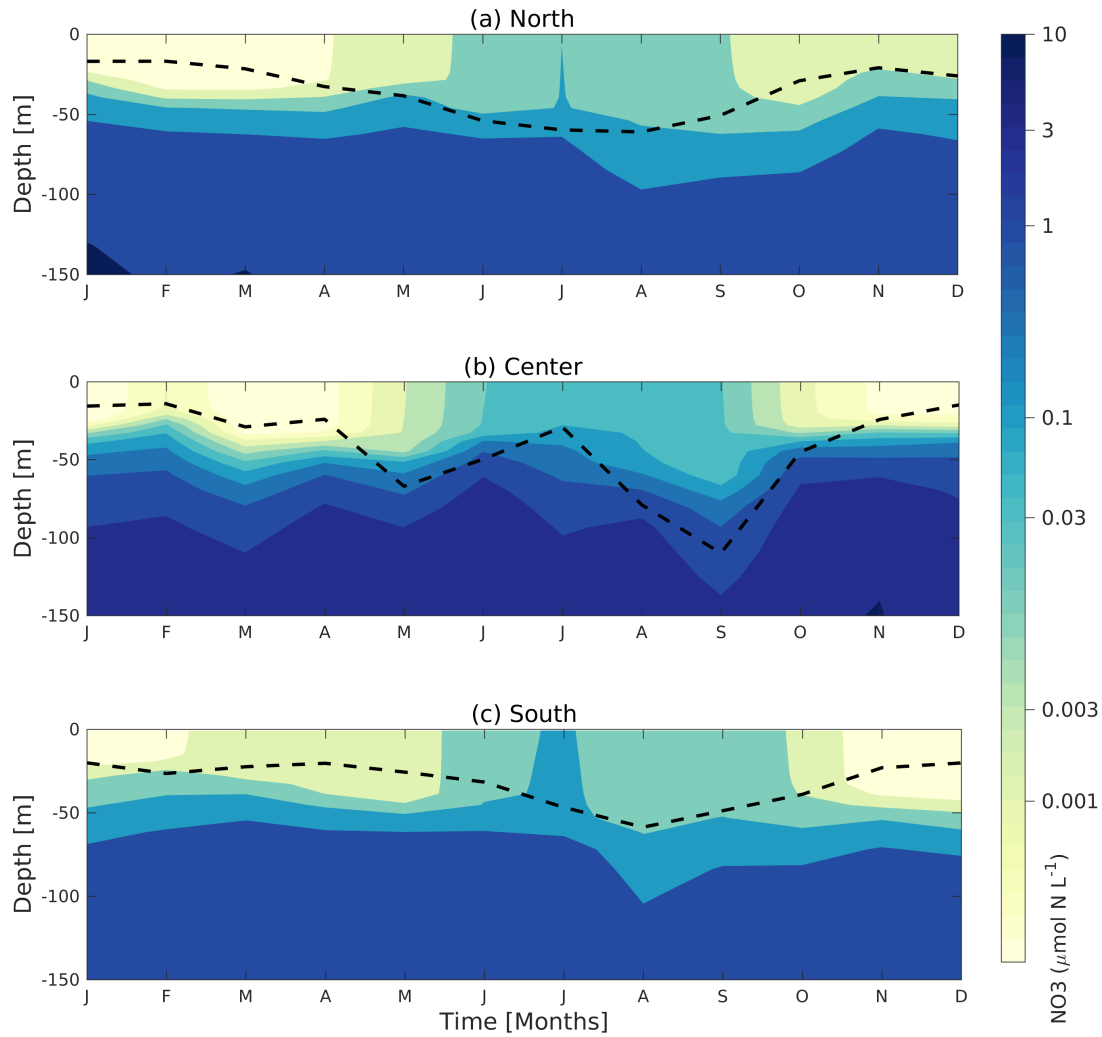


Figure 3.6: Time-depth evolution of nitrate (colored) overlaid by Mixed Layer Depth (m) representing the (a) north, (b) center, (c) south parts of the Mozambique Channel.

3.4.3 Phytoplankton and grazing by zooplankton

Next, we analyze how the pattern of physical processes affect the distribution of phytoplankton biomass in the three regions of the Mozambique Channel (Fig. 3.3a). Differences in the two classes/groups of phytoplankton in north, center and south, are made by comparing their concentrations at the surface (Fig. 3.7). The biomass in the vast area of the Mozambique Channel is about 2 times higher in winter than in summer, for both small (nanophytoplankton) and big (diatoms) sizes of phytoplankton, however, nanophytoplankton biomass double the concentrations of diatoms (Fig. 3.7a-b). The differences in biomass between the two classes of phytoplankton is because nanophytoplankton is more effective in assimilating nitrate than diatoms.

The maximum total phytoplankton biomass (nanophytoplankton+diatoms) in winter

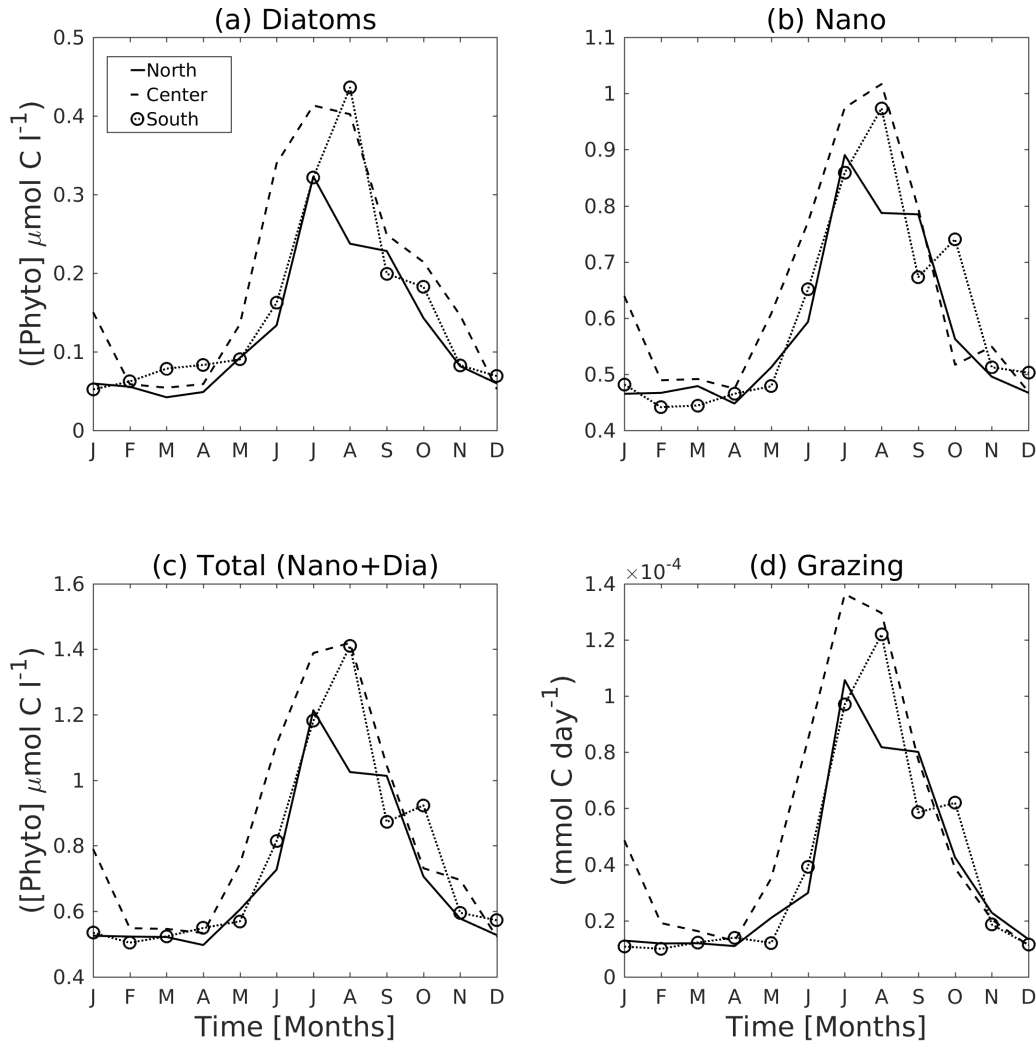


Figure 3.7: Temporal evolution of two classes/groups of phytoplankton in the Mozambique Channel. The data corresponds to (a) diatoms (dia); (b) nanophytoplankton (nano); (c) total phytoplankton (dia+nano) ; and (d) grazing on phytoplankton by zooplankton at the surface. The data is taken from north (continued), center (dashed) and south (circle-dotted) parts of the Mozambique Channel.

increase slightly with latitude, with lower biomass in north and higher in center and south (Fig. 3.7c). Higher concentrations of subsurface phytoplankton in center and south than in north during early winter, may contribute to the observed differences in the surface total phytoplankton biomass when upwelled to the surface in winter. Grazing by phytoplankton increases in proportion with phytoplankton abundance (Fig. 3.7d) despite the deepening of the MLD. The near-linear increase of grazing pressure on phytoplankton by zooplankton highlights phytoplankton stock in the Mozambique Channel is strongly controlled by the secondary producer (zooplankton), since MLD have positive effect on the phytoplankton biomass in the region.

3.4.4 Driving mechanism of the spatial variability of PP

The mechanisms that control the spatial distribution of primary production in the Mozambique Channel are analyzed using model results from sensitivity experiments with suppressed wind stress (NOWIND) and heat fluxes (NOHEAT). Values of PP from the two sensitivity experiments are contrasted to the equivalent climatological simulation of wind stress and net heat flux (CTL), where both surface forcing were kept unchanged. Higher values of the relative difference between CTL and NOWIND indicate that the wind stress is a dominant driving mechanism of depth-integrated PP in north, while its influence decreases with latitude toward central and southern parts of the channel (Fig. 3.8c). The apparent small contribution of wind stress in south and center, should be attributed to weaker winds variability used in our simulation (less than 0.1 N m^{-2} all the year). There is a slightly increase in PP during winter in the southern tip of Madagascar due to wind stress, in agreement with previous analysis in [Ramanantsoa *et al.* \(2018\)](#)

In summer, the effects of winds on PP is weaker (Fig. 3.8a) suggesting that much of the production rate is confined to subsurface waters, where phytoplankton biomass is high due to abundance of light from above and nutrients from below the base of nitracline. In fall, when the winds start strengthening as well as in spring when winds decay, its little influence is seen in the central part of the Mozambique Channel (Fig. 3.8b-d). Physical processes such as entrainment in fall and detrainment in spring may slightly fuel primary production at lower rate. But, detrainment is less productive since it is not accompanied by nitrate uplift to surface layer ([McCreary *et al.*, 2009](#)).

In contrast to wind stress, net heat flux have a major influence in the central and southern parts of the channel during winter (Fig. 3.9c), following its negative values which increases with latitude at the same period (Fig. 1.3b). However the relatively high production may also be enhanced by mesoscale eddies that dominate in the central and southern parts of the Mozambique Channel.

The effect of heat fluxes on PP during summer and spring is negligible (Fig. 3.9a & d), which is the period when the water column is stratified. At this time, a loss of surface heat flux may be associated to the winds variability where stronger wind stress could result in reduced the SST. As in the NOWIND experiment, NOHEAT have a considerable contribution for phytoplankton growth in fall, which is because of entrainment of nutrients during the onset of the deepening of the MLD.

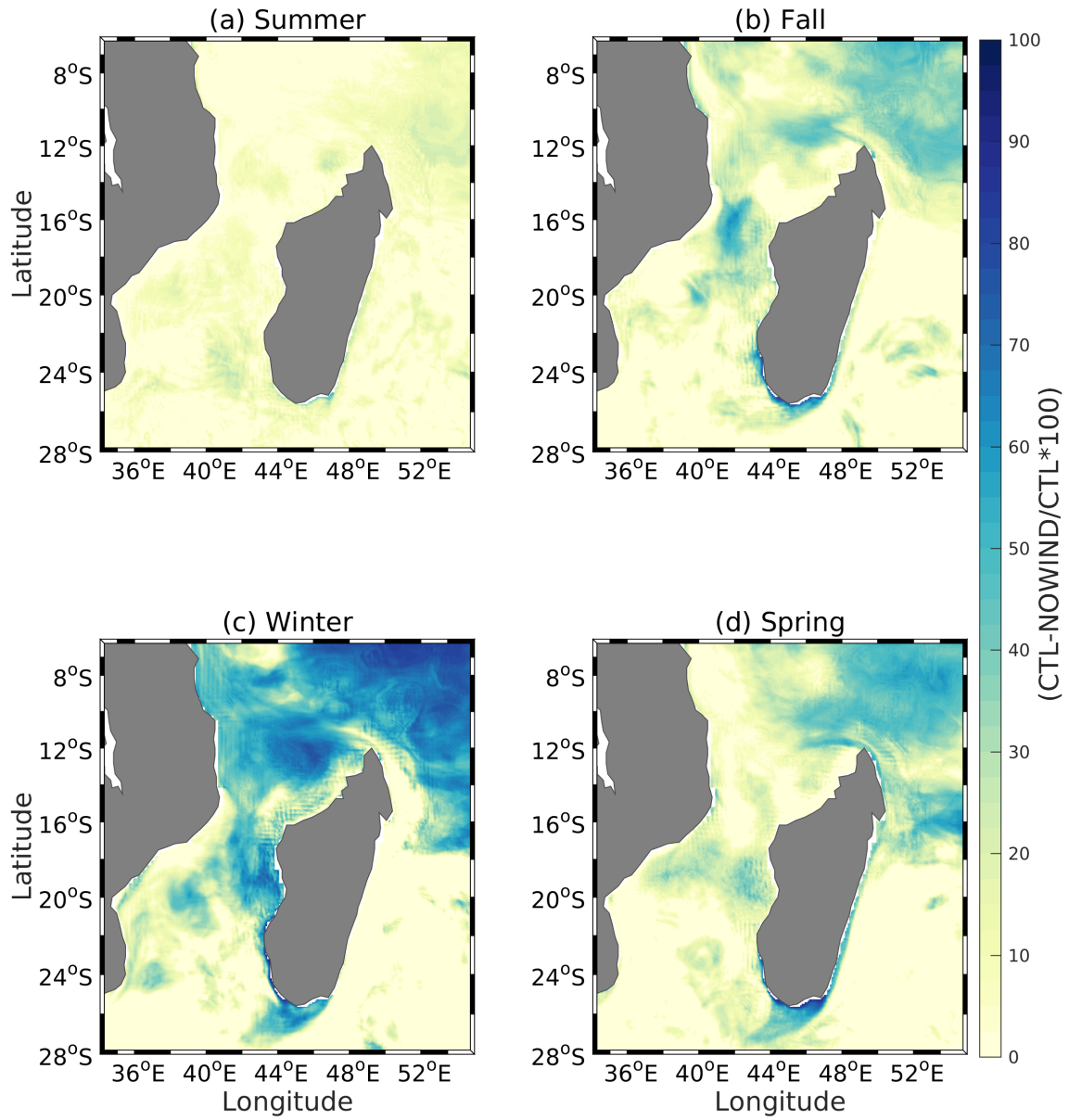


Figure 3.8: Relative difference (%) between CLIM and NOWIND experiment ($CLIM-NOWIND/CLIM*100$), showing the spatial and seasonal distribution of the wind contribution to depth-averaged PP in the Mozambique Channel.

3.4.5 Effects of eddies on the temporal variation of phytoplankton

Mesoscale eddies contribution for phytoplankton variability is assessed at fixed locations in north, center and southern parts of the Mozambique Channel (Fig. 2.1b). This allow us to understand how this features change the biological production in time. We are also interested in understanding how phytoplankton variability is influenced by the

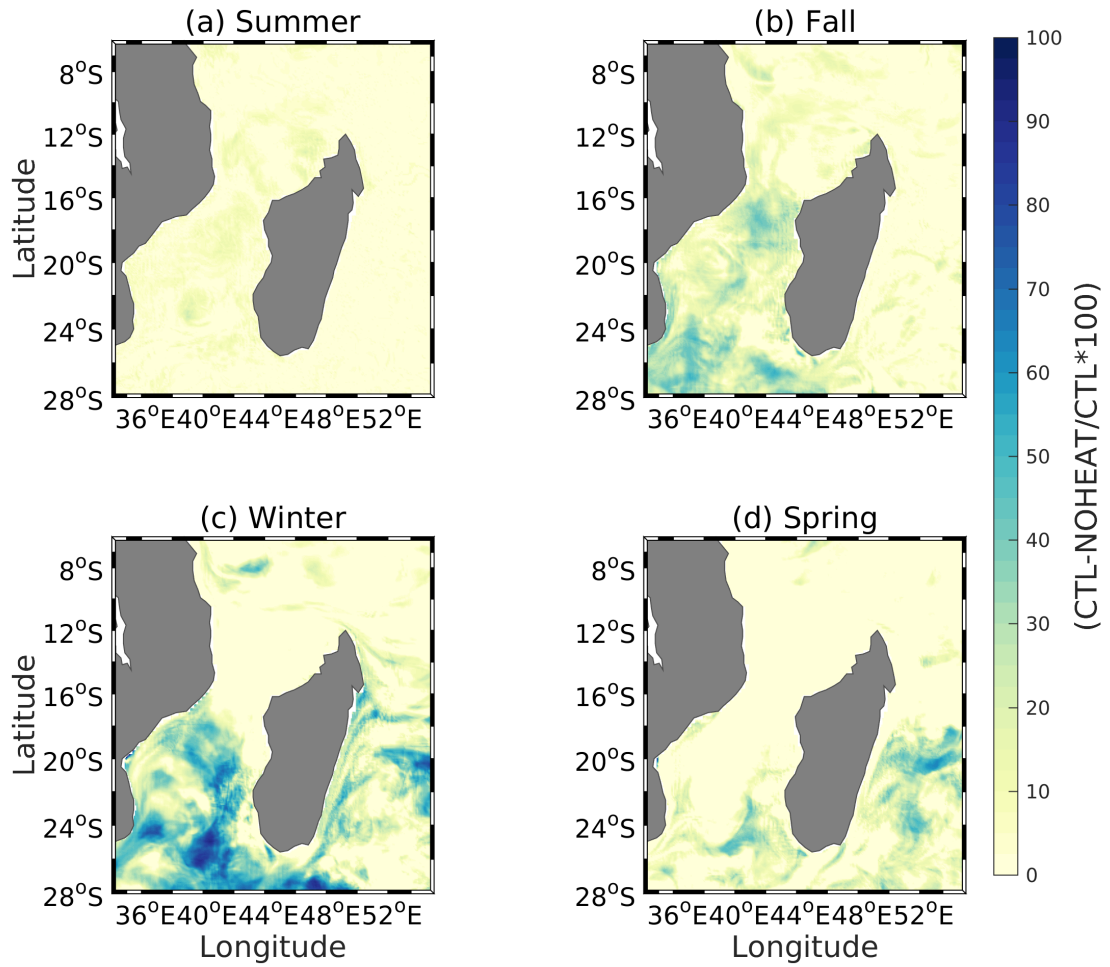


Figure 3.9: Same as figure 3.8, but for the net heat flux experiment (NOHEAT).

model resolution in the areas of intense mesoscale eddies activity in the region.

There is a positive relationship between high EKE values and enhanced phytoplankton biomass in the channel, with focus in the north (Fig. 3.10) and central (3.11) parts, and with little visibility in south (Fig. 3.12). However, high phytoplankton concentrations seem to follow high EKE values in the parent configuration than in child. This is evidenced in north as well as in center, where phytoplankton biomass is high in parent than in child during winter, following high values of EKE. In contrast, high values of EKE in child did not increase phytoplankton in early summer. This could be because stronger mesoscale eddies in child advects upwelled nitrate away from coastal areas before uptake by phytoplankton. In the central part of the channel, eddies occur almost all yearlong in child, but relatively high nitrate input occurs only in winter, triggering the winter bloom.

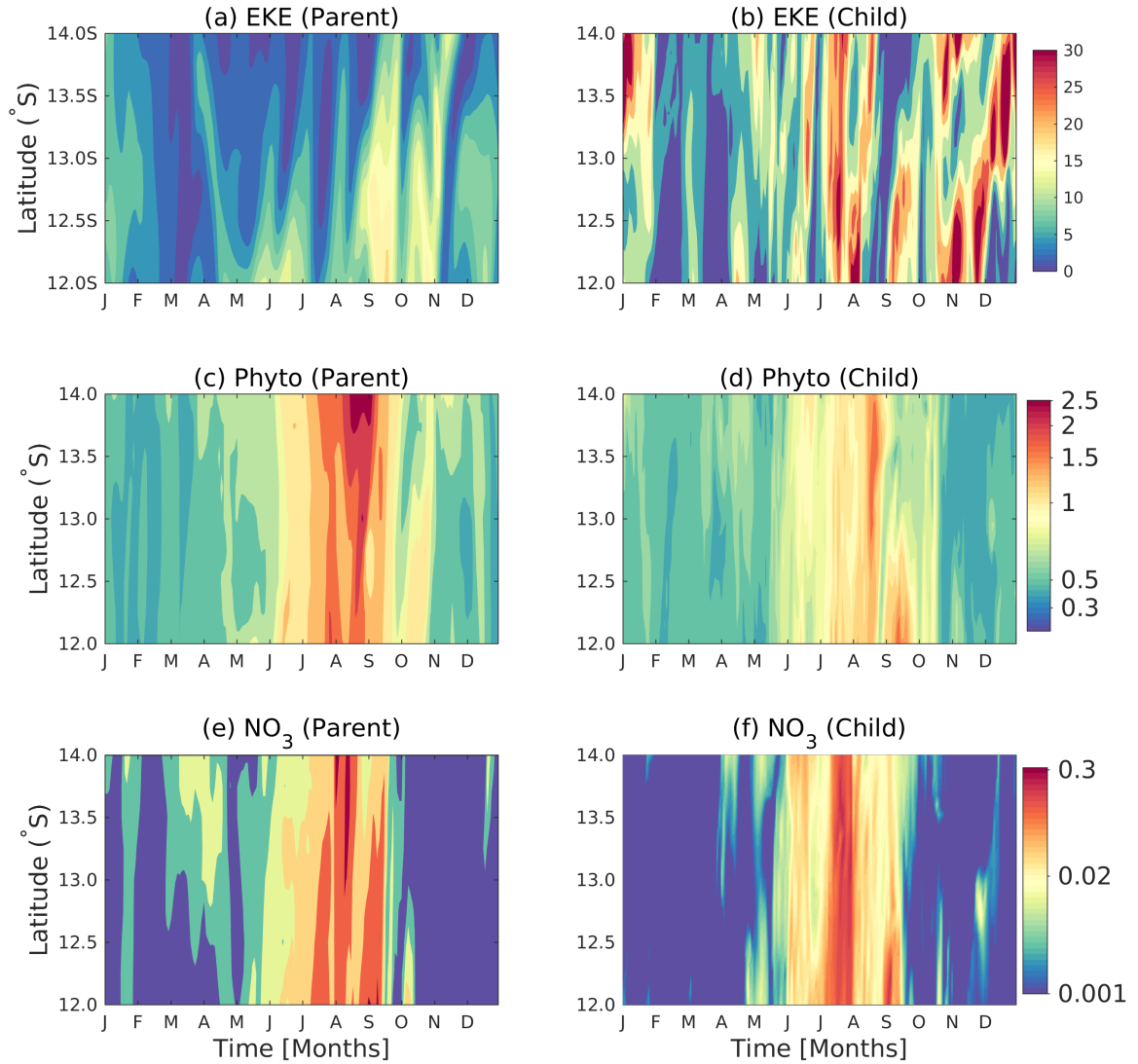


Figure 3.10: *2Days* snapshot showing the time-evolution of surface phytoplankton biomass, EKE and Nitrate in the northern Mozambique Channel.

3.4.6 Conclusion and remarks

In the previous study, we demonstrated using ROMS/PISCES that both wind stress and net heat flux forcing combine to modulate the seasonal cycle of surface chlorophyll concentrations in the northern Mozambique Channel. In the present chapter, the sensitivity experiments, NOWIND and NOHEAT are contrasted with the climatological experiment, CONTROL in order to evaluate their contribution to the spatial and temporal variability of primary production in the whole Mozambique Channel.

Overall, primary production followed the variability of new production, with a higher production rate in winter, followed by intermediate rate in spring and fall and a mi-

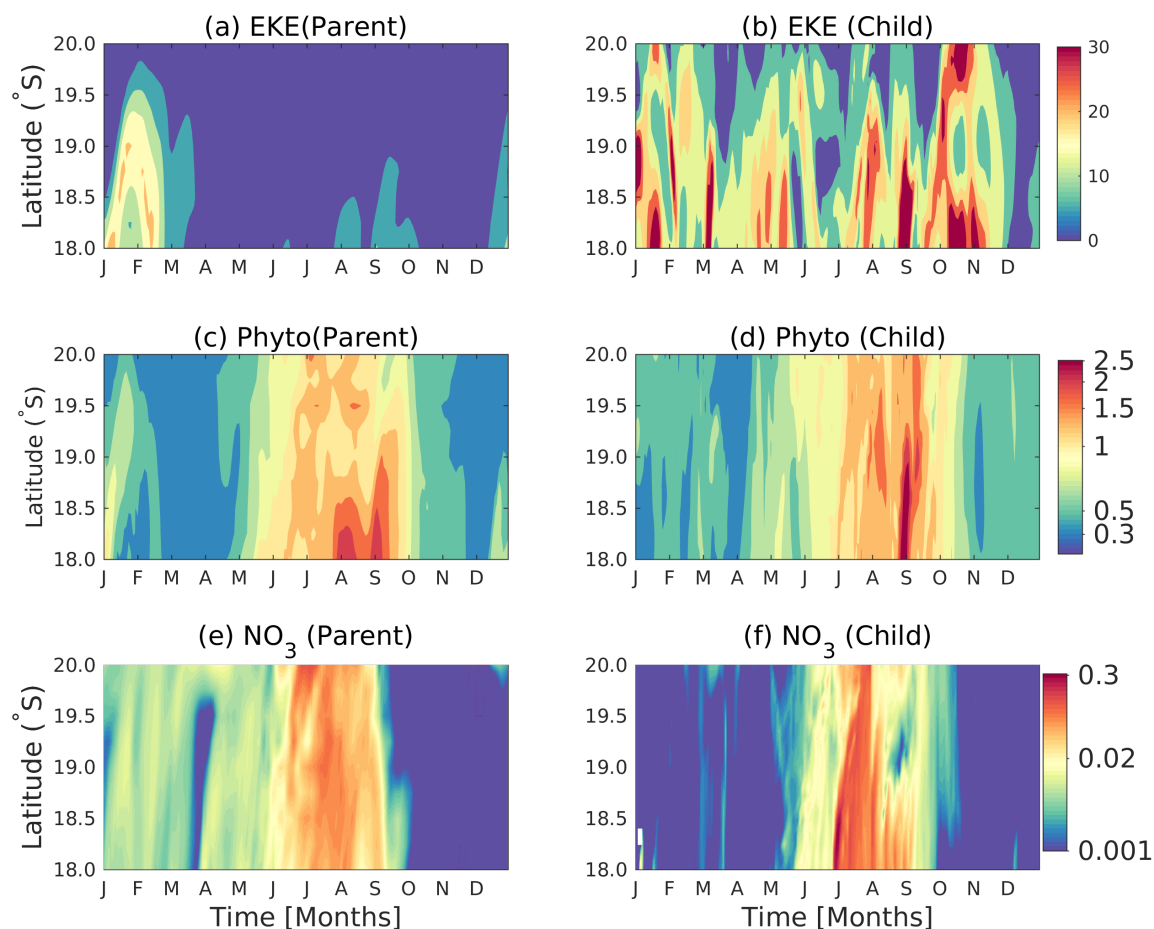


Figure 3.11: Same as figure 3.10, but for the central part of the Mozambique Channel.

nimum production rate during summer in the vast area of the Mozambique Channel. Depth-integrated primary production is about twice the new production during winter. This indicate that primary production in the Mozambique Channel depends on nitrate in winter (f -ratio of about 0.5) and most of the periods the production is based on ammonium.

Surface phytoplankton biomass in the Mozambique Channel is higher in winter, where small classe/group contribute with more than 60 % of the total phytoplankton biomass. The increase in phytoplankton abundance in the region is accompanied by enhancement in zooplankton biomass. Grazing on phytoplankton by zooplankton increases in linear proportion of phytoplankton biomass, despite deepening of the MLD during winter. This is explained by increase in primary production which exceeds the pressure on phytoplankton by zooplankton, a indication that the phytoplankton abundance in the region is mainly controlled by zooplankton.

Wind stress seems to be the dominante mechanism driving the primary production

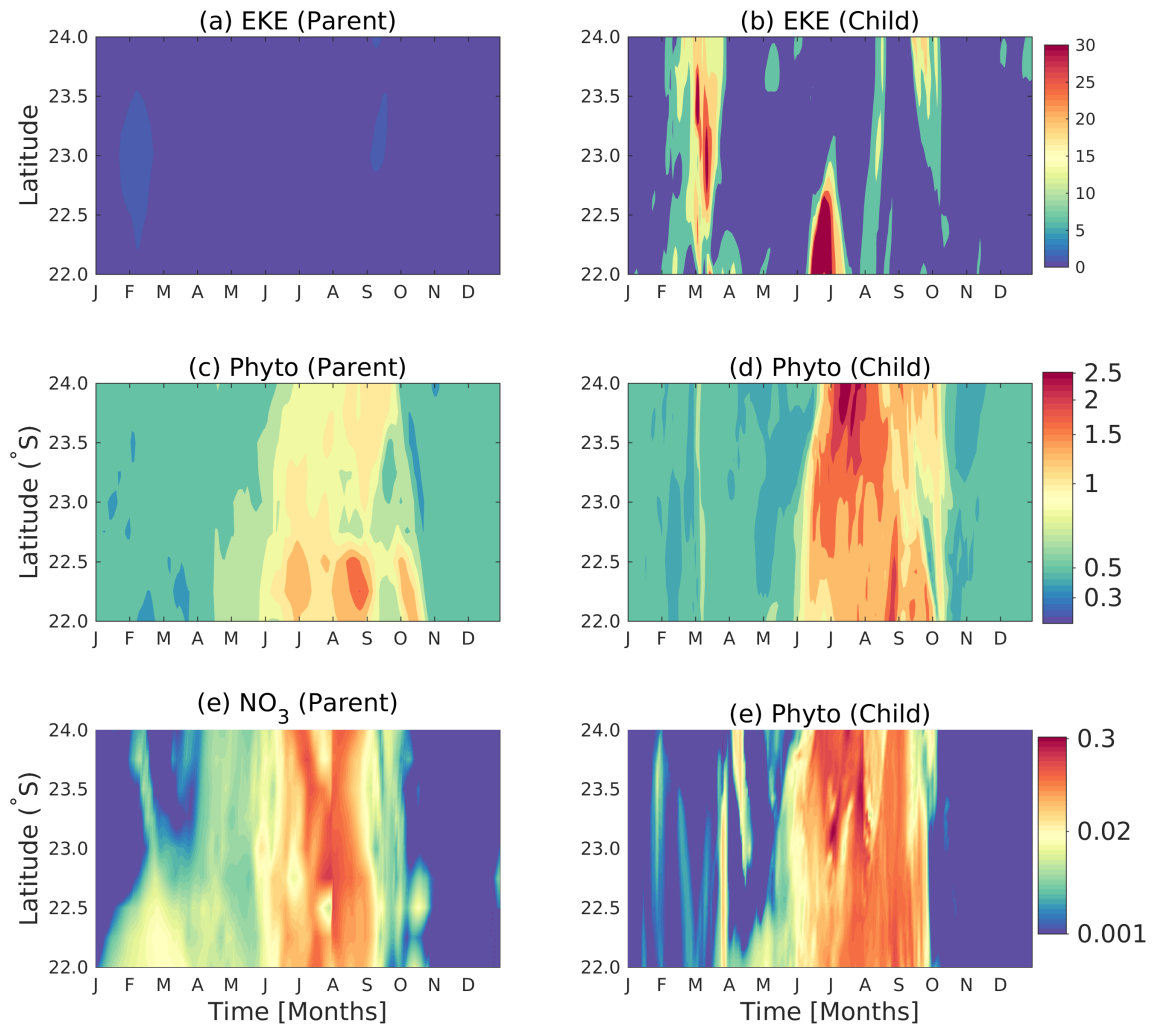


Figure 3.12: Same as figure 3.10, but for the southern part of the Mozambique Channel.

in north than in central and southern parts of the Mozambique Channel, while net heat flux has a major influence in the southern part. However, in central and southern parts of the channel mesoscale eddies also contribute to primary production.

Capítulo 5

Conclusões

Neste estudo foi utilizado o modelo hidrodinâmico ROMS acoplado ao modelo biogeoquímico PISCES para investigar os processos físicos que regulam o ciclo anual da clorofila superficial no norte do Canal de Moçambique. Configurações com $1/4^\circ$ ($\sim 25\text{km}$) e com $1/12^\circ$ ($\sim 9\text{km}$) de resolução horizontal foram usadas para analisar a sua influência na circulação e na concentração superficial da clorofila no Canal de Moçambique. Para a análise do ciclo anual da clorofila superficial o modelo foi forçado com ventos climatológicos.

A configuração de maior resolução ($1/12^\circ$) foi mais efectiva na reprodução da circulação no Canal de Moçambique quando comparada às estimativas do altímetro. As diferenças da temperatura e salinidade entre o modelo e as observações foram reduzidas consideravelmente no modelo de alta resolução.

As concentrações anuais da clorofila superficial no norte do Canal de Moçambique foram de 0.10 e $0.15 \text{ mg Chl } m^{-3}$ para o modelo de alta resolução, valores similares aos estimados pelo sensor remoto MODIS. Em contrapartida, obteve-se concentrações menores de $0.10 \text{ mg Chl } m^{-3}$ no modelo de baixa resolução.

Em geral, os resultados do modelo de alta resolução equiparam-se melhor às observações, destacando a importância da resolução do modelo na reprodução de processos físicos como por exemplo a mistura vertical de o que proporcionou melhorias na estimativa e distribuição espacial da clorofila superficial na região.

O ciclo anual da clorofila superficial no norte do Canal de Moçambique está associado não só ao vento, como também ao fluxo de calor, através da modulação da camada de mistura. A máxima de clorofila superficial ($\sim 0.20 \text{ mg Chl } m^{-3}$) verificada no inverno deve-se primeiramente ao *entrainment* de nutrientes devido ao fluxo de calor negativo. Durante o verão, as concentrações da clorofila superficial baixam ($\sim 0.10 \text{ mg Chl } m^{-3}$) devido à redução no suprimento de nutrientes, que ficam confinados na base da nutriclina

onde é formada a máxima de clorofila subsuperficial ($\sim 0.20 \text{ mg Chl } m^{-3}$).

A análise sazonal da produção primária foi feita comparando as regiões norte, centro e sul do Canal de Moçambique, onde se verificou que o vento mostrou ser mais relevante na região norte do canal. Por sua vez, as regiões centro e sul do canal, o fluxo de Calor foi o mais relevante. Refira-se que nestas duas regiões o vento ter menor variabilidade ao longo do ano. Com a introdução do vento sinóptico, a produção primária aumentou em até 70% no Canal de Moçambique, em relação aos valores obtidos pela simulação com ventos mensais. O aumento na produção primária na simulação com o vento diário deveu-se à intensa mistura vertical causada pela intensificação das velocidades.

5.1 Sugestões para Pesquisas Futuras

O modelo utilizado neste estudo foi capaz de reproduzir condignamente o padrão sazonal da clorofila superficial no Canal de Moçambique. Ficou evidente que para além da resolução espacial horizontal, o uso de forçantes realísticas é fundamental para reproduzir as concentrações da clorofila superficial. Contudo, o modelo tende a superestimar as concentrações de clorofila superficial durante o inverno. Sendo assim, sugere-se que nos próximos estudos sejam testados os parâmetros biogeoquímicos com base nas observações.

Como a alteração da resolução temporal do vento mensal para o diário resultou no aumento da produção primária na região, sugere-se que nos próximos estudos sobre a variabilidade da produção primária no Canal de Moçambique sejam testados ventos com resolução temporal ainda maior (e.g. 6 horas).

Apêndice A

Apêndice

O presente estudo é baseado na modelagem numérica o que permitiu uma abordagem multidisciplinar e sinóptica das interações físico-biogeoquímicas no Canal de Moçambique. Esta parte do trabalho visa essencialmente apresentar informações adicionais sobre o modelo usado e também mostrar as diferenças entre os resultados do modelo e os dados observacionais na região. Estas diferenças são importantes não só para se ter noção do nível de incerteza das saídas do modelo em relação aos dados observacionais como também para que sejam feitos ajustes no sentido de melhorar os resultados do modelo em futuros estudos.

A.1 Modelo Hidrodinâmico

Para análise da complexa hidrodinâmica do Canal de Moçambique e a sua influência na variabilidade da produção biológica foi usado o modelo oceânico regional ROMS. O ROMS resolve as equações primitivas do movimento (Eq. A.1), tendo em consideração a equação de conservação de massa (Eq. A.2), as aproximações hidrostática e de Boussinesq. Este modelo foi projetado para simular realisticamente processos oceânicos que ocorrem em escalas locais e regionais e com elevada resolução espacial e temporal (Shchepetkin e McWilliams, 2005). O ROMS é um modelo de superfície livre do oceano, incluindo deste modo processos físicos importantes como as marés e dispersão associada às ondas, processos que são ignorados ou alterados em modelos que assumem uma superfície rígida.

O uso da interação mútua entre a advecção e os traçadores no ROMS permite o aumento passo de tempo mantendo-o estável e sem perder a sua precisão.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial[\rho u_i u_j]}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{A.2})$$

Onde:

ρ - densidade da água do mar;

u_i - i ésima componente da velocidade;

x_i - i ésima componente do espaço;

p - pressão; e

τ_{ij} - componentes da tensão superficial do vento; e

f - outras forças;

O ROMS foi testado no Canal de Moçambique e mostrou ser eficaz na representação das principais feições oceanográficas como por exemplo os vortices de mesoescala (e.g. [Halo *et al.* \(2014\)](#)). Aliado a isto, está o fato de o modelo ter a praticidade em assimilar dados realísticos e complexos de batimetria e ainda as forçantes e condições de contorno com diferentes resoluções, quer temporal bem como a espacial.

A.2 Modelo Biogeoquímico

Para determinar a variabilidade sazonal dos processos biológicos devido aos efeitos do *stress* do vento e do fluxo de calor na camada de mistura no Canal de Moçambique, o ROMS foi acoplado ao modelo biogeoquímico PISCES. O PISCES simula a produção biológica das primeiras cadeias tróficas dos oceanos (fitoplâncton e zooplâncton), os ciclos biogeoquímicos do carbono e ainda os principais nutrientes (P, N, Si, Fe) ([Aumont e Bopp, 2006](#)). Importa referir que os nutrientes não são independentes no PISCES mas são relacionados pela razão de Redfield C/N/P (122/16/1). A razão de Redfield é mantida constante durante a simulação. Contudo, o modelo considera os processos de nitrificação e desnitrificação associados ao nitrogênio.

O fitoplâncton é controlado por uma combinação de fatores físicos como a temperatura, luz, advecção e difusão assim como aos processos biológicos como a predação e a exportação da matéria orgânica. Dois tamanhos/grupos do fitoplâncton (nanofitoplâncton e diatomáceas) e do zooplâncton (microzooplâncton e mesozooplâncton) são explicitamente modeladas no PISCES. A produção do nanofitoplâncton no PISCES é dada pela equação (A.3), tendo em consideração os termos de produção (Eq. A.4), da limitação do fosfato (Eq. A.5), ferro (Eq. A.6), nitrato (Eq. A.7), amônio (Eq. A.8) e a limitação de todos os nutrientes (Eq. A.9).

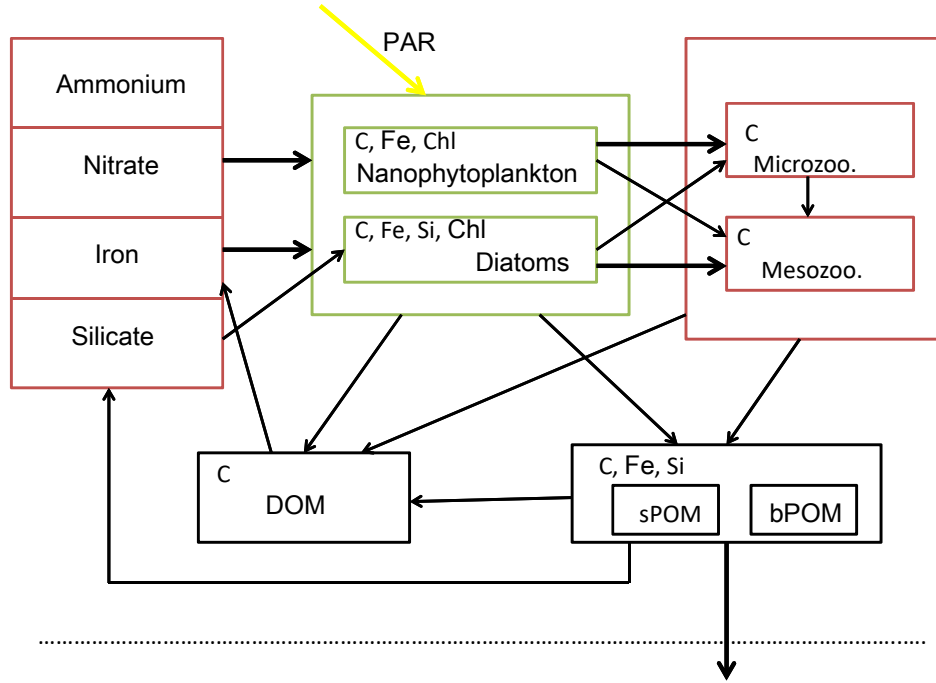


Figura A.1: Representação esquemática do PISCES. Na figura mostra-se apenas a parte do ecossistema sem incluir o ciclo de carbono e o oxigênio. Os elementos modelados explicitamente pelo modelo estão indicados no canto superior esquerdo de cada compartimento. Adaptado de (Aumont e Bopp, 2006).

Equações da produção do nanofitoplâncton (P):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = (1 - \delta^p) \mu^p P - m^p \frac{P}{k_p + P} - w_p^p P^2 - g^Z(P) Z - g^Z(P) M \quad (\text{A.3})$$

Termo de produção:

$$\mu^P = \mu_p \left(1 - e^{-\frac{\alpha^P \left(\frac{chl}{C} \right)^P P_{PAR}}{\mu^p L_{lim}^P}} \right) L_{lim}^P \quad (\text{A.4})$$

Onde $\mu_p = ab^{a^T}$.

Termos de limitação do nanofitoplâncton:

$$L_{po4}^P = \frac{PO4}{K_{po4}^P + PO4} \quad (\text{A.5})$$

$$L_{Fe}^P = \frac{Fe}{K_{Fe}^P + Fe} \quad (A.6)$$

$$L_{no3}^P = \frac{K_{nh4}^P NO_3}{K_{no3}^P K_{nh4}^P + K_{nh4}^P NO_3 + K_{no3}^P NH_4} \quad (A.7)$$

$$L_{nh4}^P = \frac{K_{no3}^P NH_4}{K_{no3}^P K_{nh4}^P + K_{nh4}^P NO_3 + K_{no3}^P NH_4} \quad (A.8)$$

$$L_{lim}^P = \min(L_{po4}^P, L_{fe}^P, L_{no3}^P, L_{nh4}^P) \quad (A.9)$$

Por sua vez, a produção da diatomácea no PISCES segue a equação (A.10), tendo em consideração os termos de limitação da sílica (Eq. A.11) e a limitação de todos os nutrientes (Eq. A.12).

Equações da produção da diatomácea (D):

$$\frac{\partial D}{\partial t} = (1 - \delta^D) \mu^D D - m^D \frac{D}{K^D + D} D - w_p^D D^2 - g^Z(D)Z - g^M(D)M \quad (A.10)$$

Termos de limitação da diatomácea:

$$L_{Si}^P = \frac{Si}{K_{Si}^D + Si} \quad (A.11)$$

$$L_{lim}^P = \min(L_{po4}^D, L_{fe}^D, L_{no3}^D, L_{nh4}^D, L_{Si}^D) \quad (A.12)$$

Com a exceção da luz, o zooplâncton depende dos mesmos fatores físicos que controlam o fitoplâncton e da própria biomassa do fitoplâncton. Isto é, o crescimento do microzooplâncton depende fundamentalmente da taxa de predação na biomassa do nanofitoplâncton e da diatomácea, entre outros (Eq. A.13). Por outro lado, o crescimento do mesozoplâncton depende também da taxa de predação na biomassa do nanofitoplâncton e da diatomácea adicionando-se ainda a predação no microzooplâncton (Eq. A.14).

Equação da produção do microzooplâncton (Z):

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = e^Z(g^Z(P)) + g^M(D) + g^M(POC_s) + g^M(POC_b))M - r^z \frac{Z}{K_z + Z} Z \quad (A.13)$$

Equação da produção do mesozoplâncton (M):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = e^M(g^M(P) + g^M(D) + g^M(Z) + g^M(POC_s) + g^M(POC_b))M - r^M \frac{M}{K_M + M} M - m^M M^2 \quad (A.14)$$

Tabela A.1: *Descrição dos coeficientes do PISCES*

Símbolo	Significado
δ	Exsudação do Carbono Orgânico Dissolvido
m	Taxa de mortalidade
a	Taxa de crescimento
b	Sensibilidade ao crescimento pela temperatura
c	Dependência do crescimento pela temperatura
K	Constante de meia saturação
w	Mortalidade quadrática média
g	Taxa de predação
α	Curva Inicial
L	Termo de limitação
r	Taxa de excreção
e	Eficiência no crescimento

O significado dos símbolos das equações do PISCES encontram-se na tabela A.1.

No PISCES o crescimento do fitoplâncton depende das concentrações externas dos nutrientes e as razões elementares entre a clorofila e o ferro ou silicato são determinadas no próprio modelo tendo em consideração a disponibilidade de nutrientes. Isto é, as razões Fe/C, Chl/C e Si/C são totalmente modeladas para as duas classes do fitoplâncton.

Outros compartimentos que são modelados no PISCES incluem a matéria orgânica dissolvida (DOM) e a matéria orgânica particulada (POM). Uma parte da POM é depositada no fundo do oceano e a outra parte é utilizada na remineralização. A POM está subdividida em dois grupos, a pequena (small POM, sPOM) e a maior (big POM, bPOM). As interações biogeoquímicas do PISCES estão sumarizadas na Fig. (A.1). Informações mais detalhadas sobre o PISCES são descritas por Aumont e Bopp (2006).

A.3 Validação do Modelo

Produtos diferentes foram utilizados para validar os resultados do modelo referentes a salinidade, temperatura e a clorofila superficial. Trata-se de análises correspondentes as variação espaço-temporal que permitem identificar as diferenças entre o modelo e os dados observacionais. Nesta parte do trabalho são feitas as comparações entre parte dos resultados das simulações climatológicas e os dados observacionais climatológicos.

A.3.1 Salinidade superficial

A salinidade do ROMS é comparada ao produto *Hydrobase*, versão 2. A Hydrobase consiste em dados climatológicos mensais de $1^\circ \times 1^\circ$ de resolução espacial, produzidos a

partir de medições hidrográficas no oceano Índico. O processamento da salinidade da *Hydrobase* é baseado na técnica utilizada por [Lozier et al. \(1995\)](#) para produzir a climatologia no Oceano Atlântico.

O padrão de distribuição espacial e temporal da salinidade superficial modelada pelo ROMS é idêntico às observações da *Hydrobase*, o que indica que o modelo reproduz perfeitamente a salinidade na maior parte do domínio, contudo algumas diferenças são verificadas (Fig. A.2). Por exemplo, baixos valores de salinidade *in situ* de cerca de 34.3 PSU são verificados no verão entre as latitudes de 12 e 18 °S, no interior do Canal de Moçambique (próximo da Ilha de Madagascar). No mesmo local, o modelo tende a superestimar a salinidade durante o verão, fato causado pela não inclusão das descargas dos rios no modelo. Baixos teores de salinidade são verificados durante o outono no norte do Canal de Moçambique, que se estendem para a região central do canal até os 18 °S de latitude nas observações mas que no ROMS os baixos valores da salinidade ficam restritos aos 16 °S de latitude. Estes valores baixos da salinidade superficial no norte do Canal de Moçambique devem-se à alta precipitação que se verifica entre o verão e o outono e que é devido a influência da convergência intertropical dos ventos ([Wyrтки, 1973](#)).

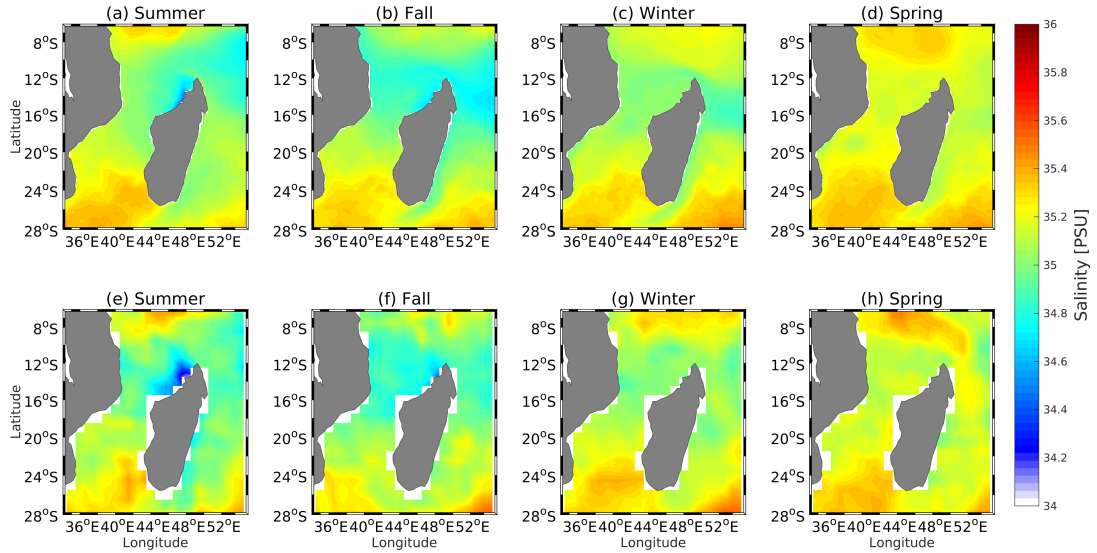


Figura A.2: Distribuição espacial da salinidade superficial no Canal de Moçambique nos períodos de verão (summer), outono (fall), inverno (winter) e primavera (spring). As figuras de cima correspondem ao ROMS (a-d) e as de baixo são relativas aos dados observacionais da *Hydrobase* (e-h).

A.3.2 Temperatura superficial

O MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) é um instrumento a bordo dos satélites Terra e Aqua projetado para adquirir diversos dados em 36 bandas

espectrais em toda a superfície da Terra a cada 1 a 2 dias. Devido a sua elevada resolução temporal e espacial (até 4 km) os dados do MODIS ajudam na compreensão da dinâmica global de processos que ocorrem na terra e nos oceanos. Os dados do MODIS utilizados neste trabalho consistem de médias mensais climatológicas da SST e também da clorofila superficial, referentes ao período de aquisição de dados entre os anos de 2002 e 2012 e com resolução espacial de 4 km.

A análise da SST obtida pelo MODIS no Canal de Moçambique aponta para a amplitude de temperatura que varia de uma média de 28 °C no verão para cerca de 24 °C durante o inverno e valores intermédios (26 °C) no outono e primavera. Em comparação, o ROMS segue o mesmo padrão de distribuição espacial e temporal da SST em todas as estações do ano, mas com valores da temperatura relativamente maiores (Fig. A.3).

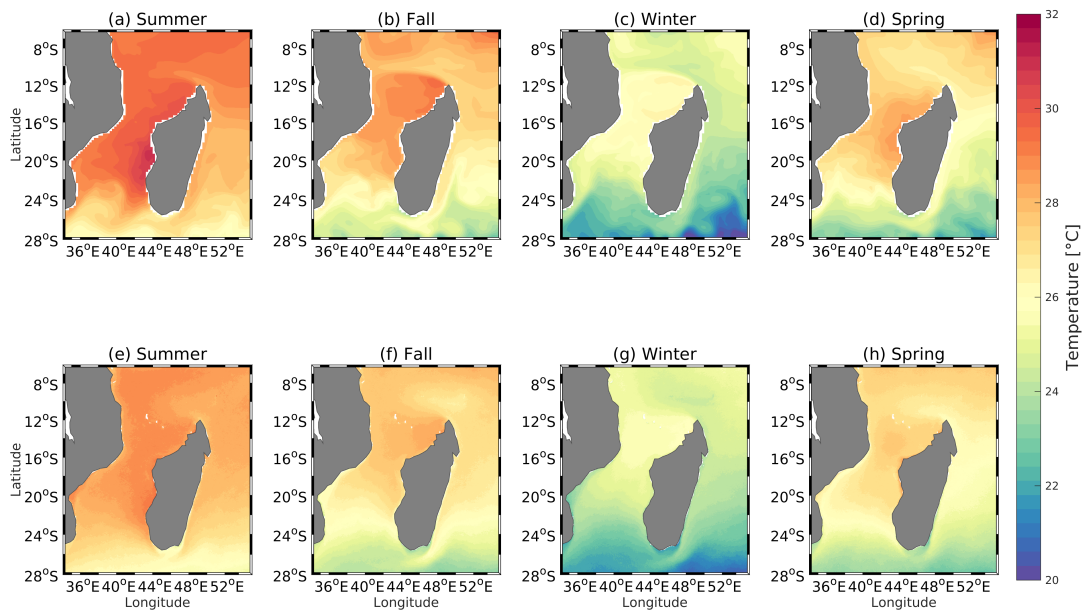


Figura A.3: Distribuição espacial da SST no Canal de Moçambique nos períodos de verão (summer), outono (fall), inverno (winter) e primavera (spring). As figuras de cima são referentes ao ROMS (a-d) e as de baixo são relativas ao MODIS (e-h).

As diferenças da SST efectuadas entre o modelo e o MODIS mostram que o modelo superestima a SST em quase toda área do Canal de Moçambique e sobrestima em alguns locais fora do canal (Fig. A.4). A maior diferença verificou-se durante os períodos de verão e outono quando comparados com o inverno e a primavera. Apesar das diferenças, o modelo reproduz maior parte da variabilidade espaço-temporal da SST no Canal de Moçambique.

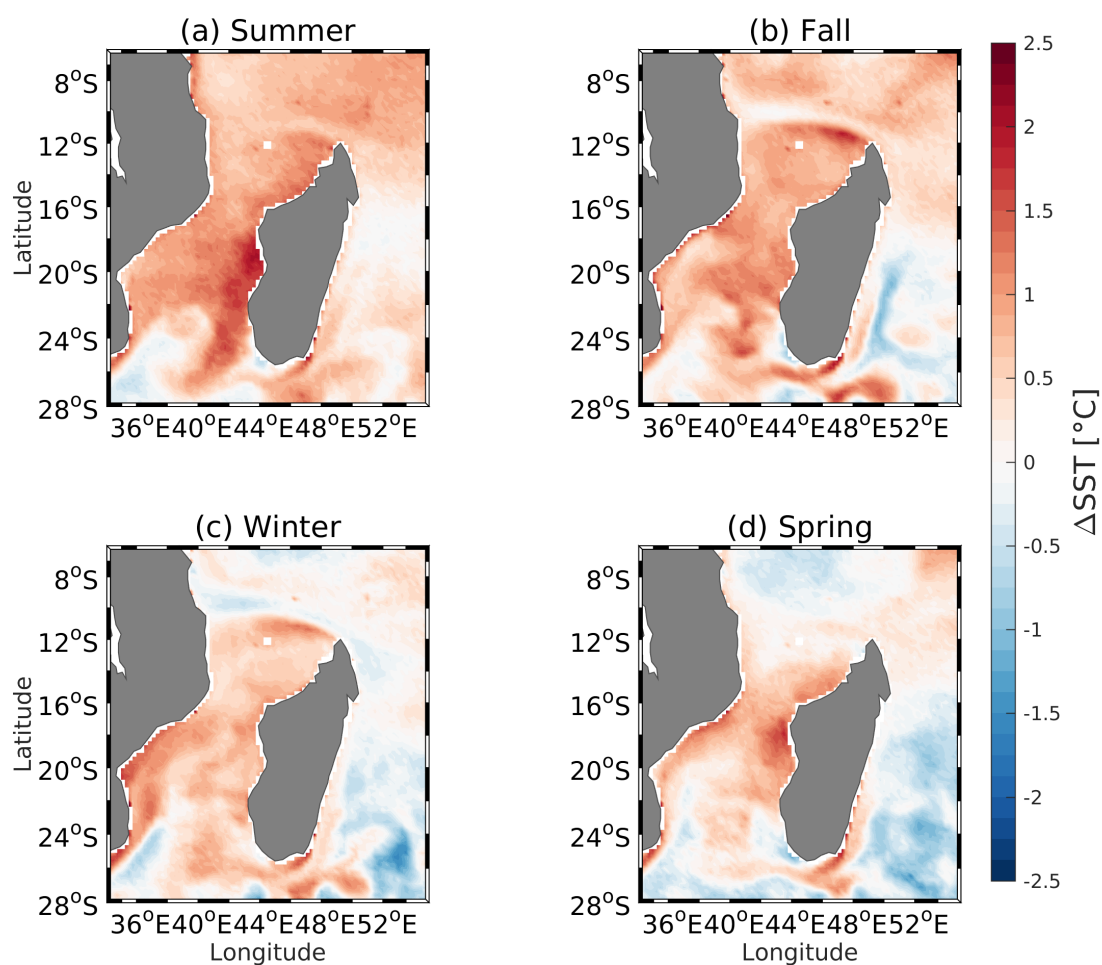


Figura A.4: Diferença na SST no Canal de Moçambique nos períodos de verão (summer), outono (fall), inverno (winter) e primavera (spring). Valores positivos indicam que o modelo superestima a SST e valores negativos indicam que a temperatura é sobrestimada pelo ROMS.

A.3.3 Clorofila superficial

As concentrações da clorofila superficial no Canal de Moçambique mostram um ligeiro aumento do verão para o outono, atingindo o seu valor máximo no inverno e em seguida voltam a decrescer durante a primavera (Fig. A.5). De um modo geral, a distribuição espacial da clorofila do PISCES quando comparada com o MODIS, mostra que o modelo consegue reproduzir corretamente a sazonalidade da clorofila em toda a região do canal de Moçambique, embora com concentrações diferentes entre ambos. No verão, o modelo sobrestima as concentrações da clorofila superficial em todo o domínio enquanto que no inverno o PISCES mostra valores da clorofila maiores do que o MODIS. À semelhança do período de inverno onde as concentrações da clorofila são maiores no modelo do que as estimadas pelo sensoriamento remoto, nos outros períodos do ano o PISCES também superestima ligeiramente os valores da clorofila, mas de forma localizada.

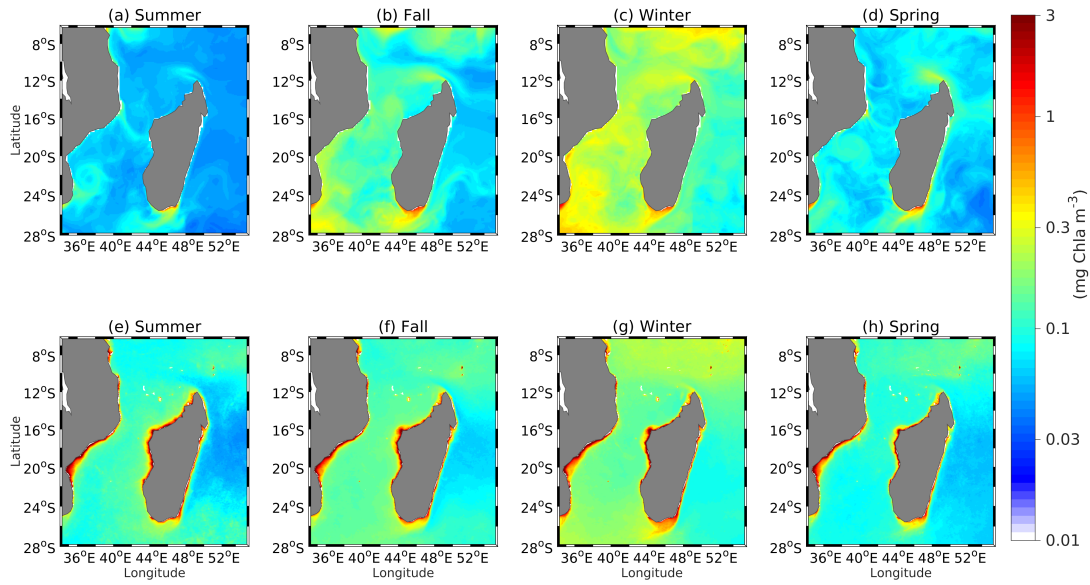


Figura A.5: *O mesmo que a figura A.3, mas para a clorofila superficial.*

Em termos quantitativos, a diferença nas concentrações da clorofila durante o verão é de cerca de $-0.05 \text{ mg Chl m}^{-3}$ no oceano aberto, contudo a diferença aumenta para mais de $-0.2 \text{ mg Chl m}^{-3}$ nas zonas costeiras (Fig. A.6-a). Importa referir que as marés e os rios não foram incluídos no modelo pois o presente estudo tinha como objetivo estudar processos em oceano aberto. Os processos de mistura e aporte de nutrientes associados respectivamente as marés e aos rios podem ter contribuído para exacerbar as diferenças nas concentrações de clorofila superficial nas zonas costeiras. As baixas concentrações do modelo em relação ao MODIS nas regiões costeiras verificam-se em todas as estações do ano.

Durante o outono, as diferenças entre as concentrações da clorofila superficial mostram que os valores modelados da clorofila são mais próximos do MODIS do lado da costa de Moçambique, mas do lado da costa de Madagascar o modelo sobrestima ligeiramente a clorofila (Fig. A.6-b). Para ambos lados do canal, a diferença entre o MODIS e o modelo não excede os $\pm 0.05 \text{ mg Chl m}^{-3}$, com a exceção do limite sul do canal onde a diferença supera os $0.05 \text{ mg Chl m}^{-3}$. Assim como no outono, a diferença nas concentrações da clorofila limita-se aos $\pm 0.05 \text{ mg Chl m}^{-3}$ durante a primavera, mas o distribuição espacial é diferente (Fig. A.6-d). O norte do canal apresenta a maior diferença enquanto o sul os valores da clorofila estão mais próximos de MODIS, sem contudo apresentar nenhuma tendência de variação zonal da clorofila como no outono. Por fim, a diferença durante o inverno é mais de $0.1 \text{ mg Chl m}^{-3}$, sendo o centro e sul do canal os locais onde o modelo mais superestima as concentrações da clorofila superficial (Fig. A.6-c).

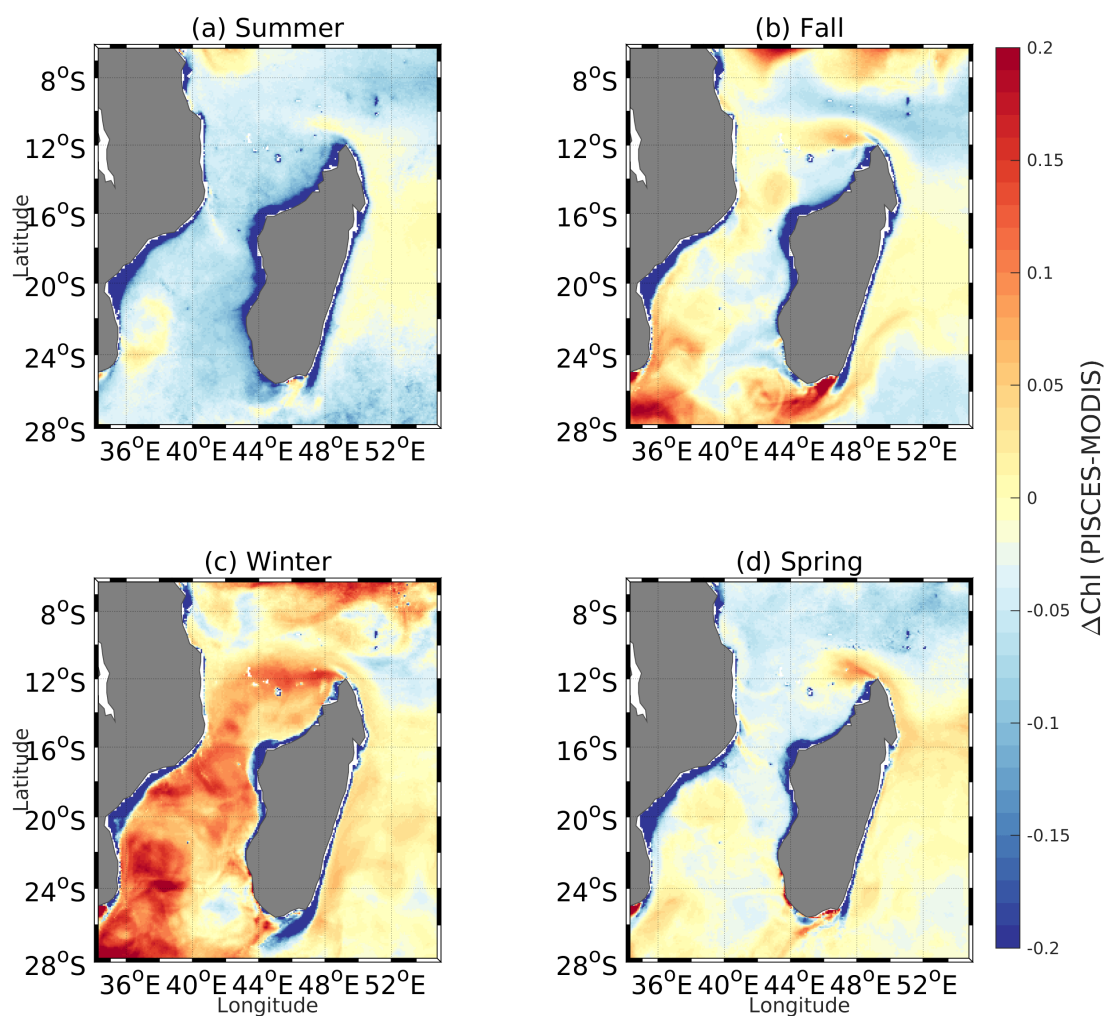


Figura A.6: *O mesmo que a figura A.4, mas para a clorofila superficial.*

Em geral, o inverno é a época do ano em que se verificam as enormes diferenças entre o modelo e as estimativas pelo sensoriamento remoto, cujo o valor superestimado de cerca de $0.1 \text{ mg Chl m}^{-3}$ pelo modelo representa cerca de um terço em relação às concentrações estimadas pelo MODIS. No verão, as concentrações de $0.05 \text{ mg Chl m}^{-3}$ verificadas no modelo representam cerca de metade das concentrações estimadas pelo MODIS.

Referências Bibliográficas

- Aumont e Bopp(2006)** Olivier Aumont e Laurent Bopp. Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(2). Citado na pág. [xiv](#), [13](#), [33](#), [66](#), [67](#), [69](#)
- Aumont et al.(2003)** Olivier Aumont, Ernst Maier-Reimer, Stéphane Blain e P Monfray. An ecosystem model of the global ocean including fe, si, p colimitations. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2). Citado na pág. [13](#), [33](#)
- Backeberg e Reason(2010)** BC Backeberg e CJC Reason. A connection between the south equatorial current north of madagascar and mozambique channel eddies. *Geophysical Research Letters*, 37(4). Citado na pág. [1](#), [12](#)
- Banse e English(2000)** K Banse e DC English. Geographical differences in seasonality of czcs-derived phytoplankton pigment in the arabian sea for 1978–1986. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(7):1623–1677. Citado na pág. [12](#)
- Barlow et al.(2014)** R Barlow, T Lamont, T Morris, H Sessions e M Van Den Berg. Adaptation of phytoplankton communities to mesoscale eddies in the mozambique channel. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 100:106–118. Citado na pág. [6](#)
- Behrenfeld e Falkowski(1997)** Michael J Behrenfeld e Paul G Falkowski. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and oceanography*, 42(1):1–20. Citado na pág. [33](#)
- Biaستoch e Krauss(1999)** Arne Biaستoch e Wolfgang Krauss. The role of mesoscale eddies in the source regions of the agulhas current. *Journal of Physical Oceanography*, 29(9):2303–2317. Citado na pág. [4](#)
- Boyer Montegut et al.(2006)** CD Boyer Montegut, J Mignot, A Lazar e S Cravatte. Control of salinity on the mixed layer depth in the world ocean. Em *AGU Fall Meeting Abstracts*. Citado na pág. [16](#)
- Brinca et al.(1980)** L Brinca, Francisco Rey, C Silva e Roald Sætre. A survey on the marine fish resources of mozambique, oct.-nov. 1980. Citado na pág. [2](#)
- Casey e Cornillon(1999)** Kenneth S Casey e Peter Cornillon. A comparison of satellite and in situ-based sea surface temperature climatologies. *Journal of Climate*, 12(6): 1848–1863. Citado na pág. [15](#)
- Chiswell et al.(2015)** Stephen M Chiswell, Paulo HR Calil e Philip W Boyd. Spring blooms and annual cycles of phytoplankton: a unified perspective. *Journal of Plankton Research*, 37(3):500–508. Citado na pág. [13](#), [25](#)

- Collins et al.(2014)** C Collins, JC Hermes e CJC Reason. Mesoscale activity in the comoros basin from satellite altimetry and a high-resolution ocean circulation model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(8):4745–4760. Citado na pág. [1](#), [50](#)
- Conkright et al.(2002)** Margarita E Conkright, Ricardo A Locarnini, Hernan E Garcia, Todd D O'Brien, Timothy P Boyer, C Stephens e John I Antonov. *World Ocean Atlas 2001: Objective analyses, data statistics, and figures: CD-ROM documentation*. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Oceanographic Data Center, Ocean Climate Laboratory. Citado na pág. [15](#)
- Da Silva et al.(1994)** A Da Silva, CC Young e S Levitus. Atlas of surface marine data 1994, vol. 1, algorithms and procedures, noaa atlas nesdis 6. *US Department of Commerce, NOAA, NESDIS, USA*, página 74. Citado na pág. [15](#)
- da Silva(1986)** A Jorge da Silva. River runoff and shrimp abundance in a tropical coastal ecosystem?the example of the sofala bank (central mozambique). Em *The role of freshwater outflow in coastal marine ecosystems*, páginas 329–344. Springer. Citado na pág. [35](#)
- de Ruijter et al.(2002)** Wilhelmus PM de Ruijter, Herman Ridderinkhof, Johann RE Lutjeharms, Mathijs W Schouten e Cornelis Veth. Observations of the flow in the mozambique channel. *Geophysical Research Letters*, 29(10). Citado na pág. [2](#), [16](#), [32](#)
- de Ruijter et al.(2004)** Wilhelmus PM de Ruijter, Hendrik M van Aken, Emilio J Beier, Johann RE Lutjeharms, Ricardo P Matano e Mathijs W Schouten. Eddies and dipoles around south madagascar: formation, pathways and large-scale impact. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(3):383–400. Citado na pág. [1](#), [53](#)
- Debreu et al.(2008)** Laurent Debreu, Christophe Vouland e Eric Blayo. Agrif: Adaptive grid refinement in fortran. *Computers & Geosciences*, 34(1):8–13. Citado na pág. [14](#)
- DiMarco et al.(2002)** Steven F DiMarco, Piers Chapman, Worth D Nowlin, Peter Hacker, Kathleen Donohue, Mark Luther, Gregory C Johnson e John Toole. Volume transport and property distributions of the mozambique channel. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(7):1481–1511. Citado na pág. [1](#), [19](#)
- Echevin et al.(2008)** Vincent Echevin, Olivier Aumont, Jesus Ledesma e G Flores. The seasonal cycle of surface chlorophyll in the peruvian upwelling system: A modelling study. *Progress in Oceanography*, 79(2):167–176. Citado na pág. [5](#)
- Eppeley e Peterson(1979)** Richard W Eppeley e Bruce J Peterson. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*, 282(5740):677–680. Citado na pág. [38](#), [59](#)
- Fanaian et al.(2015)** Safa Fanaian, Susan Graas, Yong Jiang e Pieter van der Zaag. An ecological economic assessment of flow regimes in a hydropower dominated river basin: The case of the lower zambezi river, mozambique. *Science of The Total Environment*, 505:464–473. Citado na pág. [2](#)
- Franks et al.(1986)** Peter JS Franks, JS Wroblewski e Glenn R Flierl. Prediction of phytoplankton growth in response to the frictional decay of a warm-core ring. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C6):7603–7610. Citado na pág. [32](#)

- George et al.(2013)** Jenson V George, M Nuncio, Racheal Chacko, N Anilkumar, Sharon B Noronha, Shramik M Patil, Sini Pavithran, Denny P Alappattu, KP Krishnan e CT Achuthankutty. Role of physical processes in chlorophyll distribution in the western tropical indian ocean. *Journal of Marine Systems*, 113:1–12. Citado na pág. [24](#)
- Halo et al.(2014)** I Halo, B Backeberg, Pierrick Penven, I Ansorge, C Reason e JE Ullgren. Eddy properties in the mozambique channel: A comparison between observations and two numerical ocean circulation models. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 100:38–53. Citado na pág. [1](#), [50](#), [56](#), [66](#)
- Harlander et al.(2009)** Uwe Harlander, H Ridderinkhof, MW Schouten e WPM De Ruijter. Long-term observations of transport, eddies, and rossby waves in the mozambique channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C2). Citado na pág. [16](#)
- Jose et al.(2014)** Yonss S Jose, Olivier Aumont, Eric Machu, Pierrick Penven, CL Moloney e Olivier Maury. Influence of mesoscale eddies on biological production in the mozambique channel: Several contrasted examples from a coupled ocean-biogeochemistry model. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 100:79–93. Citado na pág. [2](#), [12](#), [21](#), [32](#), [35](#), [50](#)
- Kai e Marsac(2010)** Emilie Tew Kai e Francis Marsac. Influence of mesoscale eddies on spatial structuring of top predators? communities in the mozambique channel. *Progress in Oceanography*, 86(1):214–223. Citado na pág. [2](#)
- Koné et al.(2009)** Vamara Koné, Olivier Aumont, Marina Lévy e Laure Resplandy. Physical and biogeochemical controls of the phytoplankton seasonal cycle in the indian ocean: A modeling study. *Indian Ocean Biogeochemical Processes and Ecological Variability*, páginas 147–166. Citado na pág. [3](#), [12](#), [26](#)
- Kumar et al.(2017)** B Praveen Kumar, Meghan F Cronin, Sudheer Joseph, M Ravichandran e N Sureshkumar. Latent heat flux sensitivity to sea surface temperature: Regional perspectives. *Journal of Climate*, 30(1):129–143. Citado na pág. [3](#)
- Large et al.(1994)** William G Large, James C McWilliams e Scott C Doney. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Reviews of Geophysics*, 32(4):363–403. Citado na pág. [13](#)
- Lebourges-Dhaussy et al.(2014)** Anne Lebourges-Dhaussy, J Huggett, S Ockhuis, G Roudaut, Erwan Josse e H Verheye. Zooplankton size and distribution within mesoscale structures in the mozambique channel: a comparative approach using the taps acoustic profiler, a multiple net sampler and zooscan image analysis. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 100:136–152. Citado na pág. [2](#)
- Lévy et al.(2007)** Marina Lévy, D Shankar, J-M André, SSC Shenoi, Fabien Durand e C de Boyer Montégut. Basin-wide seasonal evolution of the indian ocean’s phytoplankton blooms. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C12). Citado na pág. [3](#)
- Lévy et al.(2009)** Marina Lévy, Patrice Klein e M Ben Jelloul. New production stimulated by high-frequency winds in a turbulent mesoscale eddy field. *Geophysical Research Letters*, 36(16). Citado na pág. [50](#), [59](#)
- Liu et al.(1998)** W Timothy Liu, Wenqing Tang e Paulo S Polito. Nasa scatterometer provides global ocean-surface wind fields with more structures than numerical weather prediction. *Geophysical Research Letters*, 25(6):761–764. Citado na pág. [15](#)

- Longhurst(2001)** Alan Longhurst. A major seasonal phytoplankton bloom in the madagascar basin. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 48(11): 2413–2422. Citado na pág. [32](#)
- Lozier et al.(1995)** M Susan Lozier, W Brechner Owens e Ruth G Curry. The climatology of the north atlantic. *Progress in Oceanography*, 36(1):1–44. Citado na pág. [70](#)
- Lutjeharms et al.(2000)** JRE Lutjeharms, WPM De Ruijter, H Ridderinkhof, H Van Aken, C Veth, PJ Van Leeuwen, SS Drijfhout, JHF Jansen e GJ Brummer. Mare and acsex: new research programmes on the agulhas current system. *South African Journal of Science*, 96(3). Citado na pág. [32](#)
- Machu et al.(2002)** E Machu, JRE Lutjeharms, AM Webb e HM Van Aken. First hydrographic evidence of the southeast madagascar upwelling cell. *Geophysical research letters*, 29(21). Citado na pág. [32](#)
- Malauene et al.(2014)** BS Malauene, FA Shillington, MJ Roberts e CL Moloney. Cool, elevated chlorophyll-a waters off northern mozambique. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 100:68–78. Citado na pág. [12](#)
- Marsac(2014)** Francis Marsac. Outline of climate and oceanographic conditions in the indian ocean: an update to august 2014. Citado na pág. [3](#)
- Martinez et al.(2011)** Elodie Martinez, David Antoine, Fabrizio D’Ortenzio e Clement de Boyer Montégut. Phytoplankton spring and fall blooms in the north atlantic in the 1980s and 2000s. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C11). Citado na pág. [3](#)
- McCLANAHAN et al.(2011)** TIM McCLANAHAN, Joseph M Maina e Nyawira A Muthiga. Associations between climate stress and coral reef diversity in the western indian ocean. *Global Change Biology*, 17(6):2023–2032. Citado na pág. [1](#)
- McCreary et al.(2009)** JP McCreary, Raghu Murtugudde, Jerome Vialard, PN Vinayachandran, Jerry D Wiggert, Raleigh R Hood, D Shankar e S Shetye. Biophysical processes in the indian ocean. *Indian Ocean Biogeochemical Processes and Ecological Variability*, páginas 9–32. Citado na pág. [42](#)
- McGillicuddy Jr e Robinson(1997)** DJ McGillicuddy Jr e AR Robinson. Eddy-induced nutrient supply and new production in the sargasso sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 44(8):1427–1450. Citado na pág. [32](#)
- Mignot e de Boyer Montégut(2006)** J Mignot e C de Boyer Montégut. Control of salinity on the mixed layer depth in the world ocean. Em *Geophysical Research Abstracts*, volume 8, página 05655. Citado na pág. [16](#)
- Mordasova(1980)** NV Mordasova. Chlorophyll in the southwestern indian ocean in relation to hydrologic conditions. *Oceanology*, 20:75–79. Citado na pág. [6](#)
- Omta et al.(2009)** AW Omta, Jérôme Llido, Veronique Garçon, SALM Kooijman e HA Dijkstra. The interpretation of satellite chlorophyll observations: The case of the mozambique channel. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(6):974–988. Citado na pág. [1](#), [2](#)

- Penven et al.(2008)** Pierrick Penven, Patrick Marchesiello, Laurent Debreu e Jérôme Lefevre. Software tools for pre-and post-processing of oceanic regional simulations. *Environmental Modelling & Software*, 23(5):660–662. Citado na pág. 14
- Prasad(2004)** TG Prasad. A comparison of mixed-layer dynamics between the arabian sea and bay of bengal: One-dimensional model results. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C3). Citado na pág. 12
- Quartly e Srokosz(2004)** GD Quartly e MA Srokosz. Eddies in the southern mozambique channel. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(1):69–83. Citado na pág. 1, 32
- Ramanantsoa et al.(2018)** Juliano D Ramanantsoa, M Krug, P Penven, M Rouault e J Gula. Coastal upwelling south of madagascar: Temporal and spatial variability. *Journal of Marine Systems*, 178:29–37. Citado na pág. 42
- Resplandy et al.(2009)** Laure Resplandy, Jérôme Vialard, Marina Lévy, Olivier Aumont e Yves Dandonneau. Seasonal and intraseasonal biogeochemical variability in the thermocline ridge of the southern tropical indian ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C7). Citado na pág. 5
- Roxy et al.(2016)** Mathew Koll Roxy, Aditi Modi, Raghu Murtugudde, Vinu Valsala, Swapna Panickal, S Prasanna Kumar, M Ravichandran, Marcello Vichi e Marina Lévy. A reduction in marine primary productivity driven by rapid warming over the tropical indian ocean. *Geophysical Research Letters*, 43(2):826–833. Citado na pág. 3, 12
- Ryther et al.(1966)** John H Ryther, John R Hall, Allan K Pease, Andrew Bakun e Mark M Jones. Primary organic production in relation to the chemistry and hydrography of the western indian ocean. *Limnology and Oceanography*, 11(3):371–380. Citado na pág. 6, 32, 50
- Saetre e Da Silva(1982)** R Saetre e A JORGE Da Silva. Water masses and circulation of the mozambique channel. *Revista de Investigação Pesqueira*, 3:1–83. Citado na pág. 3, 4, 12, 32, 56
- Saetre e Da Silva(1984)** Roald Saetre e António Jorge Da Silva. The circulation of the mozambique channel. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 31(5):485–508. Citado na pág. 12, 32
- Samoilys et al.(2011)** Melita A Samoilys, January Ndagala, Denis Macharia, Isabel da Silva, Santos Mucave, David Obura et al. A rapid assessment of coral reefs at metundo island, cabo delgado, northern mozambique. *RAP Bull. Biol. Assess.*, 61:1–36. Citado na pág. 1
- Schouten et al.(2003)** Mathijs W Schouten, Wilhelmus PM de Ruijter, Peter Jan Van Leeuwen e Herman Ridderinkhof. Eddies and variability in the mozambique channel. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(12):1987–2003. Citado na pág. xi, 1, 2, 14, 32
- Shchepetkin e McWilliams(2005)** Alexander F Shchepetkin e James C McWilliams. The regional oceanic modeling system (roms): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4):347–404. Citado na pág. 13, 33, 50, 65

- Simpson et al.(1990)** John H Simpson, Juan Brown, John Matthews e Graham Allen. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries and Coasts*, 13(2):125–132. Citado na pág. [4](#)
- Stein e Alpert(1993)** U Stein e PINHAS Alpert. Factor separation in numerical simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50(14):2107–2115. Citado na pág. [23](#)
- Sunda e Huntsman(1995)** William G Sunda e Susan A Huntsman. Iron uptake and growth limitation in oceanic and coastal phytoplankton. *Marine Chemistry*, 50(1-4):189–206. Citado na pág. [13](#)
- Tang et al.(2003)** DanLing Tang, Hiroshi Kawamura, Ming-An Lee e Tran Van Dien. Seasonal and spatial distribution of chlorophyll-a concentrations and water conditions in the gulf of tonkin, south china sea. *Remote Sensing of Environment*, 85(4):475–483. Citado na pág. [12](#)
- Tegen e Fung(1995)** Ina Tegen e Inez Fung. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D9):18707–18726. Citado na pág. [15](#)
- Tew-Kai e Marsac(2009)** Emilie Tew-Kai e Francis Marsac. Patterns of variability of sea surface chlorophyll in the mozambique channel: a quantitative approach. *Journal of Marine Systems*, 77(1):77–88. Citado na pág. [3](#), [12](#)
- Ullgren et al.(2012)** JE Ullgren, HM van Aken, H Ridderinkhof e WPM de Ruijter. The hydrography of the mozambique channel from six years of continuous temperature, salinity, and velocity observations. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 69:36–50. Citado na pág. [32](#)
- Ullgren et al.(2016)** Jenny E Ullgren, Emídio André, Tor Gammelsrød e António M Hogueane. Observations of strong ocean current events offshore pemba, northern mozambique. *Journal of Operational Oceanography*, 9(1):55–66. Citado na pág. [1](#), [12](#), [16](#), [55](#)
- Weatherall et al.(2015)** Pauline Weatherall, KM Marks, Martin Jakobsson, Thierry Schmitt, Shin Tani, Jan Erik Arndt, Marzia Rovere, Dale Chayes, Vicki Ferrini e Rochelle Wigley. A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth and Space Science*, 2(8):331–345. Citado na pág. [15](#)
- Wiggert et al.(2000)** JD Wiggert, BH Jones, TD Dickey, KH Brink, RA Weller, J Marra e LA Codispoti. The northeast monsoon's impact on mixing, phytoplankton biomass and nutrient cycling in the arabian sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(7):1353–1385. Citado na pág. [12](#)
- Wiggert et al.(2002)** JD Wiggert, RG Murtugudde e CR McClain. Processes controlling interannual variations in wintertime (northeast monsoon) primary productivity in the central arabian sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(12):2319–2343. Citado na pág. [12](#)
- Wyrтки(1973)** K Wyrтки. Physical oceanography of the indian ocean. Em *The biology of the Indian Ocean*, páginas 18–36. Springer. Citado na pág. [32](#), [70](#)

Zubkov e Quartly(2003) Mikhail V Zubkov e Graham D Quartly. Ultraplankton distribution in surface waters of the mozambique channel flow cytometry and satellite imagery. *Aquatic Microbial Ecology*, 33(2):155–161. Citado na pág. [6](#)