

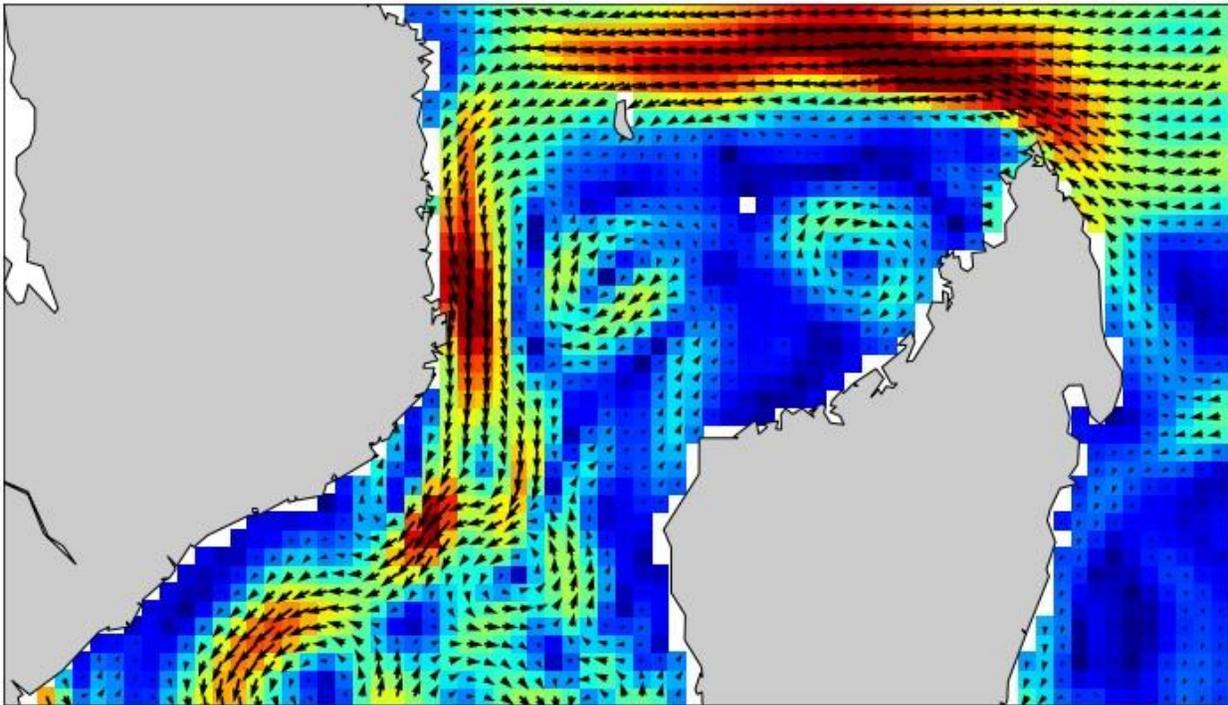


UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Monografia

Análise das correntes à superfície na região norte do Canal de Moçambique.



Autor:

Lucas Raúl Fernando

Quelimane, Junho de 2019



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Monografia para a Obtenção do Grau de Licenciatura em Oceanografia

Análise das correntes à superfície na região norte do Canal de Moçambique.

Autor:

Lucas Raúl Fernando

Supervisor:

Prof. Doutor Fialho P. J. Nehama

.....

Co-Supervisor:

Doutor Obadias J. Cossa

Quelimane, Junho de 2019

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus todo-poderoso, por me ter dado saúde, energias, inteligência, excelentes amizades ao longo dos quatro anos do curso e por todas as realizações até aqui alcançadas.

Pela sinceridade e de profundo respeito, admiração gratidão pelo meu supervisor Prof. Doutor Fialho P. J. Nehama e Co-supervisor Doutor Obadias Cossa ambos por me terem orientado ao longo dessa jornada, no apoio que tive no sentido de transmitirem seus ensinamentos e ideias com notáveis dedicação e cuidados em concretizar a pesquisa deste trabalho.

E sem deixar de citar o Prof. Catedrático Hogueane, Dr. Saíde, Dr. Noca, Dr. Mabota, Dr. Ferraz, Dr. Langa e ao Dr. Banito pelos conhecimentos científicos transmitidos por eles, e pela paciência em me levar até ao culmino dessa trajetória.

Agradeço a minha mãe Marta Ernesto e meu irmão Crescêncio por me terem proporcionado a oportunidade de estudar, me oferecendo as melhores condições possíveis para que pudesse fazê-lo com sucesso, a poio e motivação que deles sempre recebi para continuar forte nesta dura missão de aprender. O meu muito obrigado se dirige a toda a minha família Fernando, ao Dino Raul, à Joana Raul, ao Fernando Raul, ao Ernesto Raul, a Nilsa e minha cunhada Cecília pelo acompanhamento durante a minha vida toda. Não faltando os meus agradecimentos aos meus colegas irmãos, Lúcio, Osvaldo, Venâncio Júnior, Lamo Janela, Paulo Mundimo pela irmandade por eles atribuída.

Agradeço aos meus colegas que ingressamos juntos em 2015, em particular ao curso de oceanografia, por terem sido companheiros fiéis, transmissores de positivismo e compartilhadores de coragem e força. Agradeço também a todos integrantes do projecto C-RISe, ao Dr Ellis Ash, ao Dr. David Cotton, à Dra. Angela Hibbert, à Ms. Clousa, ao Giuseppe Foti pelas oportunidades adquiridas e conhecimentos no mundo da ciência. Aos meus colegas Autênsio Nobre, Virgílio Alberto, Fernando Sibanda, Zeinul Dufa, Jorge Catandica, Humberto Meque, Kelven Langa pela moral e pelos conhecimentos que com eles pude adquirir ao longo dessa caminhada.

Agradeço a Escola Superior de Ciências Marinhas, com ênfase ao corpo de docência por persistir e acreditar em mim, mesmo com as dificuldades por mim apresentadas durante o percurso, eles não deixaram que fossem o motivo de desistência.

Enfim, o meu muito obrigado se dirige a todos aqueles que influenciaram de forma positiva ou negativa no progresso estudantil, dizer que tudo cooperava para o meu sucesso académico.

Dedicatória

Este trabalho é dedicado:

A memória do,

Meu pai: Raúl Fernando

e

Minha sobrinha: Marta Crescêncio

Que por motivos infelizes não podem estar em vida para ver esse momento.

Declaração de Honra

Declaro por minha honra que esta monografia nunca foi apresentada para obtenção de qualquer grau e que ela constitui o resultado do meu labor individual. Esta monografia apresentada em cumprimento parcial dos requisitos de obtenção do grau de Licenciatura em Oceanografia, da Universidade Eduardo Mondlane.

(Assinatura)

Lucas Raúl Fernando

Resumo

Este estudo foi concebido com o objetivo de melhorar e compreender a circulação oceânica e costeira na região norte do canal de Moçambique, entre os paralelos 10°S a 20°S. Os resultados são considerados de grande importância para a navegação e as operações portuárias ao longo da zona costeira do norte de Moçambique, contribuindo assim para o acompanhamento das actividades náuticas e o apoio das aplicações marítimas nesta região do canal moçambicano. As análises das correntes superficiais foram realizadas utilizando-se dados derivados da altimetria de satélites, com resolução espacial (0,25 x 0,25 graus) e tempo de 15 anos. Uma técnica baseada em cálculos estatísticos foi utilizada na biblioteca Spyder da linguagem de programação "Python", que permitiu obter informações sobre a variabilidade atual em larga escala representada pelas médias anuais e sazonais associadas ao desvio padrão e séries temporais tiradas em várias estações ao longo do canal. Com as estações ao longo do Canal pretendeu-se avaliar a variabilidade da NEMC entorno dos 11°S, analisar a variabilidade da corrente costeira nas faixas 15°S e 18°S e para finalmente 16°S avaliar a variabilidade das correntes na região nordeste da República do Madagáscar. Os resultados deste estudo apontaram que na entrada do canal de Moçambique a corrente de Madagáscar do nordeste é variável com as maiores velocidades da ordem de 1m/s, persistindo durante o verão. As instabilidades do NEMC foram encontradas para ser responsáveis para a grande variabilidade que domina as extremidades ocidentais do Canal, onde a corrente intermitente de Moçambique (velocidades de 0.6 m/s) e os vórtices dominam o fluxo. Mais para o norte dos 11°S a NEMC orientada para costa moçambicana caracterizou-se como uma corrente muito forte, com velocidades de 1m/s nos meados de cada ano, variações sazonais da intensidade enfraquecem esta corrente atingindo 0.7m/s e ocasionalmente causando oscilações na direção para o norte. Aos 15°S a corrente costeira de Moçambique próximo continente possui direções para o Sul e as vezes para o Oeste para o período em análise. Esta corrente é também bastante forte, que por sazonalidade suas velocidade varia de 0 a 0.6m/s ao longo dos meados de cada ano. A região do nordeste da Madagáscar 16°S é dominada por fluxo de correntes bastante fracas persistindo velocidades de 0.2m/s, com variadas direcções e a circulação nesta região é dominada apenas por flutuações dos vórtices. No Banco de Sofala precisamente 18°S a corrente costeira junto a Moçambique é fraca persistindo velocidades aproximadamente a 0.7m/s ao longo de cada ano, esta corrente à superfície esta associada a variações multidirecionais devido a topografia do local.

Palavras-chaves: Canal de Moçambique, Circulação, Correntes, Altimetria de Satélite, Vórtices.

Abstract

This study was conceived with the aim of improving and understanding the oceanic and coastal circulation in the northern region of the Mozambique Channel, between parallels 10°S to 20°S. The results are considered of great importance for navigation and port operations along the coastal zone in Northern Mozambique, thus contributing to the monitoring of nautical activities and support of marine applications in this region of the Mozambican Channel. Analyzes of surface currents were carried out using data derived from satellite altimetry, at (0.25 x 0.25 degrees) spatial resolution and a time span of 15 years. A technique based on statistical calculations was used in the Spyder library of "Python" programming language, which allowed obtaining information of the large-scale current variability represented by the annual, seasonal averages associated with the standard deviation and Time Series taken in several stations along the Channel. With the stations along the Canal, it was intended to evaluate the variability of NEMC around the 11°S, to analyze the variability of the coastal current in the 15°S and 18°S bands and finally to 16°S to evaluate the variability of the currents in the northeast region of the Republic of Madagascar. The results of this study pointed out that at the entrance of the Mozambique Channel the North East Madagascar Current is variable with the greatest speeds of the order of 1m/s, persisting during summer. The instabilities of the NEMC were found to be responsible for the great variability dominating the western ends of the Channel, where the intermittent Mozambique Current (speeds of 0.6m/s) and the vortexes dominate the flow. Further to the north of the 11°S the NEMC oriented to the Mozambican coast was characterized as a very strong current, with speeds of 1m / s in the middle of each year, seasonal variations of intensity weaken this current reaching 0.7m / s and occasionally causing oscillations toward the north. In the 15°S the coastal current of Mozambique near continent has directions to the South and sometimes to the West for the period under analysis. This current is also quite strong, which by seasonality its velocity varies from 0 to 0.6m / s throughout the middle of each year. The north-eastern region of Madagascar 16°S is dominated by fairly weak current flowing at rates of 0.2m / s in varying directions and circulation in this region is dominated only by vortex fluctuations. In the Sofala Bank, precisely 18°S the coastal current near Mozambique is weak, maintaining speeds approximately 0.7m / s throughout each year, this current at the surface is associated to multidirectional variations due to the topography of the place

Keys-words: Mozambique Channel, Circulation, Currents, Satellite Altimetry, Eddies.

Lista de figuras

Figura 1: Campos de Stress de vento (vetores) de monção determinado por dados fornecidos pelos Centros Nacionais de Previsão Ambiental entre 1990-1998, sobrepostos às variações das Z20 obtidos da SODA (Schott, Xie e McCreary, 2009).....	4
Figura 2: Mapa batimétrico do Oceânico Índico mostrando correntes em larga escala (DiMarco, et al., 2001).....	5
Figura 3: Batimetria do oceano indico, onde as características cíclicas representam o campo de vórtice, sendo no sentido horário para giros ciclônicos e anti-horário para giros anticiclônicos (Halo, et al. 2014).....	7
Figura 4: Orbitas usadas para satélites de observação da terra, desenhados aproximadamente segundo escala das alturas das órbitas indicadas. A órbita geoestacionária é de aproximadamente 36.000 km acima da terra (Robinson I. S., 2010).....	8
Figura 5: A relação entre diferentes quantidades de distância usadas em altimetria (I. S. Robinson 2010).....	10
Figura 6: Localização geográfica do Norte do Canal de Moçambique, e dos pontos em que foram extraídas as séries temporais das velocidades das correntes de superfície nesta região norte do Canal de Moçambique (Fonte: Autor).....	14
Figura 7: Media de 15 anos das correntes na região norte do Canal de Moçambique nos períodos 2002 á 2016. Os vectores indicam a direcção predominante do fluxo, a cor de fundo indica sua velocidade expressa em [m/s].....	17
Figura 8: Desvio padrão anual das correntes na região norte do Canal de Moçambique nos períodos 2002 á 2016. Os vectores indicam a direcção predominante do fluxo, a cor de fundo indica sua velocidade expressa em [m/s].	18
Figura 9: Distribuição das médias sazonais das correntes na região norte do Canal de Moçambique em função dos meses. Os vectores indicam a direcção predominante do fluxo, a cor de fundo indica sua velocidade expressa em [m/s].	19
Figura 10: Mediais Mensais das correntes na região norte do Canal de Moçambique no período de 2016. Os vectores indicam a direcção predominante do fluxo, a cor de fundo indica sua velocidade expressa em [m/s].....	21
Figura 11: Sequência diária das correntes na região norte do Canal de Moçambique para mês de Dezembro de 2016. Os vectores indicam a direcção predominante do fluxo, a cor de fundo indica sua velocidade expressa em [m/s].	23
Figura 12: Series temporais das correntes na estação A do norte do Canal de Moçambique nos anos 2002 a 2005. Os pontos vermelhos indicam a direcção enquanto o verde indica a corrente.	25
Figura 13: Series temporais das correntes na estação B do norte do Canal de Moçambique nos anos 2002 a 2005. Os pontos vermelhos indicam a direcção enquanto o verde indica a corrente.	26
Figura 14:Series temporais das correntes na estação C do norte do Canal de Moçambique nos anos 2002 a 2005. Os pontos vermelhos indicam a direcção enquanto o verde indica a corrente.	28
Figura 15: Series temporais das correntes na estação D do norte do Canal de Moçambique nos anos 2002 a 2005. Os pontos vermelhos indicam a direcção enquanto o verde indica a corrente.	29

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

Lista de símbolos

A tabela a seguir apresenta todos símbolos ou abreviaturas usados neste artigo:

AC	Corrente de Agulhas	°	Grãos Centígrados
EACC	Corrente da Costa Leste Africana	<	Maior
EMC	Corrente Este de Madagáscar	π	Pi
MC	Corrente de Moçambique	~	Variação
SEC	Corrente Sul Equatorial	\approx	Aproximadamente
NEMC	Corrente Nordeste de Madagáscar	m	Metros
NCEP	Centro Nacional de Previsão Ambiental	m /s	Metros por segundos
SEMC	Corrente Sudeste de Madagáscar	°C	Graus Celcius
SODA	Assimilação Simples de Dados do Oceano	cm	Centímetros
NetCDF	Rede de Formulário de Dados Comum	km	Quilómetros
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar	T	Período
Z20	Profundidades na posição exotérmica dos 20°C	M	Massa da terra
ESA	European Space Agency	G	Constante gravitacional
C-RISe	Centro Nacional de Oceanografia	R	Raio da terra
AMR	Advanced Microwave Radiometer	H	Altura
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite	OND	Outubro, Novembro e Dezembro
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço	JFM	Janeiro, Fevereiro e Marco
CNES	National Centre for Space Studies	AMJ	Abril, Maio e Junho
SCIAMACHY	SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHart	JAS	Julho, Agosto e Setembro
AATSR	Advanced Along Track Scanning Radiometer	HS	Hemisfério Sul
RA-2	Radar Altimeter 2	HN	Hemisfério Norte
MWR	Micro Wave Radiometer	E	Este ou Leste
MIPAS	Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding	N	Norte
LRR	Laser RetroReflector	bar	Barómetro
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer	f	Parâmetro de coriolis
GOMOS	Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars	g	Aceleração de gravidade
UEM	Universidade Eduardo Mondlane	u / v	Velocidades geostróficas
ESCMC	Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras	r	Distancia

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

Índice

I.	INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS.....	1
1.1.	Introdução.....	1
1.2.	Objectivos.....	3
II.	REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1.	Regime dos ventos ao longo do Oceano Indico	4
2.2.	Correntes de larga escala no Oceano Indico.....	5
2.3.	Vórtices no Canal de Moçambique	6
2.4.	SENSORIAMENTO REMOTO.....	7
2.4.1.	Os métodos da oceanografia por satélite.....	7
2.4.2.	Órbitas dos satélites.....	8
2.4.3.	O princípio da altimetria sobre o oceano	9
2.4.4.	Correntes geostróficas medidas por satélite	10
2.4.5.	Produtos de dados oceânicos derivados pela altimetria de satélite	11
III.	METODOLOGIA	14
3.1.	Área de estudo	14
3.2.	Dados.....	15
3.2.	Processamento dos dados	15
IV.	RESULTADOS	17
4.1.	Análise da variabilidade das correntes à superfície derivadas do satélite	17
4.1.1.	Media de longo termo das correntes à superfície no norte do Canal de Moçambique.....	17
4.1.1.1.	Desvio padrão das correntes a superfície no norte do Canal de Moçambique	18
4.1.2.	Médias sazonais das correntes no norte do Canal de Moçambique	19
4.1.3.	Médias mensais das correntes para o ano de 2016 no norte do Canal de Moçambique 20	
4.1.4.	Análise da sequência de imagens das correntes diárias para o mês de Dezembro de 2016 23	
4.6.	Séries temporais das correntes no período de 2002 a 2016.....	24
4.6.1.	Estação A.....	24
4.6.2.	Estação B.....	26
4.6.3.	Estação C.....	27
4.6.4.	Estação D.....	28
V.	DISCUSSÃO	30
5.1.	Variabilidade das correntes à superfície no Norte do Canal de Moçambique.....	30
5.1.1.	Média de longo termo das correntes à superfície para o período de 2002 a 2016	30

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

5.1.2. Análise da serie temporal das correntes a superfície no norte do Canal de Moçambique	32
VI. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	34
6.1. Conclusão	34
6.2. Recomendações	35
VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
VIII. ANEXOS	38

I. INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

1.1. Introdução

A água que flui para o Sul no Canal de Moçambique é principalmente derivada da Corrente Sul Equatorial. Foi sempre reconhecido que o campo de fluxo nesta região é complexo, e também pouco compreendido (DiMarco *et al.*, 2001; DeRuijter e Ridderinkhof *et al.*, 2003 e Halo, 2012). As razões por de trás disso associam-se à falta de dados oceanográficos úteis (ou seja, com boa resolução no tempo e no espaço), para permitir a realização dum estudo científico capaz de fornecer resultados confiáveis e conclusivos. As limitações na compreensão da dinâmica dessas águas oceânicas no Canal de Moçambique, esta associada obviamente aos custos em termos de mão-de-obra, tempo de embarque, instrumentação, etc. a fim de realizar observações directas de longo prazo, que seus riscos de falha são sérios e relativamente grandes. Portanto a maioria de estudos observacionais em longo prazo das correntes oceânicas recentemente são baseados principalmente em métodos indirectos, como analisar a variabilidade em rastreadores oceânicos ou, mais recentemente, em observações de satélite de longo prazo sobre a altura da superfície do mar (Ridderinkhof, *et al.*, 2010).

O conhecimento da dinâmica da circulação no Canal de Moçambique pode contribuir para a compreensão do padrão de circulação e apoiar as aplicações de engenharia marítima. Nas últimas décadas, várias companhias multinacionais petrolíferas, realizaram levantamentos sísmicos, tendo constatado a existência de hidrocarbonetos na Costa de Moçambique. Por isso é necessário ter conhecimento dos padrões oceanográficos predominantes nas áreas a serem exploradas, nomeadamente a circulação, a magnitude e direcção das correntes (Vassele, 2010). Assim, o estudo do padrão de circulação no Canal de Moçambique será um complemento útil aos estudos e levantamentos geológicos já realizados nesta região, uma vez que o conhecimento da força e amplitude das correntes, especialmente nos locais operacionais, é um elemento chave de gestão nos locais em causa.

As informações sobre a hidrodinâmica costeira revestem-se de importância ainda maior quando há a proximidade de zonas portuárias, uma vez que, o conhecimento detalhado do sistema de circulação pode atuar como ferramenta chave para a prevenção e contenção de danos ambientais causados por possíveis acidentes, exemplo de derrames de óleo e outros poluentes (Lira *et al.*, 2010).

No Canal de Moçambique existe uma forte evidência de que os vórtices de mesoescala desempenham um papel importante na circulação de grande escala (Biaستoch, 2008), estudos de modelagem e simulacao (De Schouten *et al.*, 2003; Lutjeharms, 2006; Ridderinkhof *et al.*, 2010 e Halo, 2012) sugerem que o escoamento é descontínuo caracterizado pelo um trasiato de vortices ao longo desta

geriao do Canal. No entanto o papel de vórtices no Canal têm sido investigados no contexto de perspectivas ecológicas a partir de observações de satélite (Quartly e Srokosz, 2004), durante o seu curso de propagação transportam água do ambiente costeiro para o largo (offshore), arrastando consigo sedimentos, nutrientes, ou clorofila. Eles controlam desta forma a distribuição espacial e temporal do ecossistema para todos os níveis tróficos (Halo, 2012).

O regime de circulação na região Norte do Canal de Moçambique é pouco conhecido devido a escassez de dados oceanográficos observados com maior resolução e cubrindo períodos longos para melhor descrever as climatologias actuais das correntes. Junto a costa as correntes são consideradas agentes responsáveis pelo transporte e formação de bancos, modificando assim a topografia do fundo marinho que para a sua remoção acarretam elevados custos causando impacto na navegação e segurança marítima. Por isso, as informações sobre as correntes oceânicas nessa região são importantes para a navegação e operações portuárias ao longo da zona costeira e da pesca.

O conhecimento prévio sobre o comportamento das correntes no Canal de Moçambique, se faz importante para uma avaliação do padrão de circulação oceânica e costeira das águas, tanto como para o monitoramento das inúmeras actividades náuticas praticadas neste local, uma vez que a dinâmica ajuda a compreender os diversos processos da vida marinha e do clima (Schott, *et al.*, 2009). Sendo assim, as correntes superficiais tem grande importância no transporte do calor, enquanto as correntes de mar profundo, produzidas em altas latitudes possuem elevada quantidade de oxigénio que é transportado para o fundo oceânico, permitindo a existência de vida, mesmo em profundidades onde não há actividade fotossintética.

Este presente trabalho está organizado da seguinte forma: depois de ter sido apresentada uma introdução ao assunto e objectivos no Capítulo 1, o Capítulo 2 descreve os ventos, as correntes em larga escala e os giros predominantes no oceano Indico em particular no canal de Moçambique. Ainda mais é apresentada os métodos de oceanografia por satélite, princípio de altimetria, medição das correntes geostróficas por satélite e os produtos derivados de satélite. No Capitulo 3 tem-se a área em estudo, descrição dos dados e métodos de processamento; o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e sua interpretação; Capítulo 5 fornece uma discussão dos resultados e por fim no Capítulo 6 são encontrados as conclusões e recomendações do presente estudo.

1.2. Objectivos

O objectivo geral é avaliar a variabilidade das correntes de superfície na região Norte do canal de Moçambique

Específicos

Os objectivos específicos do presente estudos são:

- ✓ Determinar a magnitude da velocidade das correntes entre o período 2002 á 2016;
- ✓ Determinar a direcção das correntes;
- ✓ Descrever a variabilidade anual, sazonal e mensal do fluxo das correntes.

II. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Regime dos ventos ao longo do Oceano Índico

O regime de ventos que influenciam a circulação de grande escala no Oceano Índico é dominado pelas monções no Hemisfério Norte (HN), enquanto no Hemisfério Sul (HS), é dominado pelos ventos alísios. Esse padrão de ventos deve-se à presença do continente asiático na parte norte deste oceano. Na Figura 1, apresentam-se as variações da tensão do vento à superfície em função das estações do ano, sobrepostas nas variações das profundidades da posição da exotérmica dos 20°C (Z20). Em geral as zonas dominadas por uma grande ressurgência (upwelling), são caracterizadas por uma termoclina pouco profunda, enquanto no caso inverso é mais profunda, (Figura 1). Ainda na (Figura 1) nota-se que a sul de 10°S, os ventos alísios persistem ao longo de todo ano, mas o seu máximo sazonal acontece durante o verão Boreal (Schott e McCreary Jr., 2003, Schott *et al.*, 2009).

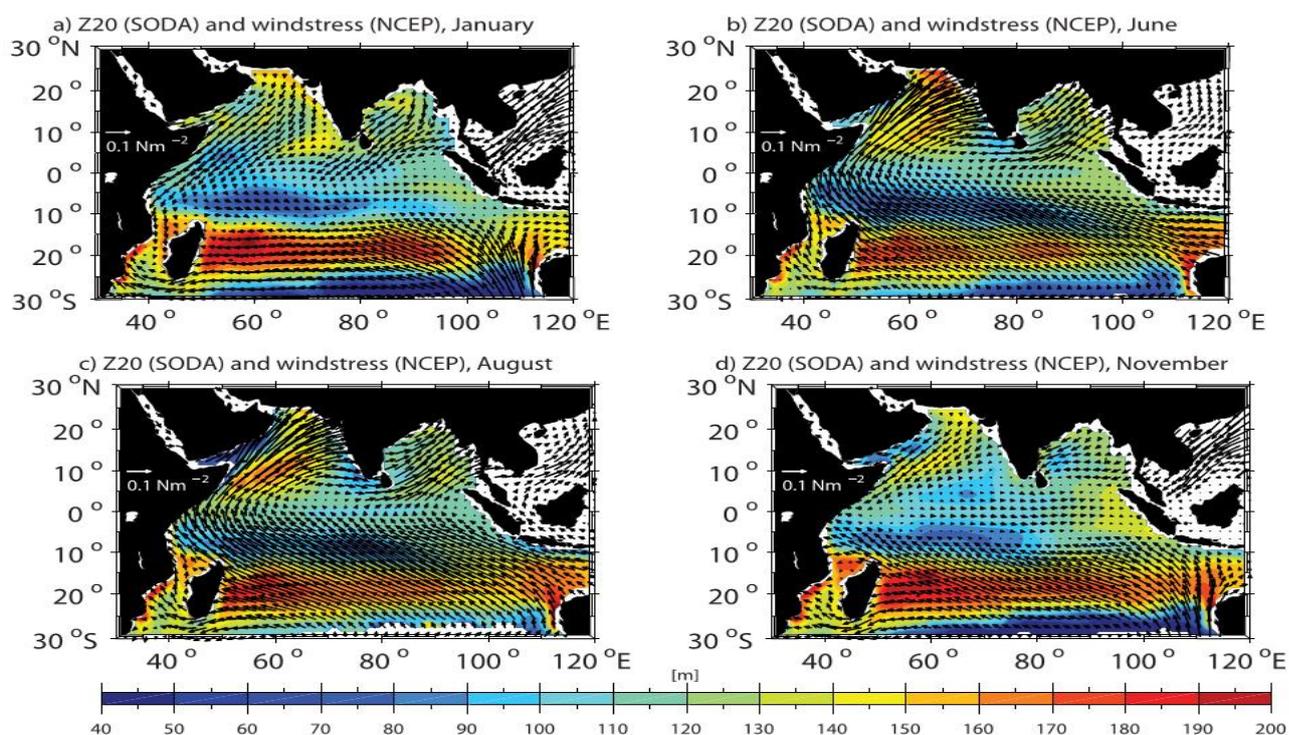


Figura 1: Campos de Stress de vento (vetores) de monção determinado por dados fornecidos pelos Centros Nacionais de Previsão Ambiental entre 1990-1998, sobrepostos às variações das profundidades médias da isotérmica dos 20°C (Z20) obtidos dos dados da Assimilação Simples de Dados do Oceano (SODA), entre 1992-2001 para os meses de (a) janeiro, (b) junho, (c) agosto e (d) novembro (Schott, Xie e McCreary, 2009).

Durante esse período o vento sobre o HN é geralmente do sudoeste, o que concorre para o fortalecimento do jato de Findlet, um vento bastante forte em direcção ao continente asiático, (Figuras

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

b-c). Durante o verão Austral (Figuras a-d), esses ventos sopram no sentido inverso, isto é, do continente asiático para o Índico. A inversão dos ventos é muito importante para a variabilidade da circulação de larga escala no Oceano Índico, principalmente no HN e ao longo do sector equatorial (Schott e McCreary Jr., 2003, Schott *et al.*, 2009). No HS os ventos são geralmente estáveis, e por isso os padrões característicos nessa região assemelham-se àqueles dos outros oceanos (Schott e McCreary Jr., 2003, Schott *et al.*, 2009).

2.2. Correntes de larga escala no Oceano Índico.

A circulação oceânica no sudoeste do Oceano Índico desempenha um papel importante no ciclo de retorno da circulação global dos oceanos (DiMarco, *et al.*, 2001 e Benny, 2014). Deste modo, torna-se complexo compreender o regime actual das correntes na camada superior em grande escala nesta região, em particular no canal de Moçambique (Figura 2).

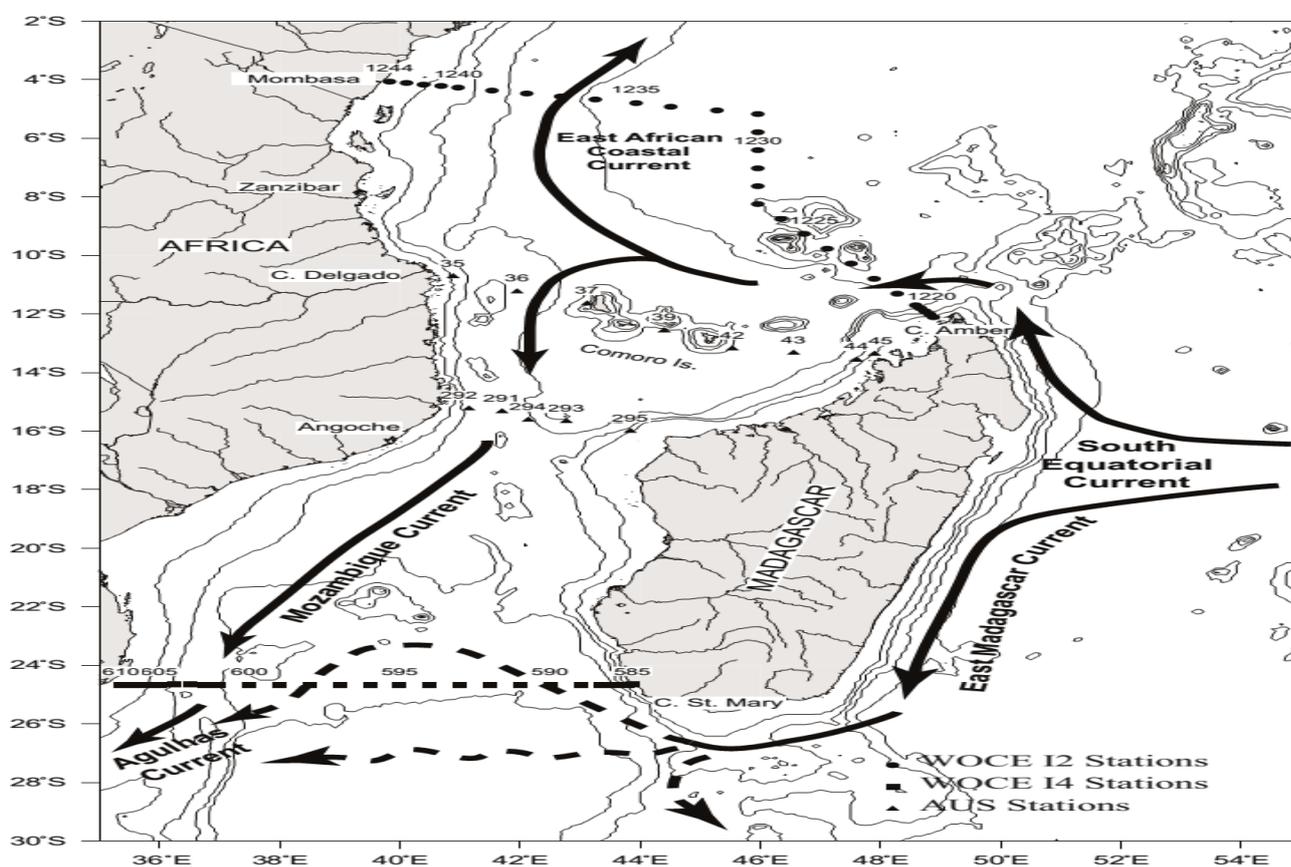


Figura 2: Mapa batimétrico do Oceano Índico mostrando correntes em larga escala (DiMarco, *et al.*, 2001).

Em geral a região central do Oceano Índico sul é caracterizada pelo escoamento oeste da Corrente Sul Equatorial, conforme é lucidado na Figura 2. A corrente sul equatorial (SEC) é parte do ramo norte da circulação de larga escala (fluxo do giro subtropical interior) que é induzida pela força do

vento local (alta subtropical). A SEC flui para oeste através do Oceano Índico e bifurca-se na costa leste de Madagáscar, perto de 17°S e dá origem à Corrente Sudeste de Madagáscar (SEMC) ou Corrente Este de Madagáscar (EMC) que flui para o sul, e à Corrente Nordeste de Madagáscar (NEMC) que flui para o norte.

A NEMC ramo da SEC flui para oeste até alcançar a costa Africana onde também bifurca formando a Corrente da Costa Leste Africana (EACC), que continua para o norte atravessando o equador e alimentando assim a corrente da Somália. Outra parte do escoamento que bifurca da Corrente Nordeste de Madagáscar flui para o sul penetrando o Canal de Moçambique (Lutjeharms, 2006; Schott *et al.*, 2009), desta forma tornando-se a Corrente de Moçambique (MC), Figura 2. No percurso da Corrente do Leste de Madagáscar (EMC) e da Corrente de Moçambique (MC) em direcção ao sul, estas juntam – se na faixa latitudinal [24-25°S], formando e alimentando o sistema da Corrente de Agulhas (AC), contribuindo desta forma para a circulação global de capotamento.

2.3. Vórtices no Canal de Moçambique

Ao longo do Canal de Moçambique, a dinâmica da circulação em superfície é caracterizada por forte atividade de mesoescala (Figura 3). O escoamento é descontínuo e dominado essencialmente por vórtices (Schouten *et al.*, 2003 e Ridderinkhof *et al.*, 2010), tanto ciclónicos quanto anticiclónicos (Halo, *et al.*, 2014), que se propagam para o sul e eventualmente juntam-se à corrente das Agulhas (Schouten *et al.*, 2003). Os vórtices ciclónicos formam-se com maior frequência porém os anticiclónicos possuem diâmetro, amplitude e tempo de vida superiores aos ciclónicos (Halo, *et al.*, 2014). Em uma média de 4 por ano, os vórtices anticiclónicos propagam-se em direcção ao polo em trajetórias muito regulares do lado oeste do Canal ao longo da costa de Moçambique e atingem amplitudes máximas (com anomalias em torno de 30 cm) entre 20°S e 30°S (Schouten *et al.*, 2005).

Os giros são de vital importância para circulação de grande escala no Canal de Moçambique conforme (Biaostoch, 2008 e Halo, 2012). Sendo os giros ciclónicos conhecidas como importantes características dinâmicas para os ecossistemas marinhos (Lutjeharms, 2006). Eles geralmente trazem águas ricas em nutrientes. No entanto, apesar de seu importante papel, pouco se sabe sobre sua abundância e características no Canal de Moçambique. Por exemplo, de Ruijter *et al.* (2002) não encontrou vórtices ciclónicos no Canal de Moçambique.

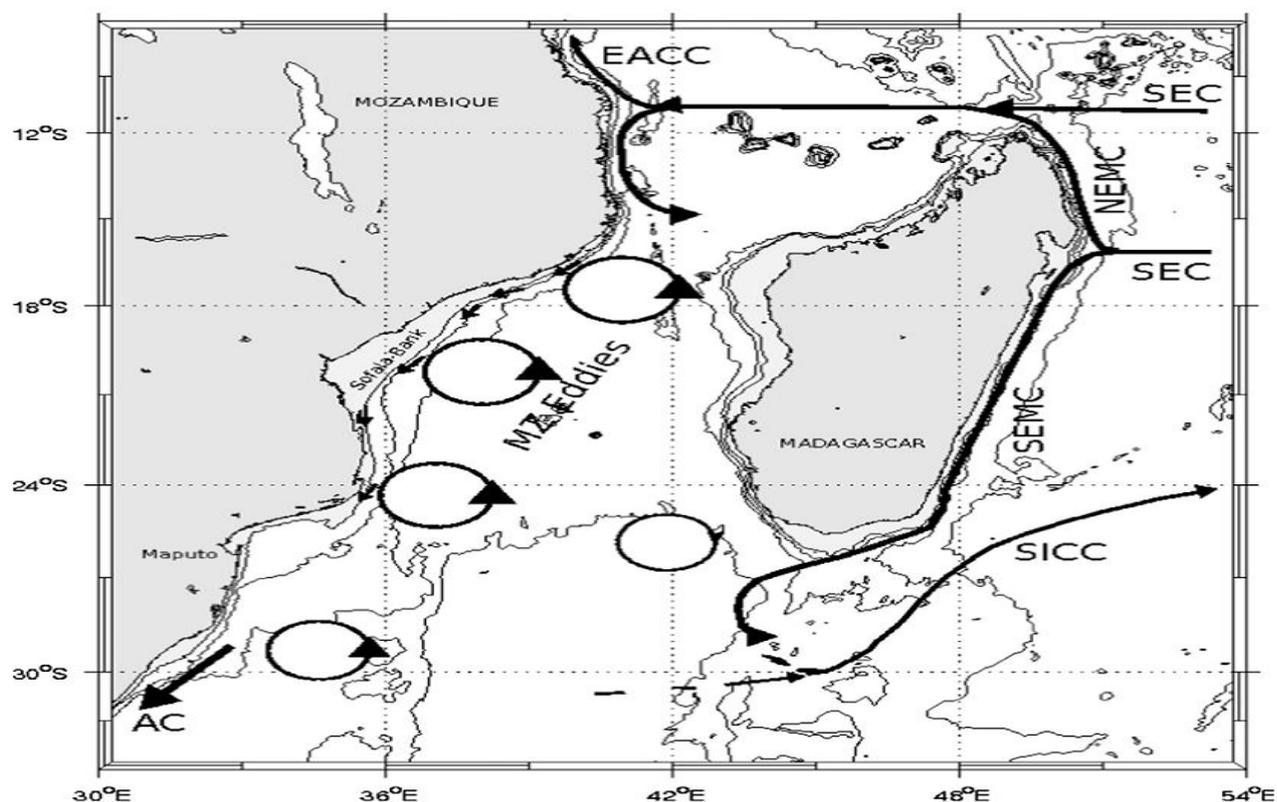


Figura 3: Batimetria do oceano Índico, onde as características cíclicas representam o campo de vórtice, sendo no sentido horário para giros ciclônicos e anti-horário para giros anticiclônicos (Halo, et al. 2014).

2.4. SENSORIAMENTO REMOTO

2.4.1. Os métodos da oceanografia por satélite

O uso de satélites em órbita da Terra como plataformas para sensores de visão oceânica oferece uma série de vantagens únicas, de obter ampla cobertura sinótica em detalhes espaciais finos, e frequência amostragem (repetição) regular para produzir séries temporais por vários anos. Essas capacidades peculiares distinguem o Sensoriamento Remoto por satélite de todas as outras técnicas de observação oceanográfica (Robinson, 2004 e Robinson, 2010).

A capacidade de imagem sinótica depende principalmente das características espaciais de amostragem do sensor, que são limitadas pela sensibilidade do detector e pela capacidade de fluxo de dados do sistema de telecomunicações entre as estações de satélite e terrestres. Outro conjunto de limitações decorre das restrições inevitáveis impostas pelas leis físicas da dinâmica orbital do satélite (Clarizia, *et al.*, 2009).

2.4.2. Órbitas dos satélites

Os satélites que orbitam a Terra são impactados pela força de gravidade e pela inércia. Com base na dinâmica newtoniana, o período, T , para um satélite rodar uma vez segundo uma órbita circular numa distância r acima do centro da Terra é

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM'}} \quad (1)$$

Onde G é a constante da gravitação; M é a massa da Terra; O produto GM tem o valor de $3.98603 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ e é uma constante. Representando a altura do satélite h acima do solo e do raio da Terra como R (cerca de 6,378 km), tem-se o r da expressão anterior dado por $r = R+h$, e assim

$$T = \frac{2\pi\sqrt{(R+h)^3}}{GM'} \quad (2)$$

Existem apenas dois tipos básicos de órbita úteis para o sensoriamento remoto, a saber: satélites geoestacionários e satélites quase polares, conforme ilustrado na Figura 4.

A órbita geoestacionária (Figura 4), é feita a uma altura de cerca de 35.785 km, e tem um período de um dia sideral (~23,93 h), que corresponde ao tempo que a Terra leva para rodar 360°. Sendo fixo, ele pode ver apenas aquela parte do mundo dentro de seu horizonte e não pode ver muito além de cerca de 7.000 km em qualquer direção medida a partir do ponto mais baixo do satélite no Equador, na longitude do satélite. Normalmente esta órbita oferece um intervalo de revisitação de menos de 30 minutos e resolução espacial de 3 a 5 km. Isto confere-lhes uma frequência de amostragem maior em comparação com os sensores de satélite, mas uma resolução espacial relativamente fraca.

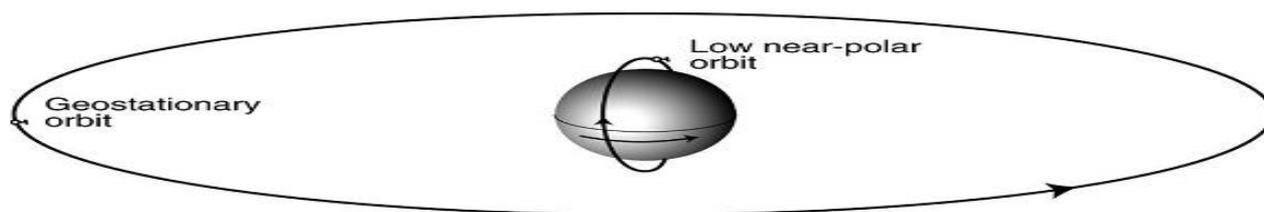


Figura 4: Orbitas usadas para satélites de observação da terra, desenhados aproximadamente segundo escala das alturas das órbitas indicadas. A órbita geoestacionária é de aproximadamente 36.000 km acima da terra. A órbita quase polar é tipicamente entre 700 km e 1.000 km acima da superfície da Terra (Robinson I. S., 2010).

Em órbita quase polar, o satélite sobrevoa numa altitude muito mais baixa, tipicamente entre cerca de 700 km e 1.350 km, sendo o período orbital de cerca de 100 minutos (Equação 2). Assim, completa

entre 14 e 15 órbitas por dia, durante as quais a Terra gira uma vez. Então o satélite marca uma trilha no solo cruzando cerca de 14 vezes na direção nordeste-sudoeste (trilhas descendentes) e o mesmo número de trilhas ascendentes na direção sudeste-noroeste.

2.4.3. O princípio da altimetria sobre o oceano

O grande problema da observação dos oceanos deve-se ao facto de que oceano é um fluido dominado pela prevalência de grandes estruturas hidrodinâmicas coerentes e estatisticamente previsíveis, como giros, vórtices e “correntes”, em meio a campos turbulentos de circulação (na melhor das hipóteses com estatísticas previsíveis) (Robinson, 2010). A dinâmica do oceano inclui escalas de variabilidade que vão de metros a milhares de km, e de minutos a muitos anos. Isto significa que quando se fala em monitorar o oceano, é necessário determinar quais são as escalas que caracterizam os movimentos que desejamos observar, já que cada escala exige a utilização de tecnologias específicas.

A distância entre a superfície do oceano e um satélite tem um valor limitado dado por R_{alt} . A Figura 5, mostra os parâmetros que mais precisam ser definidos ou medidos para produzir uma propriedade oceanográfica útil. Em primeiro lugar, quando a altura do satélite, H_{sat} for conhecida em relação a um nível de referência, então a altura, H , do mar acima do nível de referência pode ser determinado. O nível de referência é um elipsóide regular junto à superfície definida dentro de um quadro de referência fixado na terra em rotação.

O elipsóide é escolhido de modo a corresponder aproximadamente à forma da terra ao nível do mar, e fornece uma referência conveniente para medir todas as outras alturas. Vários fatores físicos contribuem para as alturas h , que é geralmente chamada de topografia da superfície do oceano. O primeiro é a distribuição da gravidade sobre a terra, representada pelo geóide, cuja altura h geóide acima do elipsóide de referência pode ser vista na Figura 6. O geóide é a superfície equipotencial, no nível médio do mar, do campo gravitacional efetivo da terra, que incorpora forças de rotação da terra e a gravitação do sólido da terra, do próprio oceano e da atmosfera.

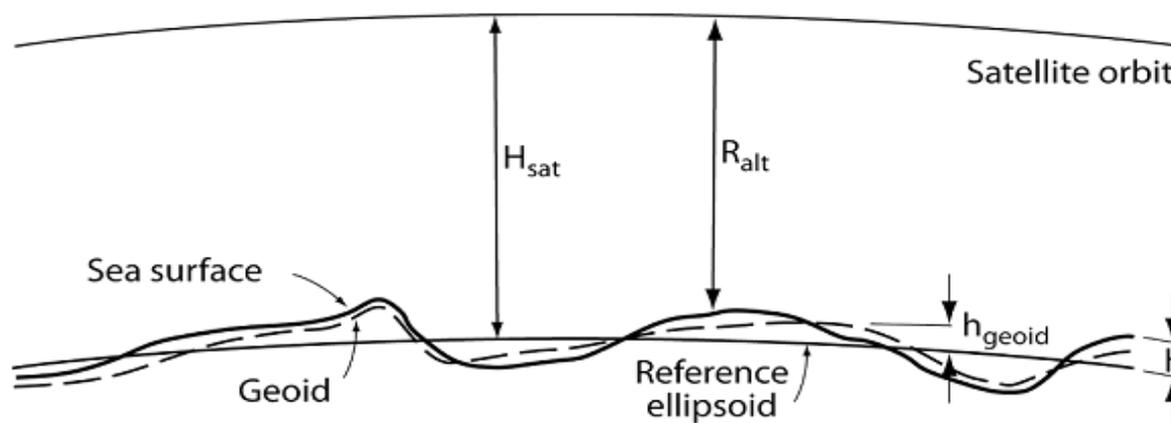


Figura 5: A relação entre diferentes quantidades de distância usadas em altimetria (I. S. Robinson 2010).

Outro fator que contribui para h é h_{tide} , o deslocamento instantâneo da superfície do mar em relação à sua posição média devido às marés, incluindo a contribuição da maré terrestre. Em terceiro lugar está a resposta local, do oceano, a distribuição da pressão atmosférica sobre o oceano, aproximado pelo efeito inverso do barômetro, em que uma pressão aumentada de 1 mbar abaixa o nível do mar em 1 cm. O fator remanescente é o deslocamento da superfície do mar associado ao movimento do mar, chamado de topografia dinâmica do oceano, h_{dyn} . Portanto:

$$h = h_{dyn} + h_{geoid} + h_{tide} + h_{atm}. \quad (3)$$

A topografia dinâmica é a propriedade que é de maior relevância para a modelagem do oceano, uma vez que contém informações sobre a circulação oceânica. Rearranjando (3) e substituindo $h = H_{sat} - R_{alt}$, tem-se:

$$h_{dyn} = H_{sat} - R_{alt} - h_{geoid} - h_{tide} - h_{atm}. \quad (4)$$

A exatidão e precisão da altura dinâmica estimado no oceano, depende não só da própria medição altimétrica, mas também sobre os outros quatro termos em (4). Para missões de altimetria dedicada usa-se a uma altura de cerca de 1340 km, uma vez que o arrasto atmosférico é mínimo nessa nível. A altura do satélite em órbita, H_{sat} , agora pode ser previsto com uma precisão de 2cm usando uma combinação de dispositivos de laser e micro-ondas de rastreamento

2.4.4. Correntes geostróficas medidas por satélite

Para determinar as correntes de superfície do oceano, utilizam-se as equações geostróficas:

$$\left. \begin{aligned}fv &= g \frac{\partial hSSHA}{\partial x} \\fu &= -g \frac{\partial hSSHA}{\partial y}\end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Onde: (u,v) são as velocidades nas direcções leste e norte, também conhecidas como componentes da velocidade geostrófica; f é o parâmetro de Coriolis; g é a aceleração devido à gravidade; x e y são as distâncias na direcção Leste e Norte, respectivamente. A partir de uma única passagem superior, apenas a componente da corrente em uma direcção ao longo da faixa do percurso do altímetro pode ser determinada, mas onde ascendente e descendente as faixas se cruzam entre si o vector de velocidade completa pode ser estimado (Robinson, 2010).

Uma vez que a equação (5) assume equilíbrio geostrófico, se houver qualquer deslocamento da superfície irá conduzir a erros em (u,v) . No entanto, as correntes geostróficas não devem persistir por mais de metade de um dia, devido ao comportamento do pêndulo $(1/f)$, antes de ajustar a geostrófica. Perto do equador a altura da superfície do mar, SSHA, não pode ser interpretada directamente em termos de correntes superficiais já que aqui f é muito pequeno e as equações geostróficas (5) não pode ser aplicadas.

2.4.5. Produtos de dados oceânicos derivados pela altimetria de satélite

A altimetria de satélite, possivelmente a técnica mais madura para o mapeamento de correntes oceânicas, permitiu avanços em nossa compreensão da dinâmica da circulação oceânica de larga escala (aproximadamente > 200 km) e de uma visão inigualável da energia cinética turbulenta em escala global (Bertuluci, *et al.* 2015). O espaçamento entre pistas moída convencional de um altímetro individual é conhecida para limitar resolução transversal para várias centenas de km. Da mesma forma, múltiplos altímetros produzem mapas em grade da altura da superfície do mar que é limitada a uma resolução de cerca de 100 km e 10 dias. Este chamado "intervalo de altimetria" levou a tentativas de combinar os dados do altímetro de resolução mais baixa com sequências de satélite de média e alta resolução e observações in situ. Estimativas diretas e indiretas da corrente de superfície oceânica e maiores quantidades derivadas de água, como limites frontais, podem ser derivadas usando uma variedade de sensores satélites.

A corrente de superfície oceânica é definida como o movimento horizontal e vertical coerente da água oceânica superficial (sobre um regime de profundidade específico) com uma dada velocidade e um

limite superior em contato com a atmosfera que persiste sobre uma geografia, região e período de tempo (Aviso+ 2015).

A Globcurrent é um projecto europeu financiado pela ESA, cujo objectivo é fazer avançar a estimativa quantitativa das correntes da superfície do oceano a partir da sinergia do sensor de satélite e demonstrar o impacto e os avanços através de aplicações científicas, operacionais e comerciais lideradas pelo usuário. Isso, por sua vez, destacará as vantagens das abordagens por satélite e aumentará a captação e exploração das medições de corrente oceânica por satélite. Em geral, a globcurrent engloba como principais produtos de satélite para os dados das correntes a superfície usadas no presente estudo que são da órbita quase polar: a Envisat, CryoSat-2, Jason-1 e Jason-2.

Envisat (Environmental Satellite)

Este satélite que actualmente está inativo, foi o maior satélite já criado para observação da Terra. Foi lançado em 1 de Março de 2002, pela Agência Espacial Europeia (ESA- The European Space Agency), a partir da missão “Polar Platform for future Earth”. Lançado a partir da base de Kourou na Guiana Francesa, por meio do foguete Ariane-5 (Bertuluci, Di Sessa, Roquete e Chuerubim, 2015), o satélite era constituído por dez instrumentos: ASAR, GOMOS, AATSR, MWR, MERIS, MIPAS, SCIAMACHY, RA-2, DORIS e LRR. Tais instrumentos permitiam a observação contínua e o monitoramento da Terra, a partir de uma análise primorosa da atmosfera, dos oceanos, continentes e das calotas de gelo. O objectivo principal do Envisat é de assegurar a continuidade na obtenção de dados iniciada pelos sensores ERS-1/2, garantido dessa forma o apoio à investigação e permitir a monitorização das mudanças climáticas e ambientais.

O CryoSat-2

O CryoSat-2 é a continuação da Missão de Oportunidade do Explorador da Terra no Programa Planeta Vivo da ESA. Ele substitui o CryoSat, que foi selecionado para desenvolvimento em 1999 e que se perdeu como resultado da falha no lançamento em 8 de outubro de 2005. O CryoSat-2 terá os mesmos objetivos de missão que a missão original do CryoSat; Ele monitorará a espessura do gelo e o gelo do mar e ajudará a explicar a conexão entre o derretimento do gelo polar e o aumento do nível do mar, e por isso está contribuindo para estudar as mudanças climáticas (Labroue, et al., 2012).

Jason-1

Foi o primeiro seguimento da bem-sucedida missão TOPEX / Poseidon. Esta segunda missão conjunta NASA-CNES foi construída em uma nave espacial francesa e lançada em um foguete americano Delta II da Base Aérea de Vandenberg, na Califórnia. Como TOPEX / Poseidon, a carga

incluía instrumentos americanos e franceses (Aviso+, 2015). Dados de altímetro do Jason-1 fazem parte de um conjunto de dados fornecidos por outras missões oceânicas gerenciadas pelo JPL. O Jason-1 foi desativado em julho de 2013 e continuou a tarefa de fornecer as importantes séries de dados oceanográficos originadas pela TOPEX / Poseidon por 11-1 / 2 anos.

Jason – 2

O Jason-2 é um satélite de acompanhamento da missão oceanográfica conjunta CNES / NASA. A missão de topografia da superfície do oceano no satélite Jason-2 (OSTM / Jason-2) é uma continuação da missão Jason-1 (Aviso+, 2015 e Clarizia, et al., 2009). Foi lançado em 20 de junho de 2008 a partir da Base da Força Aérea de Vandenburg, na Califórnia. O complemento do sensor baseia-se no que foi desenvolvido no Jason-1, mas com aprimoramentos significativos para melhorar o desempenho e a confiabilidade, a fim de levar o conjunto de sensores à capacidade operacional. Tem como sensores, o Solid-State Radar Altimeter, AMR, DORIS TRSR-2/GPSP e LRA.

Descrição das correntes de geostrófica + ekman combinadas

Embora as correntes de superfície no oceano não sejam a adição simplificada de diferentes componentes actuais, na primeira versão dos produtos da GlobCurrent as correntes combinadas são pretendidas como a soma do geostrófico e do Ekman, nas componentes de duas profundidades (0m e 15m) conforme elucida as equações (6) e (7):

$$U_{\text{total}} (z = 0 \text{ m}) = U_{\text{geost}} + U_{\text{ek}} (z = 0 \text{ m}) \quad (6)$$

$$U_{\text{total}} (z = 15 \text{ m}) = U_{\text{geost}} + U_{\text{ek}} (z = 15 \text{ m}) \quad (7)$$

O repositório da globcurrent possui diferentes tipos das correntes, cujo o parâmetro compreende duas componentes (o Norte e para o Leste). Considerando a superfície como o limite inferior da atmosfera osmótica, a velocidade que é uma grandeza vetorial, o Leste indica uma componente vetorial positiva quando direcionado para o leste (negativo para o oeste), então o equilíbrio geostrófico é assumido “surface_geostrophic_eastward_sea_water_velocity” que significa a soma de uma parte variável da água em todas as fases. Por outro lado tem-se as correntes do ekman “ekman_current_velocity (GlobCurrent <Parameter>: CUREkm)” que resultam do equilíbrio entre o atrito (induzido pelo estresse do vento) e força de Coriolis. A tensão do vento é frequentemente parametrizada em função do quadrado da velocidade do vento e de um coeficiente de arrasto. Ekman teórico corrente na superfície flui a 45 ° para a direita (esquerda) da direção do vento no hemisfério norte (sul).

III. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho consistiu em três (3) fases, a primeira dedicou-se na revisão bibliográfica, a segunda foi atribuída aquisição dos dados e por fim ao processamento dos mesmos no escritório.

3.1. Área de estudo

O Canal de Moçambique faz parte do Oceano Índico que separa Madagáscar do resto do Continente Africano, situando-se no Sudoeste do Oceano Índico entre as latitudes 12° Sul á 26° Sul e longitudes 33° Este á 40° Este. Sendo a Costa Moçambicana a sua fronteira ocidental que é relativamente complexa, rica em ecossistema marinho e importante para a pescaria, recreativa, turística e navegação. O presente estudo dedica-se à análise climatológica das correntes próximo à costa e no mar aberto, onde o domínio compreende a toda a região Norte do Canal de Moçambique (Figura 6) que se localiza entre os paralelos 10°S á -20°S de latitude e 30°E á -51°E de longitude.

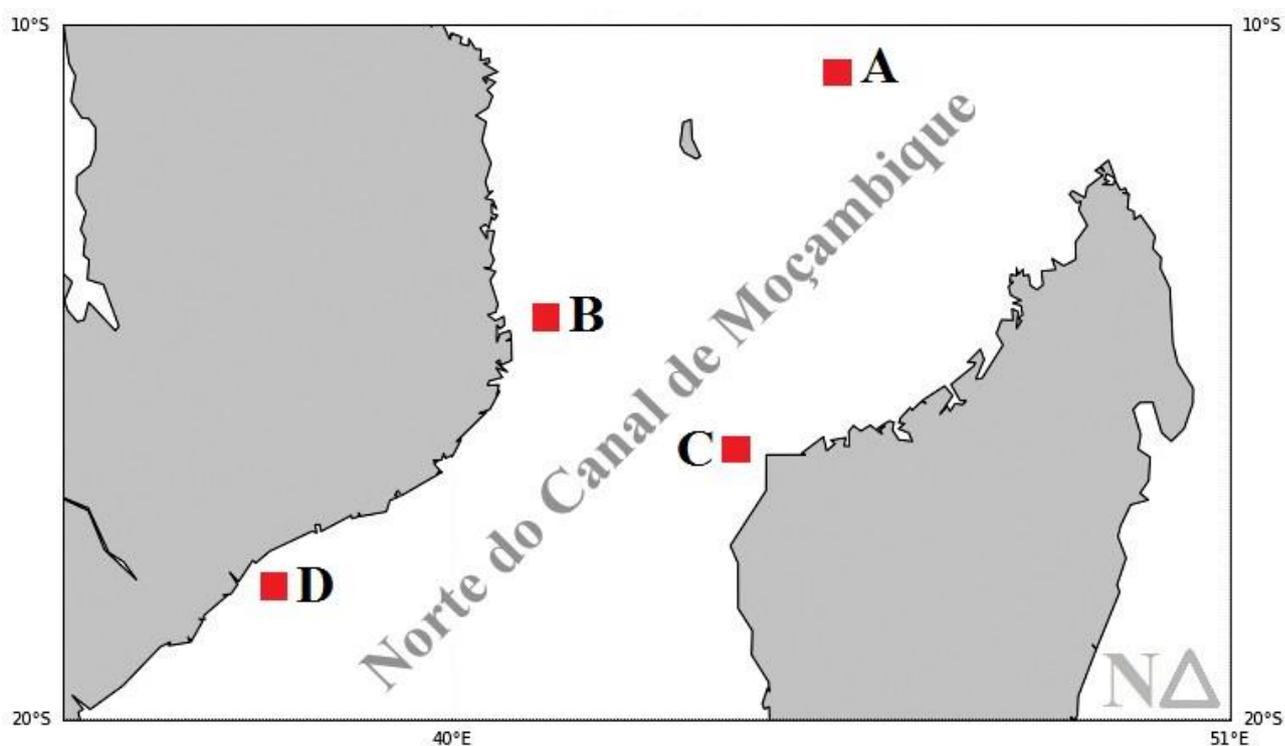


Figura 6: Localização geográfica do Norte do Canal de Moçambique, e dos pontos em que foram extraídas as séries temporais das velocidades das correntes de superfície nesta região norte do Canal de Moçambique (Fonte: Autor).

Os quatro (4) pontos para análise das series temporais das correntes para a região de domínio são representadas por estação **A** que se localiza nos paralelos -11.0N a 45.0E, estação **B** aos -14.0N a 41.0E, estação **C** nos -16.0N a 44.0E e a estação **D** que compreendem os paralelos -18.0S a 37.5E, conforme é lucidado na Figura 6.

3.2. Dados

Na realização do presente trabalho, foram analisados dados das correntes de Ekman e geostróficas combinadas com (0,25 x 0,25 graus) de resolução espacial adquiridas na base de dados do projecto Europeu GlobCurrent (www.globcurrent.org), produzidos pelo sistema de combinação e unificação de dados dos altímetros “ Ssalto/Duacs” e distribuídos pela AVISO, com o apoio da Cnes (<http://www.aviso.oceanobs.com/duacs/>). Estes dados fornecidas em meios diários com duas componentes da velocidade e direcção das correntes Norte (V) e Este (U), pois resultam da fusão dos produtos Envisat, CryoSat-2, Jason-1 e Jason-2 da altimetria de satélite, ainda mais estes dados são armazenados no formato de rede de Formulário de Dados Comum (“*NetCDF*”).

O repositório de dados GlobCurrent inclui a corrente geostrófica, Ekman e as correntes combinadas de Ekman com a geostrófica da superfície numa profundidade de 15 m. As correntes combinadas são também interpolados e colocados em uma grelha comum com uma resolução espacial de 25 km, e uma resolução temporal de 1 dia para a corrente geostrófica e 3 (três) horas para as correntes Ekman, abrangendo um período de 23 anos, de janeiro de 1993 a maio de 2017. Mas para o presente estudo foram usados dados de 15 anos, colhidos desde 2002 á 2016 no endereço do projecto GlobCurrent.

3.2. Processamento dos dados

Os dados das correntes à superfície do presente estudo foram lidas e processados através da linguagem de programação do software “Python”, que é uma das boas e poderosas ferramentas para a realização de pesquisas com conjuntos de dados via satélite, com um benefício particular de ser isento na licença, ainda mais produz cálculo científico, possui uma rapidez na execução de código, permite a publicação da informação num website com mais facilidade, além disso produz resultados em gráficos bem como mapas, etc como outros programas (por exemplo Matlab).

O método consistiu no cálculo da magnitude e a direcção das correntes geostróficas e Ekman combinadas a partir de fórmulas específicas para linguagem do Python e na produção de mapas contendo médias (diárias, mensais, sazonais e anuais), desvio padrão das mesmas e gráficos apresentando as series temporais da velocidade e direcção das correntes. Contudo a velocidade e direcção para duas componentes da corrente diárias para Norte (V) e Este (U) são obtidas usando a fórmula:

$$\mathbf{Velocidade} = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (8)$$

$$\mathbf{Direcção} = \text{Arctan} \left(\frac{U}{V} \right) \quad (9)$$

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

A análise da variabilidade das correntes consistiu na identificação de padrões de circulação em mapas de distribuição da velocidade média aritmética de longo período, e média sazonal com base em dados de 15 anos. A média de longo termo é um parâmetro adequado para descrever as correntes porque fornece uma estimativa precisa sobre o padrão das velocidades e direcções das correntes, isto é quantifica a sua magnitude e sua variabilidade. A fim de identificar se os dados analisados estão longe da média ou se estão bem próximo determinou-se o desvio padrão das correntes. Para complementar análise foi feita a serie temporal que é uma sequência de dados ordenados no tempo. Esta técnica da analise da serie temporal consistiu em identificar ao comportamento das componentes da velocidade e direcção das correntes ao longo dos 15 anos em estudo para uma determinada região do Canal.

Para calcular a média de longo termo (\underline{X}) e respectivo desvio padrão (S), simplesmente calculou-se a média de cada componente excedente, 30/31 dias para um mês típico ou cerca de 92 dias para um a estação usando a seguinte fórmula da estatística:

$$\underline{X} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{X}{n} \right) \quad (9)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \underline{X})^2}{n-1}} \quad (10)$$

Onde:

- ✓ \underline{X} é a Media pretendida das correntes (mensal, sazonal, anual);
- ✓ S é o Desvio padrão correspondente a uma dada média calculada (mensal, sazonal, anual);
- ✓ n é conjunto de observações das correntes diárias usadas para determinar uma dada media;
- ✓ X_i é cada observação diária das correntes.

Por exemplo Benny (2014) usou uma técnica similar do presente estudo, baseada na média de longo termo na região Sul do Oceano Indico e concluiu que grandes variações das correntes à superfície são observadas no campo da velocidade média mensal de longo prazo. Na qual maior mudança é observada na Corrente Sul Equatorial, que mostra variações espaciais e temporais.

IV. RESULTADOS

4.1. Análise da variabilidade das correntes à superfície derivadas do satélite

A análise das correntes no norte do Canal de Moçambique foi baseada no mapeamento das médias e respectivo desvio padrão, sequência de correntes diárias e series temporais para os 15 anos.

4.1.1. Média de longo termo das correntes à superfície no norte do Canal de Moçambique

A Figura 7, apresenta a média de longo termo das correntes à superfície, determinada por uma séries de dados de satélites (altimetria), com uma extensão temporal de 15 anos, os quais cobrem toda a região Norte do Canal de Moçambique, compreendida entre os 20°S e 10°S.

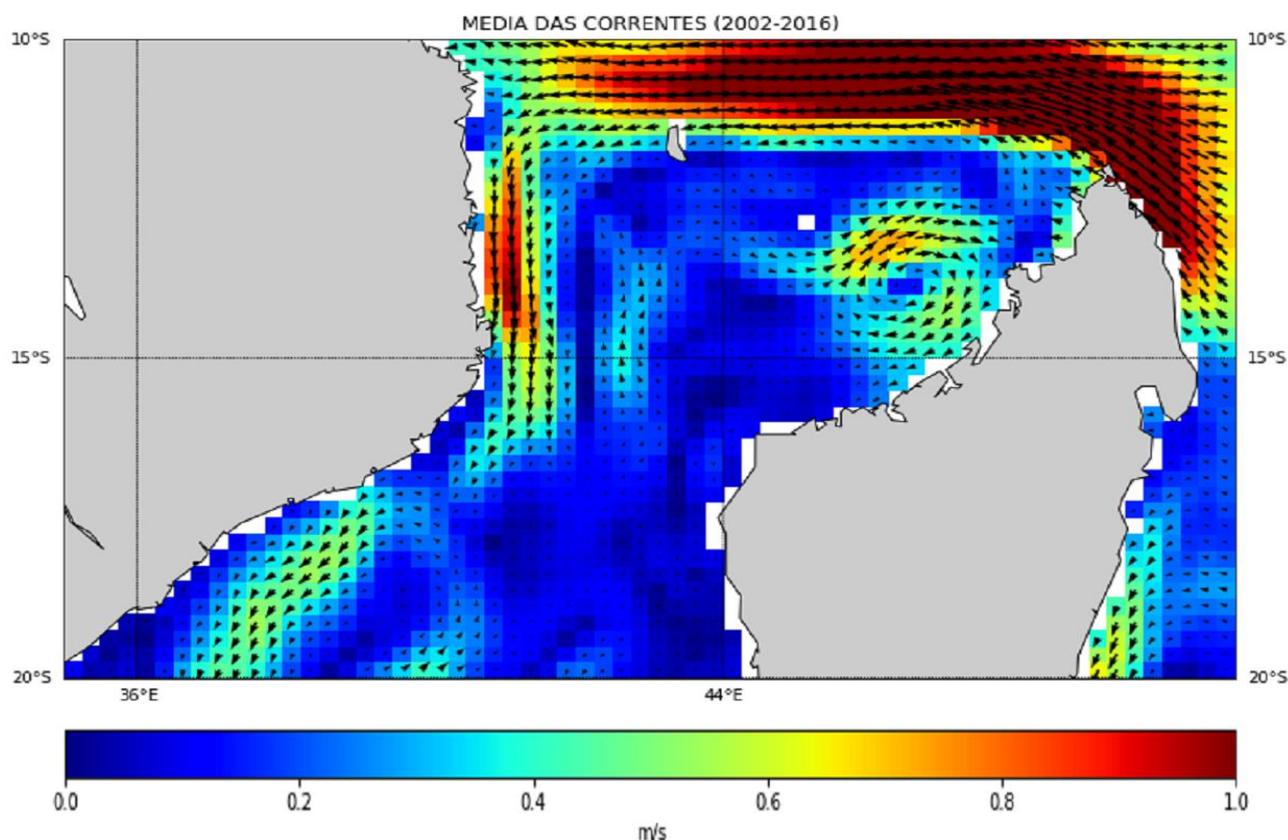


Figura 7: Média de 15 anos das correntes na região norte do Canal de Moçambique nos períodos 2002 á 2016. Os vectores indicam a direcção predominante do fluxo, a cor de fundo indica sua velocidade expressa em [m/s].

A região mais a norte nesta média, precisamente entre 10 e 12° S é caracterizada, por uma corrente bastante forte à superfície, indicativo da persistência da Corrente do Nordeste de Madagascar (NEMC). Na região nordeste de Madagascar, nota-se também a persistência desta corrente, a qual junta-se à SEC. Mais para o Sul dos 15°S na longitude dos 50°E, nota-se a prevalência do ramo para Sul da Corrente do Este de Madagascar (EMC) com velocidades de aproximadamente 0.6m/s. Ao

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

longo da Costa de Moçambique observa-se a prevalência de uma corrente forte, mas como se sabe a corrente naquela região é intermitente o que possivelmente pode estar a reflectir o impacto do movimento dos anticiclones para o Sul. A cerca de 14° S, esse valor parece indicar uma velocidade de aproximadamente de 1 m/s, na média em análise. A parte central do Canal é dominada por correntes muito baixas na ordem de 0 m/s à superfície, o que também se observa na parte ocidental de Madagáscar, com a excepção do Noroeste em que se observa a prevalência de um giro ciclónico centrado nos paralelos 46°E,14°S.

4.1.1.1. Desvio padrão das correntes a superfície no norte do Canal de Moçambique

Na Figura 8, apresenta-se o desvio padrão para a média de longo termo das correntes à superfície, determinado a partir de dados de altimetria, com uma extensão temporal de 15 anos, conforme explicados nas secções anteriores, dentro da região de interesse, isto é na parte norte do Canal de Moçambique [10°-20°S e 35-48°E].

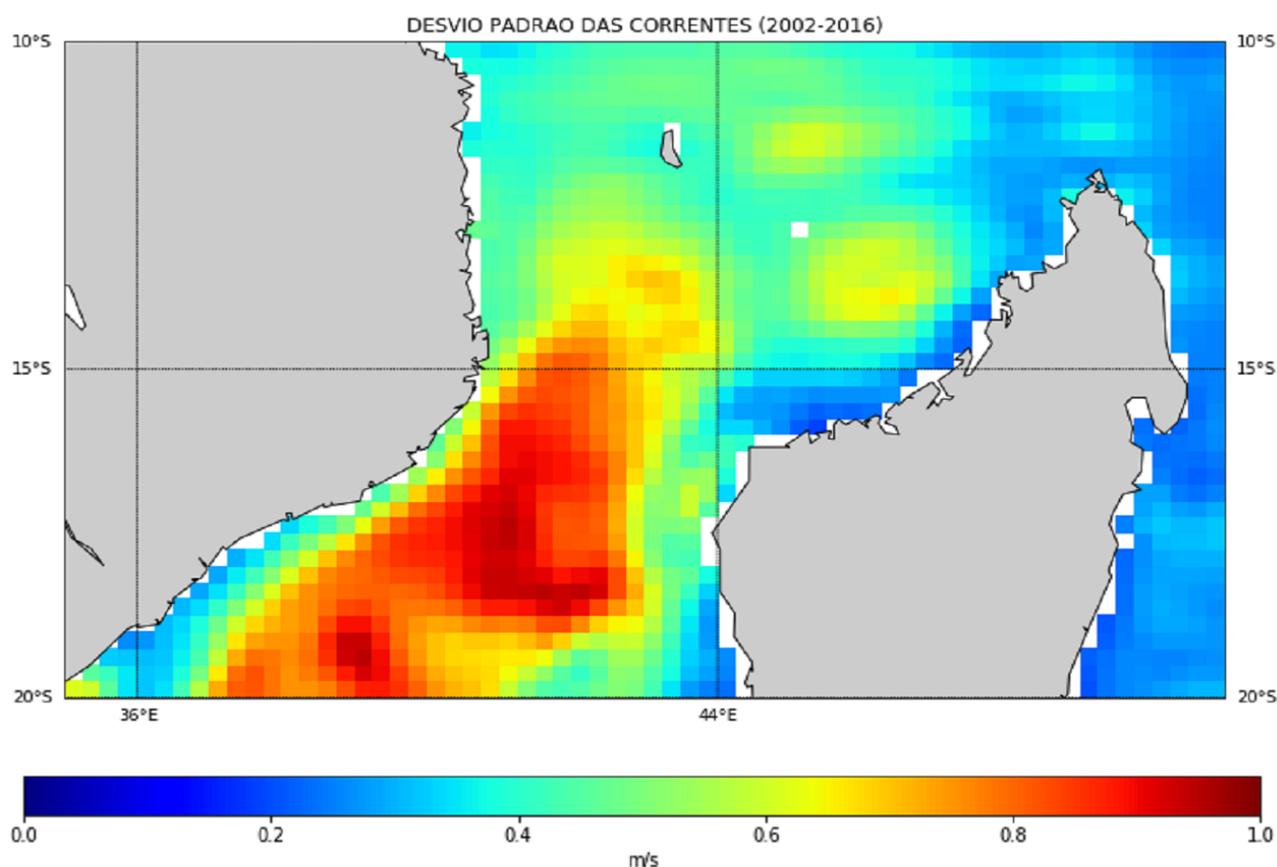


Figura 8: Desvio padrão anual das correntes na região norte do Canal de Moçambique nos períodos 2002 á 2016. Os vectores indicam a direcção predominante do fluxo, a cor de fundo indica sua velocidade expressa em [m/s].

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

Depreende-se claramente que o desvio padrão apresenta valores bastante altos, na ordem de 1m/s na parte central do canal, mas com mais variabilidade ao longo da região ocidental. Na zona norte do Canal de Moçambique, concretamente junto às Ilhas Comores a variabilidade aponta para um desvio padrão intermédio, sendo nula nas outras zonas do Canal. O valor intermédio do desvio padrão nessa zona parece dever se à variabilidade climática da corrente, no caso a NEMC, e ao facto dos giros serem gerados naquela zona.

4.1.2. Médias sazonais das correntes no norte do Canal de Moçambique

De uma forma geral, as médias sazonais determinadas para o período em análise (15 anos), apresentam características similares às correntes de larga escala que dominam as correntes de superfície nesta região, conforme é elucidado na Figura 9.

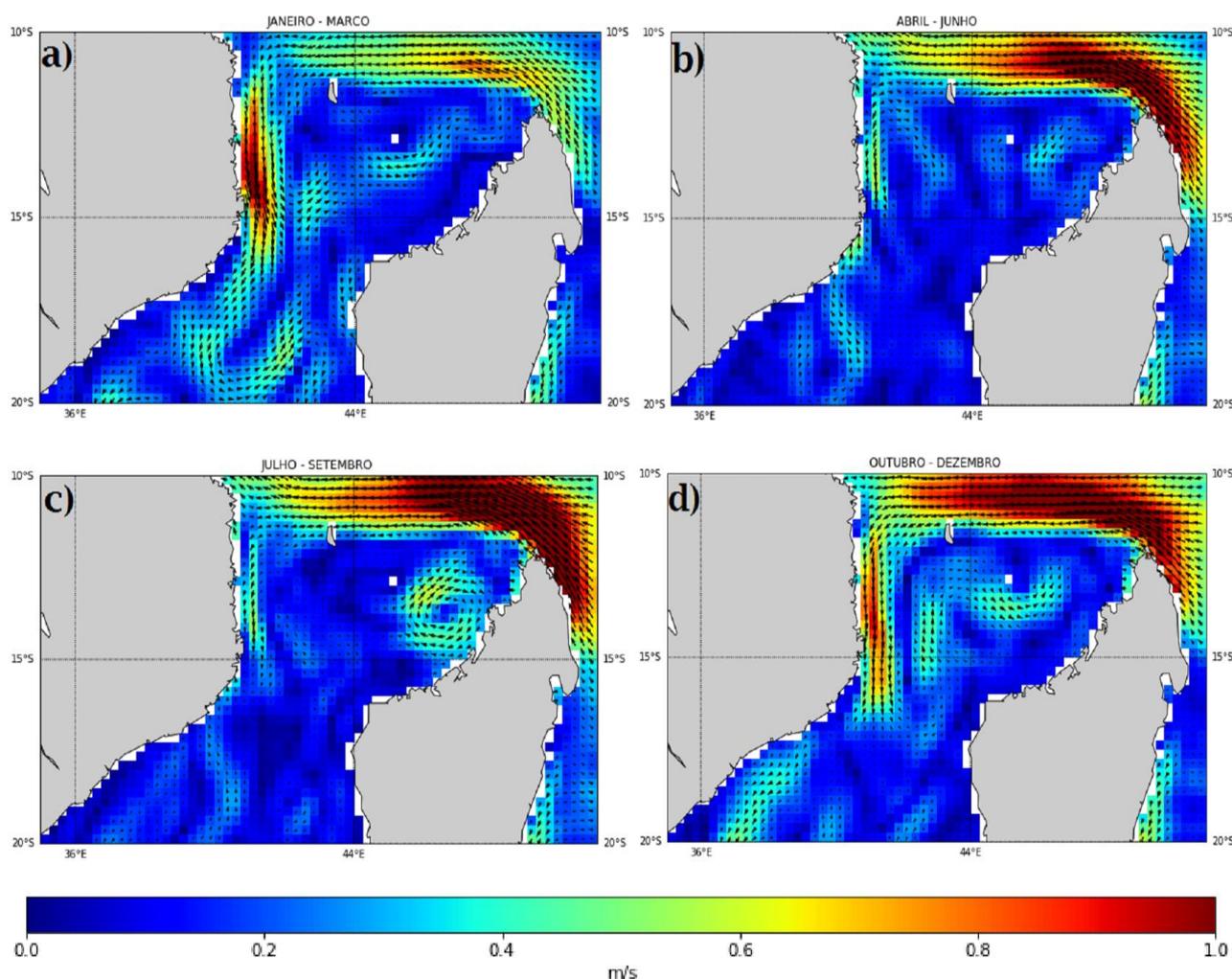


Figura 9: Distribuição das médias sazonais das correntes na região norte do Canal de Moçambique em função dos meses. Os vectores indicam a direcção predominante do fluxo, a cor de fundo indica sua velocidade expressa em [m/s].

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

Na média JFM, nota-se que a corrente de superfície na parte norte do Canal, a qual é conhecida como NEMC é bastante fraca, sendo da ordem de 0.6 m/s durante esta estação do ano. Mas o sinal da corrente junto à costa de Moçambique indica persistência da ordem de 1 m/s para o Sul. A intensidade dessa corrente associa-se ao trânsito dos giros anticiclônicos para o Sul. No centro do domínio a corrente é quase nula, mas denotam-se faixas em que a corrente de superfície é em direcções variadas, Figura 9, painel **a**). Na estação AMJ, a NEMC é bastante forte e tem a ordem de 1 m/s. Na costa de Moçambique ela é fraca, o que indica a importância das variações sazonais na região, Figura 9, painel **b**).

Na estação JAS nota-se a preponderância da NEMC, mas não Corrente costeira em Moçambique (MC) Figura 9, painel **c**). A Noroeste de Madagáscar, existe um giro ciclónico similar ao que foi descrito na média anual. Na média OND, nota-se que tanto a MC como a NEMC são proeminentes, Figura 9, painel **d**). A influência dos giros no meio do Canal manifesta-se através da existência de faixas de correntes propagando se aleatoriamente nas diversas direcções. Em geral a sazonalidade em muito importante na circulação de grande escala nesta região.

4.1.3. Médias mensais das correntes para o ano de 2016 no norte do Canal de Moçambique

Na Figura 10, apresentam-se as médias mensais das correntes à superfície para o ano de 2016 na região Norte do Canal de Moçambique, compreendida entre os paralelos 10°S e 20°S. De um modo geral estas médias mensais mostram que os giros ocorrem ou persistem de forma aleatória. Isso é explicado pela sua posição não permanente nesta região do Canal.

No mês de Janeiro de 2016 conforme a Figura 10, painel **a**), denota-se que as correntes são relativamente fracas quase em toda região do Canal. Mais para norte a NEMC persiste com sinal fraco desde a costa leste de Madagáscar até a Costa de Moçambique, com velocidades na ordem 0.5m/s. Ao longo seu percurso para o Sul, junto à costa moçambicana, ela é intermitente devido a formação dos giros, mas persistindo com velocidades de aproximadamente 0.8m/s. Nota-se um total de 3 grandes giros anticiclónicos prevalecendo dentro do canal entre os paralelos [13°S-20°S] ao longo deste mês.

Para mês de Fevereiro de 2016 Figura 10, painel **b**), as correntes a superfície são um pouco mais fortes nesta região. Nos limites 10°S-12°S a NEMC persiste intensificada sendo da ordem de 0.7m/s para a Costa. Junto à costa moçambicana, as assinaturas desta corrente ascendem velocidades de 1m/s. Em geral observam-se poucos giros de maior dimensão prevalecendo no centro do canal, conforme elucidado na Figura 10, painel **b**). Enquanto para mês de Março (Figura 10, painel **c**), as correntes são muito fortes, tanto para NEMC e MC.

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

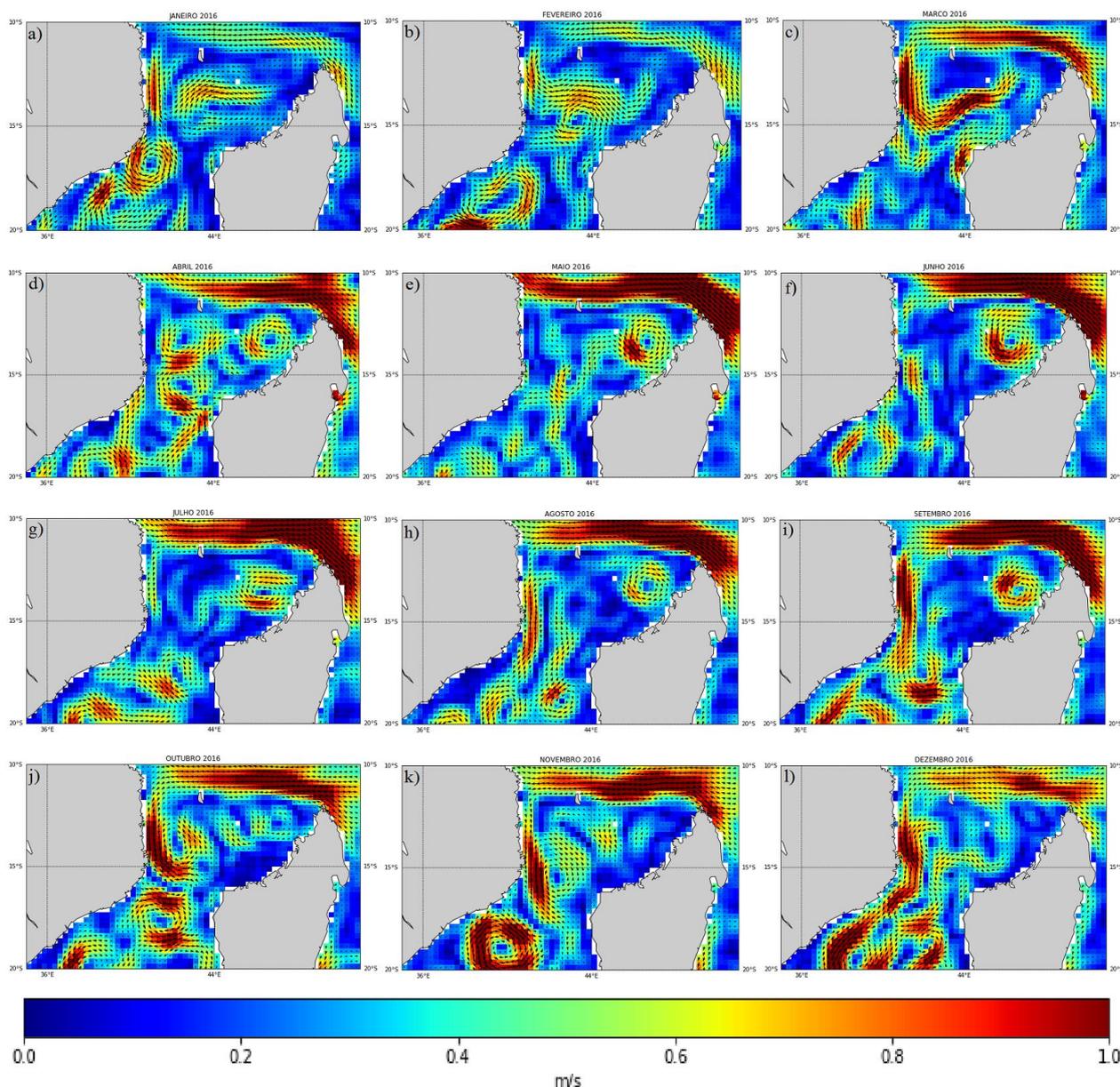


Figura 10: Médias mensais das correntes na região norte do Canal de Moçambique no período de 2016. Os vectores indicam a direcção predominante do fluxo, a cor de fundo indica sua velocidade expressa em [m/s].

Nota-se também grande giro anticiclónico formado mais a norte entre os paralelos [10-15°S]. Abaixo desta faixa de latitudes esta corrente não se faz sentir. A intensificação do sinal das correntes entre o mês de Janeiro e Março é indicativo do aumento do fluxo durante o verão, em associação com a influência das moções do HN, onde os ventos são orientados para o continente Asiático neste período do ano. No mês de Abril Figura 10, painel **d**), vários giros anticiclónicos são gerados dentro do canal. Estes giros parecem ser formados devido à variações nas direcções das correntes, registadas no mês anterior (Março). Também pela difusão do grande giro anticiclónico que prevaleceu mais a norte do

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

canal nesse mês. De facto, nesse mês, foi notória a proeminência da NEMC, a qual apresentava velocidades de aproximadamente a 1m/s.

Ao contrário no mês de Maio de 2016 Figura 10, painel e), a corrente para o Sul junto à costa moçambicana era inexistente. Dentro do Canal prevaleciam faixas com variadas direcções e um ciclone a noroeste do Madagáscar. Em Junho de 2016 de acordo com a Figura 10, painel f), as faixas multi-direcionais criam um grande anticiclónico centrado aproximadamente aos limites [18°S, 40°E]. A norte, a assinatura da corrente NEMC era fraca e por isso também fraca a corrente junto à costa moçambicana, com velocidades de aproximadamente 0.4m/s.

No mês de Julho Figura 10, painel g), observa-se uma inconsistência da corrente junto à costa moçambicana (MC), com velocidades fracas na ordem 0.3m/s para o Sul. Observa-se também vários giros de pequenas dimensões no centro do Canal Figura 10, painel g). Na Figura 10, painel h), correspondente ao mês de Agosto de 2016, denota-se junto a costa moçambicana uma faixa que sugere continuidade da corrente (MC) naquelas latitudes, persistindo com sinal de 0,8m/s. Em Setembro Figura 10, painel i), a mesma corrente continua, aproxima-se mais a linha da costa, com velocidades mais fortes na ordem 1m/s.

Em Outubro de 2016, a corrente à superfície NEMC sofre atenuação devido as correntes frias vindas do leste de Madagáscar, conforme elucidado na Figura 10, painel j). A noroeste de Madagáscar observa-se um ciclone com correntes quase nulas diante da sua periferia. Na Figura 10, painel k), a MC que é intermitente, praticamente não existe, mas no canal prevalecem anticiclónicos com assinaturas de superfície muito proeminentes.

No mês Novembro apenas observam-se dois giros em direcção ao Sul, com correntes muito fortes na sua periferia, Figura 10, painel k). No último mês do ano 2016 (Dezembro) Figura 10, painel l), nota-se a fraca preponderância da NEMC. Esta corrente possui velocidades baixas. Este sinal associa-se aos ventos do continente Asiático para Oceano Indico. Enquanto as moções do HS, dos ventos alísios influenciam bastante ao sinal muito forte da corrente contínua junto a costa conforme elucidado na Figura 10, painel l).

Contudo as médias mensais do ano 2016 mostram um padrão diferente da circulação em comparação aos outros anos analisados, nomeadamente 2002,2003 etc., cujas figuras não foram apresentadas. Esse comportamento deve-se à variabilidade das correntes de larga escala em resposta às variações induzidas pelas monções tanto para HS ou HN.

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

4.1.4. Análise da sequência de imagens das correntes diárias para o mês de Dezembro de 2016

Na Figura 11, apresentam-se os mapas com as correntes diárias para o mês de Dezembro de 2016, determinadas em toda região norte do Canal de Moçambique, compreendida aos 10 á 20°S. De um modo geral, nas variações diárias das correntes apresentam precisamente os processos da circulação que assolam o Canal nesta região.

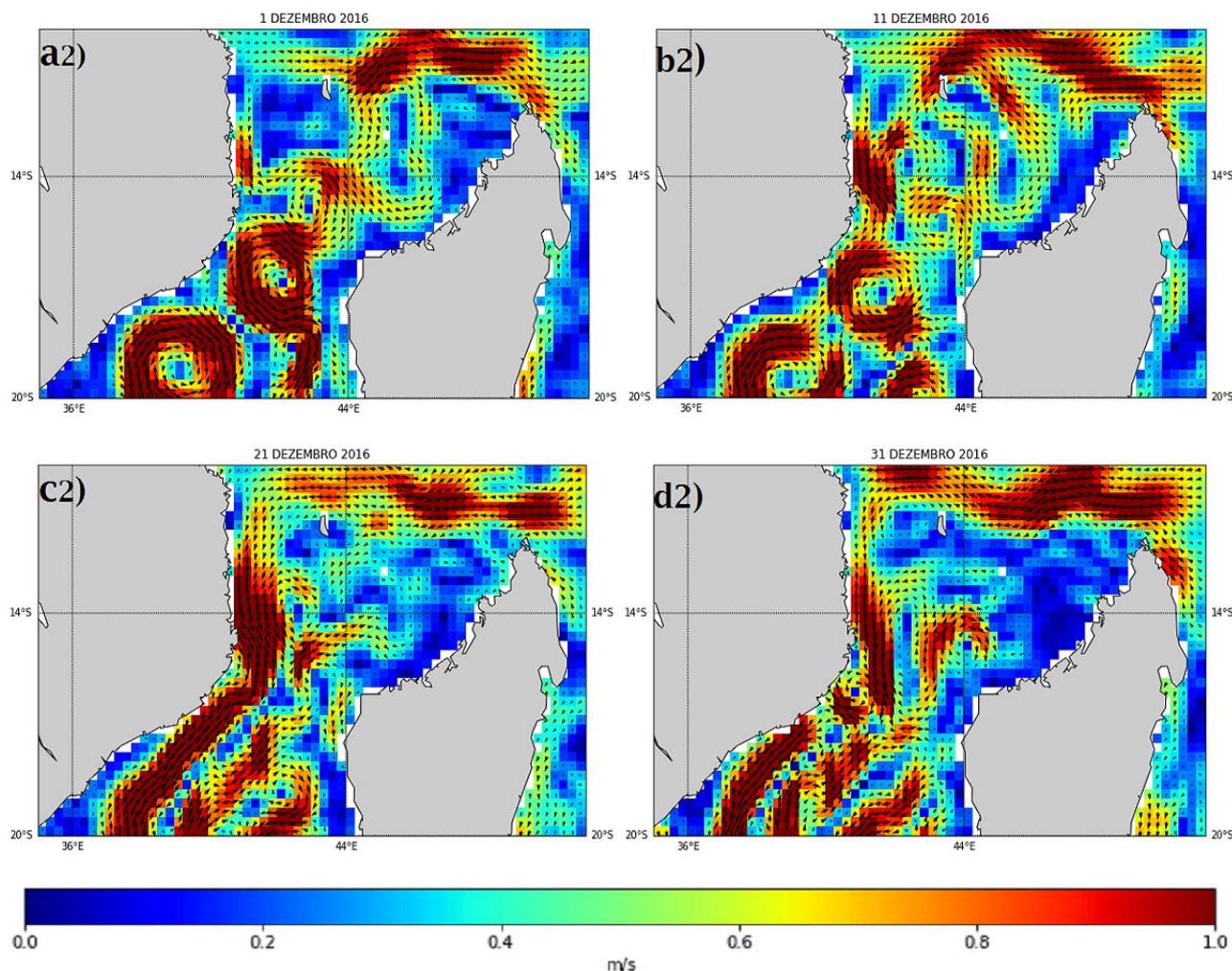


Figura 11: Sequência diária das correntes na região norte do Canal de Moçambique para mês de Dezembro de 2016. Os vectores indicam a direcção predominante do fluxo, a cor de fundo indica sua velocidade expressa em [m/s].

No dia 1 de Dezembro de 2016 conforme a Figura 11, painel a), observam-se três (3) giros com diâmetros muito grandes, os quais ocupam quase toda parte do Canal [14 a 20°S]. As correntes que formam estes giros possuem velocidades aproximadamente 1m/s junto a periferia do giro. Mais para o Norte do Canal (Figura 11, painel a), nota-se que a NEMC é persistente, se encontrando na ordem 1m/s ao longo da faixa latitudinal [10 a 12°S]. No dia 11 do mês de Dezembro de acordo com a Figura 11, painel b), observam-se mais giros, indicativo de que NEMC poderá ter contribuído para a

formação de mais giros, à medida que os anteriores se movem para o Sul do Canal, Figura 11, painel **b**).

Na Figura 11, painel **c**), correspondente ao mapa das correntes no dia 21 de Dezembro. Nela denota-se uma corrente “contínua” junto a linha da costa de Moçambique, sugestiva da prevalência de uma corrente contínua nessa fase, a qual é forte em todo seu percurso, no sentido Norte a Sul. Enquanto a SEC apresenta varias faixas das correntes, em diversas direcções. Este facto de correntes multidireccionais é também visível no centro do canal.

Ao contrário, no dia 31 de acordo com o mapa da Figura 11, painel **d**), a corrente mais para o NEMC segue ao longo do seu percurso usual em forma de uma faixa uniforme, indicativo do impacto do forçamento de larga escala nesta região, Figura 11, painel **d**). A corrente de Moçambique (MC) apresenta uma descontinuidade em direcção ao Sul, com prevalência dum menor giro ciclónico centrado ao 16°S, 42°E com velocidades aproximadamente a 1m/s. Na região Noroeste do Madagáscar [12 a 15°S] observa-se correntes muito fracas na ordem dos 0m/s para os dias 21 e 31 do mês de Dezembro, Figura 11, painéis **c - d**).

4.6. Séries temporais das correntes no período de 2002 a 2016

Na Figura 6 que ilustra a área de estudo (Secção **3.1**), apresentou-se os pontos escolhidos para estudar a variabilidade das correntes de larga escala ao longo da região norte do Canal de Moçambique. Contudo no ponto A, tem-se o local em que se procede à avaliação da variabilidade da Corrente do Nordeste da Madagáscar (NEMC). Em B e D analisam-se as variabilidades da corrente costeira ao longo do Canal de Moçambique, para finalmente em C avaliar-se a variabilidade das correntes na região nordeste da República do Madagáscar, Figura 6. Portanto, os gráficos das series temporais das correntes que se seguem, apresentam a relação das componentes da velocidade e direcção das correntes em função dos dias do ano para diferentes estações. Com intuito de entender a variabilidade espacial e sazonal da Corrente do Nordeste de Madagáscar neste período em análise. A representação gráfica da serie compreende a seguinte legenda: cor verde representa o gráfico da velocidade da corrente em m/s, enquanto a cor vermelha representa a direcção da mesma corrente em função do tempo (dias).

4.6.1. Estação A

Na Figura 12, apresentam-se as séries temporais das variações da velocidade das correntes de superfície e das respectivas direcções em função do tempo (dias), para a estação A, para os anos 2002 Figura 12, painel **a**), 2003 Figura 12, painel **b**), 2004 Figura 12, painel **c**) e 2005 Figura 12, painel **d**).

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

Em geral no ano 2002, nota-se que a Corrente do Nordeste de Madagáscar (NEMC) é bastante forte ao longo do ano, persistindo com velocidades médias de aproximadamente 1m/s para oeste do Canal, elucidativo da sua propagação em direcção à costa de Moçambique, Figura 12, painel a). Note o leitor que a contagem da direcção é de zero 0° no norte, o que implica 90° no leste, 180° Sul e 270° no oeste. Por isso a oscilação da direcção da velocidade em torno dos 270° revela que a NEMC propaga-se para o oeste (pontilhados a vermelho).

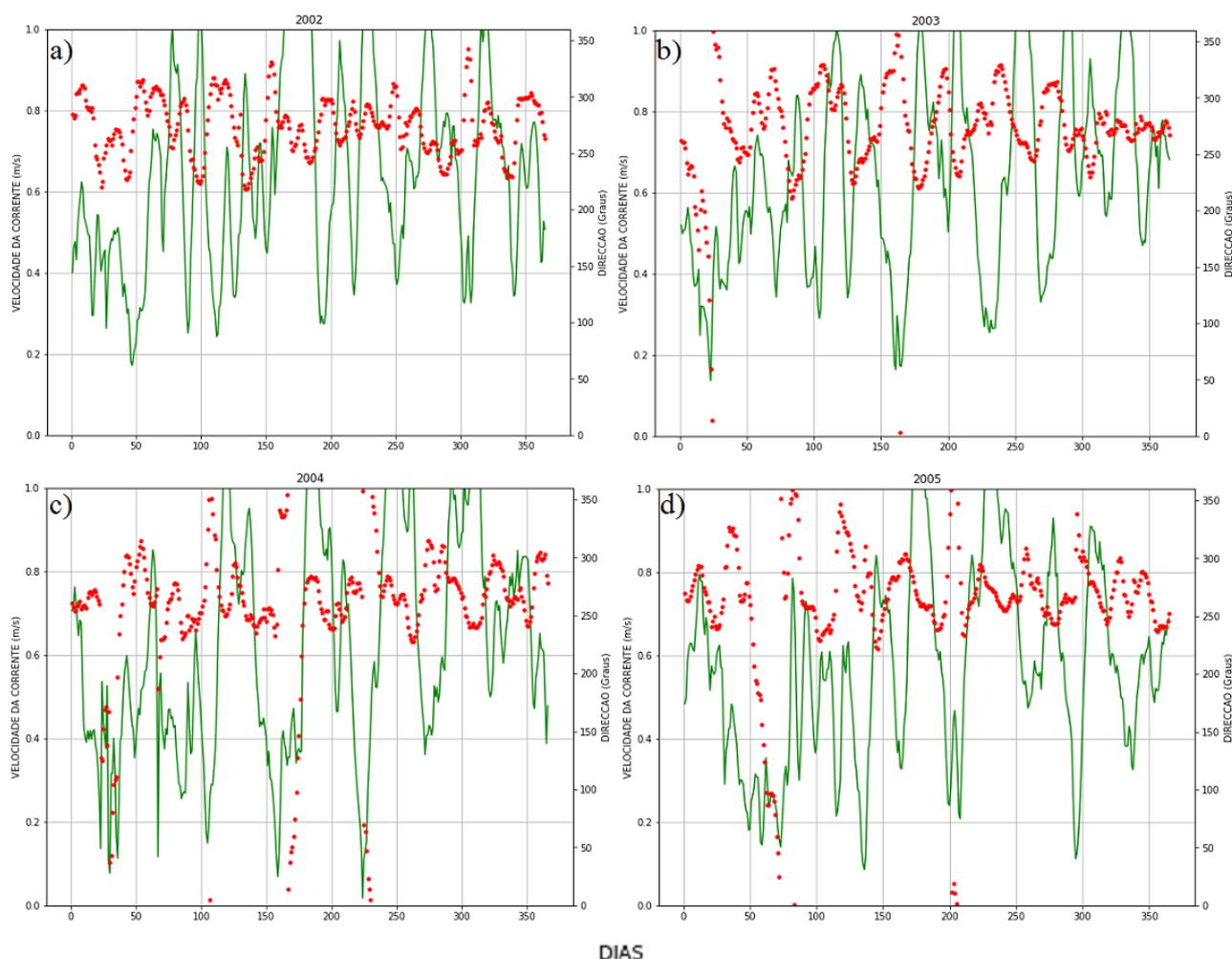


Figura 12: Series temporais das correntes na estação A do norte do Canal de Moçambique nos anos 2002 a 2005. Os pontos vermelhos indicam a direcção enquanto o verde indica a corrente.

Por sua vez a intensidade da corrente apresenta uma variação sazonal sendo baixa durante os primeiros meses do ano ($V < 0.6\text{m/s}$), e o último do ano. No meio do ano 2002 a velocidade apresenta grandes oscilações ultrapassando ocasionalmente 1m/s, mas por vezes baixando para menos de 0.4m/s, Figura 12, painel a). No ano de 2003 Figura 12, painel b), o padrão é geralmente similar mas verificam-se algumas oscilações das correntes para o norte e para o sul no início do ano.

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

Em 2004 e 2005, Figura 12, painéis c-d) também mantém-se o mesmo padrão com a excepção de que existem maiores variações no que diz respeito à direcção de propagação, mas com a intensidade da corrente a baixar apenas consideravelmente ao segundo mês, uma vez que é observado um pico de aproximadamente 0.7m/s no início do primeiro mês, em ambos os casos. As oscilações na direcção da corrente são geralmente para o norte.

4.6.2. Estação B

Ao longo da costa moçambicana tem-se a estação B que se localiza no ponto [-15.0S, 41.0E]. Na Figura 13, apresentam-se as series temporais das variações da velocidade das correntes de superfície e direcções das mesmas em função do tempo (dias), nos anos 2002 a Figura 13, painel a), 2003 a Figura 13, painel b), 2004 a Figura 13, painel c) e 2005 a Figura 13, painel d).

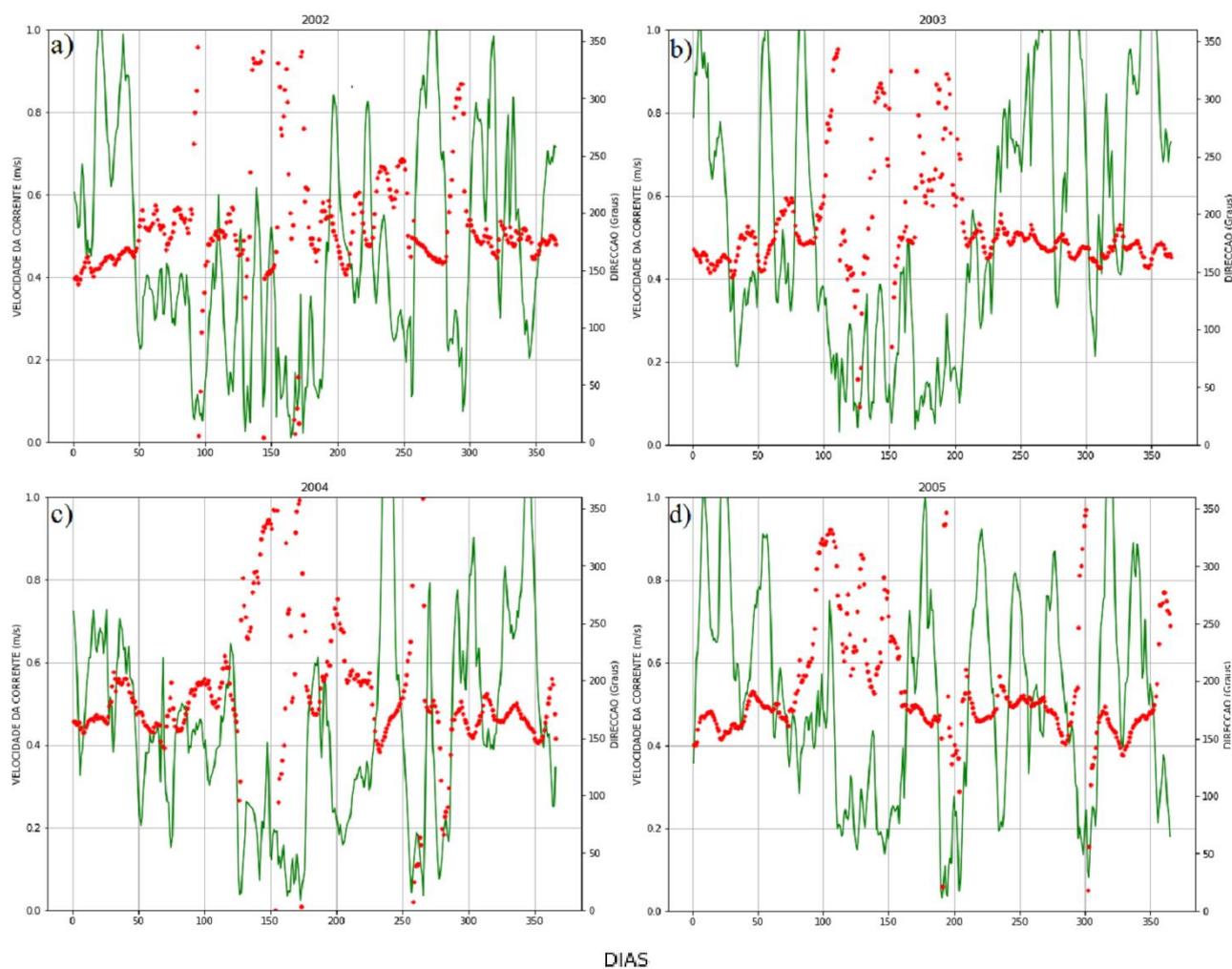


Figura 13: Series temporais das correntes na estação B do norte do Canal de Moçambique nos anos 2002 a 2005. Os pontos vermelhos indicam a direcção enquanto o verde indica a corrente.

No ano 2002 conforme Figura 13, painel **a**), nota-se que a Corrente Costeira de Moçambique (MC) é forte e apresentando sazonalidade nas velocidades ao longo do ano, apresentando velocidades que se aproximam de 1m/s nos primeiros meses do ano e últimos meses do ano, enquanto no meio deste ano 2002 apresenta oscilações que não ultrapassam 0,6m/s, mas por vezes com probabilidades de baixar para aproximadamente 0 m/s.

Nota-se também que as oscilações na direcção da velocidade desta corrente são em torno dos 180° revelando que a corrente de superfície ao longo da costa moçambicana é para o Sul. Por vezes algumas oscilações espúrias em direcção a Oeste “Noroeste” (315°) são detectadas no ponto B, elucidando instabilidades da corrente naquele ponto, ou mesmo impacto de outros processos, sobretudo no meio do ano em que a intensidade da corrente é geralmente baixa. Para o ano de 2003 Figura 13, painel **b**), o padrão é geralmente similar mas verificam-se algumas oscilações das correntes.

Em 2004 e 2005 Figura 13, painéis **c-d**), também mantém-se mais ou menos o mesmo padrão, mas com maiores variações nos picos das intensidades das velocidades. Por exemplo, em 2004 foram observados picos da intensidade da corrente mais baixa em comparação com os outros anos, no início do ano.

De uma forma geral este padrão de sazonalidade da intensidade e direcção da corrente na costa Moçambicana, prevalece ao longo dos restantes anos em análise (2006-2015), que aqui não são apresentadas.

4.6.3. Estação C

As séries temporais das variações da velocidade das correntes de superfície e as respectivas direcções em função do tempo (dias), para a estação C localizada ao noroeste de Madagáscar, são apresentadas na Figura 14. Em geral observa-se que a intensidade da velocidade das correntes é resumidamente fraca em todos anos com valores máximos de 0.6 m/s e mínimos de aproximadamente zero, apresentando variações de direcções no sentido da corrente nesta estação.

No ano 2002, a corrente persiste com velocidades médias de aproximadamente a 0,2 m/s, mas a direcção da corrente flutua consideravelmente, quer dizer não tem uma direcção específica de prevalência. Esse comportamento é verificado nos anos subsequentes, 2003, 2004 e 2005, conforme ilustrado nas painéis **b-c-d** da Figura 14). De uma forma geral denota-se que a intensidade da corrente apresenta variações sazonais, nas intensidades médias das correntes com prevalência de picos mais altos 0.6 m/s de intensidade à superfície nas estações iniciais e finais dos anos em análise, mas ligeiramente mais baixos (0.2 m/s) ao meio do ano, Figura 14, painéis **a-d**).

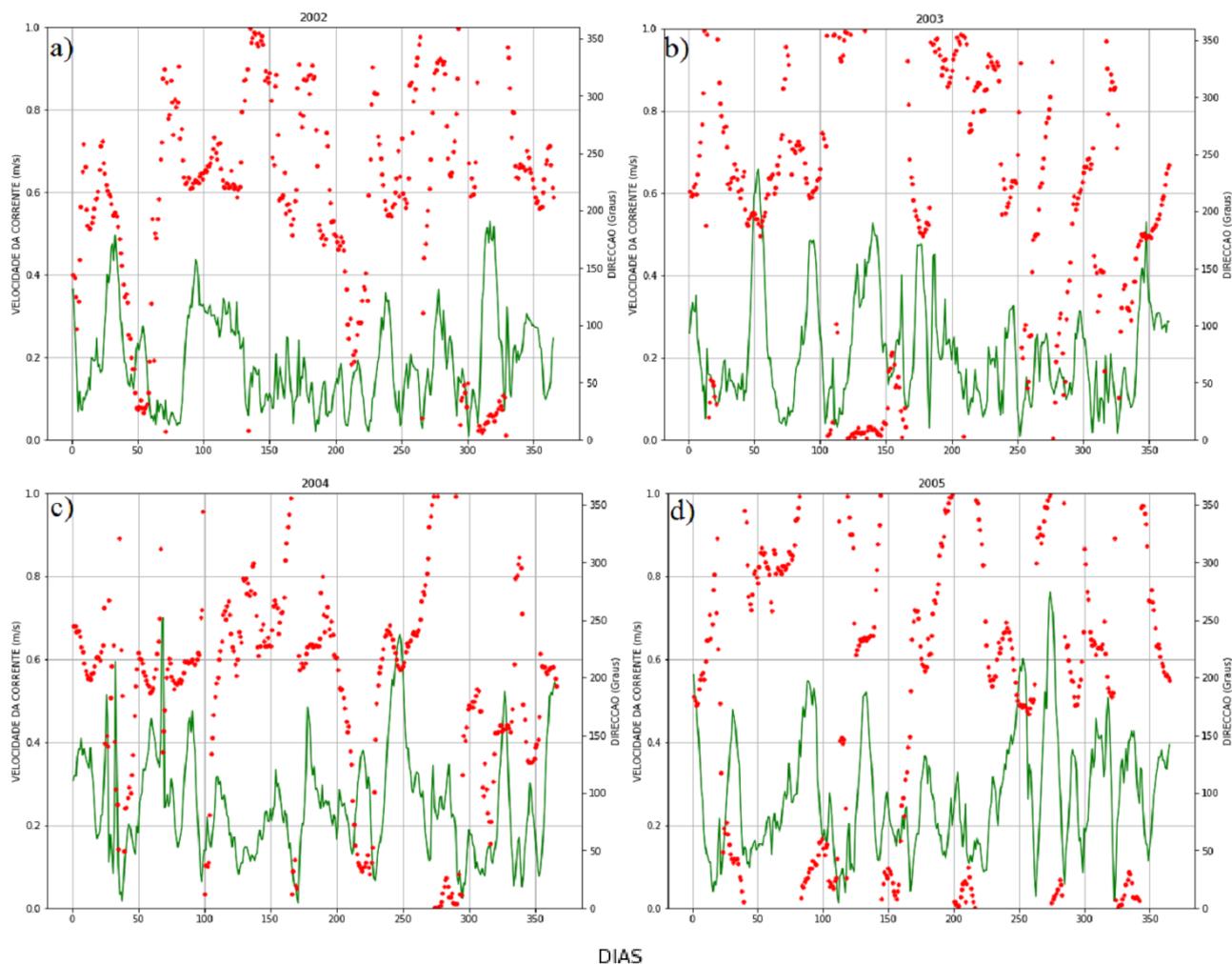


Figura 14: Series temporais das correntes na estação C do norte do Canal de Moçambique nos anos 2002 a 2005. Os pontos vermelhos indicam a direcção enquanto o verde indica a corrente.

4.6.4. Estação D

Ainda ao longo da costa moçambicana, precisamente a $[-18^{\circ}\text{N}$ e $37.5^{\circ}\text{E}]$, na qual foram determinadas as series temporais das variações da velocidade das correntes de superfície e respectivas direcções em função do tempo (dias), conforme lucidado na Figura 15.

Nota-se que a intensidade da velocidade das correntes é fraca em todos anos com valores máximos de 0.7 m/s e mínimos de aproximadamente 0 m/s, apresentando variações de direcções no sentido da corrente nesta estação. Isso parece dever-se por um lado à influência da batimetria, uma vez que o local situa-se no Banco de Sofala. Mas duma forma geral observa se uma preponderância da corrente para o Sul. Esse comportamento é verificado nos anos subsequentes, 2003, 2004 e 2005, conforme ilustrado nos painéis **b-c-d** da Figura 15). De uma forma geral também denota-se que a intensidade da corrente apresenta constantes variações que tendem a camuflar a sazonalidade observada nos casos

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

anteriores, nas intensidades médias das correntes ao longo do ano de 2002, Figura 15, painel a). Ao contrário do ano 2003, onde as variações sazonais das intensidades da corrente apresentam a prevalência de picos mais altos 0.6 m/s de intensidade à superfície no primeiro mês e no último do ano em análise, nos meados do ano 2003, a intensidade da corrente é ligeiramente mais baixa (0.2 m/s), Figura 15, painel b).

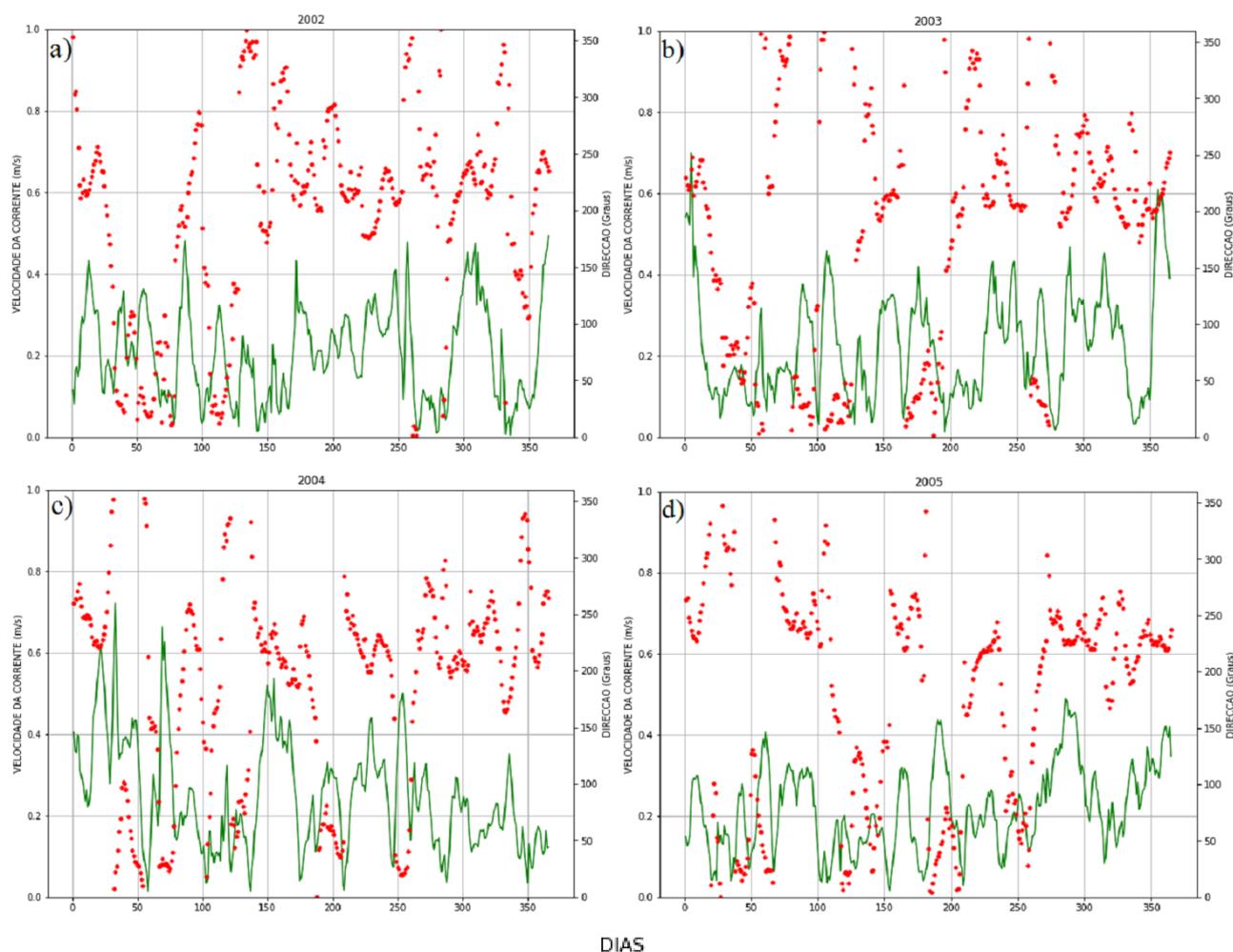


Figura 15: Series temporais das correntes na estação D do norte do Canal de Moçambique nos anos 2002 a 2005. Os pontos vermelhos indicam a direcção enquanto o verde indica a corrente.

No ano 2004, a intensidade da corrente apresentam oscilações com uma tendência decrescente ao longo do ano, Figura 15, painel c). Enquanto no ano 2005 este padrão de tendência é ao contrário, isto é, as oscilações são crescentes ao longo do ano, Figura 15, painel d). O padrão das variações da intensidade da corrente com tendência crescente em função do ano é também observado para outros anos como 2006, 2007 e 2008, Figura 15 painéis e-g) Figuras apresentadas no anexo do trabalho. Enquanto para o ano 2009 as variações são sazonais ao longo do ano são similares do ano 2002, conforme apresentado na Figura 15, painel h) do anexo.

V. DISCUSSÃO

5.1. Variabilidade das correntes à superfície no Norte do Canal de Moçambique

5.1.1. Média de longo termo das correntes à superfície para o período de 2002 a 2016

A região norte do Canal de Moçambique é dominada pelas correntes em larga escala, revelando variações temporais e espaciais na magnitude e direcção do fluxo. A média anual das correntes à superfície, a qual foi obtida a partir de dados da altimetria de satélite com uma extensão temporal de 15 anos (ver capítulo anterior), permite visualizar a NEMC, o que elucida a predominância dessa corrente na parte norte do Canal de Moçambique. Essa corrente como se sabe, orienta-se para o Oeste entre as latitudes 10 e 12° S, após ter-se desviado no norte da ilha de Madagáscar mais conhecida como Cape Ambar. Este resultado esta em concordância com (DiMarco, *et al.* 2001) que afirma que esta região sofre menor variabilidade uma vez que o fluxo não sofre colisão com a topografia.

Dentro do Canal de Moçambique a NEMC forma uma contra corrente denominada CM que flui para o Sul, depois de ter desviado precisamente ao 12° S. Halo, *et al.* (2012) sugere que esse desvio é provavelmente pela presença do limite continental ao longo da costa Africana. Junto a costa a CM é forte persistindo velocidade média de aproximadamente 0.6m/s. Esta média velocidade da corrente encontra-se dentro dos parâmetros obtidos pelo Lutjeharms, *et al.* (2006), para este autor a media varia entre 0.4 a 1.5m/s, assumindo que altas velocidades se estende desde o norte das ilhas Comores (12S) até 16S mais para sul do Canal. Por outro lado nossa análise revelou que a Corrente de Moçambique (MC) é descontínua nas fronteiras ocidentais do Canal, o que se atribui à passagem de vórtices anticiclónicos nesta região. A passagem de vórtices anticiclónicos de acordo com (Lutjeharms, *et al.* 2012) contribui para o transporte de clorofila costeira para o centro do Canal, o que influencia o sucesso reprodutivo das aves marinhas locais. De acordo com (Ridderinkhof e Ruijter 2003; Malauene, *et al.* 2018) estes vórtices são gerados na parte estreita do Canal em ~16°S, por conservação do potencial de vorticidade. Eles afirmam que o fluxo nesta zona é estrangido através da Davie Ridge, favorecendo a geração de vórtices. Por outro lado os resultados de modelação numérica sugerem que esses vórtices são gerados na ponta mais norte de Madagáscar, pelas instabilidades do fluxo da SEC (Biastrich, *et al.* 2008 e Halo, *et al.* 2014)

Os ciclones observados em nossas análises. Observações por satélites bem como simulações numéricas, (de Ruijter, *et al.* 2003; Halo, *et al.* 2012 e Banny, *et al.* 2014) sugerem que a presença dos ciclónicos no Canal de Moçambique é usual e estes tem como local de preferência o leste e oeste das ilhas ou bacias de Comores ao longo da isóbata de 3000 m [12-13S]. Dentro do Canal de Moçambique, tanto na aparte central bem como no ocidente de Madagáscar as correntes são muito

fracas, com velocidades quase nulas. DiMarco, *et al.* (2001), acrescenta que o fluxo é mais confuso nesta região em comparação com fluxo nas entradas do Canal.

Na mesma análise, fora do Canal de Moçambique precisamente no leste de Madagáscar, as correntes são fortes persistindo velocidades médias de 1m/s. DiMarco, *et al.* (2001) acrescenta que a Corrente Nordeste de Madagáscar (NEMC) intensifica – se, mas sem encender 1.5 m/s da sua ordem. Este sinal esta subforma numa banda continua a qual se estende desde o norte da ilha Madagáscar ate as ilhas dos Camores. Por outro Banny, *et al.* (2014) sugere que esta corrente NEMC e forte e alcançando velocidades aproximadamente a 1.5m/s devido ao ganhos que adquire ao juntar-se com fluxo da SEC propagando se ambos em direcção a costa africana.

Contudo, nesta análise as correntes de larga escala revelaram direcções as quais possuem uma similaridade de sentidos apontados pela batimetria da circulação para oceano indico em particular canal de Moçambique apresentadas em estudos anteriores, baseados simulação numérica (de DiMarco, *et al.* 2001 e de Ruijter, *et al.* 2003) e de observações altimétrica (Halo, *et al.* 2012 e Banny *et al.* 2014 modificando Schott e McCreary (2001).

Análises do desvio padrão baseada nas séries altimétrica de cerca de 15 anos em análise na região norte do Canal de Moçambique, permitiu demonstrar que os vórtices propagam-se do lado ocidental do canal em direcção ao sul. Este resultado é análogo ao obtido noutros estudos, (Ridderinkhof e Ruijter, 2003, Halo, *et al.* 2012 e Banny, *et al.* 2014). Essa zona é caracterizada por um valor alto do desvio padrão enquanto mais para o norte, junto às ilhas Comores obteve-se valores intermédios de desvio padrão, o que é explicado pela maior variabilidade da NEMC. Os vórtices ciclónicos propagam-se de uma forma aleatória e apresentam geralmente trajectórias mais curtas. Por isso seu impacto na variabilidade é desprezável.

Análises das médias sazonais, revelaram que no verão (estações JFM e OND) a NEMC prevaleceu larga e forte com velocidade variando entre 0,25 e 1 m/s, ocupando a faixa entre as latitudes de 10 e 20°S, o que retrata um padrão sinuoso da corrente naquela região. A zona central do canal apresenta uma circulação turbulenta, caracterizada principalmente por vórtices anticiclónicos. No Inverno, (AMJ e JAS) as variações são conspícuas em toda a NEMC, sendo que se fortalecem mais para o norte. A estrutura sinuosa desaparece e a circulação turbulenta é bastante fraca. Este padrão sazonal foi também encontrado por (Benny, *et al.* 2014), o qual conclui que no sul do Oceano Índico tropical, o amplo fluxo zonal de toda a SEC mostra variações sazonais em sua magnitude e localização.

5.1.2. Análise da serie temporal das correntes a superfície no norte do Canal de Moçambique

O comportamento das correntes nas estações A, B, C e D permitiram demonstrar que a NEMC na **Estação A** situada em [-11.0N, 45.0E], é caracterizada por variações sazonais na intensidade da corrente, persistindo com velocidades fortes nos meados do ano. Essa corrente orienta-se para oeste em direcção a costa moçambicana. Em geral as velocidades da corrente enfraquecem nos melados de cada ano, atingindo velocidades de 0.7m/s. Este comportamento é associado com as variações sazonais das SEC que alimenta a NEMC.

A intensificação desta corrente à superfície deve-se ao aumento da velocidade do vento durante o verão (primeiros e últimos meses do ano), em associação com a influência das moções do HN, onde os ventos são orientados para o continente Asiático neste período do ano. Alguns autores (Ridderinkhof., 2010 e Halo, *et al.*, 2012) usaram tanto observações da altimetria por satélite como modelos numéricos, para demonstrar que a NEMC é uma corrente muito persistente, que sofre influência directa do efeito dos forçamentos combinadas dos ventos e do fluxo vindo das passagens da Indonésia. Banny, *et al.* (2014) associou as elevadas velocidades desta estação com a presença de um núcleo principal da geração de vórtices precisamente nas ilhas de Camores onde as velocidades aproximam se de 1.5m/s.

Na análise da corrente costeira ao longo do Canal de Moçambique a partir da serie temporal das velocidades e direcção da corrente a superfície para **Estação B** localizado próximo ao limite continental africano a [-15.0S, 41.0E], indica que as velocidades são muito fortes ao longo do ano, registando sazonalidade na sua intensidade, a qual varia de 0 a 6 m/s nos meados do ano. É sabido que esta corrente costeira orienta-se ao Sul, mas algumas oscilações espúrias para Oeste foram detectados. Isto pode dever se ao facto desta corrente ser intermitente, o que reflecte o impacto dos vórtices anticiclónicos para o sul nesta região. Schouten, *et al.* (2003) confirma que a passagem de grandes vórtices anticiclónicos, com uma intensidade de aproximadamente a 1m/s a nesta região, enquanto Halo, *et al.* (2014) acrescenta que estes anticiclónicos além de terem maiores diâmetros que variam de 300-400km, possuem uma amplitude e tempo de vida muito longa comparando com vórtices ciclónicos. Observações por satélites bem como estudos de modelagem (de Ruijter, *et al.* 2003; Lutjeharms, *et al.*2012 e Halo, *et al.* 2012) sugerem que a frequência de ocorrência de vórtices anticiclónicos reduz de cerca de sete por ano no norte do Canal, para cerca de quatro por ano no sul. Uma vez que os vórtices deslocam-se para o sul, contribuem para a variabilidade da Corrente de Agulhas.

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

A análise de variabilidade das correntes à superfície na **Estação C** [-16.0N a 44.0E] localizada na região nordeste da República do Madagáscar revelou, que as correntes são bastante fracas persistindo velocidades de 0.2m/s. Essas correntes se orientam em direcções variadas, sugestivo de que a circulação naquela estação depende principalmente da passagem de vórtices de meso-escala. Um estudo lavado a cabo por Malauene, *et al.* (2018), baseado em modelação numérica e em observações por satélite, aponta que nesta faixa latitudinal dos 16S as correntes médias à superfície são mais fracas próximo a costa de Madagáscar, persistindo velocidades 0.1m/s em comparação ao mar aberto.

A corrente costeira junto a Moçambique, observada na **Estação D** [-18.0N e 37.5.0E] localizada na região do Banco de Sofala, revela que a corrente é fraca persistindo com velocidades máximas de 0.7m/se e com mínimos de aproximadamente 0 m/s. Nesta região a corrente está sob a forma de grande vórtice anticiclónico. Estudos de modelagem e observações por satélite (Ridderinkhof e de Ruijter, 2003 e Banny, 2014) sugerem que nesta região ocorre a formação de vórtices, devido a queda relacionada com a geometria da secção estreita do Canal de Moçambique durante fortes eventos correntes quando a ansa anticiclónica do norte é empurrada através da constricção.

Considerando que esta corrente é para o Sul, mas por resultado encontrado demonstra que nesta região a corrente possui direcções variadas, por um lado devido a topografia local. Doutro lado, Ridderinkhof (2010) sugere que esta corrente sofre alguns desvios e ramificações pouco significativos, mas com capacidade suficiente para estimar a morfodinâmica costeira devido ao regime dos ventos locais.

VI. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusão

Com base em análises de dados altímetros, com uma extensão de cerca de 15 anos, foi possível concluir que a região norte do Canal de Moçambique é dominada por processos de meso-escala, nomeadamente vórtices anticiclónicos gerados na região das Comores, e que se propagam ao longo da costa de Moçambique em direcção ao sul. Esses vórtices são gerados por instabilidades da Corrente do Nordeste de Madagáscar na parte norte do Canal de Moçambique. Vórtices ciclónicos são também observados frequentemente no interior do Canal.

A Corrente do Nordeste da Madagáscar propaga-se em direcção à costa africana. Ela sofre grande variabilidade, com magnitudes de velocidade que atingem 1m/s ao longo da faixa latitudinal localizada entre os [10-12°S], junto à entrada norte do Canal de Moçambique. Nessa região localiza-se a ilha de Madagáscar e as Ilhas das Comores. Mais para diante essas instabilidades resultam na formação de vórtices de anticiclónicos.

Ao longo da faixa costeira de Moçambique verifica-se a ocorrência ocasional de uma corrente contínua, a corrente de Moçambique (MC). Esta é somente vista em intervalos de tempos mais curtos, daí a sua ausência em algumas médias mensais. Por isso, o conceito de intermitência determinado por outros estudos é evidente em nossas análises de dados altimétricos.

A NEMC como uma componente da circulação de larga escala é caracterizada por grandes variações sazonais. No verão ela é larga e forte com magnitudes da velocidade variando entre 0.25 e 1m/s ocupando a faixa entre as latitudes de 10 e 20°S, o que retrata um padrão sinuoso da corrente nesta região. No inverno as variações são mais notáveis em toda NEMC, fortalecendo-se mais para norte, desaparecendo deste modo a estrutura sinuosa.

A Corrente do nordeste de Madagáscar orientada para costa moçambicana reflete a persistência de elevadas velocidades na ordem de 1m/s durante os meados de cada ano sobre o fluxo na região do mar aberto [-11.0N, 45.0E]. Com as variações sazonais do SEC esta corrente enfraquece atingindo 0.7m/s de velocidade e pequenas oscilações na direcção para o norte observam-se, deste modo indicando assinaturas da corrente costeira do Leste da Africa.

As direcções para Sul e as vezes para Oeste foram observadas na corrente costeira de Moçambique na região localizada próximo ao limite continental africano [-15.0S, 41.0E], refletindo o impacto dos anticiclónicos sobre esta corrente intermitente caracterizada por velocidades muito fortes, que por sazonalidade sua a intensidade varia de 0 a 0.6m/s nos meados do ano. A região Nordeste da

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

Madagáscar [-16.0N a 44.0E] é dominada por um fluxo de correntes bastante fracas persistindo velocidades de 0.2m/s, as direcções variadas das correntes nesta região refletem a influencia das flutuações dos vórtices que dominam a circulação.

A corrente costeira junto a Moçambique, observada na região do Banco de Sofala [-18.0N e 37.5.0E], revela que os anticiclónicos desta corrente dominam o local, persistindo velocidades fracas de aproximadamente a 0.7m/s ao longo de cada ano, esta corrente esta associada a direcções variadas que reflecte o impacto da geometria do local.

6.2. Recomendações

A partir da experiência adquirida durante a realização deste trabalho recomenda-se:

- ✓ A continuação deste estudo, de forma a descrever e compreender melhor a circulação oceânica á superfície ao norte do Canal de Moçambique;
- ✓ A realização dum estudo combinado usando dados das correntes adquiridas pelos métodos *in situ* com as observações por satélite, a fim de fornecer informações aprimoradas para apoiar o planeamento dos três grandes portos no norte do país.
- ✓ A utilização de métodos de análises espectrais, para aceder o impacto dos processos que decorre ao longo das bandas de baixas e altas frequências e identificar as causas inerentes.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aviso+. (2015). SSALTO/DUACS User Handbook. 4.4. cnes.

Bertuluci, C. d., Di Sessa, G. A., Roquete, P. H., & Chuerubim, M. L. (2015). Satélite Envisat: Environmental Satellite.

Benny, N. P., Ambe, D., Mridula, K. R., Ses, S., Omar, K. M., & Mahmud, M. R. (2014). Mean and seasonal circulation of the South Indian Ocean estimated by combining satellite altimetry and surface drifter observations. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 25, 91-106, doi: 10.3319/TAO.2013.08.05.01(Oc).

Biastoch, A., Lutjeharms, J. R., Boning, C. W., & Scheinert, M. (2008). Mesoscale perturbations control inter-ocean exchange south of Africa. *Geophys.: Res. Lett* 35, doi:10.1029/2008GL035132.

Clarizia, M., Gommenginger, C., Gleason, S., Srokosz, M., Galdi, C., & Bisceglie, M. (2009). Analysis of GNSS-R delay-Doppler maps from the UK-DMC satellite over the ocean. 36, L02608, doi:10.1029/2008GL036292.

Collins, C., Reason, C. J., & Hermes, J. C. (2012). Scatterometer and reanalysis wind products over the western tropical Indian Ocean. *journal of geophysical research* , vol. 117.

DeRuijter, W. P., Ridderinkhof, H., & Schouten, M. W. (2003). Variability of the southwest Indian Ocean. 363, doi:10.1098/rsta.2004.1478, 63–76. *Phil. Trans. R. Soc. A.*

DiMarco, S. F., Chapman, P., Nowlin, W. D., Peter, H., Donohue, K., Luther, M., . . . Toole, J. (2001). Volume transport and property distributions of the Mozambique Channel. 49, 1481–1511.

Halo, I. F. (2012). The mozambique channel eddies: characteristics and mechanisms of formation. Cape Town: University of Cape Town.

Halo, I., Penven, P., Backeberg, B., Ansorge, I., Shillington, F., & Roman, R. (2014). Eddy properties in the Mozambique Channel: A comparison between observations and two numerical ocean circulation models. 119, doi:10.1002/2014JC009820.

Labroue, S., Ollivier, A., Guibbaud, M., Boy, F., Picot, N., & Féménias, P. (2012). Quality assessment of Cryosat-2 altimetric system over ocean.

Lira, L., Wor, C., Hazin, F. H., Júnior, H. A., & Santos, J. C. (2010). Estudo de correntes marinhas por meio do lançamento de cartões de deriva no litoral do estado de Pernambuco, Brasil. Brazil: Labomar.

Lutjeharms, J. R. E. (2006). The Agulhas Current. Vol. 1. Springer-Verlag, Berlin

- Lutjeharms, J., Biastoch, A., Van der Werf, P., Ridderinkhof, H., & De Ruijter, W. (2012). On the discontinuous nature of the Mozambique Current. *S Afr J Sci.* 2012; 108 (1/2), Art. #428, 5 pages, <http://dx.doi.org/10.4102/sajs.v108il2.428>.
- Malauene, B., Moloney, C., Lett, C., Roberts, M., Marsac, F., & Penven, P. (2018). Impact of offshore eddies on shelf circulation and river plumes of the Sofala Bank, Mozambique Channel. *Journal of Marine Systems* . Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.05.001>
- Marín, V. H., & Delgado, L. E. (2007). Lagrangian observations of surface coastal flows North of 30° S in the Humboldt Current system. *27*, 731-743p. *Cont. Shelf Res.*
- Quartly, G. D., & Srokosz, M. A. (2004). Eddies in the southern Mozambique Channel. *Deep Sea Res., Part II* 51, 69–83.
- Ridderinkhof, H., Van der Werf, P. M., Ullgren, J. E., Van Aken, H., Van Leeuwen, P., & Ruijter, W. P. (2010). Seasonal and interannual variability in the Mozambique Channel from moored current observations. *VOL. 115, C06010, doi:10.1029/2009JC005619*.
- Robinson, I. S. (2004). *Measuring the Ocean from Space: The Principles and Methods of Satellite Oceanography* (669 pp.). Germany/Chichester, U.K: Springer/Praxis, Heidelberg.
- Robinson, I. S. (2010). *Discovering the ocean from space: the unique applications of satellite oceanography*. Berlin, Germany: Springer/Praxis Publishing.
- Schott, F. A., & McCreary Jr, J. P. (2001). The monsoon circulation of the Indian Ocean. *51*, 1–123.
- Schott, F. A., Xie, S.-P., & McCreary, J. P. (2009). *Indian Ocean circulation and climate variability*, 47 (*RG1002, doi:10.1029/2007RG000245*). *Rev. Geophys.*
- Schouten, M. W., Ruijter, W., Leeuwen, P. J., & Ridderinkhof, H. (2003). Eddies and variability in the Mozambique Channel. *50*, 1987–2003.
- Schouten, M., Ruijter, W., & Ridderinkhof, H. (2005). A seasonal intrusion of subtropical water in the Mozambique Channel. *32, L18601, doi:10.1029/2005GL023131*.
- Vassele, V. J. (2010). *Eddy structure and dynamics in the Mozambique channel*. Bergen: Geophysical Institute University of Bergen.

VIII. ANEXOS

3.4. Identificação de padrões de circulação no norte do Canal de Moçambique

Apos delimitado a área em estudo com as coordenadas 10°S á -20°S de latitude e longitudes 30°E á -55°E no python, posteriormente tomou-se seguintes procedimentos para alcance dos resultados:

3.4.1. Procedimento para mapeamento anual das correntes a superfície

No mapeamento anual da velocidade e direcção das correntes, usou-se **currents_region_eyers.py** para calcular a média e desvio padrão de todos os dados anuais das correntes, obtendo os resultados em forma de mapas.

3.4.2. Procedimento para mapeamento sazonal das correntes a superfície

O mapeamento sazonal da velocidade e direcção das correntes consistiu para cada 3 meses de todos anos em análise, a partir de **currents_region_sazonalmonthly.py** calculou-se a media e o desvio padrão sazonal das correntes, apresentando o resultado em forma de mapas.

3.4.3. Procedimento para mapeamento mensal das correntes a superfície

Para um período de um (1) ano, mapeou-se mensalmente a velocidade e direcção das correntes. Na base de **currents_region_monthly.py** determinou-se a media das correntes e respectivo desvio padrão, obtendo resultados em forma de mapas.

3.4.4. Procedimento para mapeamento das correntes diárias a superfície

O mapeamento das correntes diárias foi feito somente para dados de um (1) mês, onde usou – se **currents_region_day.py** para determinação da média das correntes, representando em forma de mapa.

3.4.5. Procedimentos com as series temporais das correntes a superfície

As series temporais das correntes é apresentada para (4) quatro pontos, isto é estação A, B, C e D localizadas na região norte do Canal de Moçambique (conforme ilustra a **Figura 6**) para período de 15 anos. Foi determinada a velocidade e direcção das correntes em função dos anos a partir de **curplot_point_month.py**, obtendo resultado em forma de gráficos. Tomando a seguinte legenda, cor verde pra velocidade da corrente e pontilhados vermelhos para direcção da mesma.

Os resultados em forma de mapas e gráficos processados no python, foram encaminhados no programa “*Paint*” a fim de serem reorganizadas para posteriormente serem analisadas e discutidas ao longo do presente estudo.

Análise da variabilidade das correntes no norte do Canal de Moçambique

Desvio padrão sazonal das correntes na região norte do Canal de Moçambique

Em geral a Figura 1, apresenta a distribuição de mapas do desvio padrão sazonal das correntes à superfície, determinadas em toda região norte do Canal de Moçambique para um período de 15 anos.

Este padrão de desvio da média sazonal das correntes a superfície é similar com padrão da media anual das correntes, onde maior variabilidade dos dados esta no centro do canal e menor dispersão dos dados em outras regiões do canal.

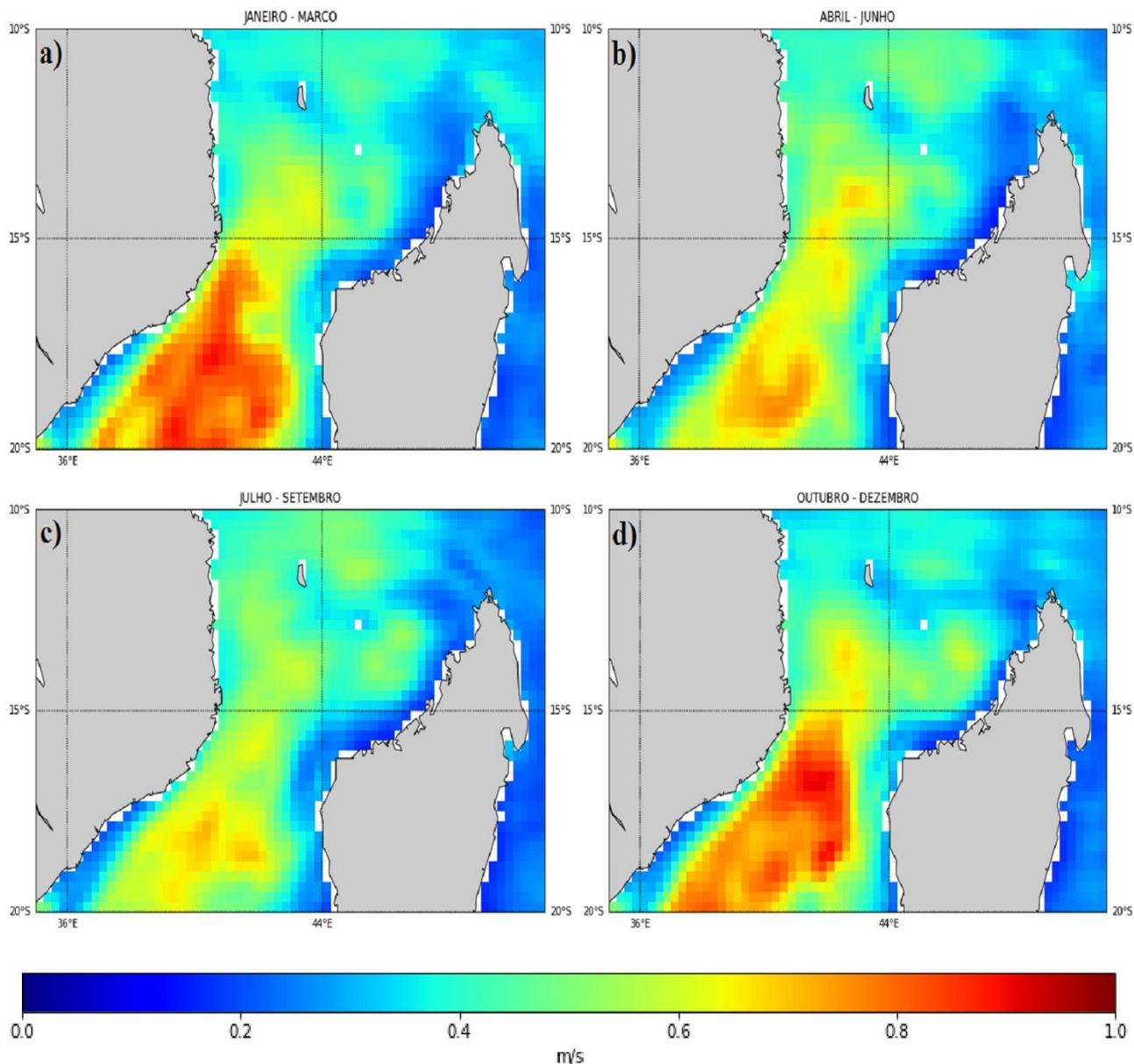


Figura 1: Desvio padrão sazonal das correntes na região norte do Canal de Moçambique. Os vectores indicam a direcção predominante do fluxo, a cor de fundo indica sua velocidade expressa em [m/s].

Desvio padrão mensal das correntes no norte do Canal de Moçambique para ano de 2016

A distribuição dos mapas de desvio padrão das correntes à superfície para o ano 2016, é apresentado na Figura 2. Determinadas para toda região norte do Canal de Moçambique que compreende os paralelos latitudinais 10-20°S.

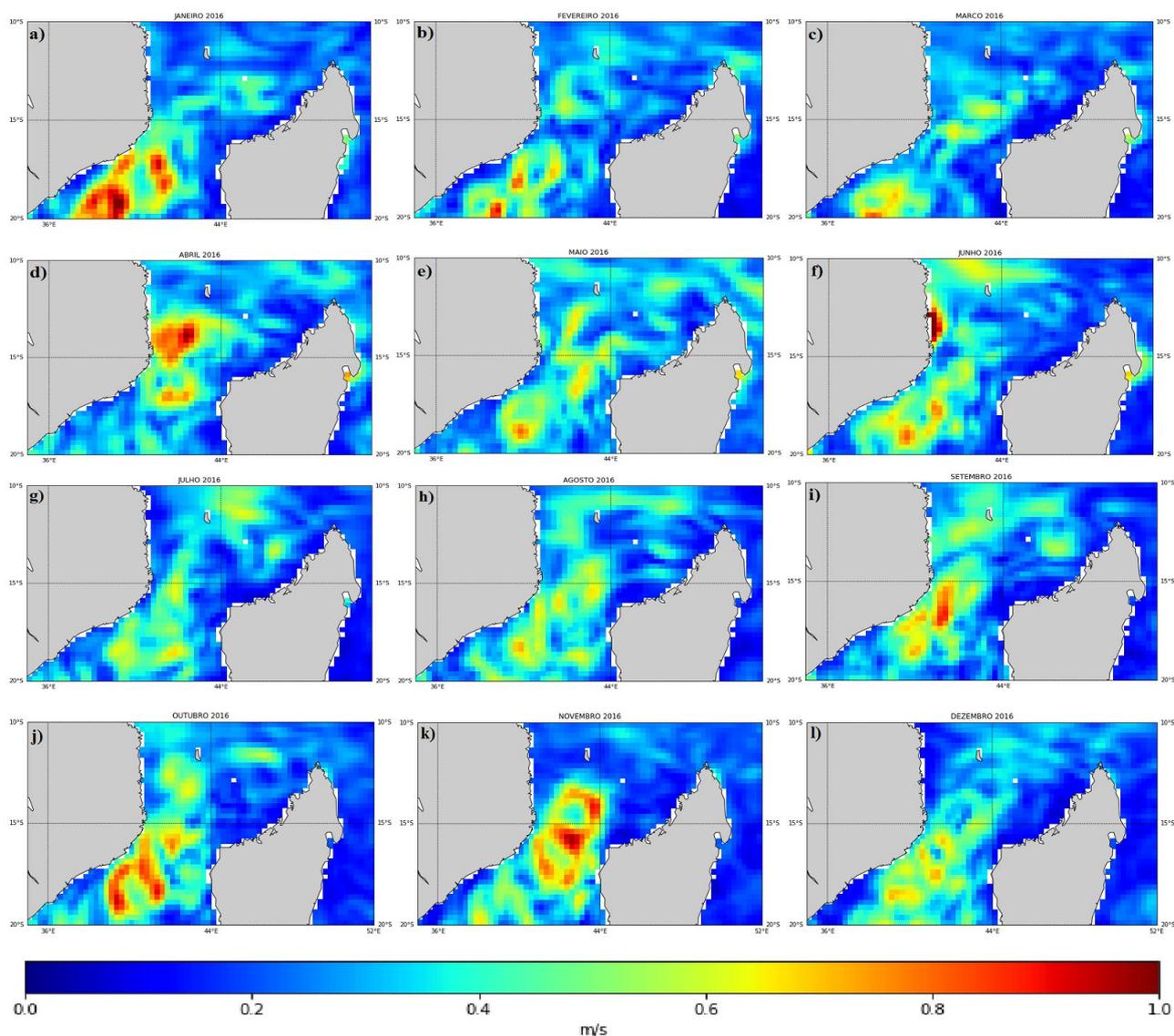


Figura 2: Desvio padrão mensal das correntes na região norte do Canal de Moçambique em 2016. Os vectores indicam a direcção predominante do fluxo, a cor de fundo indica sua velocidade expressa em [m/s].

1. Estação A

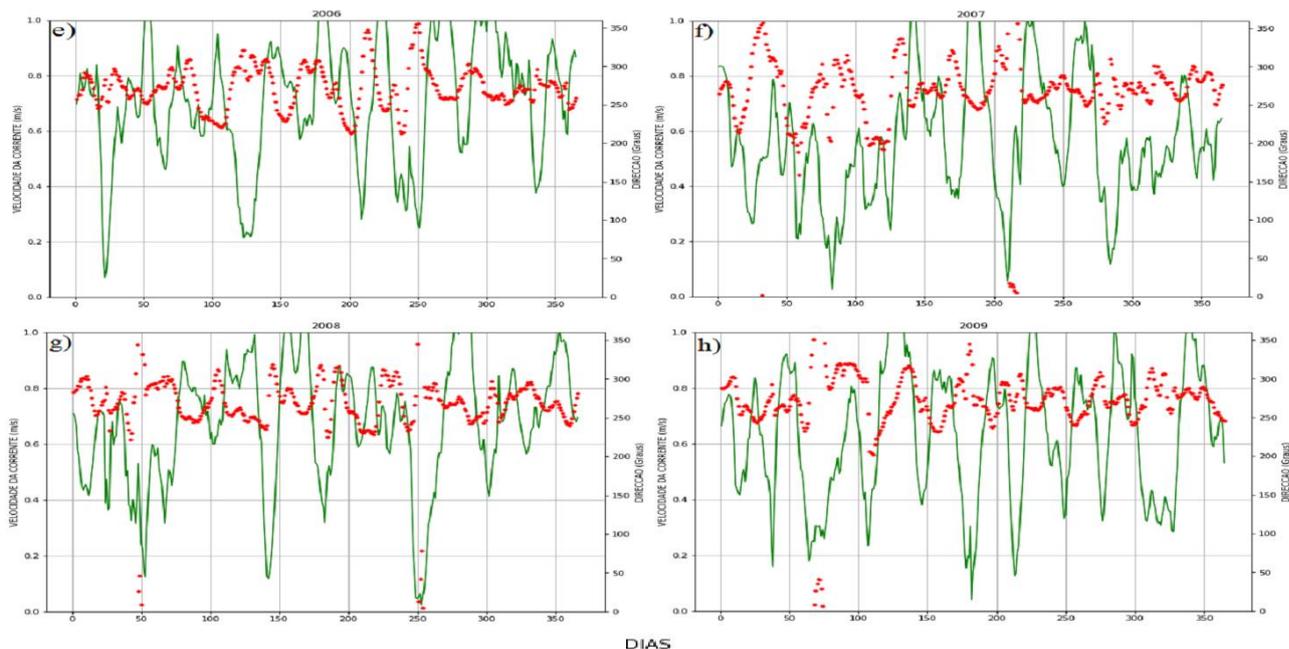


Figura 3: Series temporais das correntes na **estação A** do norte do Canal de Moçambique nos anos 2006 a 2009. Os pontos vermelhos indicam a direcção enquanto o verde indica a corrente.

2. Estação B

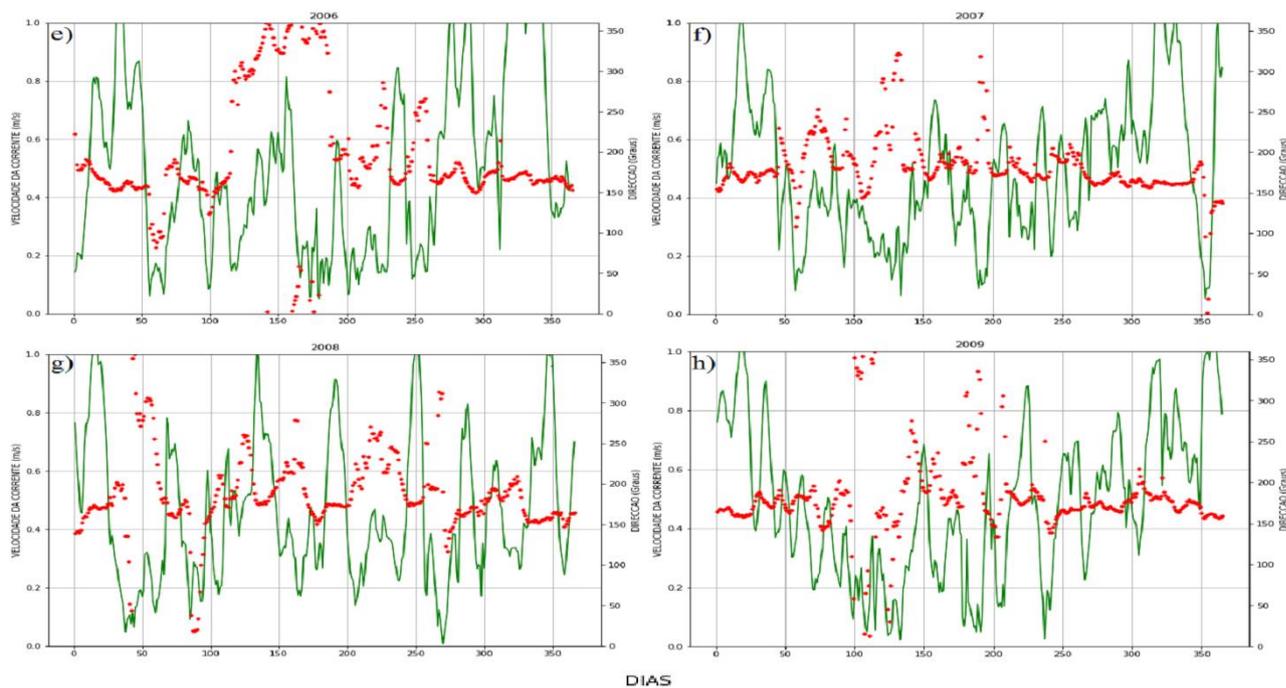


Figura 4: Series temporais das correntes na **estação B** do norte do Canal de Moçambique nos anos 2006 a 2009. Os pontos vermelhos indicam a direcção enquanto o verde indica a corrente.

3. Estação C

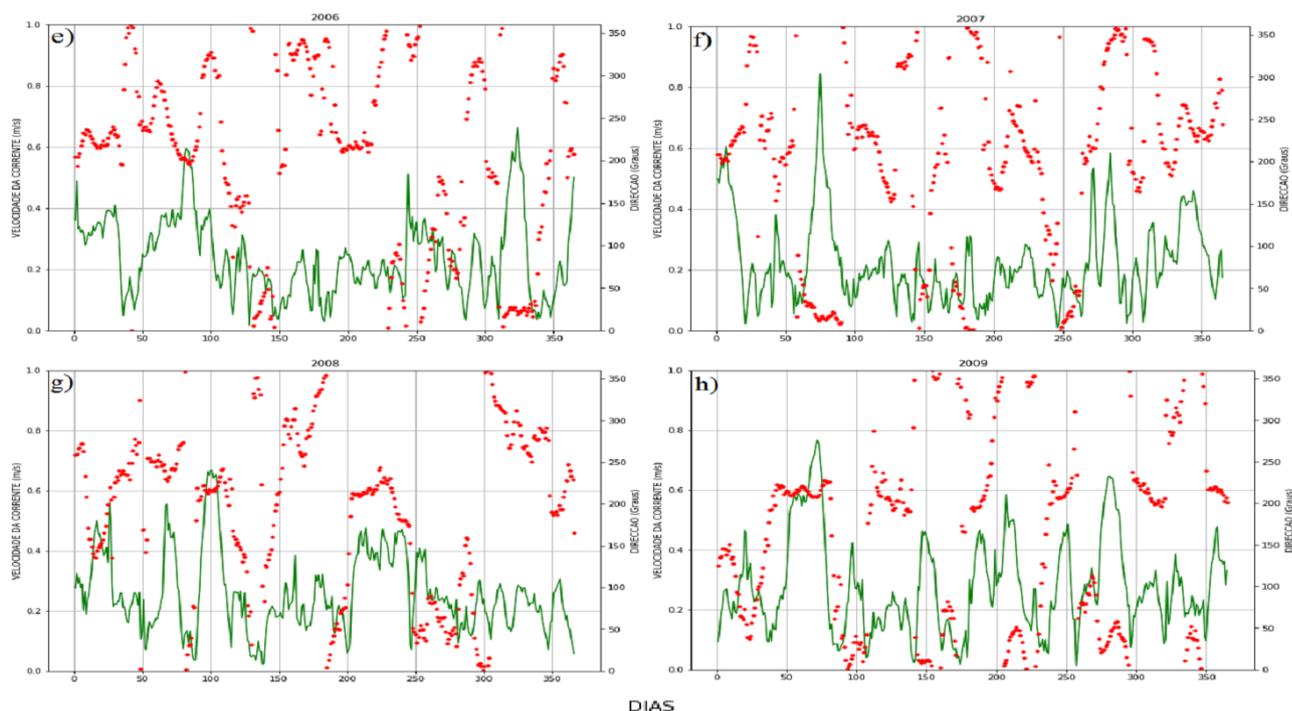


Figura 5: Series temporais das correntes na **estação C** do Norte do canal de Moçambique nos anos 2006 a 2009. Os pontos vermelhos indicam a direcção enquanto o verde indica a corrente.

4. Estação D

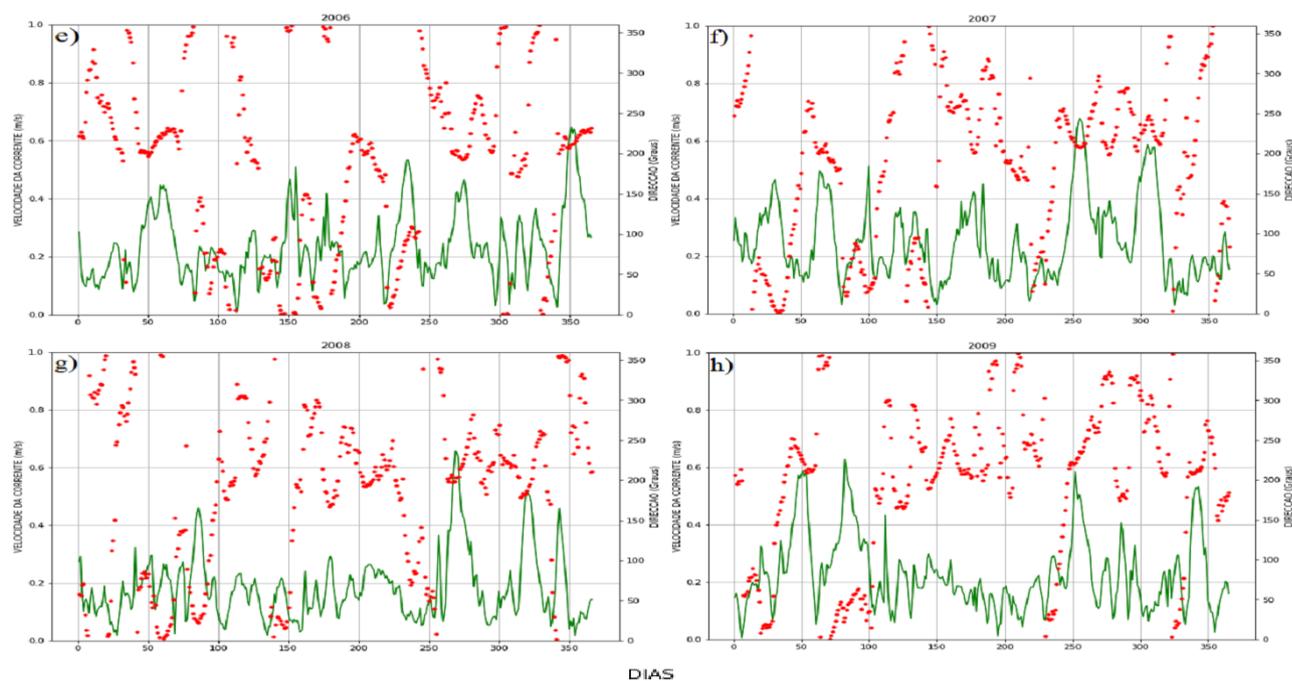


Figura 6: Series temporais das correntes na **estação D** do norte do Canal de Moçambique nos anos 2006 a 2009. Os pontos vermelhos indicam a direcção enquanto o verde indica a corrente.