



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
BACHARELADO EM OCEANOGRAFIA



LÉO COSTA AROUCHA

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DOS VÓRTICES DA CORRENTE
NORTE DO BRASIL: OBSERVAÇÕES PARA O PERÍODO DE 1993 A 2007

Recife
2018

LÉO COSTA AROUCHA

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DOS VÓRTICES DA CORRENTE
NORTE DO BRASIL: OBSERVAÇÕES PARA O PERÍODO DE 1993 A 2007**

Monografia apresentada ao Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco como pré-requisito para a conclusão do curso de Bacharelado em Oceanografia.

Orientadora: Profa. Dra. Dóris Regina Aires
Veleda

Recife
2018

Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Oceanografia, 2018.
Inclui Referência e Apêndice.

5. AMEDA. I. Veleda, Dóris Regina Aires (Orientadora). II. Título.

BCTG/2018-317

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
BACHARELADO EM OCEANOGRAFIA
Av. Arquitetura, s/n 50740-550
Cidade Universitária, Recife, PE, Brasil
Fone: 81.2126-8746



ATA ESPECIAL Nº 13/2018

Aos vinte dias do mês de junho de dois mil e dezoito, às 14h00min, no Auditório do Museu de Oceanografia da UFPE, reuniu-se a Banca Examinadora para apresentação do Trabalho de Conclusão do Curso de Oceanografia do Acadêmico **LÉO COSTA AROUCHA**, composta por Prof^ª. Dr^ª. Dóris Regina Aires Veleda, Orientadora e Presidente, Prof^ª. Dr^ª. Carmen Medeiros Limongi, Dr. Thiago Luiz do Vale Silva e Dr. Pedro Tyaquiça da Silva Santos, tendo por título: **“Variabilidade espaço-temporal dos vórtices da corrente Norte do Brasil: observações para o período de 1993 a 2007”**. Dando início à reunião, a Orientadora e Presidente passou a palavra ao acadêmico, que fez a exposição do trabalho, respondendo, posteriormente, às perguntas formuladas pela Banca Examinadora. Encerrando os debates, a Banca Examinadora reuniu-se e considerou o aluno **APROVADO** atribuindo-lhe a NOTA FINAL **10,0**. Nada mais havendo a tratar, lavrou-se a presente ata, que após lida e achada conforme foi assinada pelos membros da Banca Examinadora, pelo acadêmico e pelo Secretário do Curso de Bacharelado em Oceanografia.

Recife, 20 de junho de 2018.

Prof^ª. Dr^ª. Dóris Regina Aires Veleda (____) _____
Orientadora e Presidente da Banca Examinadora

Prof^ª. Dr^ª. Carmen Medeiros Limongi (____) _____

Dr. Thiago Luiz do Vale Silva (____) _____

Dr. Pedro Tyaquiça da Silva Santos (____) _____

Acad. Léo Costa Aroucha _____

André Conceição Cordeiro _____
Secretário do Curso de Bacharelado em Oceanografia

AGRADECIMENTOS

Escrever esses agradecimentos não é a coisa mais simples de se fazer. São 5 anos e 6 meses de curso, e tem muita gente importante que passa pelo nosso caminho, então todo cuidado é pouco pra ninguém ser esquecido nesse texto. Primeiramente, quero agradecer a todo mundo que de alguma forma me apoiou na escolha deste curso, incluindo família e amigos, mesmo frente a minha oportunidade de escolha de outros cursos mais badalados do que Oceanografia. Agradecer aos meus amigos de colégio, principalmente os que tão desde pequenos, os Falecidus, e os Bros, que sempre estiveram comigo em tempos bons ou ruins; e aos colegas de curso, em especial à turma de 2013.1, incluindo os que permanecem e os que tão sempre em amizade e em nossos corações. Agradecimento especial a todos os momentos passados no KIF e a todos que já fizeram parte desse rolê, e que participaram de uma das melhores épocas de vivência de curso e universidade. Agradecer também a todos os outros colegas de curso, incluindo os de outros estados, que sempre se ajudaram e tem uma grande relação conjunta de cooperação entre os cursos em todo Brasil. Lembro também de agradecer a todos que fazem e fizeram parte da Mar Aberto, especialmente em seu processo de fundação, e desejo sucesso e os melhores ventos para a Empresa Júnior. Cultivei grandes amizades na Oceanografia e espero que continuemos juntos nos oceanos do mundo. Sou também muito grato à todas e todos que conheci e convivi em Southampton, incluindo gringos e brasileiros, com os quais tive as melhores experiências pessoais e culturais, e que nunca serão esquecidos. *Special thanks to the National Oceanography Center – Southampton and those who are part of it, including friends, professors and employees, and specially to Dr. Laura Grange, for the personal and professional help, support and advice.*

Não posso esquecer também de agradecer a todas as pessoas envolvidas no DOCEAN durante todo o curso, incluindo todas e todos os funcionários (as), técnicos (as) e professores (as). Em especial à André Cordeiro, secretário, que sempre fez de tudo ao seu alcance para ajudar todos os alunos. Sou grato também à Heitor Duarte, Enrique Droguett, e ao Centro de Estudos e Ensaio em Risco e Modelagem Ambiental (CEERMA) e seus funcionários e funcionárias, pela oportunidade e estrutura durante um ano de pesquisa. Além disso, outro centro merece agradecimentos, pois, apesar do pouco tempo que estou presente, fui e estou sendo muito bem recebido: ao Centro de Energias Renováveis (CER – UFPE) e a todas e todos aqueles que fazem parte, muito obrigado! Gostaria de incluir nos agradecimentos a Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais – Rede Clima pelo incentivo à pesquisa e oportunidades dadas, além do Projeto PIRATA, pela oportunidade de embarque.

Estes projetos, no entanto, só puderam chegar a mim graças a oportunidade que tive no Laboratório de Oceanografia Física, Estuarina e Costeira (LOFEC), o qual sempre estarei presente, e, a este e a todas as pessoas que fazem parte eu agradeço. *Additionally, I would like to thank specially to Alexander Stegner, Briac Le Vu and Thomas Arsouze, who were very kind, sharing interest, and contributing to the development of this research.*

Não era meu desejo citar muitos nomes nesse agradecimento, no entanto, tem gente que merece ser citada. Muito obrigado à Ananda, por me conhecer, conviver comigo, ser minha amiga, parceira, companheira, e ter compartilhado, vivido e me ajudado nas experiências que já passei até hoje, e que sempre acreditou na minha capacidade e me incentivou, incentiva e incentivará pessoal e profissionalmente a alcançar meus sonhos. Muito obrigado também à Pedro Tyaquiã e Francis Lopes, meus pesquisadores, professores, amigos e conselheiros, que me ajudam pessoal e profissionalmente, compartilhando pesquisas científicas e que puderam contribuir para a realização deste trabalho. Finalmente, e especialmente, agradeço à minha orientadora, Dóris Regina Aires Veleda, que se tornou também amiga, conselheira e exemplo de como se realiza e se desenvolve pesquisa científica no Brasil com qualidade, ética e responsabilidade. Dóris, muito obrigado por todos os conselhos, dicas, ideias, oportunidades, e ajudas na realização do que mais gosto de fazer. Desculpa por qualquer transtorno, estresse ou confusão que possa ter causado, e espero poder retribuir tudo que você já fez por mim.

Ainda, quero agradecer a Davi, Mazé, Guma e Debi, as pessoas que compartilham tudo comigo diariamente, que sempre me ajudaram, que fariam tudo por mim, e que puderam de alguma forma contribuir durante o curso e o desenvolvimento deste trabalho. Por fim, as pessoas mais especiais da minha vida, que também compartilham seus dias comigo, meus pais, Coca e Doda, que sempre fizeram tudo por mim e por meu irmão, e que investiram o que podiam e não podiam em nossa educação, nos dando a oportunidade de estudar nas melhores instituições. Muito obrigado, pai e mãe, esse trabalho é também pra vocês! Obrigado pelo incentivo, pela ajuda, conselhos, por aguentar meus estresses, por me darem suporte, por serem quem são e por me tornarem quem sou. Tomo vocês como espelho e referência em tudo, e espero poder retribuir de alguma forma tudo que já fizeram por mim. É isso! Obrigado!

RESUMO

A Corrente Norte do Brasil (CNB), ao sofrer retroflexão, intensifica a vorticidade de seu escoamento e pode, ocasionalmente, liberar grandes vórtices anticiclônicos de núcleo quente, que são definidos como porções de massas de água “confinadas” por um movimento circular proveniente de corrente oceânica. Estas feições contribuem para a distribuição de massa, momento, calor, sal, e nutrientes nos oceanos. O objetivo deste trabalho é analisar a geração e ocorrência dos vórtices da CNB (VCNBs) através de 15 anos (1993-2007) de dados de campo de correntes geostróficas à 50m de profundidade e com 0.25° de resolução, aplicados ao Algoritmo de Detecção e Trajetória de Momento Angular de Vórtices (AMEDA). Assim, foram analisados, para cada vórtice, 5 parâmetros: $R_{máx}$, $V_{máx}$, Número de Rossby (Ro), Energia Cinética (EC) e anomalia de altura da superfície do mar ($aASM$). Foram observados 83 VCNBs no período analisado, indicando média de 5.53 vórtices por ano. Grande variabilidade interanual na geração dos VCNBs foi verificada. Tais estruturas apresentaram duração média de 15 semanas, $R_{máx}$ e $V_{máx}$ médios de 144.37 km e 0.2655 m/s, respectivamente, além de $aASM$ médias de 7cm. Para EC e Ro os valores médios obtidos foram 2.35 m²/s² e 0.0884, respectivamente. Observou-se também leve sazonalidade tanto na geração de vórtice, quanto na taxa das EC s e $aASM$ associadas aos mesmos, com os maiores valores sendo observados na primeira parte do ano. Acredita-se que a sazonalidade na geração seja influenciada pelas intensidades da CNB, haja vista que os meses de menor força coincidem com os de máxima geração de VCNBs, enquanto que a sazonalidade nas taxas das EC s e $aASM$ s parece ser afetada pela sazonalidade no tipo de vórtice formado. Foram também verificadas correlações entre alguns parâmetros analisados, em que a relação $R_{máx}$ x EC , ainda não retratada na literatura, pode, por exemplo, ser importante na estimativa de transferência de energia entre Hemisfério Sul e Hemisfério Norte baseando-se no $R_{máx}$ do vórtice. Notou-se também a capacidade do AMEDA na identificação dos centros e das trajetórias dos VCNB's, trajetórias estas quase permanentemente à noroeste, podendo alguns vórtices apresentar pequenas variações temporárias neste sentido. Por fim, estima-se que os VCNBs têm dificuldade para se fundir, devido à presença de um escudo dinâmico externo de vorticidade positiva, oposta às dos centros dos mesmos (negativa). Ainda assim, foram observados alguns eventos de fusão, onde tal interação pode ser a responsável por um crescimento na EC do vórtice fundido em relação aos isolados, além dos mesmos atingirem valores de $R_{máx}$ entre 30-40% maiores quando fundidos do que quando isolados.

Palavras-chave: Vórtices. Anéis oceânicos. Corrente Norte do Brasil. AMEDA.

ABSTRACT

The North Brazil Current (CNB), when retroflects, intensifies its flow vorticity, being able, occasionally, to release great warm core anticyclonic eddies, which are defined as wrapped-up pieces of water mass confined by a rotating movement from ocean currents. These features contribute to the distribution of mass, momentum, heat, salt and nutrients throughout the oceans. The aim of this work is to analyse NBC rings (VCNBs) generation and occurrence through fifteen years of geostrophic velocity field data (1993-2007) at 50m depth and 0.25° resolution, applied to Angular Momentum Eddy Detection and tracking Algorithm (AMEDA). For each eddy five parameters were analysed: $R_{\max}$, $V_{\max}$, Rossby Number (Ro), Kinetic Energy (EC) e Sea Surface Height anomaly ($aASM$). Still, four rings were selected as Case Studies for the analyses of ring tracking and merging by AMEDA. 83 NBCRs were found in the 15 years, indicating an average of 5.53 rings per year. High interannual variability on ring generation was verified. Such features presented mean lifetime of 15 weeks, mean $R_{\max}$ and $V_{\max}$ of 144.37 km and 0.2655 m/s, respectively, plus an average of 7cm of $aASM$. In the case of EC and Ro the mean values obtained were 2.35m²/s² e 0.0884, respectively. It was also observed weak seasonality in ring generation, in the rates of EC and in $Aasm$ associated to these eddies, with increasing values verified in the first half of the year. This seasonality might be influenced by CNB intensity, since the months of maximum ring generation and decreased intensity of CNB are almost the same, while the seasonality in rates of EC and $aASM$ related to the vortex seems to be affected by the seasonality in the type of ring that is formed. Correlation between some parameters were also verified, including $R_{\max}$ x EC , still not cited in literature, could, for example, be important when estimating the energy transfer between Southern and Norther Hemispheres based on ring $R_{\max}$. Future studies could point out this importance. Was also noticed the capacity of AMEDA in detection of VCNBs centers and tracking, which the trajectories were almost permanently to northwest, while some rings presented small and temporary variations in this direction. Finally, it is estimated that merging between VCNBs is difficult, since it took two weeks and rings $R_{\max}$ s needed to be decreased before merging, due to the presence of an outer dynamic shield with opposite vorticity (positive) from the inner ring core (negative). Still, few merging events were detected, and this interaction could be responsible for an increase in the EC of the merged ring in relation to those isolated, plus those rings reach $R_{\max}$ values 30-40% greater when merged than when isolated.

Keywords: Eddies. Rings. North Brazil Current. AMEDA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Balanço de forças em vórtice ciclônico (a) e anticiclônico (b) no HN.....	17
Figura 2 –	Circulação no ANTO.....	30
Figura 3 –	Área de estudo.....	34
Figura 4 –	Número de VCNB's que cruzaram 55°W em cada ano.....	40
Figura 5 –	Número acumulado de VCNB's que cruzaram 55°W em cada ano.....	41
Figura 6 –	Distribuição dos valores dos parâmetros para os vórtices encontrados.....	43
Figura 7 –	Boxplot para distribuições sazonais de aASM e EC.....	44
Figura 8 –	Trajetória de V36 nas 6 semanas no ano de 1999.....	47
Figura 9 –	Trajetória de V64 nas 6 semanas no ano de 2004.....	49
Figura 10 –	Trajetórias de V45 e V46 em 8 semanas nos anos de 2000 e 2001.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Correlações (R^2) entre os parâmetros analisados.....	45
Tabela 2 –	Valores dos parâmetros calculados para V36 e V64.....	51
Tabela 3 –	Valores dos parâmetros calculados para V45 e V46 isolados e após fusão.....	55
Tabela 4 –	Valores dos parâmetros calculados para 83 vórtices identificados.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APAN –	Águas Profundas do Atlântico Norte
ANTO –	Atlântico Norte Tropical Oeste
ASM –	Altura da Superfície do Mar
aASM –	Anomalia de Altura da Superfície do Mar
ATN –	Atlântico Tropical Norte
CCE –	Contracorrente Equatorial
CCNE -	Contracorrente Norte Equatorial
CK -	Corrente de Kuroshio
CLA –	Corrente Leste Australiana
CNB –	Corrente Norte do Brasil
CNE –	Corrente Norte Equatorial
CPBO -	Corrente Profunda de Borda Oeste
CPUE –	Captura por Unidade de Esforço
CRMA –	Célula de Recirculação Meridional do Atlântico
CT –	Ciclone Tropical
ENOS -	El Niño Oscilação Sul
ETFL –	Expoente de Tamanho-Finito de Lyapunov
HN -	Hemisfério Norte
HS –	Hemisfério Sul
ILE –	Ilha Lady Elliot
MALN –	Momento Angular Local Normalizado
PP –	Produtividade Primária
SCNB –	Subcorrente Norte do Brasil
VCNB –	Vórtice da Corrente Norte do Brasil
VNF –	Vórtice de Núcleo Frio
VNQ –	Vórtice de Núcleo Quente
OW –	Parâmetro de Okubo-Weiss
TR –	Tempo de Retenção
SCE –	Subcorrente Equatorial
SCNB –	Subcorrente Norte do Brasil
SCNE -	Subcorrente Norte Equatorial
SSM –	Salinidade da Superfície do Mar
TSM –	Temperatura da Superfície do Mar
ZCIT –	Zona de Convergência Intertropical
ZMO –	Zona de Mínimo de Oxigênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	16
3	VÓRTICES E SEUS IMPACTOS	17
3.1	Vórtices e suas características	17
3.2	Influência em processos oceânicos	20
3.3	Influência na ecologia de organismos marinhos.....	23
4	ATLÂNTICO NORTE TROPICAL OESTE (ANTO).....	30
4.1	Corrente Norte do Brasil (CNB).....	32
4.2	Área de Estudo	34
5	METODOLOGIA	36
5.1	Base de dados.....	36
5.2	Algoritmo AMEDA.....	36
5.3	Cálculos e parâmetros utilizados.....	38
5.4	Análises Estatísticas.....	40
6	RESULTADOS.....	41
6.1	Variabilidade interanual e sazonal no número de vórtices.....	41
6.2	Parâmetros analisados.....	43
6.3	Estudos de Caso.....	46
6.3.1	Análise de trajetória de vórtices em estações do ano distintas.....	47
6.3.2	Análise do evento de fusão entre vórtices.....	53
7	DISCUSSÃO.....	57
8	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS.....	61
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A - Valores dos parâmetros calculados para os 83 vórtices.....	72

1 INTRODUÇÃO

Vórtices oceânicos de mesoescala, também conhecidos como “anéis oceânicos”, *eddies* e *rings* em inglês, são definidos como porções de massas de água “confinadas” por um movimento circular proveniente de uma corrente oceânica. Os mesmos podem se propagar de meses a anos e com deslocamentos de centenas a milhares de quilômetros (OLSON, 1991). Estes, são geralmente associados às correntes de borda oeste ou às instabilidades baroclínicas de fluxos geradas principalmente por interações entre correntes e topografia de uma região (KAMENKOVICH *et al.*, 1986). Desta forma, têm sua ocorrência distribuída por todo o globo, sendo gerados principalmente nas costas lestes dos continentes, ou seja, a borda oeste dos oceanos. Eles podem ser classificados em ciclônicos e anticiclônicos. Onde os primeiros apresentam núcleo frio, associados a ressurgência no centro do vórtice com anomalias negativas de altura da superfície do mar (ASM) e elevação da termoclina (WILLIAMS; FOLLOWS, 2003; BAKUN, 2006). Vórtices ciclônicos apresentam rotação no sentido anti-horário no Hemisfério Norte (HN) e horário no Hemisférios Sul (HS). Por outro lado, os anticiclônicos apresentam rotação no sentido horário no HN e anti-horário no HS. Os vórtices anticiclônicos exibem núcleos quentes, associados a subsidência de massas de água, anomalias positivas de ASM e aprofundamento da termoclina (WILLIAMS; FOLLOWS, 2003; BAKUN, 2006).

Uma intensa corrente de borda oeste é a Corrente Norte do Brasil (CNB), a qual é considerada um padrão dominante da circulação superficial no Atlântico Norte Tropical Oeste (ANTO) (FRATANTONI; RICHARDSON, 2006). A CNB flui predominantemente para noroeste ao longo da costa norte do Brasil e próximo de 6° N – 8° N e 45° W, se separa da costa e retroflecta para a direita, alimentando a Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) (JOHNS *et al.*, 1990; JOHNS *et al.*, 1998; JOHNS *et al.*, 2003; FONSECA *et al.*, 2004). A retroflexão da CNB apresenta um ciclo sazonal associado com a migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (FONSECA *et al.*, 2004). O deslocamento meridional da ZCIT faz com que os alísios de sudeste predominem de junho a novembro, desenvolvendo ao máximo a retroflexão nestes meses, enquanto que entre dezembro e maio a retroflexão é praticamente ausente (JOHNS *et al.*, 1998; GARZOLI *et al.*, 2004; LUMPKIN; GARZOLI, 2005). A retroflexão intensifica a vorticidade do escoamento e pode, ocasionalmente, liberar grandes vórtices anticiclônicos de núcleo quente (DIDDEN; SCHOTT, 1993; JOHNS *et al.*, 2003).

Vórtices nos oceanos contribuem para distribuição de massas de água, sendo parte da circulação geral oceânica (OLSON, 1991). Na verdade, os movimentos relacionados aos

vórtices são tão importantes que, em alguns casos, podem se sobrepor aos padrões de circulação oceânica (JOSEPH, 2013). Sabe-se ainda que eles podem afetar a biota marinha (OLSON, 1991), possuindo grande influência na produtividade primária (PP). Tais estruturas podem causar a advecção horizontal de fitoplâncton, devido às velocidades rotacionais das mesmas, gerando parte da variabilidade de clorofila observada nos oceanos (CHELTON *et al.*, 2011). Além disso, o transporte de nutrientes induzidos por vórtices de ambientes costeiros para ambientes oceânicos pode reduzir a produtividade primária em sistemas de ressurgência de borda leste (GRUBER *et al.*, 2011), o que, no entanto, pode gerar locais isolados de alta PP nesses ambientes, geralmente pobres em nutrientes (CRAWFORD *et al.*, 2007). McGillicuddy *et al.* (1998) demonstrou que vórtices ciclônicos, por exemplo, são importantes na indução de fluxos verticais de nutrientes requeridos para a produção nova do fitoplâncton. Vórtices anticiclônicos, no entanto, podem induzir uma maior concentração de nutrientes em seus núcleos e periferias por diversos mecanismos, aumentando consequentemente a concentração de clorofila em tais estruturas (CRAWFORD *et al.*, 2007). Eles têm também capacidade para transportar plumas de sedimentos das margens continentais para regiões profundas, atuando algumas vezes como os principais responsáveis em trocas sedimentares entre margem e talude (WASHBURN *et al.*, 1993). Além disso, Bakun (2006) percebeu alterações na distribuição vertical e horizontal de larvas de mesozooplâncton e larvas de peixes devido à dinâmica dos vórtices. Em relação à distribuição de calor e massa, os anéis da CNB, por exemplo, são responsáveis pelo transporte de mais da metade do fluxo quente da Célula de Recirculação Meridional do Atlântico (CRMA) do HS para o HN (FRATANTONI *et al.* 2000; JOHNS *et al.*, 2003), sendo os mesmos também um dos principais mecanismos de transporte de energia e massa do Oceano Atlântico Sul pro Oceano Atlântico Norte (RICHARDSON *et al.* 1994; FRATANTONI *et al.* 1995; FRATANTONI *et al.*, 2000; JOHNS *et al.*, 2003; CRUZ-GÓMEZ; SALCEDO-CASTRO, 2013). Ainda, também contribuem para a dispersão de águas doces e ricas em nutrientes da pluma do Rio Amazonas, transportando-as para noroeste, em direção as ilhas do Caribe (JOHNS *et al.*, 1990; FRATANTONI; GLICKSON, 2002). Portanto, haja vista que vórtices oceânicos têm extrema importância no transporte e balanço global de momento, massa, calor, nutrientes, produtividade e ciclagem de elementos (OLSON, 1991; MCGILLICUDDY *et al.* 1998; BENITEZ-NELSON *et al.* 2007; VILLAS BÔAS *et al.*, 2015), seu estudo e a quantificação de seus parâmetros são cruciais para um melhor entendimento de aspectos de circulação global e processos oceânicos.

O primeiro estudo que inicialmente descreveu e identificou a presença dos vórtices da CNB (aqui denominados VCNBs) foi o realizado por Legeckis e Gordon (1982). Eles identificaram,

através de dados de satélite de TSM, a presença de anéis elípticos de núcleo quente que transladavam com velocidades variando entre 4-35km/dia (LEGECKIS; GORDON, 1982). Posteriormente, diversos trabalhos foram realizados com objetivos de analisar tais VCNBs (DIDDEN; SCHOTT, 1993; RICHARDSON *et al.* 1994; FRATANTONI *et al.* 1995; GONI; JOHNS, 2001; FRATANTONI; GLICKSON, 2002; JOHNS *et al.* 2003; FRATANTONI; RICHARDSON, 2006; JOCHUMSEN *et al.* 2010; CASTELÃO; JOHNS, 2011). Estes vórtices, tipicamente, apresentam um diâmetro médio de 400 km, máxima anomalia de ASM (aASM) de 5-30 cm (DIDDEN; SCHOTT, 1993; JOHNS *et al.* 2003; FRATANTONI; RICHARDSON, 2006), velocidades azimutais superficiais de 1 m/s e subsuperficiais de 15-20 cm/s, e podem se estender até profundidades maiores que 1000 m (JOHNS *et al.*, 1990; DIDDEN; SCHOTT, 1993; RICHARDSON *et al.*, 1994; FRATANTONI *et al.*, 1995; FRATANTONI; GLICKSON, 2002; GONI; JOHNS, 2003; FRATANTONI; RICHARDSON, 2006). Os VCNBs se movem na direção noroeste, por 3 a 4 meses, em direção ao Mar do Caribe, com velocidade de translação de 7-20 km/dia, até atingir as Antilhas, onde começam a se dissipar (DIDDEN; SCHOTT, 1993; FRATANTONI *et al.*, 1995; FRATANTONI; GLICKSON, 2002; GONI; JOHNS, 2003; FRATANTONI; RICHARDSON, 2006; CASTELÃO; JOHNS, 2011). Estima-se que o número médio de vórtices por ano seja entre 3 e 7 (GONI; JOHNS, 2001; FRATANTONI; GLICKSON, 2002; GARRAFFO *et al.*, 2003; GARZOLI *et al.*, 2003; GONI; JOHNS, 2003; JOHNS *et al.*, 2003; FRATANTONI; RICHARDSON, 2006; JOCHUMSEN *et al.*, 2010). Castelão e Johns (2011) apontaram para a presença de um “escudo dinâmico” nos VCNBs, gerado por uma vorticidade externa (positiva), inerente aos mesmos, de sentido oposto à interna (negativa), o que pode dificultar a fusão entre estes vórtices. Richardson *et al.* (2005) sugeriu que a interação entre os VCNBs com as ilhas Antilhas contribui na geração de outros vórtices anticiclônicos observados no arco de ilha a leste do Mar do Caribe. Ao atingir a região Caribenha, os vórtices causam alterações nos padrões de circulação local, além de gerarem variações nas salinidades superficiais e influenciarem na capacidade de recrutamento e crescimento de larvas planctônicas de peixes (COWEN; CASTRO, 1994; KELLY *et al.*, 2000; COWEN *et al.*, 2003).

Diversas metodologias foram utilizadas para identificação de vórtices e determinação de seus centros com eficácia. Inicialmente, foram utilizadas metodologias baseadas ou em características geométricas do campo de velocidade geostrófica ou em mapas de altimetria da superfície do mar. Um dos primeiros trabalhos que divulgou e aplicou uma destas metodologias foi o de McWilliams (1990), que utilizou a vorticidade relativa para identificação dos centros dos vórtices. Este método foi melhorado através da utilização de análise de ondeleta no campo

de vorticidade (DOGLIOLI *et al.*, 2007). Muito se usou também o parâmetro de Okubo-Weiss (OW), que quantifica a importância relativa da rotação em relação à deformação, através de dados de corrente geostrófica (ISERN-FONTANET *et al.*, 2003; CHELTON *et al.*, 2007; CHAIGNEAU *et al.*, 2008). Assumindo que um vórtice coerente seria caracterizado por linhas de correntes fechadas ou espirais, outros trabalhos utilizaram apenas as características geométricas do campo de velocidade geostrófica na identificação de vórtices (SADARJOEN; POST, 2000; NENCIOLI *et al.* 2010). Mais recentemente, outras metodologias começaram a se destacar pelo seu caráter híbrido: considerando tanto os aspectos geométricos quanto os físicos dos vórtices (HALO *et al.* 2014; YI *et al.* 2014; MKHININI *et al.*, 2014). Estas, no entanto, utilizavam o OW para detecção de possíveis centros de vórtices, com exceção de Mkhini *et al.* (2014). Este introduziu um novo parâmetro: o Momento Angular Local Normalizado (MALN), ou seja, um valor integral do momento angular em uma área restrita. Este parâmetro será detalhado posteriormente na seção de Metodologia. Atualmente, os algoritmos híbridos se tornaram ainda mais eficazes com a inserção da identificação de eventos específicos de separação ou fusão de vórtices (LI *et al.*, 2014; LE VU *et al.*, 2018). Desta forma, os melhoramentos nas metodologias utilizadas para identificação de vórtices permitem a caracterização dos principais parâmetros dinâmicos destas estruturas, entre eles: velocidade azimutal máxima, raio de máxima velocidade azimutal, número de Rossby; além da identificação dos eventos de interação entre vórtices, seja de fusão ou separação. Neste trabalho será utilizado o Algoritmo de Detecção e Trajetória de Momento Angular de Vórtices (AMEDA) (LE VU *et al.*, 2018) para a identificação dos vórtices da CNB, além de seus centros, trajetórias e parâmetros dinâmicos.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é identificar e descrever a variabilidade espaço-temporal dos VCNBs e suas propriedades físicas através da utilização do algoritmo AMEDA. Para atingir este propósito três objetivos específicos foram estipulados: 1) aplicar uma técnica de detecção e rastreamento de vórtices; 2) descrever as suas características físicas; 3) descrever eventos específicos de formação e trajetória dos vórtices da CNB. Desta forma, são utilizados alguns vórtices como estudos de caso para as análises da capacidade do Algoritmo em identificação dos momentos de interação entre os vórtices, além de suas trajetórias.

3 VÓRTICES E SEUS IMPACTOS

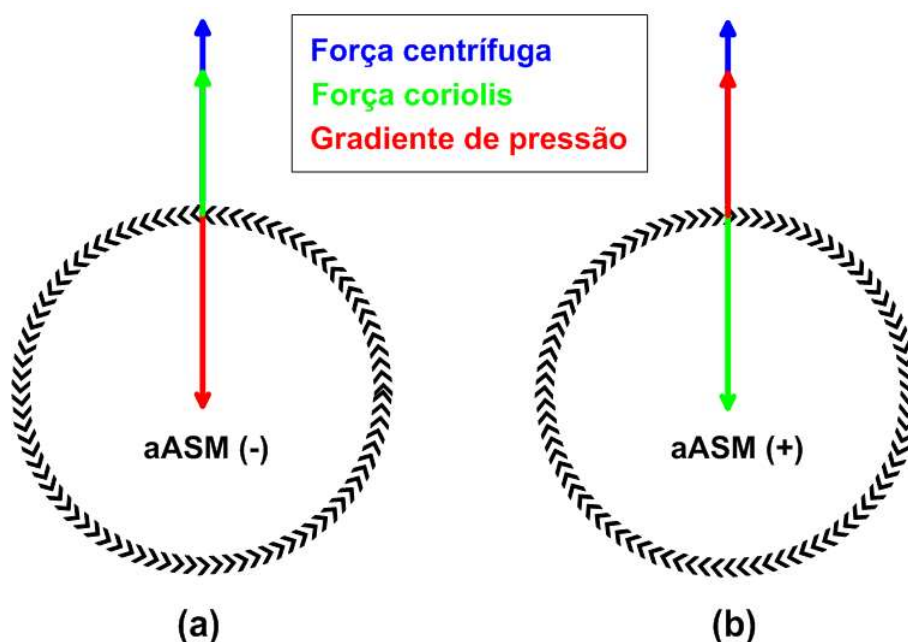
3.1 Vórtices e suas características

O termo “anel” foi primeiramente utilizado na literatura para descrever vórtices que se destacaram dos meandros da Corrente do Golfo (FUGLISTER, 1972). A existência de tais estruturas, no entanto, é evidente há cerca de 80 anos, quando grandes anomalias negativas de temperatura com padrão circular foram encontradas também na região de atuação da Corrente do Golfo (ISELIN, 1940). Associa-se a essas anomalias a existência de Vórtices de Núcleo Frio (VNF) na região. Os mesmos autores foram também os primeiros a estudar os anticiclônicos Vórtices de Núcleo Quente (VNQ) (ISELIN; FUGLISTER, 1948). Posteriormente, Olson *et al.* (1991) definiu anéis como intensos vórtices que apresentam porções de massas de água “confinadas” por um movimento circular proveniente de corrente oceânica. Joseph (2013), de forma semelhante, definiu anéis como uma categoria de vórtice com características circulares bem definidas, sendo identificados através de características termais distintas do restante da superfície do mar. O termo “vórtice” refere-se à parcela de massa d’água com movimentos rotacionais, semelhantes à um pião, e que possui também movimentos translacionais, além da rotação (JOSEPH, 2013). Em geral, define-se anéis também como vórtices de mesoescala, onde a mesoescala refere-se à dimensão espacial de centenas de quilômetros. De fato, variabilidades de mesoescala no oceano são de escala de 100 km (JOSEPH, 2013). Vórtices, por sua vez, podem apresentar dezenas de quilômetros (JOSEPH, 2013), e são mais associados às variações barotrópicas (i.e. constantes com a temperatura) do que baroclínicas (ROBINSON, 1983). Ainda, as propriedades nos vórtices variam mais rapidamente do que as propriedades de anéis, tornando a biologia nos centros dos anéis mais singular e individual do que as de vórtices (MANN; LAZIER, 2006). No entanto, haja vista que vórtices de mesoescala e anéis possuem dinâmica e movimentos semelhantes, com variações apenas nas suas intensidades, considera-se que os efeitos físicos e biogeoquímicos causados nos oceanos por essas estruturas são também similares e podem ser aplicados tanto para vórtices quanto para anéis. Neste trabalho usaremos tanto o termo “vórtice” quanto o termo “anel” ao se referir às estruturas liberadas pela retroflexão da CNB.

Como descrito anteriormente, vórtices de mesoescala podem apresentar tanto núcleos frios quanto núcleos quentes, a depender de seu senso de rotação (OLSON, 1991). VNFs são característicos de vórtices ciclônicos, enquanto que VNQs estão relacionados à vórtices anticiclônicos. Os últimos apresentam rotação no sentido anti-horário no HS e horário no HN, além de aASM positivas e subsidência de massas de água. Tal aASM é consequente

subsidência de massas estão associados aos movimentos convergentes das massas de água, na superfície, em direção ao núcleo do vórtice, devido aos desvios que o transporte de massa sofre por conta do balanço de forças no centro de um vórtice (i.e. força centrífuga, força de Coriolis, gradiente de pressão) (Figura 1) (BAKUN, 2006), desvios estes para a direita no HN e esquerda no HS (JOSEPH, 2013). O oposto (i.e. aASM negativas e ressurgência de massas de água) ocorre para vórtices ciclônicos (BAKUN, 2006). De fato, devido à presença da força de Coriolis, os centros de vórtices anticiclônicos apresentam máximo de pressão em seus centros em relação à sua periferia (VANDENBROUCK *et al.*, 2000).

Figura 1 - Balanço de forças em vórtice ciclônico (a) e anticiclônico (b) no HN.



Comprimento de setas indica magnitude relativa de forças. O mesmo é válido para o HS, com exceção do senso de rotação de cada vórtice, que neste caso, seria o inverso. Adaptado de: Bakun (2006). Fonte: adaptado de: Bakun (2006).

Vórtices são encontrados em todos os oceanos ao redor do globo (OLSON, 1991). Os mais conhecidos são os associados às mais intensas correntes de borda oeste, como a Corrente de Golfo e a Corrente de Agulhas. No entanto, outras correntes de borda oeste, como a CNB e a Corrente Leste Australiana (CLA), também produzem anéis comparáveis, em termos de intensidade, aos formados pelas correntes citadas anteriormente, apesar de os produzirem menos frequentemente (OLSON, 1991). Os vórtices nos oceanos são formados por fortes correntes oceânicas que sofrem alguma instabilidade (OLSON, 1991), e possuem como principais mecanismos de geração: interações com a topografia, com forçantes atmosféricas, além de instabilidades baroclínicas das correntes de larga escala (KAMENKOVICH *et al.*,

1986). Instabilidades hidrodinâmicas ocorrem quando as correntes excedem a capacidade de manter o equilíbrio geostrófico (i.e. gradiente de pressão balanceado pelo movimento de rotação da Terra (i.e. força de Coriolis)) (PEDLOSKY, 1979). Instabilidades baroclínicas ocorrem quando a pressão varia sobre as linhas isopícnais (de mesma densidade), e a densidade varia sobre linhas isóbaras (de mesma pressão), ou seja, quando há gradientes horizontais de densidade (ORLANSKI; COX, 1973). Acredita-se que as maiores forçantes para a formação de vórtices de mesoescala nos oceanos sejam, de fato, as instabilidades baroclínicas (GILL *et al.*, 1974), que são também de grande importância para a conversão de energia potencial inerente aos oceanos em energia cinética de vórtices (ORLANSKI; COX, 1973; GILL *et al.*, 1974). No caso das correntes de borda oeste, a formação de vórtices é precedida por crescimento de ASM ou pela presença de meandros, que com a intensificação do fluxo, tendem a fechar porções de fluido, que são desacoplados da corrente gerando tais estruturas, com a corrente posteriormente retomando ao fluxo linear (OLSON, 1991). Olson *et al.* (1991) também indicou outro tipo de processo de formação associado a correntes de borda oeste, que ocorre quando a corrente deixa a costa do continente e migra em direção ao oceano. Interações com a costa e a topografia de uma região são também muito importantes na geração de vórtices, como os vórtices do Golfo do Maine, gerados por interações com a topografia local (GANGOPADHYAY; ROBINSON, 2002). Ainda, o formato da linha de costa associado ao fluxo de correntes pode também gerar outro processo de formação de tais feições. Zharkov e Nof (2010) demonstraram que os VCNBs, por exemplo, são gerados principalmente pela pequena inclinação da linha de costa no nordeste do continente sul-americano. Ma (1996), por sua vez, mostrou que os anéis da CNB podem ser gerados como consequência da reflexão de pacotes de ondas equatoriais de Rossby que se propagam para o oeste. Ele propôs o seguinte mecanismo de geração: uma longa onda de Rossby chega ao lado oeste da bacia oceânica e é refletida, criando uma onda de Rossby curta, com suas altas anomalias de vorticidade relativa. Devido ao efeito Beta (β), o qual é a variação do parâmetro de Coriolis com a latitude, e a interação com a costa, essas anomalias de vorticidade potencial se separam da região de reflexão e propagam-se para noroeste ao longo da costa. Observa-se, no entanto, que apesar das diversas formas de geração dos vórtices, a estrutura básica dos mesmos é similar, mesmo quando formados diferentemente (OLSON, 1991).

A ocorrência de vórtices é dada em todos os oceanos, como dito anteriormente, e seus locais de máxima concentração coincidem com os locais de maiores frequências de geração e com as regiões por onde os mesmos transladam (OLSON, 1991; JOSEPH, 2013). O processo de formação de vórtices leva, geralmente, algumas semanas, podendo também durar poucos meses

(FUGLISTER; WORTHINGTON, 1951), no entanto, outros trabalhos demonstraram processos de formação que duraram cerca de 6 meses (KAWAI, 1972). O tempo de vida de cada vórtice depende dos locais onde eles ocorrem e, conseqüentemente, das interações que sofrem com a topografia de onde transladam, além de depender também da taxa de perda de energia que os mesmos sofrem (OLSON, 1991). De fato, estima-se que os anéis oceânicos com maior tempo de vida são aqueles formados da Corrente de Agulhas, que se movem por todo o Oceano Atlântico até encontrar uma barreira física continental (GORDON; HAXBY, 1990). A frequência de ocorrência de vórtices de mesoescala no oceano parece ainda ser influenciada pelas mudanças climáticas atuais (MATEAR *et al.*, 2013). Acredita-se que mudanças climáticas possam aumentar a atividade dos vórtices nos oceanos, devido à intensificação das correntes de borda oeste previstas para acontecer com tais mudanças climáticas (MATEAR *et al.*, 2013). Esse aumento poderia contrabalançar, através de processos de mistura associados aos vórtices, a maior estratificação que os oceanos sofreriam com as alterações do clima (MATEAR *et al.*, 2013).

3.2 Influência nos processos oceânicos

Olson *et al.* (1990) destacou a influência dos vórtices na circulação em larga escala dos oceanos, envolvendo tanto a transferência de energia e propriedades associadas com a formação do mesmo, quanto seu impacto em processos turbulentos e de mistura. Desta forma, as propriedades associadas às massas d'água que são transportadas por essas estruturas podem migrar para locais onde águas com outras características são predominantes. Tal migração de massa d'água envolta por corrente circular pode permitir a ocorrência de diversos processos biológicos, sedimentares e físico-químicos nessas estruturas, entre eles: concentração de nutrientes e clorofila; geração de áreas anóxicas (i.e. com concentração de oxigênio insuficiente para a comunidade biológica); anomalias de Salinidade da Superfície do Mar (SSM), Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e ASM; transporte de camada de barreira; anomalias de fluxo de calor; e transporte de massas d'água e sedimentos (WASHBURN *et al.*, 1993; BENITEZ-NELSON *et al.*, 2007; DONG *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2014; VILLAS BÔAS *et al.*, 2015; HE *et al.*, 2016; SCHÜTTE *et al.* 2016; RUDZIN *et al.*, 2017).

O transporte de massa e de calor nos oceanos é importante na regulação do clima do planeta, e esse papel é tradicionalmente atribuído à circulação oceânica de larga escala (ZHANG *et al.*, 2014). No entanto, vórtices oceânicos de mesoescala tem também contribuição fundamental nesse processo (CHELTON, *et al.*, 2011; DONG *et al.*, 2014). O transporte por parte de tais estruturas deve-se principalmente ao movimento giratório individual de cada um dos vórtices

(DONG *et al.*, 2014). Ou seja, ao pararem com os movimentos em torno de seus próprios eixos, ou ao diminuïrem a intensidade desse movimento, os mesmos podem iniciar processo de dissipação, liberando a parcela de água antes armazenada em seus interiores. Zhang *et al.* (2014) comparou em magnitude os transportes de massa realizados por vórtices e os realizados pelas circulações termohalinas e superficiais de larga escala, indicando que os transportes gerados por esses vórtices impactam especialmente os transportes das correntes de borda oeste. O transporte zonal de massa por vórtice pode atingir valores integrados verticalmente de até 40 Sv ($1\text{ Sv} = 10^6\text{ m}^3/\text{s}$) (ZHANG *et al.*, 2014). Utilizando dados de aASM, Dong *et al.* (2014) identificou tais estruturas com vorticidade, e indicou que o aprisionamento advectivo de parcelas de água no interior das mesmas gera uma tendência de transporte de anomalias de TSM e SSM.

O transporte de calor nos oceanos realizado pelos vórtices de mesoescala, por sua vez, podem gerar anomalias de TSM, o que gera perturbações na troca de calor entre oceano e atmosfera (SOUZA *et al.*, 2014). Villas Bôas *et al.* (2015) indicou que tais anomalias de calor nos centros dos anéis são proporcionais às suas amplitudes, e que anomalias mais fortes ocorrem em seus centros, enfraquecendo em direção às bordas de tais feições. Vórtices ciclônicos e anticiclônicos são associados com anomalias de fluxo de calor negativas e positivas, respectivamente, com os primeiros absorvendo calor atmosférico e os últimos liberando calor para a atmosfera (VILLAS BÔAS *et al.*, 2015). Desta forma, infere-se que os mesmos podem também gerar impactos nos fluxos de calor e consequentemente na circulação atmosférica próxima à superfície (FRESNER *et al.*, 2013). Acredita-se que o primeiro furacão já registrado no Oceano Atlântico Sul, o furacão Catarina, tenha interagido com 4 VNQs, gerando uma repentina intensificação do mesmo (VIANNA *et al.*, 2010). Além da transferência de calor entre oceano e atmosfera, outra razão pode contribuir para a relação entre intensificação de furacões e vórtices de mesoescala. Tais estruturas oceânicas já foram identificadas com a presença de uma “camada de barreira” em seu centro (RUDZIN *et al.*, 2017). A camada de barreira é um fenômeno que se desenvolve quando uma haloclina se desenvolve em profundidades menores que a termoclina, criando uma barreira entre o interior do oceano e interface oceano-atmosfera, o que pode contribuir para o aprisionamento de calor na camada superficial oceânica (SPRINTALL; TOMCZAK, 1992). De fato, Rudzin *et al.* (2017) atribuiu a presença da camada de barreira à um VCNB. Haja vista da capacidade dos vórtices em transportar anomalias de salinidade (DONG *et al.*, 2014), imagina-se que tais anomalias aconteceram devido à região de geração dos VCNBs ser próxima a desembocadura de dois grandes rios: Amazonas e Orinoco. Foi observada a participação de ambos os rios em episódios

de intensificação de Ciclones Tropicais (CTs) devido à presença da camada de barreira na região (FFIELD, 2006). Portanto, haja vista que anéis possuem uma capacidade de transportar anomalias de calor e que efeitos como a camada de barreira podem estar presentes em seus centros, infere-se que possa ocorrer episódios de intensificação dos CTs formados no Atlântico Norte por sua passagem sobre os VCNBs.

Além da influência em processos de transporte e armazenamento de calor e salinidade, vórtices oceânicos também podem afetar aspectos dos processos biogeoquímicos nos oceanos (WASHBURN *et al.*, 1993; ROGACHEV *et al.*, 1996). Washburn *et al.* (1993) observou que um vórtice anticiclônico foi capaz de transportar plumas de sedimentos contendo carbono orgânico da margem continental para a região abissal, o que pode ter resultado em fluxos de carbono às regiões profundas no Oceano Pacífico. Estima-se que tal vórtice, que possuía diâmetro de 90km e permaneceu 2 meses na região entre plataforma e talude, foi capaz de transportar 10^5 toneladas de sedimento (WASHBURN *et al.*, 1993). Da mesma forma que sedimentos, nutrientes podem ser transportados por vórtices atingindo águas com deficiência em nutrientes (e.g. os centros dos grandes giros oceânicos), o que pode gerar alta PP não usual (i.e. “florações”) (CRAWFORD *et al.*, 2007). De fato, a PP, a biomassa da comunidade, e o tamanho de diatomáceas foram aumentados no centro de um anel, gerando grande bombeamento de sílica (i.e. aumento da concentração) nesta região (BENITEZ-NELSON *et al.*, 2007). Ainda, vórtices nos oceanos podem afetar concentrações de gases e nutrientes, provocando possíveis alterações nos fluxos de gás carbônico (CO_2), além de influenciarem a sazonalidade do fluxo de CO_2 (ROGACHEV *et al.*, 1996). No inverno, quando o fluxo é positivo do oceano para a atmosfera, o centro do vórtice apresenta o máximo fluxo positivo para a atmosfera, enquanto que no verão o centro do vórtice apresenta o máximo fluxo positivo para o oceano, quando o fluxo positivo é dessa vez da atmosfera para o oceano nas outras regiões (ROGACHEV *et al.*, 1996).

A estrutura hidrográfica dos vórtices, com movimentos rotatórios de uma corrente em seu entorno, aponta para que a massa de água dentro deste vórtice esteja isolada do oceano aberto (KARSTENSEN *et al.*, 2015). Além disso, estima-se que no Atlântico o consumo de oxigênio dentro destas estruturas chega a ser uma ordem de grandeza maior do que o consumo de oxigênio para o oceano aberto (FIEDLER *et al.*, 2016). Estas configurações sugerem que regiões de ocorrência vórtices possam apresentar Zonas de Mínimo Oxigênio (ZMO) (SCHÜTTE *et al.* 2016). Diversos estudos apontam para centros de vórtices como regiões de baixíssimas concentrações de oxigênio (KARSTENSEN *et al.*, 2015; WAITE *et al.*, 2015; FIEDLER *et al.*, 2016; SCHÜTTE *et al.* 2016; LEVIN, 2018). Níveis de mínima concentração

de oxigênio no Oceano Atlântico, por exemplo, estão acima de $40\mu\text{mol kg}^{-1}$ (LEVIN, 2018), no entanto, ZMOs associadas à vórtices anticiclônicos foram encontradas na região, apresentando concentrações menores que $2\mu\text{mol kg}^{-1}$ (KARSTENSEN *et al.*, 2015). Conclui-se, portanto, que a dinâmica dos vórtices de mesoescala tem capacidade de alterar diversos parâmetros físicos e biogeoquímicos de um ambiente. Desta forma, infere-se que possivelmente as comunidades biológicas, que seguem as alterações biogeoquímicas do ambiente e que estão presentes em regiões de ocorrência de tais estruturas, estejam sendo influenciadas pela dinâmica das mesmas.

3.3 Influência na ecologia de organismos marinhos

Diversos tipos de organismos podem ser influenciados pela ação de vórtices oceânicos. Há muito tempo é sabido a efetividade dos mesmos em transferência de energia e matéria pelos oceanos (OLSON, 1991). Tal transferência envolve também transporte de comunidades biológicas presentes inicialmente nas massas d'água que originaram o vórtice, além de ferro e nutrientes (WIEBE *et al.*, 1976; CRAWFORD *et al.*, 2007). Desta forma, a partir do início dos anos 80 alguns trabalhos apresentaram interações físico-biológicas causadas por essas estruturas (GOWER *et al.*, 1980; ANGEL; FASHAM, 1983). Estudos de tal influência e dos mecanismos pelos quais a dinâmica associada a essas estruturas afeta concentrações superficiais de clorofila e nutrientes continuam até hoje (CRAWFORD *et al.*, 2007; HE *et al.*, 2016; HUANG *et al.* 2017). De fato, Crawford *et al.* (2007) indicou grande concentração de nutrientes nas bordas dos vórtices, e que vórtices de ocorrência em regiões costeiras tem importante papel em transferir tais nutrientes e clorofila provenientes da costa para regiões pelágicas. Além disso, o mesmo trabalho indicou que, ao se dissipar, tais vórtices elevam novamente a termoclina, fornecendo, neste processo de enfraquecimento, nutrientes para as regiões superficiais (CRAWFORD *et al.*, 2007). Essa influência, porém, não se limita a organismos do plâncton. Aves, peixes, répteis e mamíferos também apresentaram concentrações e comportamentos diferenciados quando diante de tais estruturas de massas d'água (WEIMERSKIRCH *et al.*, 2004; LUSCHI *et al.*, 2006; BAILLEUL *et al.*, 2010; JAINE *et al.*, 2014). Considera-se a importância de vórtices até mesmo para aspectos evolutivos de algumas espécies (ROCHA *et al.*, 2005). De fato, a presença dos mesmos no ambiente marinho pode ter profunda influência nas taxas de recrutamento, flutuação de populações aquáticas, e em processos de especiação (OLSON, 1991). Aqui são apresentados alguns trabalhos que destacaram os processos relacionados aos vórtices oceânicos que afetaram de alguma forma a ecologia da macrofauna marinha.

Weimerskirch *et al.* (2004) analisou as estratégias de forrageamento das aves fragatas (*Fregata minor*) em fase de reprodução na Ilha Europa, localizada na parte central do Canal de Moçambique. Foi encontrado que o forrageamento de aves ocorreu majoritariamente em regiões offshore (92% das localizações). Devido à escassez de recursos do Canal, as aves realizaram longas viagens à procura de presas dispersas, encontrando alimento em locais de alta produtividade. Desta forma, os animais nem sempre retornavam ao mesmo local, e sua localização era guiada pela disponibilidade de alimento. A maior concentração de aves fragatas foi encontrada nas bordas dos vórtices de mesoescala. Estas regiões entre vórtices possuem características semelhantes às frentes oceânicas, locais com considerável variação de características dinâmicas e físico-químicas, indicando, portanto, locais de alta concentração de nutrientes aprisionados (WEIMERSKIRCH *et al.*, 2004). Esses nutrientes permitem que as bordas sejam locais de alta produtividade. No entanto, fragatas evitaram as zonas centrais de anéis com anomalias de ASM, especialmente os ciclônicos (ASM negativa), e preferiram áreas das bordas tanto de vórtices anticiclônicos quanto ciclônicos, na zona de maior probabilidade de máxima corrente geostrófica (WEIMERSKIRCH *et al.*, 2004). De fato, outros estudos também apontaram para a maior produtividade e preferência de forrageamento de aves nas periferias dos centros quentes de vórtices anticiclônicos em relação aos centros frios de vórtices ciclônicos (MCGILLICUDDY *et al.*, 1998; NEL *et al.*, 2001; LIMA *et al.*, 2002). As predações de aves associadas aos vórtices no Canal de Moçambique são relacionadas também com predadores de subsuperfície, como o atum. A alta produtividade nas bordas destas estruturas atrai consumidores de toda a cadeia trófica, e a chegada de predadores subsuperficiais desloca a concentração de presas para locais mais superficiais, disponibilizando esses alimentos para as fragatas. Em escalas mais regionais, portanto, aves marinhas tem locais de preferência para a procura de alimento, podendo estes locais estarem relacionados à vórtices de mesoescala.

Outro trabalho realizado na região do Canal de Moçambique buscou caracterizar os habitats de mesoescala e inferir relações destes locais com a distribuição de diversas espécies de atuns e com uma ave marinha, a fragata (*Fregata minor*) (KAI; MARSAC, 2010). Os autores mostraram, através de análises estatísticas, a ligação do forrageamento de fragatas com a localização de frentes dinâmicas (periferia dos vórtices) e variações de TSM. Ainda, as bordas dos vórtices indicaram, assim como no estudo anterior, locais com concentrações de presas. Desta forma, a localização dos atuns mostrou relação direta com as regiões de vórtices com os peixes tendo atuação nas diferentes regiões destas estruturas (no centro, na periferia e até no fundo). O primeiro estudo apresentado aqui para a região do Canal de Moçambique mostrou que fragatas forrageavam especialmente em regiões de borda de vórtices (WEIMERSKIRCH

et al., 2004). Outro resultado diferente entre os estudos foi a maior concentração de peixes observada nos vórtices ciclônicos de núcleo frio observada por Kai e Marsac (2010), diferente do que apresentou Weimerskirch *et al.* (2004) para aves, onde apenas vórtices de núcleos quentes apresentaram forrageamento associado. Kai e Marsac (2010) indicaram ainda que regiões de frentes entre vórtices são pontos de encontro entre as diferentes comunidades biológicas, devido à concentração de recursos provenientes não apenas da plataforma continental, mas também da relativamente escassa região offshore, que gera altas concentrações de clorofila (MCGILLICUDDY *et al.*, 1998). Além disso, a interação entre as bordas de vórtices gerou grandes barreiras dinâmicas, onde os gradientes têm papel na estruturação da comunidade biológica, haja vista que permitem a maturação do sistema e diversificação da teia alimentar (KAI; MARSAC, 2010). Este processo de maturação resulta na agregação de níveis tróficos superiores na periferia do vórtice devido à acumulação de presas nos gradientes. Por fim, sugere-se que eventos climáticos, como El Niño Oscilação Sul (ENOS) e La Niña, podem alterar a taxa de formação e a intensidade de anéis na região do Canal de Moçambique (KAI; MARSAC, 2010), haja vista da influência dos mesmos na intensidade de processos oceânicos de mesoescala na região próxima à Madagascar (PALASTANGA *et al.*, 2006), o que pode ter consequências para as estratégias de forrageamento e buscas de novos locais para alimentação de fragatas que acasalam na Ilha Europa.

Outro trabalho, realizado na região da Corrente de Agulhas, determinou a importância dos vórtices que se propagam ao Atlântico para a invasão de espécies de peixes em novos oceanos. Rocha *et al.* (2005) buscaram determinar indicações de invasões recentes do Oceano Atlântico pelo *Gnatholepis thompsoni* (Gobiidae) através de dados genéticos. O estudo foi incentivado pela ocorrência de 8 espécies deste grupo de peixes no Indo-Pacífico e apenas uma no Atlântico. Teste estatístico de Fu (Fs) (FU, 1997) indica recente expansão populacional em todas as localizações do Atlântico. Esta expansão populacional provavelmente está relacionada ao atual período interglacial, haja vista que neste período há uma maior disponibilidade de habitat recifal. A invasão do Atlântico por esse peixe ocorreu através dos vórtices anticiclônicos (provenientes do “Vazamento de Agulhas”), que superaram baixas temperaturas e migraram com a Corrente Sul-Equatorial (CSE) (ROCHA *et al.*, 2005). Atualmente, a Corrente de Benguela atua como barreira a essa migração devido à sua baixa temperatura não suportada por peixes recifais. Acredita-se que a invasão se deu em fases do período interglacial onde a força do “Vazamento de Agulhas” era maior, permitindo maior entrada de água tropicais do Índico no Atlântico, superando a barreira de correntes frias (ROCHA *et al.*, 2005). Por fim, os autores defendem que o *Gnatholepis thompsoni* se estabilizou primeiramente no Atlântico

Oeste, com clima tropical semelhante às localizações no Índico, e que as invasões nas partes Leste e Central do Atlântico seriam através da Contracorrente Equatorial (CCE), facilitadas recentemente pelas altas temperaturas geradas pelo aquecimento global (ROCHA *et al.* 2005).

Também na região de atuação da Corrente de Agulhas outro estudo observou influência dos vórtices de mesoescala em um diferente grupo de animais: as tartarugas. Luschi *et al.* (2006) analisaram o comportamento migratório de duas espécies de tartaruga: tartaruga cabeçuda (*loggerhead*) e tartaruga-de-couro (*leatherback*). Ambas os grupos apresentam estilos de vidas diferentes: enquanto que a tartaruga cabeçuda migra apenas ao longo da costa, entre áreas de residência e nidificação e são adaptadas à ambientes costeiros e rasos, a tartaruga-de-couro possui um habitat pelágico e se alimenta de plâncton, seguindo padrões de alta disponibilidade de nutrientes em regiões offshore. Observou-se que as trajetórias de algumas tartarugas-de-couro estavam relacionadas com a ocorrência dos vórtices, onde as mesmas permaneceram por semanas, realizando frequentes movimentos circulares indicativos de forrageamento (LUSCHI *et al.*, 2006). Desta forma, as zonas de ocorrência de vórtices podem também influenciar padrões de migrações de tartarugas, provavelmente pela alta produtividade que essas zonas possuem. Assim, infere-se que a circulação pode afetar a tartaruga-de-couro diretamente, pela sujeição a alta hidrodinâmica na periferia dos vórtices, apesar do mergulho não ter sido afetado, e indiretamente, através da capacidade de disponibilização de presas que essas regiões produtivas possuem (LUSCHI *et al.*, 2006).

A influência dos anéis oceânicos nos habitats oceânicos de forrageamento e nos movimentos migratórios de tartarugas foi também investigado por Polovina *et al.* (2004). Neste trabalho estavam envolvidas duas espécies de tartarugas: as tartarugas cabeçudas (*Caretta caretta*) e as oliváceas (*Lepidochelys olivacea*). Observou-se que as tartarugas oliváceas possuíam padrões migratórios em regiões de latitudes mais baixas, com mais alta TSM (8°N – 28°N), locais estes fora da atuação dos vórtices. A tartaruga cabeçuda, no entanto, foi encontrada entre meandros da Corrente de Kuroshio (CK) e na borda dos vórtices dessa dinâmica região. Estas tartarugas migram entre as praias de nidação do Japão e da Austrália, apresentando habitat de forrageamento no Pacífico. Esses habitats estão relacionados a ocorrência de vórtices, com tartarugas podendo permanecer nesses locais durante meses (POLOVINA *et al.*, 2004). Observou-se que as tartarugas permaneceram 3 meses nas regiões periféricas e centrais dos vórtices, e 6 meses em toda área, forrageando também nas frentes oceânicas presentes (POLOVINA *et al.*, 2004). Acredita-se que esse forrageamento é devido a esses locais apresentarem alta concentração de presas, com as periferias dos anéis concentrando presas flutuantes, devido à alta produtividade e concentração de clorofila-a nos centros destas

estruturas (POLOVINA *et al.*, 2004). Infere-se também que os meandros da CK que instrusionam em águas frias e produtivas, aprisionam também comunidades biológicas da parte norte da CK nos vórtices ciclônicos. O entendimento das regiões de ocorrência de vórtices é, portanto, muito importante para o entendimento do habitat oceânico de animais pelágicos e seus padrões de migração (POLOVINA *et al.*, 2004).

Outro estudo investigou a relação das capturas por unidades de esforço (CPUEs) de atuns com mapas de probabilidade de ocorrência de vórtices, baseando-se em TSM e concentrações de clorofila-a na região de atuação da CK (ZAINUDDIN *et al.*, 2006). Desta forma, o objetivo do trabalho foi a identificação de áreas altamente produtivas, os “hotspots” de albacora (*Thunnus alalunga*). De fato, as maiores CPUEs foram observadas em áreas de probabilidade de ocorrência de vórtices acima de 80% de 1998-2000 (ZAINUDDIN *et al.*, 2006). Os autores encontraram ainda relação significativa entre estas regiões através de teste de regressão linear ($R^2=0,79$ e $P < 0.0001$). O trabalho observou ainda que as áreas de transição entre vórtices eram as áreas com maiores produtividades, e que as grandes capturas nos anos de 1998 e 2000 estão associadas aos mesmos, especialmente os anticiclônicos, com alta velocidade geostrofica (ZAINUDDIN *et al.*, 2006). Assim como as CPUEs, as maiores PP foram encontradas também nos anos de 1998 e 2000. Acredita-se na relação direta entre a PP e a concentração de organismos de níveis tróficos superiores em anéis, haja vista que este habitat produz localmente elevada abundância de clorofila e zooplâncton, além de agregar presas mecanicamente (ZAINUDDIN *et al.*, 2006). Desta forma, a maior PP nesses anos possibilitou que os habitats com grande presença de vórtices também apresentassem riqueza de espécies, possibilitando a agregação de peixes de nível trófico superior. Assim, as frentes e os vórtices da região de atuação da CK no Oceano Pacífico caracterizam os locais de “hotspots” de albacora.

Os vórtices associados a Corrente Leste Australiana (CLA) também foram estudados por um trabalho que objetivou investigar padrões de movimentação e padrões de uso de habitats da Arraia Manta (*Manta alfredi*) na Ilha Lady Elliot (ILE), uma ilha localizada à sul do Vórtice de Capricórnio (JAINE *et al.* 2014). Para tal foram utilizados não apenas dados *in situ* através de transmissores acoplados às raias, mas também com uma modelagem de possíveis regiões de ocorrência de arraias. Foi observado que as arraias reais (dos dados *in situ*) passaram mais tempo na região do vórtice do que as arraias que tiveram suas localizações modeladas ($p<0.001$). Algumas arraias chegaram a passar cerca de 85% do tempo na região desta feição, com apenas um organismo migrando para longe dessa região. A maior concentração de arraias foi localizada na região do Vórtice de Capricórnio. Infere-se que a hidrodinâmica do anel no local estimula e redistribui produção biológica, o que gera a criação de ambientes pelágicos

atrativos para níveis tróficos superiores (JAINE *et al.*, 2014). Além disso, foi mostrado que as arraias usam região do vórtice principalmente para forrageamento de animais flutuantes, haja vista que os mesmos são plânctívoros (JAINE *et al.*, 2014). De fato, os autores também observaram que *M. alfredi* faz o uso de águas offshore para migrar entre locais de agregação e explorar *hotspots* efêmeros de produtividade. Por fim, raias mantas ocupam não apenas regiões costeiras ou limites das plataformas continentais, mas também ambientes offshore para exploração de *hotspots* produtivos, além de viajaram longas distâncias (JAINE *et al.*, 2014).

O estudo de Bailleul *et al.* (2010) procurou descrever o comportamento de forrageamento de elefantes-marinhos (*Mirounga leonina*) relacionando-os às características físicas dos vórtices localizados nas Ilhas Kerguelen, que são áreas de ocorrência de elefantes-marinhos. De fato, 60% dos mamíferos monitorados permaneceram em regiões de ocorrência de vórtices, enquanto que 82% dos locais de alimentação estavam no campo de atuação dos mesmos (BAILLEUL *et al.*, 2010). Os animais apresentaram uma preferência por anéis ciclônicos na fase de forrageamento, especialmente as regiões periféricas (65%). Ainda, quanto maior a aASM, maior era a profundidade de forrageamento dos elefantes-marinhos. Somado a isso, os vórtices ciclônicos concentram mais as presas, haja vista da menor ASM, o que limita o espaço para fuga das presas em relação aos vórtices anticiclônicos. O forrageamento preferencial foi, portanto, em VNFs (ciclônicos), devido à maior facilidade para o predador para caçar em menor espaço, além da profundidade de mergulho mais profunda à medida que a aASM aumenta, devido ao mais intenso forrageamento em locais com maior chance de sucesso na caça (BAILLEUL *et al.*, 2010).

Elefantes-marinhos na região das Ilhas Kerguelen foram também estudados por d'Ovídio *et al.* (2013). O objetivo do trabalho foi analisar os tempos de retenção de vórtices através de simulações matemáticas e a influência deste tempo de retenção no comportamento de elefantes marinhos (*Mirounga leonina*) forrageadores. O forrageamento, assim como os outros diversos estudos apresentados neste trabalho, também se concentrou nas regiões de ocorrência de vórtices, que eram indicados por valores negativos do cálculo do parâmetro de Okubo-Weiss (OW) (D'OVÍDIO *et al.*, 2013). Outro parâmetro utilizado foi o Expoente de Tamanho-Finito de Lyapunov (ETFL) onde os maiores valores indicam barreiras de transporte entre trocas horizontais de água para dentro e para fora dos vórtices. De fato, este parâmetro representa a região de gradiente caracterizando as frentes nas bordas dos vórtices oceânicos. O parâmetro de tempo de retenção (TR) mede o número de dias que água fica retida no anel. Desta forma, os resultados indicam que elefantes-marinhos podem permanecer mais tempo em vórtices com tempos de retenção maior (com alto TR) (D'OVÍDIO *et al.*, 2013), o que se deve

ao fato do tempo ser necessário para o estabelecimento de uma comunidade ecológica desenvolvida, que permite a predação de organismos de níveis tróficos superiores. Por fim, sugere-se que águas aprisionadas por essas feições de mesoescala podem ser importantes fatores no monitoramento de *hotspots* de interações tróficas nas regiões oceânicas (D'OVÍDIO *et al.*, 2013).

Em relação ao ANTO, mais especificamente à possível influência dos vórtices da CNB em organismos, Cowen *et al.* (2003) examinou a interação dos VCNBs com a dinâmica costeira das ilhas do Caribe e com efeitos ecológicos de recrutamento de larvas de peixes recifais (*Thalassoma bifasciatum*) (Gudião Azul). Eles indicaram que a chegada dos anéis na região não apenas alterou a circulação local, mas também a distribuição de concentração de clorofila-a, que passou a atingir seu máximo em maiores profundidades associadas aos vórtices, tendo em conta a camada de baixa salinidade que é intrínseca aos VCNBs que gera um gradiente e a formação de frente oceânica de salinidade (COWEN *et al.*, 2003). Além disso, o crescimento diário do otólito de larvas, que é indicador para estimativa da taxa de crescimento larval, foi reduzido em larvas afetadas pela presença de vórtices. Nota-se que as larvas não associadas aos vórtices apresentaram crescimento mais acelerado. Ainda, as larvas de peixes que encontraram essas feições em algum momento da sua fase larval maior apresentaram maior duração desta fase (COWEN *et al.*, 2003). Destaca-se que todas as larvas com duração de fase larval maior que 75 dias estavam submetidas a dinâmica de um vórtice do dia 1 ao dia 20 da fase larval. Por fim, infere-se que a ocorrência dos anéis na região teve um impacto negativo na intensidade de assentamento das larvas (COWEN *et al.*, 2003), devido a diminuição do crescimento larval e o aumento do tempo nessa fase de vida, o que tem potencial de afetar toda uma população.

Os estudos apresentados aqui retrataram a possível influência de vórtices oceânicos na ecologia de organismos aquáticos. Efeitos ecológicos podem assim ser gerados tanto por vórtices ciclônicos quanto os anticiclônicos, como os da CNB. O entendimento da dinâmica de vórtices de mesoescala pode também ser muito importante para o gerenciamento de recursos pesqueiros em uma perspectiva do ecossistema, especialmente em regiões de grande frequência dos mesmos. Desta forma, a análise de ocorrência, sazonalidade e variabilidade interanual dos VCNBs, além de suas características físicas, apresenta grande importância também para os processos biológicos naquela região.

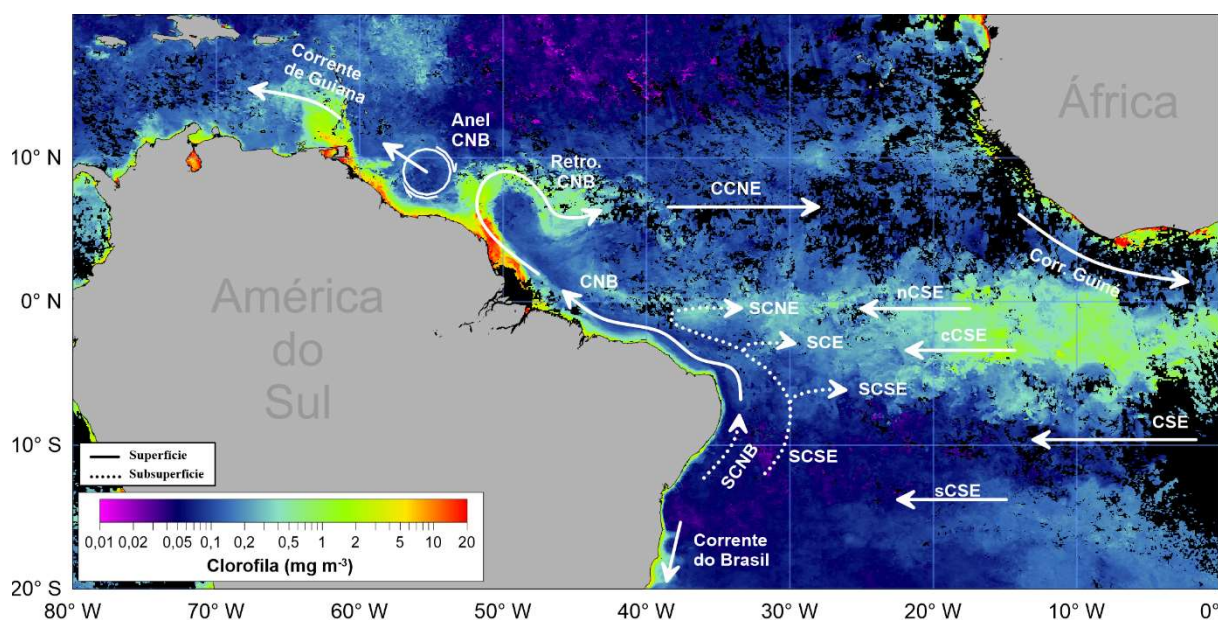
4 ATLÂNTICO NORTE TROPICAL OESTE (ANTO)

O Atlântico Tropical Norte (ATN) (região com limites entre 6-22°N e 60-15°W (WANG *et al.*, 2006)) apresenta circulação oceânica superficial delimitada pelas bordas equatoriais dos giros subtropicais dos hemisférios norte e sul (LUMPKIN; GARZOLI, 2005). Aqui, considera-se ANTO a região do ATN limitada longitudinalmente entre 35-60°W. Os padrões de circulação presentes no ANTO possuem papel importante no transporte de massa, calor e salinidade entre o HN e o HS (SCHMITZ; RICHARDSON, 1991; SCHMITZ; MCCARTNEY, 1993). De fato, é esta a circulação, por exemplo, responsável pelo fechamento da CRMA, causado pelo transporte superficial de águas quentes do HS para o HN através da CNB, e pelo transporte profundo da Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) em direção ao HS através da Subcorrente de Borda Oeste (SCBO). A SCBO é também conhecida como Corrente Profunda de Borda Oeste (CPBO) (JOHNS *et al.*, 2008; MEINEN *et al.*, 2012). Estima-se que a magnitude desta troca de massas d'água entre os hemisférios seja na ordem de 13 Sv (SCHMITZ; RICHARDSON, 1991). A região conta ainda com a presença de contracorrentes zonais e outras correntes de borda oeste, tornando a circulação ainda mais complicada nesta área (BOURLÈS *et al.*, 1999). A combinação de águas provenientes de ambos os hemisférios fornece um mecanismo de formação de massas d'água com características distintas, sendo isso indicativo do papel do ATN em misturar as águas com origens em diferentes hemisférios (BOURLÈS *et al.*, 1999).

Superficialmente a circulação no Atlântico Tropical é caracterizada por um fluxo da CSE em direção à oeste. O Atlântico Tropical Sul é caracterizado pela presença do ramo Sul da CSE (sCSE), a qual flui desde o Sul da costa da África (Figura 2) até a costa brasileira, onde a mesma se bifurca, dando origem à Subcorrente Norte do Brasil (SCNB) e Corrente do Brasil, com a primeira fluindo ao norte, atravessando a região equatorial, e a última fluindo à sul pela costa brasileira. Ao chegar em aproximadamente 5°S, a SCNB se une ao ramo Central da CSE (cCSE) que vem de leste, formando assim a intensa CNB. A CNB sofre retroflexão superficialmente em aproximadamente 7°N e 48°W, alimentando a CCNE. Esse giro equatorial é, portanto, constituído pela CNB e sua retroflexão, pela CCNE de fluxo de oeste, pela Corrente de Guiné (ARNAULT, 1987), e por parte da CSE que formam ou se juntam à CNB, fechando o giro (Figura 2) (LUMPKIN; GARZOLI, 2005). A circulação é ainda caracterizada por correntes profundas, apresentando estrutura vertical também bastante complexa. A bifurcação da Corrente Norte Equatorial (CNE) no HN é importante para alimentação tanto da CCNE quanto da Subcorrente Norte Equatorial (SCNE) (BOURLÈS *et al.*, 1999) (Figura 2). Além disso, a CNB e a sua componente subsuperficial, a Subcorrente Norte do Brasil (SCNB) alimentam

correntes zonais que fluem para leste em latitudes e profundidades diferentes, como por exemplo a Subcorrente Equatorial (SCE), centrada na termoclina, e a SCNE localizada abaixo da termoclina (SILVEIRA *et al.*, 1994; BOURLÈS *et al.*, 1999) (Figura 2). Como dito anteriormente, a CNE também contribui consideravelmente para a SCNE (Figura 2). Bourlès *et al.* (1999) obteve que o transporte médio do sistema CNB/SCNB é 22.1 ± 4.5 Sv, sendo 23.6 Sv no verão e 19.1 Sv no inverno. Ainda, o mesmo trabalho apontou que o sistema CCNE/SCNE possui transporte médio de 30.0 ± 7.3 Sv, sendo a diferença observada entre os dois diferentes sistemas devida à contribuição da CNE que, ao se retroflectar, alimenta o último. Outros estudos observaram que a SCBO, proveniente da região leste do Caribe também se junta à SCNE (JOHNS *et al.*, 1990; COLIN; BOURLÈS, 1994) (Figura 2).

Figura 2 - Circulação no ANTO.



Linhas contínuas indicam correntes superficiais. Linhas pontilhadas indicam correntes subsuperficiais. SCNB: Subcorrente Norte do Brasil; CNB: Corrente Norte do Brasil; SCNE: Subcorrente Norte Equatorial; SCE: Subcorrente Equatorial; SCSE: Subcorrente Sul Equatorial; CCNE: Contracorrente Norte Equatorial; nCSE: ramo norte da Corrente Sul Equatorial; cCSE: ramo central da Corrente Sul Equatorial; sCSE: ramo sul da Corrente Sul Equatorial. Fonte: autoria própria.

Soma-se a toda complexidade da área a grande variação sazonal que as correntes do ANTO apresentam. A CCNE e o ramo equatorial da CSE, por exemplo, apresentam máxima intensidade durante o inverno e a primavera no HS (i.e. ~ junho-novembro) e enfraquecem no outono (RICHARDSON; WALSH, 1986; ARNAULT, 1987; RICHARDSON; REVERDIN, 1987). Da mesma forma, a CNB e a Corrente de Guiana também apresentam sazonalidade, com máximos também nos períodos de inverno e primavera no HS (RICHARDSON; WALSH,

1986; ARNAULT, 1987; JOHNS, *et al.*, 1998). Tais variações são ocasionadas pela sazonalidade em larga escala dos ventos alísios, influenciados primordialmente pela migração da ZCIT, com tais correntes atingindo o máximo quando a ZCIT está localizada na posição norte mais extrema que possa alcançar (STRAMMA; SCHOTT, 1999).

O ANTO é também caracterizado por ser uma região de grande ocorrência de furacões e ciclones tropicais. Por ser uma região tropical, apresentando alta TSM, é de extrema importância o estabelecimento das características físicas da região, para previsão de possível intensificação ou não, além de como que a passagem de furacão pode afetar o ANTO. De fato, altas TSMs podem causar intensificação de CTs, além da passagem destas tempestades causarem um aprofundamento da camada de mistura, e diminuição da TSM, devido ao efeito de “*cold wake*” (CIONE; ULHLORN, 2003). Pasquero e Emanuel (2008) retrataram ainda o crescimento das anomalias de TSM na região a partir de 1950, indicando aumento de conteúdo de calor na superfície, fator crucial na intensificação de CTs. A máxima alteração de temperatura observada foi a 150m de profundidade, atingindo 0.65-0.7°C de variação (PASQUERO; EMANUEL, 2008). Além disso, a dinâmica do Atlântico somado aos efeitos das suas piscinas quentes se mostraram também importantes na taxa de precipitação e na intensificação de furacões no ANTO (WANG *et al.*, 2006, HOUSON-GBO *et al.*, 2015). Outro fator primordial no ANTO é a presença da pluma dos rios Orinoco e, principalmente, Amazonas. Acredita-se que tais plumas também sejam participantes nos eventos de intensificação de furacões por conta do efeito de camada de barreira (FFIELD, 2006). A descarga do Rio Amazonas, de fato, tem papel muito importante no ANTO. O Amazonas é o rio que possui a maior descarga global e conta por 20% da entrada fluvial nos oceanos, além de ser responsável por quase metade de toda entrada de água doce no ATN (CARTON, 1991). Tal descarga do Amazonas já demonstrou ser influenciada pelos anos de ocorrência de ENOS (TYAQUIÇÃ *et al.*, 2017), além de ter capacidade de impactar a distribuição de nutrientes, microrganismos e fluxos de carbono (GOES *et al.*, 2014; ARAÚJO *et al.*, 2017). A seguir, há um maior detalhamento a respeito da CNB e dos limites da área de estudo do ANTO utilizados neste trabalho.

4.1 Corrente Norte do Brasil (CNB)

A CNB é uma intensa corrente de borda leste de baixas latitudes no ANTO, que flui na direção noroeste, transportando águas das camadas superiores dos oceanos que cruzam o equador (JOSEPH, 2013). Tem influência até aproximadamente 800m de profundidade, onde há a transição para a SCBO (JOHNS *et al.*, 1998), e seu surgimento tem origem na sCSE, que,

ao atingir a região abaixo da ponta mais oriental do continente sul-americano, aproximadamente 10°S, podendo variar de 8°S em 100m até 20°S em 500m de profundidade (VELEDA, 2008), posteriormente se bifurcando, dá origem à uma corrente fluindo à sul, a Corrente do Brasil, e uma fluindo à norte, a SCNB (Figura 2) (JOHNS *et al.*, 1998; LUMPKIN; GARZOLI, 2005; VELEDA *et al.*, 2012).

O ramo subsuperficial da CNB é mais conhecido como a SCNB, onde o sistema CNB/SCNB apresenta transporte médio anual de 22.1 ± 4.5 Sv, com o maior transporte concentrado no verão (BOURLÈS *et al.*, 1999). À medida que flui para norte, a CNB (antes uma corrente fraca e costeira) inicia um processo de intensificação, devido principalmente à contribuição da porção central da CSE em 4°S (Figura 2) (LUMPKIN; GARZOLI, 2005). Tal processo transfere o núcleo de máxima velocidade do sistema CNB/SCNB de 200m de profundidade para regiões superficiais, o que faz com que o sistema seja enfraquecido e haja total predominância da CNB superficial (SCHOTT *et al.*, 1998). Contribui também para tal intensificação a confluência da porção norte da CSE entre 2-3°N, que aceleram ainda mais a CNB (LUMPKIN; GARZOLI, 2005). Antes disso, ao cruzar a linha do equador, parte da CNB sofre retroflexão, originando e alimentando a SCE (LUMPKIN; GARZOLI, 2005).

A porção mais superficial da CNB continua fluindo predominantemente para noroeste ao longo da costa norte do Brasil e próximo de 6°N – 8° N e 45-48°W, se separa da costa e retroflecta para a direita, alimentando a CCNE (JOHNS *et al.*, 1990; JOHNS *et al.*, 1998; JOHNS *et al.*, 2003; FONSECA *et al.*, 2004; LUMPKIN; GARZOLI, 2005). A retroflexão da CNB apresenta um ciclo sazonal associado com a migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (FONSECA *et al.*, 2004). O deslocamento meridional da ZCIT faz com que os alísios de Sudeste predominem de junho a novembro, desenvolvendo ao máximo a retroflexão nestes meses, enquanto que entre dezembro e maio a retroflexão é praticamente ausente (JOHNS *et al.*, 1998; GARZOLI *et al.*, 2004; LUMPKIN; GARZOLI, 2005). A retroflexão intensifica a vorticidade do escoamento e pode, ocasionalmente, liberar grandes vórtices anticiclônicos de núcleo quente (DIDDEN; SCHOTT, 1993; JOHNS *et al.*, 2003). Os VCNBs são liberados principalmente devido à pequena inclinação da costa da América do Sul entre 5°N-8°N (ZHARKOV; NOF, 2010).

Tais vórtices são propagados na direção noroeste e são considerados a principal contribuição para a perenidade, ao longo da costa norte da América do Sul, da Corrente de Guiana, uma corrente que se estende abaixo da camada de Ekman influenciada pela CNB (LUMPKIN; GARZOLI, 2005). Lumpkin e Garzoli (2005) indicaram intensificação na corrente de Guiana associada à sazonalidade da retroflexão da CNB, onde a corrente se

apresenta mais forte nos meses de ausência da retroflexão. Além disso, estima-se que haja uma relação direta entre o volume transportado pela CNB e a latitude de penetração no HN que ela atinge. Quando este transporte é máximo, a máxima latitude de penetração também é alcançada e um vórtice quase sempre é liberado (GARZOLI *et al.*, 2003; GARZOLI *et al.*, 2004). Ou seja, quanto maior a latitude de penetração da retroflexão da CNB, maior é a chance de liberação de vórtice (GARZOLI *et al.*, 2003), indicando que os anos em que a CNB atingir mais vezes a sua máxima latitude seriam os anos com mais vórtices liberados. A CNB tem papel fundamental em dois processos: o fechamento do giro equatorial gerado pelo regime de ventos, alimentando um sistema de Contracorrentes zonais (LUMPKIN; GARZOLI, 2005); e o favorecimento do transporte das águas quentes superficiais do Atlântico do HS para o HN, sendo parte importante da CRMA (JOHNS *et al.*, 1998).

4.2 Área de Estudo

O presente trabalho teve como área de estudo uma região específica do ANTO, limitadas latitudinalmente entre 5° S - 15° N e longitudinalmente entre 45° W - 70° W (Figura 3). Tais limites foram escolhidos com o intuito de tornar a análise de geração e crescimento dos VCNBs mais detalhada, haja vista que é dentro destes limites que ocorre a retroflexão da CNB (6° - 8° N e 45 - 48° W) e consequente liberação dos vórtices. Pequenos vórtices ciclônicos, além dos anticiclônicos provenientes da retroflexão da CNB, também já foram observados na região (CASTELÃO; JOHNS, 2011).

Além disso, é importante também destacar na área de estudo a presença das desembocaduras dos rios Amazonas (0,5° N; 50,5° W) e Orinoco (9,5°; 61,5° W) (Figura 3), que já demonstraram ser importantes para o ANTO de diversas formas, além de se relacionarem com os vórtices da CNB (FFIELD, 2006; GOES *et al.*, 2014; ARAUJO *et al.*, 2017). Ressalta-se, por fim, a presença das ilhas Antilhas (~60-63°W) na área de estudo, locais onde ocorre o enfraquecimento e morte dos vórtices, devido à interação entre os VCNBs e a topografia da região (FRATANTONI; RICHARDSON, 2006). A área delimitada para este trabalho, portanto, é suficiente para a análise da geração surgimento dos vórtices da CNB, além de seu enfraquecimento ao atingir a região Caribenha.

Figura 3 - Área de estudo.

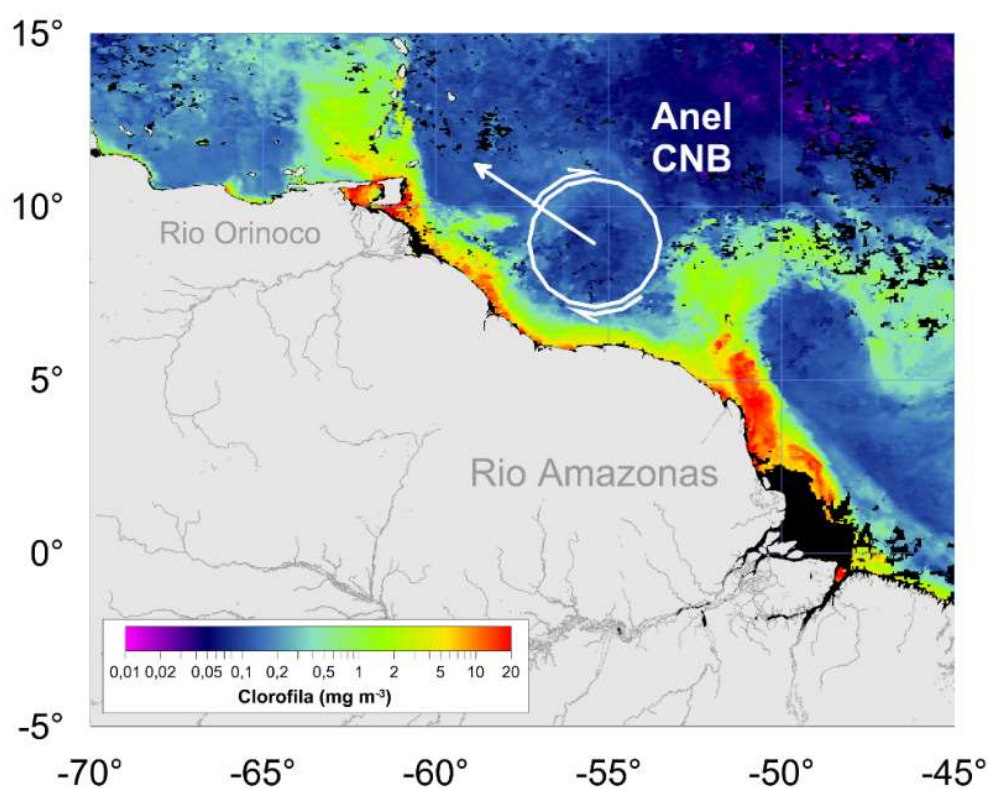


Imagem de Chlorofila-a e representação de um vórtice desprendido da retroflexão da CNB (linha branca). Destaca-se a foz de dois grandes rios: Orinoco e Amazonas. Fonte: autoria própria

5 METODOLOGIA

5.1 – Base de dados

Neste estudo foram utilizados 15 anos (janeiro de 1993 - dezembro de 2007) de dados de reanálise semanais do oceano subsuperficial (50 m de profundidade) de altura absoluta da superfície do mar (i.e. altura geopotencial, ou seja, altura da superfície de pressão acima do nível médio do mar) em metros (m), e das componentes geostróficas zonais e meridionais das correntes em metros por segundo (m/s), retirados da base de dados “Global Observed Ocean Physics Temperature Salinity Heights and Currents Reprocessing” - ARMOR3D L4 (GUINEHUT *et al.*, 2004; GUINEHUT *et al.*, 2012; MULET *et al.*, 2012). Esta base de dados apresenta resolução de $\frac{1}{4}^\circ$ (i.e. 0.25°) e é obtida através da combinação de dados de satélite e de dados *in situ*. Tal base é disponibilizada pelo Serviço de Monitoramento do Ambiente Marinho Copernicus (CMEMS, disponível em: <http://marine.copernicus.eu/>). Neste trabalho considera-se a altura geopotencial como ASM e sua anomalia como aASM. Utilizaram-se dados de 50m de profundidade pois os mesmos apresentam menos ruídos e possíveis interferências de processos atmosféricos do que dados superficiais, permitindo o destaque unicamente para as correntes geostróficas.

5.2 – Algoritmo AMEDA

Os dados foram aplicados ao Algoritmo de Detecção e Trajetória de Momento Angular de Vórtices (AMEDA) (LE VU *et al.*, 2018), que é um algoritmo híbrido, baseado tanto em parâmetros físicos quanto em propriedades geométricas do campo de velocidade. Com ele pode-se analisar os momentos de geração, crescimento, intensificação, trajetória, fusão e separação dos vórtices, além dos parâmetros obtidos para cada vórtice formado. Foram considerados como VCNBs apenas os anéis que foram visivelmente liberados pela CNB, e apenas estes foram contabilizados no resultado final. O AMEDA possui as seguintes propriedades, de acordo com Le Vu *et al.* (2018): algoritmo com parâmetros ajustáveis e robustos à diferentes resoluções espaço-temporais; facilidade de validação do algoritmo, haja vista que o cálculo de propriedades dos vórtices permite a comparação direta com dados *in situ*; identificação dos eventos de fusão e separação de vórtices, permitindo o acompanhamento com precisão da evolução dinâmica dos mesmos.

Destaca-se aqui os dois passos principais do AMEDA: a identificação dos centros dos vórtices e a determinação de sua trajetória. Para a identificação dos centros dos vórtices, o

algoritmo se baseia em dois critérios: critério dinâmico e critério geométrico. Para o primeiro, AMEDA utiliza um método proposto por Mkhinini *et al.* (2014), que, ao invés de utilizar o OW, que é um parâmetro vastamente utilizado para identificação de centros de vórtices a partir de dados do campo de velocidade geostrófico (CHELTON *et al.*, 2007; CHAIGNEAU *et al.*, 2008), utiliza outro parâmetro dinâmico, o Momento Angular Local Normalizado (MALN), ou seja, um valor integral do momento angular em uma área restrita. O MALN será 1 para os centros dos vórtices ciclônicos e -1 para os centros de vórtices anticiclônicos, e é calculado com base na seguinte fórmula:

$$MALN(G_i) = \frac{\sum_j G_i X_j \times V_j}{\sum_j G_i X_j \cdot V_j + \sum |G_i X_j| |V_j|} \quad (5.1)$$

onde G_i é um ponto, X_j é o vetor posição e V_j o vetor velocidade num ponto do grid vizinho a G_i . Este parâmetro não depende da intensidade do vórtice e é utilizado para a distinção entre pontos hiperbólicos (MALN alto) e pontos elípticos (MALN igual a zero) (LE VU *et al.*, 2018). Como o valor de MALN não é suficiente para garantir pontos de centros de vórtices realmente capazes de prender massas de água (LE VU *et al.*, 2018), o critério geométrico também é utilizado. Este último é baseado nas linhas dos campos de correntes e considera um ponto como o centro de um vórtice somente se os valores de MALN característicos de vórtices coincidirem com linhas de correntes fechadas ao seu redor. Ou seja, que as linhas de velocidade sejam invertidas quando cruzarem o centro do vórtice e que as direções dos vetores de velocidade mudem com um senso de rotação, onde vetores de velocidades vizinhos devem estar no mesmo quadrante ou em quadrantes adjacentes (NENCIOLI *et al.*, 2010).

A determinação das trajetórias dos vórtices, por sua vez, é baseada na pesquisa a cada passo de tempo dos vórtices que estavam presentes no passo de tempo anterior. Para isso, AMEDA utiliza o método do Vizinho Local mais próximo, que consiste em associar, para cada centro de vórtice detectado em determinado passo, o outro mais próximo de mesmo sinal detectado no passo anterior em determinada área. Desta forma, o Algoritmo foi capaz tanto de identificar os centros dos vórtices, quanto em indicar suas prováveis trajetórias. É importante destacar, no entanto, que análises criteriosas foram realizadas em cada passo de tempo (em cada semana) para a verificação de tais trajetórias e da duração dos vórtices. Além disso, ressalta-se que as configurações padrões dos parâmetros, utilizadas por Le Vu *et al.* (2018), foram praticamente mantidas, com exceção do $Rlim$ (i.e. tamanho máximo do contorno característico do vórtice). Devido à problemas na identificação dos vórtices, os idealizadores do AMEDA

(Briac Le Vu e Alexander Stegner) sugeriram uma alteração do $Rlim$, antes estabelecido como $Rlim=5Rd$, para $Rlim=10Rd$, sendo Rd o raio de deformação de Rossby do primeiro modo baroclínico na área de estudo. O Rd utilizado foi o analisado por Chelton *et al.* (1998) e é definido como a escala horizontal em que os efeitos rotacionais se tornam mais importantes do que efeitos de flutuação e gravidade, ou seja, a escala horizontal de perturbação em que o alongamento do vórtice e a vorticidade relativa associada com isopícnas inclinadas possuem igual contribuição para a vorticidade potencial (NURSER; BACON, 2014). Nurser e Bacon (2014) também o definem como a escala horizontal do relaxamento geostrófico.

O AMEDA também diferencia os momentos em que $Rmáx$ (i.e. o raio correspondente à maior velocidade azimutal) (LE VU *et al.*, 2018) é maior que o raio do vórtice e o momento em que ambos os raios são praticamente semelhantes. Desta forma, linhas pontilhadas são usadas para identificação de vórtices com $Rmáx$ próximo ao tamanho do raio total do mesmo, enquanto que linhas cheias identificam vórtices onde $Rmáx$ é menor que o raio total do vórtice. Além disso, há também diferenciação entre vórtices ciclônicos e anticiclônicos. Os primeiros são representados por contorno de linha vermelha, já os últimos por contornos de linhas azuis. Contornos brancos indicam possível interação entre vórtices, enquanto que contornos de linhas verdes apontam para características semelhantes, ou seja, indicando que uma possível fusão ou separação de vórtices está ocorrendo.

5.3 – Cálculos e parâmetros utilizados

O AMEDA foi aplicado a 15 anos de dados (1993-2007), de semana a semana (781 semanas), para a identificação e acompanhamento da evolução dos VCNBs que se destacaram da retroflexão da CNB. Estes vórtices identificados pelos campos de velocidades geostróficas foram plotados sobre um fundo de aASM, calculada a partir dos dados de ASM. A aASM para cada semana foi calculada da seguinte maneira:

$$aASM(x, y, t) = ASM_s(x, y, t) - ASM_m(x, y, s) \quad (5.2)$$

Onde: ASM_s é a altura absoluta da superfície do mar para determinado ponto de determinada semana, ASM_m é a média de ASM_s obtida para cada ponto na semana específica de cada mês dos 15 anos observados, e x, y, t, s são a latitude, longitude, o passo de tempo (1-781) e a semana específica do mês (1-52) de cada centro de vórtice identificado, respectivamente. Ou seja, a aASM da 1ª semana de janeiro de 1993 será o ASM_s desta semana menos o ASM_m das primeiras semanas de janeiro de 1993-2007.

A partir do funcionamento do Algoritmo, com os vórtices identificados em cada tempo específico, passaram a ser computados os parâmetros para cada vórtice. Para cada VCNB foi escolhida uma semana específica para se ter tais parâmetros. Os parâmetros contados nesta semana representam cada vórtice específico, e, portanto, a semana a ser computada deve ser escolhida atentamente. O critério para a escolha da semana em que os parâmetros do vórtice seriam computados foi a principal assinatura superficial dos vórtices, ou seja, a assinatura de *aASM*. Desta forma, os momentos de máxima *aASM* identificados nos centros dos vórtices (além de seus parâmetros) foram selecionados para representar os vórtices. Além disso, consideraram-se apenas os anéis liberados pela CNB que cruzaram a linha de 55°W. Pequenas turbulências com durações menores que duas semanas e raios inferiores à 30 km na área de estudo, ocasionalmente, também eram consideradas vórtices pelo AMEDA, porém foram negligenciadas neste estudo.

Através deste método foram computados os parâmetros representativos de cada vórtice, onde a semana escolhida era a que indicava a melhor identificação do vórtice “verdadeiro” e (com mais alta *aASM*), o que aponta para uma máxima capacidade do fluxo em concentrar massas d’água em seu centro. Foram analisados 3 parâmetros diretamente do AMEDA, sendo eles: *Vmáx*, *Rmáx*, *EC*. *Vmáx* indica a máxima velocidade azimutal (i.e. velocidade rotacional, ou seja, a velocidade do corpo em torno de seu próprio eixo), e é dado em metros por segundo (m/s). *Rmáx*, que já foi definido anteriormente, é também definido como o raio do círculo da mesma área com contorno fechado de *aASM* que apresentou máxima velocidade geostrófica média (MASON *et al.*, 2014). *Rmáx* é dado em quilômetros (km). *EC* é a energia cinética de cada vórtice, dada em metros quadrados por segundos quadrados (m²/s²), e calculada a partir da seguinte fórmula:

$$EC = \frac{v^2 + u^2}{2} \quad (5.3)$$

onde *v* é a componente meridional e *u* é a componente zonal do campo geostrófico de velocidade. Outro parâmetro foi obtido indiretamente do Algoritmo: o adimensional número de Rossby de vórtices, *Ro*, que compara os efeitos de advecção e de rotação em um vórtice (VANDENBROUCK *et al.*, 2000). Para os cálculos de *Ro*, utilizou-se também *f*, o parâmetro de Coriolis para cada vórtice, também retirados do AMEDA, de forma que o número de Rossby foi calculado como a razão entre a força inercial a força de Coriolis:

$$Ro = \frac{Vmáx}{f Rmáx} \quad (5.4)$$

Ro representa força da rotação aplicada em relação aos termos não-lineares, comparando a importância da vorticidade relativa em relação à planetária, e possui valores na ordem de $Ro \sim 10^{-2}$, por exemplo, para um fluxo geofísico, que apresenta larga dimensão espacial, e é fortemente influenciado por Coriolis (VANDENBROUCK *et al.*, 2000). Ro para vórtices anticiclônicos, é, por definição, negativo, em relação ao sentido de rotação (CASTELÃO; JOHNS, 2011). Observa-se que os vórtices anticiclônicos ao redor do globo possuem valores médios de Ro por volta de -0.1 (OLSON, 1991). No entanto, para este estudo, foi considerada apenas a magnitude tanto de $Vmáx$ quanto de Ro , onde todos os valores indicativos de tais parâmetros estão representados em módulo. A $aASM$ foi também computada para cada centro de vórtice encontrado. Desta forma, os parâmetros analisados foram: $Vmáx$, $Rmáx$, EC , Ro , $aASM$. Para os estudos de caso, foi realizado o cálculo de velocidade média de translação ($Vmtr$), a partir da distância entre as posições iniciais e finais dos vórtices, de forma que:

$$Vmtr = \frac{\text{distância entre vórtices}}{\text{duração do vórtice (semanas)}} \quad (5.5)$$

onde a distância entre os vórtices representa o quão distante é a posição que o vórtice se enfraqueceu em relação à posição que ele foi formado. A $Vmtr$ é dada em quilômetros por semana, sendo então dividido por 7 para se obter a unidade mais utilizada neste caso, quilômetros por dia (km/dia).

5.4 – Análises Estatísticas

As análises estatísticas realizadas no presente trabalho se resumiram à construção de histogramas e o estabelecimento de correlações entre os parâmetros calculados. Considerou-se como uma boa correlação valores acima de 0.5, que explicariam 50% das correlações entre os dados observados. Além disso, calculou-se também a anomalia do número de vórtices, de forma que:

$$\text{Anomalia } n^o v \text{ (ano)} = n^o v \text{ (ano)} - \text{média do } n^o v \text{ por ano} \quad (5.6)$$

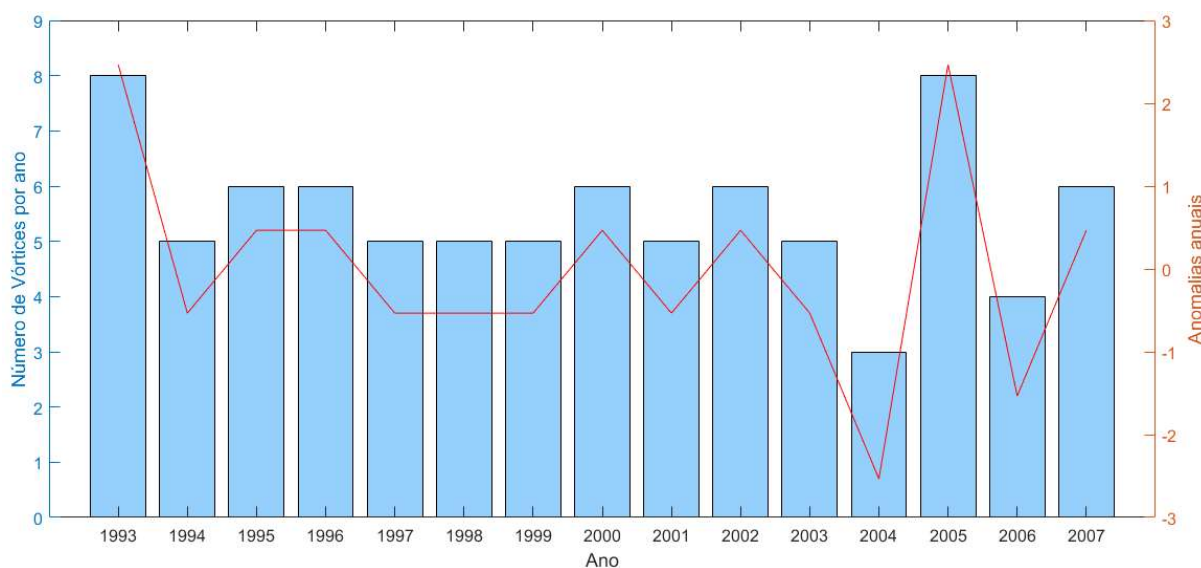
onde $n^o v$ é o número de vórtices observado.

6 RESULTADOS

6.1 – Variabilidade interanual e sazonal no número de vórtices

Os resultados obtidos com as análises apontaram para a presença de 83 vórtices que foram destacados da CNB no intervalo de 15 anos (1993-2007), indicando uma média de 5,53 vórtices por ano. Estes resultados estão de acordo com a literatura, onde diversos trabalhos apontam para uma taxa de formação de 3-7 anéis por ano no período analisado, incluindo vórtices superficiais e subsuperficiais (GONI; JOHNS, 2001; FRATANTONI; GLICKSON, 2002; GARRAFFO *et al.*, 2003; GARZOLI *et al.*, 2003; GONI; JOHNS, 2003; JOHNS *et al.*, 2003; FRATANTONI; RICHARDSON, 2006; JOCHUMSEN *et al.*, 2010). Destaca-se, porém, que a grande maioria destes vórtices são superficiais (GARZOLI *et al.*, 2003; GONI; JOHNS, 2003; JOHNS *et al.*, 2003; JOCHUMSEN *et al.*, 2010). Garzoli *et al.* (2003), por exemplo, identificaram 12 vórtices superficiais e 4 subsuperficiais em um período de 22 anos. Jochumsen *et al.* (2010), por sua vez, indicaram a presença de apenas 10 vórtices de subsuperfície em 15 anos de análise, enquanto que, no mesmo período, 92 vórtices superficiais foram encontrados. Os resultados do presente trabalho, no entanto, estão restritos aos vórtices identificados em 50m de profundidade. Fratantoni e Glickson (2002), usando dados de satélite, identificaram a presença de 14 vórtices no período de setembro de 1997 a setembro de 2000, exatamente o mesmo número observado neste estudo, destacando que até mesmo as datas de formação de cada anel são semelhantes (ver Apêndice A).

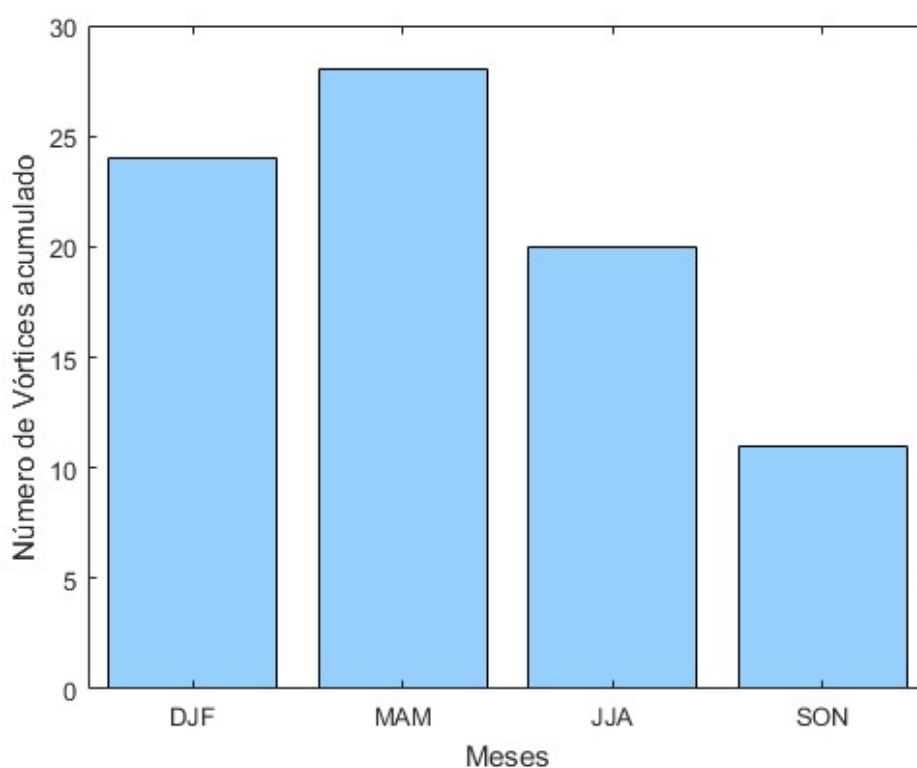
Figura 4 - Número de VCNB's que cruzaram 55°W em cada ano.



Fonte: autoria própria.

A Figura 4 apresenta a interanualidade observada no período estudado, onde o número de vórtices destacados da CNB é bastante variável para cada ano. O máximo de anéis identificados por ano foram 8, nos anos de 1993 e 2005. Da mesma forma, a maior anomalia positiva observada foi também nestes anos (Figura 4). O mínimo número observado foi para o ano de 2004, onde apenas 3 vórtices foram observados, caracterizando assim a máxima anomalia negativa para este ano (Figura 4). Essa variabilidade interanual também foi observada por outros autores, que usaram diferentes tipos de dados: dados de satélite, dados *in situ*, e modelos (GONI; JOHNS, 2001; JOHNS *et al.*, 2003; JOCHUMSEN *et al.*, 2010, respectivamente).

Figura 5 - Número acumulado de VCNB's que cruzaram 55°W em cada ano.



Número acumulado é soma de todos encontrados nos meses do período analisado. DJF (inverno boreal): dezembro, janeiro, fevereiro; MAM: março, abril, maio (primavera boreal); JJA: junho, julho, agosto (verão boreal); SON: setembro, outubro, novembro (outono boreal). Fonte: autoria própria

Pode-se observar também uma considerável variabilidade sazonal na taxa de geração dos VCNBs (Figura 5). 63% dos vórtices foram gerados entre os meses de dezembro – maio, indicando uma formação em maior taxa na primeira parte do ano, entre o inverno e a primavera boreal. O período com maior taxa de geração foram os meses de março-maio, que apresentou formação de 28 vórtices nos 15 anos analisados (~34% do total). Por outro lado, a menor

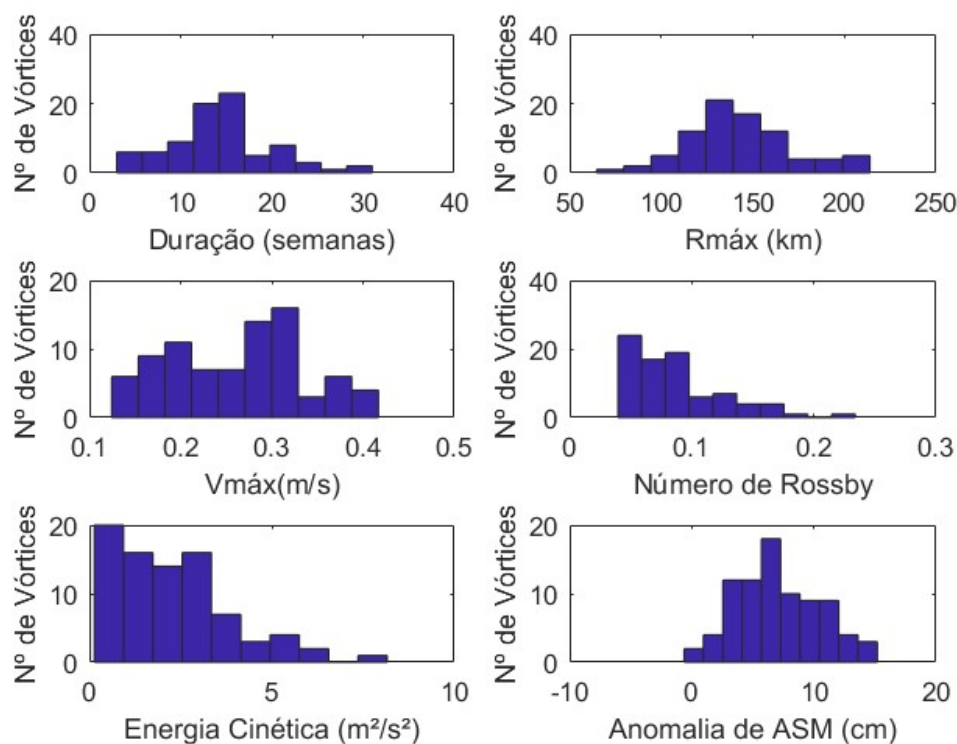
geração foi observada entre os meses de junho e novembro, especialmente no outono boreal (Figura 5), onde apenas 11 vórtices foram gerados entre os meses de setembro-novembro no período de 15 anos. Este resultado representa uma redução em ~61% no número de anéis gerados entre os períodos de máxima (março-maio) e mínima geração (setembro-novembro). Este resultado vai de acordo com outros estudos que observaram sazonalidade nos períodos de geração dos vórtices (GARRAFFO *et al.*, 2003; JOCHUMSEN *et al.*, 2010). No entanto, Jochumsen *et al.* (2010) observou uma redução de apenas 30% entre os períodos de taxas de geração máxima e mínima. Por outro lado, outros trabalhos apresentaram resultados diferentes com relação à sazonalidade na geração dos anéis. Observou-se, além de uma interanualidade na geração dos vórtices, uma variação sazonal apenas no tipo de vórtice gerado, e não na taxa de geração, com os subsuperficiais gerados principalmente entre os meses de setembro-novembro (JOHNS *et al.*, 2003). Além disso, Goni e Johns (2003) também observaram forte variação interanual e padrão sazonal não tão aparente.

6.2 – Parâmetros analisados

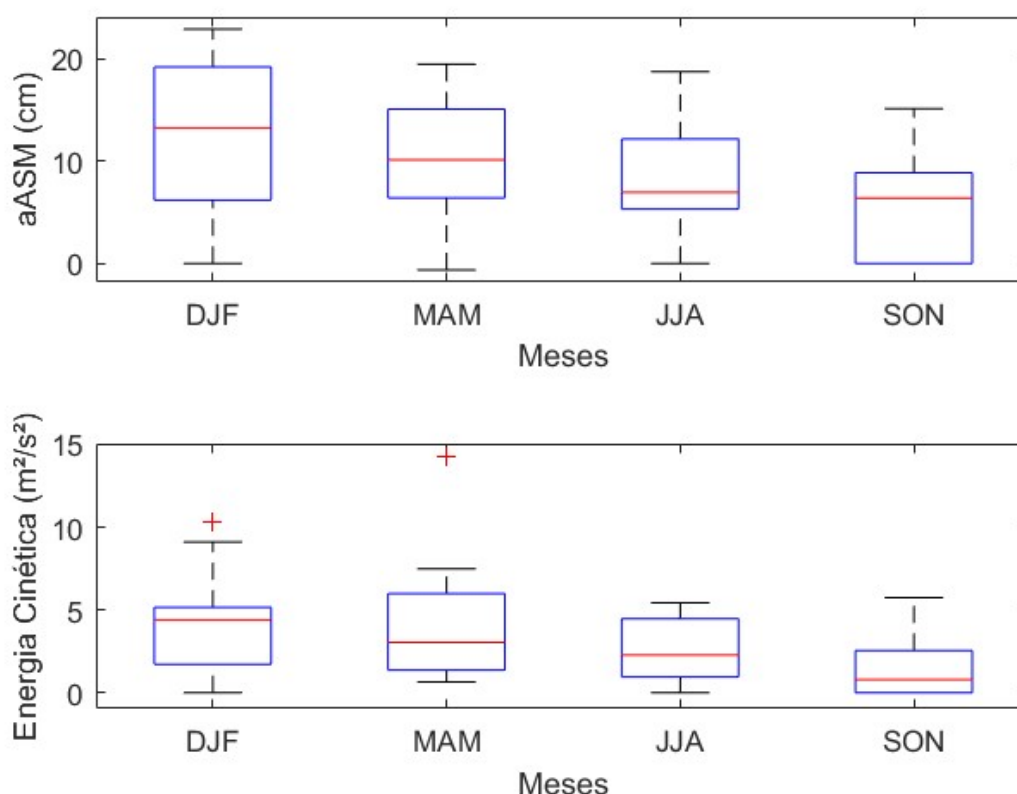
A Figura 6 apresenta um histograma que resume a distribuição dos valores obtidos para cada parâmetro de vórtice analisado. Os VCNB apresentaram duração média de, aproximadamente, 15 semanas, e a maior parte dos vórtices analisados teve entre 12-15 semanas de vida (Figura 6a). De fato, Fratantoni e Richardson (2006) encontraram um período médio de duração de 3.3 meses, com os vórtices variando entre 1 e 6 meses de vida. A média de $R_{máx}$ para todos os vórtices foi de 144.37 km, com a maior parte deles distribuído entre 120 e 160 km (Figura 6b), concordando com outros trabalhos que analisaram os VCNBs anteriormente e apresentaram valores de $R_{máx}$ entre 100-160 km (DIDDEN; SCHOTT, 1993; RICHARDSON *et al.* 1994; FRATANTONI *et al.* 1995; FRATANTONI; GLICKSON, 2002; GONI; JOHNS, 2003; FRATANTONI; RICHARDSON, 2006; CASTELÃO; JOHNS, 2011). Já para $aASM$, a média de anomalia ficou em torno de 7 cm, com maior número de vórtices relacionados às anomalias entre 6-8 cm (Figura 6f). Estes resultados corroboram os observados na literatura, onde as máximas $aASM$'s associadas à centro de vórtices da CNB variam de 5-30 cm (DIDDEN; SCHOTT, 1993; RICHARDSON *et al.*, 1994; GONI; JOHNS, 2001; GONI; JOHNS, 2003; JOHNS *et al.*, 2003). Por outro lado, em relação à distribuição de valores obtida para $V_{máx}$, não foi observado um comportamento médio padrão, com grande concentração de valores entre 0.15-0.20 m/s e 0.27-0.32 m/s (Figura 6c). Geralmente, são esperados valores máximos de máxima velocidade azimutal para os VCNB de aproximadamente 1m/s (DIDDEN; SCHOTT, 1993; RICHARDSON *et al.* 1994; FRATANTONI *et al.* 1995; GONI; JOHNS,

2003; CASTELÃO; JOHNS, 2011), apesar de valores próximos aos encontrados neste estudo também terem sido observados (FRATANTONI; GLICKSON, 2002; FRATANTONI; RICHARDSON, 2006). Já a média observada para cada vórtice foi de 0.2655 m/s. Por fim, tanto o Ro quanto a EC apresentaram distribuições semelhantes, com a predominância dos menores valores para cada um destes parâmetros do vórtice, e o número de vórtices com estes valores diminuindo à medida que os números crescem. 75% dos anéis apresentaram Ro entre 0.06-0.1 (Figura 6d), e a média calculada para todos os vórtices foi de 0.0884. Em relação à literatura, estes valores calculados estão subestimados, assim como $V_{máx}$, haja vista que os valores de Ro para os VCNB estão geralmente entre $-0.4 < Ro < -0.1$ (RICHARDSON *et al.*, 1994; FRATANTONI *et al.*, 1995; CASTELÃO; JOHNS, 2011). Neste trabalho, os maiores valores de Ro foram obtidos para os momentos de formação do vórtice, o que será detalhado na próxima seção. Em relação à energia cinética, grande parte dos vórtices apresentou EC entre 1.05-3.70 m^2/s^2 . Esta parte corresponde à 82% do número de vórtices observados, onde a média de EC para os mesmos foi de 2.35 m^2/s^2 (Figura 6e). Esses valores estão de acordo com o trabalho de Didden e Schott (1993), que observaram variação entre 0.8-3.0 m^2/s^2 de energia cinética de cada vórtice para o período observado.

Figura 6 - Distribuição dos valores dos parâmetros para os vórtices encontrados.



Fonte: autoria própria.

Figura 7 - Boxplot para distribuições sazonais de *aASM* e *EC*.

EC = Energia Cinética (m^2/s^2); *aASM* = anomalia de altura da superfície do mar (cm). DJF (inverno boreal): dezembro, janeiro, fevereiro; MAM: março, abril, maio (primavera boreal); JJA: junho, julho, agosto (verão boreal); SON: setembro, outubro, novembro (outono boreal). Linha vermelha indica média. Limites da caixa azul indicam os percentis de 25% e 75%. Linhas pontilhadas pretas indicam desvio padrão. Outliers são indicados por cruz vermelha. Fonte: autoria própria.

Percebeu-se também, através da análise dos resultados observados para cada vórtice, uma possível sazonalidade nas taxas de energia cinética dos vórtices, além da *aASM* relacionada aos seus centros. A Figura 7 demonstra essa sazonalidade, onde as maiores médias observadas tanto para *EC* (Figura 7b) quanto para *aASM* (Figura 7a) são maiores nos meses de inverno boreal (DJF), enquanto que as menores nos meses de outono boreal (SON). As maiores médias verificadas foram de 12.72 cm e 4.17 m^2/s^2 e as menores 5.61 cm e 1.45 m^2/s^2 para *aASM* e *EC*, respectivamente. Nota-se que, apesar do maior número de vórtices ser encontrado nos meses de março, abril e maio (Figura 5), são nos meses anteriores que a máxima *EC* e máxima *aASM* nos centros dos vórtices são verificadas (Figura 7). Dos meses de outono para os meses de inverno boreal, estimou-se um aumento da energia cinética presente nos vórtices de aproximadamente 288%, enquanto que do inverno para o verão, a diminuição da *EC* dos anéis chegou a quase 38%. Didden e Schott (1993) apontaram para uma redução de 70% entre a *EC*

de janeiro em relação aos meses de verão. No caso da *aASM* o aumento médio da anomalia do outono para o inverno boreal foi de 227%, enquanto que do inverno para o verão a diminuição na *aASM* foi de aproximadamente 30%.

Por fim, foram aplicadas correlações entre os dados dos parâmetros analisados (Tabela 1). Os resultados destas correlações estão descritos na Tabela 1. Dos resultados, apenas 3 apresentaram correlações positivas, sendo estas: $R_{máx}$ x EC ; $V_{máx}$ x Ro ; $V_{máx}$ x EC . $V_{máx}$ mostrou correlação positiva com Ro , onde aproximadamente 69% dos resultados de um eram explicados pelo outro. A maior correlação observada foi entre $V_{máx}$ e a energia cinética, onde aproximadamente 80% dos valores obtidos estavam correlacionados. EC mostrou também correlação de 71% com os resultados para $R_{máx}$. É curioso observar também na Tabela 1 que a máxima *aASM* não apresentou correlação significativa com nenhum outro parâmetro.

Tabela 1 - Correlações (R^2) entre os parâmetros analisados.

Parâmetros	$R_{máx}$ (km)	$V_{máx}$ (m/s)	Ro	EC (m^2/s^2)	$aASM$ (m)
$R_{máx}$ (km)	1,00				
$V_{máx}$ (m/s)	0,29	1,00			
Ro	-0,25	0,69	1,00		
EC (m^2/s^2)	0,71	0,80	0,30	1,00	
$aASM$ (m)	-0,02	0,37	0,02	0,18	1,00

n: 83, α : 0.05, P: < 0.001, *gl: 82.

*Graus de Liberdade

As correlações significativas são apresentadas em negrito. Fonte: autoria própria.

6.3 – Estudos de Caso

A utilização do AMEDA nesse estudo permitiu: a identificação da trajetória dos vórtices da CNB; a observação dos eventos de fusão entre os grandes anéis; além da presença de pequenos vórtices ciclônicos e anticiclônicos na área de estudo. As trajetórias identificadas e traçadas pelo Algoritmo, embora bastante úteis, nem sempre apresentavam alta confiabilidade, haja vista que determinados pontos iniciais das trajetórias (i.e. ponto de formação do vórtice) apresentavam algumas variações de posição entre uma semana e a sua subsequente. No entanto, foi possível verificar a exata trajetória que os vórtices tomaram através da observação contínua (semana a semana) da evolução dos mesmos. Foram observados poucos eventos de interação entre vórtices (aproximadamente 12 eventos), com a maioria ocorrendo entre vórtices da CNB e pequenos vórtices provenientes de leste. Estes últimos se localizavam, em geral, acima da linha de 10°N de latitude, e migravam de leste para oeste, interagindo ocasionalmente com os vórtices da CNB. Apenas dois eventos de fusão entre vórtices da CNB foram observados: entre o V25 e V26 (Apêndice A), que se fundiram em fevereiro de 1997; e entre o V45 e o V46

(Apêndice A), que se fundiram em fevereiro de 2001. Desta forma, foram utilizados 4 vórtices como estudos de caso, dois para análise da trajetória dos mesmos em diferentes estações do ano (V36 e V64), e dois para observação do evento de fusão entre os mesmos (V45 e V46). Estes estudos de caso são detalhados no tópico seguinte.

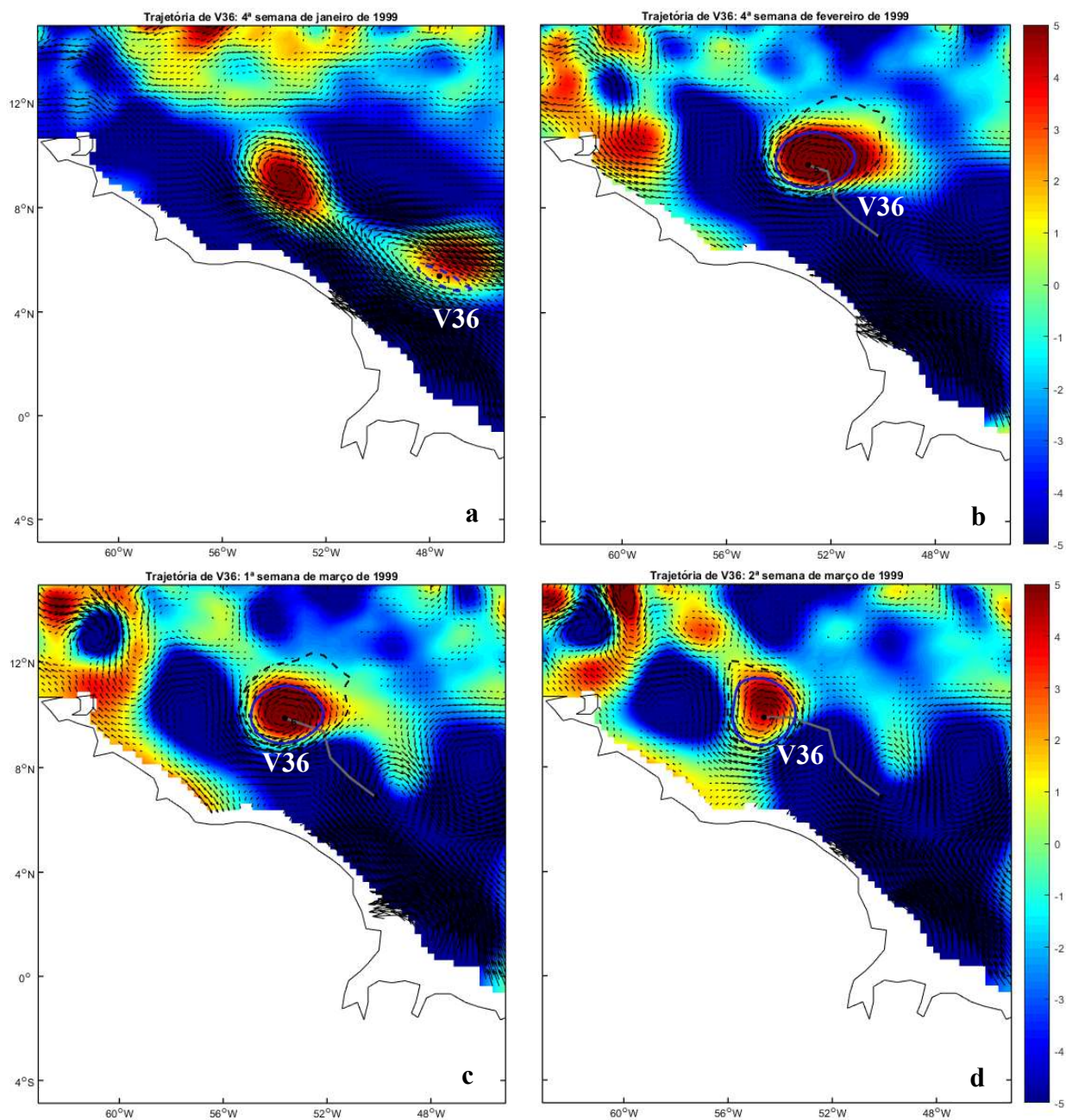
6.3.1 – Análise da trajetória de vórtices em estações do ano distintas

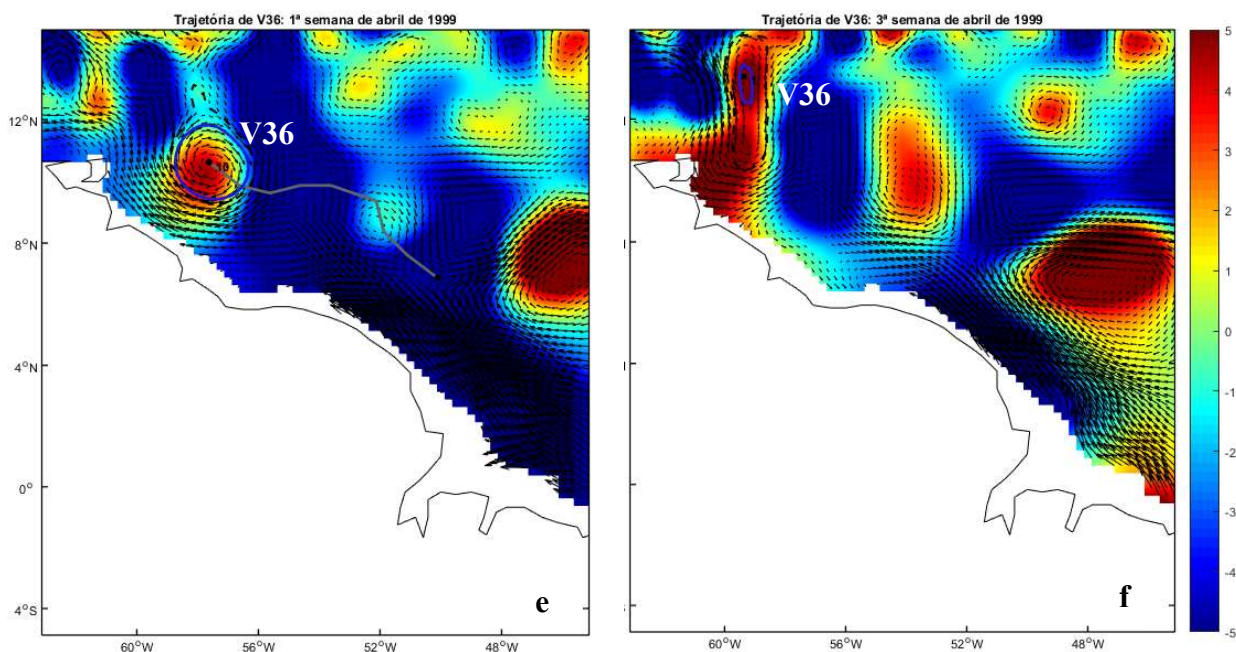
Dois vórtices (V36 e V64) foram escolhidos como exemplos para a demonstração do funcionamento do AMEDA na detecção da trajetória de vórtices. Os mesmos foram escolhidos por serem os que tiveram suas trajetórias representadas mais fielmente. Outro estudo utilizou o mesmo algoritmo também para detecção da trajetória de tais estruturas (IOANNOU *et al.*, 2018). As velocidades médias de translação (V_{mtr}) de cada vórtice também foram calculadas. Estima-se que os anéis liberados pela CNB apresentam velocidade de translação entre 7-20 km/dia (DIDDEN; SCHOTT, 1993; FRATANTONI *et al.*, 1995; FRATANTONI; GLICKSON, 2002; GONI; JOHNS, 2003; FRATANTONI; RICHARDSON, 2006). Além disso, procurou-se selecionar estudos de caso de vórtices de diferentes épocas do ano (V36 foi formado em janeiro, enquanto que V64 foi formado em junho), para identificar se houveram diferenças na trajetória e/ou em sua velocidade de translação. Para a representação das trajetórias dos dois vórtices escolhidos (V36 e V64) foram removidas quaisquer representações de outros vórtices ou de suas trajetórias nas semanas de ocorrência dos escolhidos, de forma que apenas o vórtice analisado tivesse destaque (Figura 8 e Figura 9). Tanto para V36, quanto para V64, foram plotados os momentos de formação (Figura 8a e Figura 9a), as semanas de evolução, onde os mesmos são intensificados (Figura 8b-e e Figura 9b-e), além dos momentos de enfraquecimento (Figura 8f e Figura 9f).

V36 apresentou duração de 13 semanas, enquanto que V64 durou 16 semanas (Apêndice A). A Figura 8 ilustra seis dessas semanas de V36, onde é possível perceber o surgimento do vórtice em aproximadamente 5°N e 48°W, proveniente da retroflexão da CNB (Figura 8a). Posteriormente, observa-se o momento de evolução do vórtice, que migra para noroeste, se afastando da costa (Figura 8b). Um comportamento verificado pela Figura 8 foi o desvio para norte que a trajetória do vórtice realizou ao atingir ~ 8°N e 53°W, onde a trajetória só retoma sua direção inicial (para noroeste) ao atingir entre 9-10°N (Figura 8). Ao retomar sua direção inicial da trajetória, V36 vai perdendo força à medida que se aproxima das Antilhas, onde o mesmo, ao atingi-las, perde sua forma original (neste caso, alongando-se) e é dissipado (Figura 8f). Nota-se também que a trajetória indicada nas figuras não tem seu ponto inicial na posição

correta de surgimento do vórtice (Figura 8b-e). Além disso, no momento de dissipação de V36 percebe-se que não há a indicação da trajetória do mesmo até aquele ponto (Figura 8f).

Figura 8 - Trajetória de V36 nas 6 semanas no ano de 1999.



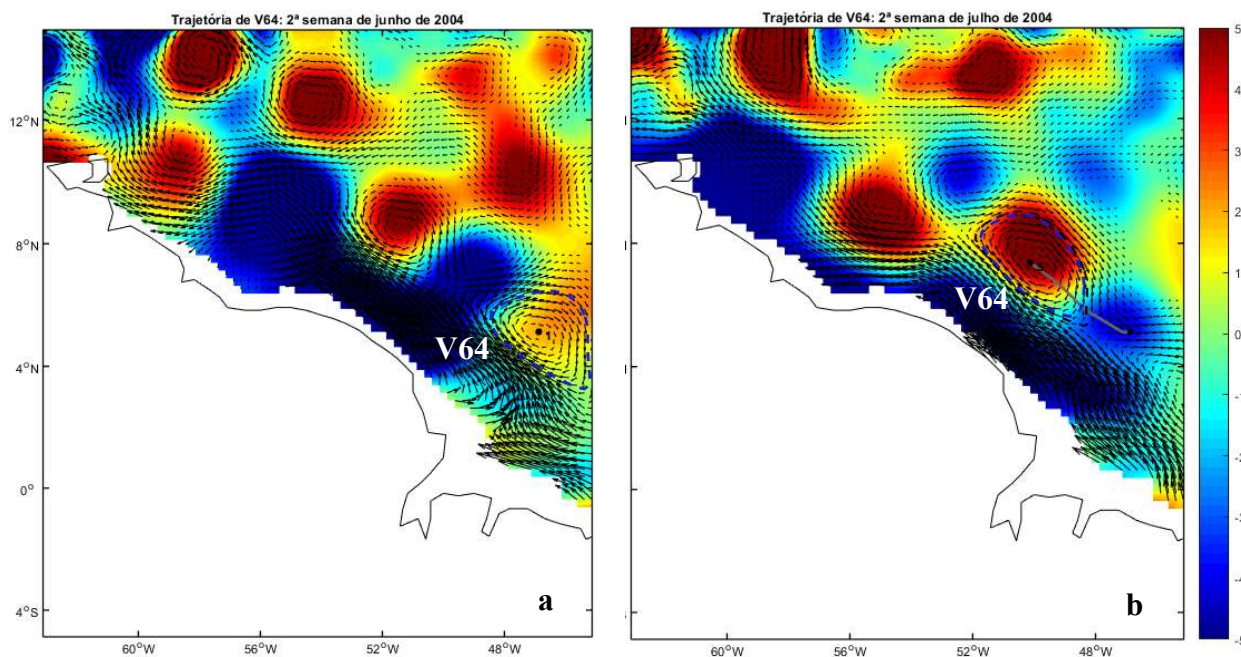


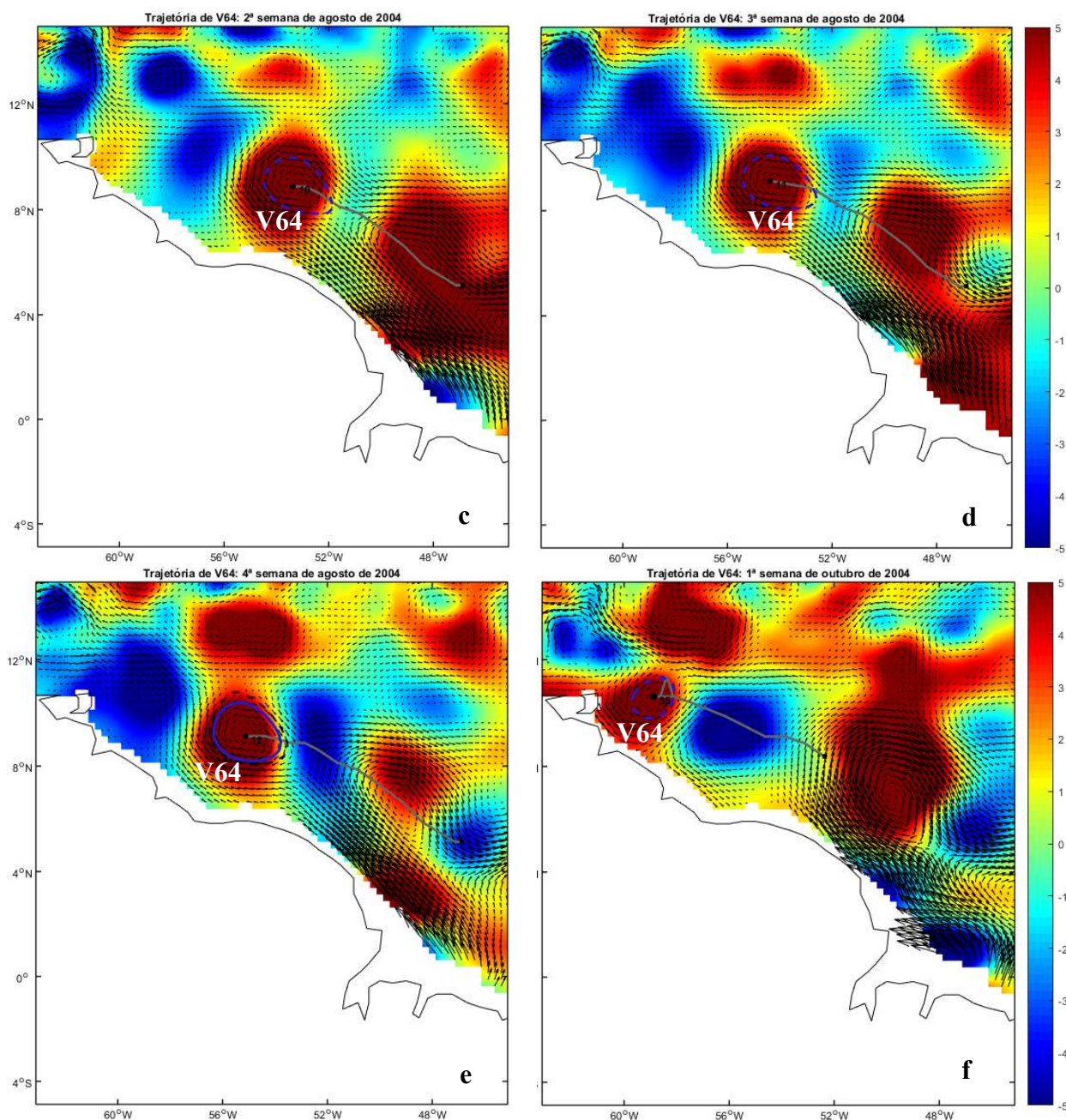
a: 4ª semana de janeiro; b: 4ª semana de fevereiro; c: 1ª semana de março; d: 2ª semana de março; e: 1ª semana de abril; f: 3ª semana de abril. Pontos pretos marcam posição inicial e atual do centro do vórtice. Setas pretas indicam direção do fluxo de corrente geostrófica. Contorno cheio azul indica posição do $R_{máx}$, ou seja, onde ocorre a maior $V_{máx}$. Contorno pontilhado preto indica raio externo do vórtice. Contorno pontilhado azul indica que $R_{máx}$ é equivalente ao contorno externo do vórtice. Linha cinza indica trajetória do vórtice. Escala de cor indica aASM, dada em centímetros (cm). Fonte: autoria própria.

A Tabela 2 resume as semanas analisadas para cada vórtice (V36 e V64), além dos valores obtidos para todos os parâmetros em cada semana de análise. Em suas 13 semanas de duração, o máximo valor de Ro observado para V36 ocorreu no momento de sua formação, na 4ª semana de janeiro de 1999, e foi de 0.1792 (Tabela 2) (Figura 8a). O momento de máximo de $aASM$ (8.7500 cm), por sua vez, coincidiu com o momento de maior $R_{máx}$ (138.6629 km), além também de máxima $V_{máx}$ (0.3245 m/s), e, conseqüente, maior EC (2.8278 m²/s²) (Tabela 2). Isto ocorreu na 4ª semana de fevereiro de 1999 (Figura 8b). Desta forma, acredita-se que a máxima intensificação de V36 ocorreu no mesmo momento em que o vórtice se separou mais da costa, alterando sua trajetória de noroeste para norte, até uma latitude entre 9°-10°N, onde retoma a direção noroeste inicial. Destaca-se também a considerável e brusca redução no $R_{máx}$, $V_{máx}$, e na EC à medida que o vórtice se aproxima das Antilhas (3ª semana de abril de 1999) (Figura 8f). Nesta semana, o $R_{máx}$, $V_{máx}$ e a EC , antes variando entre 130-140 km, 0.25-0.35 m/s, e 1.5-3.0 m²/s², foram reduzidos à 39.5626 km, 0.1417 m/s, e 0.0589 m²/s², respectivamente, demonstrando enfraquecimento do mesmo. V36 percorreu aproximadamente 1564 km em 13 semanas, o que implica em uma velocidade média de translação ~17.19 km/dia.

A Figura 9 mostra seis das 16 semanas de duração de V64, no ano de 2004. Na análise deste vórtice, percebe-se que a sua trajetória conseguiu ser bem destacada, indicando corretamente os pontos de início e de posição do centro do anel em praticamente todas as semanas (Figura 9a-e). Apenas a Figura 9f que apresentou uma trajetória traçada a partir de outro ponto que não o inicial. A formação de V64 ocorreu antes de 48°W (Figura 9a), em $\sim 5^{\circ}\text{N}$, e sua migração apresentou padrão bem característico. Diferentemente de V36, que variou a direção de sua trajetória, V64 apresentou uma direção constante de translação na direção noroeste. Além disso, V64 migrou com trajetória mais próxima à costa do que o vórtice analisado anteriormente. Por fim, ao atingir o extremo norte do continente sul-americano, na região muito próxima às Antilhas, notou-se que V64 fez um movimento para norte, retornando à posição na semana seguinte, quando se dissipou. Nota-se este comportamento na Figura 9f, onde o traçado cinza para norte do centro do vórtice indica que ele migrou entre estes dois pontos nas últimas duas semanas de permanência.

Figura 9 - Trajetória de V64 nas 6 semanas no ano de 2004.





a: 2ª semana de junho; b: 2ª semana de julho; c: 2ª semana de agosto; d: 3ª semana de agosto; e: 4ª semana de agosto; f: 1ª semana de outubro. Pontos pretos marcam posição inicial e atual do centro do vórtice. Setas pretas indicam direção do fluxo de corrente geostrófica. Contornos cheios azuis indicam posição do $R_{máx}$, ou seja, onde ocorre a maior $V_{máx}$. Contornos pontilhados pretos indicam raio externo do vórtice. Contornos pontilhados azuis indica que $R_{máx}$ é equivalente ao contorno externo do vórtice. Linha cinza indica trajetória do vórtice. Escala de cor indica $aASM$, dada em centímetros (cm). Fonte: autoria própria.

De forma semelhante à V36, V64 também apresentou o máximo Ro (0.1323) no momento de sua formação, na 2ª semana de junho de 2004 (Figura 9a). Nesta mesma semana observou-se também o máximo de $R_{máx}$ (164.7386 km). Em suas 16 semanas de duração, o vórtice percorreu aproximadamente 1455 km. Desta forma, a V_{mtr} aproximada foi de 12.99

km/dia. Por outro lado, a semana de ocorrência de máxima *aASM* (i.e. 2ª semana de agosto de 2004, com *aASM* de 10.6417 cm) não coincidiu com os máximos de *Vmáx*, *Rmáx* e *EC* (Tabela 2), diferentemente de V36. O máximo de *Vmáx* calculado foi de 0.3086 m/s, na mesma semana que o máximo de *EC* (3.3119 m²/s²), ou seja, 2ª semana de julho de 2004 (Figura 9b). Haja vista que neste estudo considera-se o máximo de *aASM* como indicador de intensificação dos vórtices, considerou-se que V64 estava mais intensificado na 2ª semana de agosto. Destaca-se também, assim como apresentou V36, grande redução nos parâmetros de *Rmáx*, *Vmáx*, e *EC*, quando o V64 se aproxima da região do Caribe entre a 4ª semana de agosto e a 1ª semana de outubro de 2004. A redução, neste caso, foi menos brusca que a ocorrida em V36, de forma que os valores passaram de 128.1887 km, 0.2819 m/s, e 1.8526 m²/s² para 83.6315 km, 0.1468 m/s e 0.2212 m²/s², para *Rmáx*, *Vmáx* e *EC*, respectivamente.

Ao se comparar V36 e V64 observa-se que o vórtice formado em junho de 2004 estava mais relacionado às mais altas *aASM*'s positivas do que V36. Da mesma forma, nota-se que V64 possuiu também maior *Rmáx* máxima do que V36, assim como *EC*. Valores de *Vmáx* e *Ro* mostraram-se semelhantes, variando de acordo com o momento de cada vórtice. Destaca-se, por fim, os diferentes tamanhos dos vórtices nos momentos de suas formações e desaparecimentos. V36 apresentou aumento de *Rmáx* a partir da sua formação até se intensificar. O oposto ocorreu para V64, onde o máximo *Rmáx* se deu no momento de formação, com a redução deste raio à medida que o V64 ganhava força (Tabela 2). Em relação à dissipação dos vórtices, V36 apresentou redução de, aproximadamente, 70% em seu *Rmáx* na semana em que interagiu com as Antilhas (Figura 8e-f). Já V64, ao atingir o extremo norte da costa do Brasil, reduziu *Rmáx* em, aproximadamente, 35% (Figura 9e-f). Destaca-se, por fim, que, através do cálculo da anomalia de *TSM*, realizado da mesma forma que o descrito para *aASM*, indicou que em janeiro de 1999, momento de ocorrência do V36, a anomalia de *TSM* era positiva (0.2-0.6 °C), enquanto que em junho de 2004, momento de ocorrência de V64, a anomalia de *TSM* observada foi negativa (-0.6 – -1.0 °C).

Tabela 2 - Valores dos parâmetros calculados para os vórtices V36 e V64.

ID	SEMANA DO MÊS	MÊS/ANO	Rmáx (km)	Vmáx (m/s)	Ro	EC (m ² /s ²)	aASM (cm)
V36	4 ^a	Jan/1999	59.2225	0.1446	0.1792	0.0926	2.0458
V36	4 ^a	Fev/1999	138.6629	0.3245	0.0962	2.8278	8.7500
V36	1 ^a	Mar/1999	134.1424	0.2918	0.0872	2.1830	7.2667
V36	2 ^a	Mar/1999	136.9284	0.2572	0.0753	1.7140	4.3208
V36	1 ^a	Abr/1999	130.4059	0.3037	0.0867	2.2607	4.2250

V36	3 ^a	Abr/1999	39.5626	0.1417	0.1065	0.0589	5.9042
V64	2 ^a	Jun/2004	164.7386	0.2832	0.1323	2.4694	2.0125
V64	2 ^a	Jul/2004	163.8864	0.3086	0.1008	3.3119	5.7875
V64	2 ^a	Ago/2004	123.8938	0.2780	0.1000	1.6279	10.6417
V64	3 ^a	Ago/2004	127.4886	0.2845	0.0967	1.9531	9.9250
V64	4 ^a	Ago/2004	128.1887	0.2819	0.0954	1.8526	9.6000
V64	1 ^a	Out/2004	83.6315	0.1468	0.0655	0.2212	7.2625

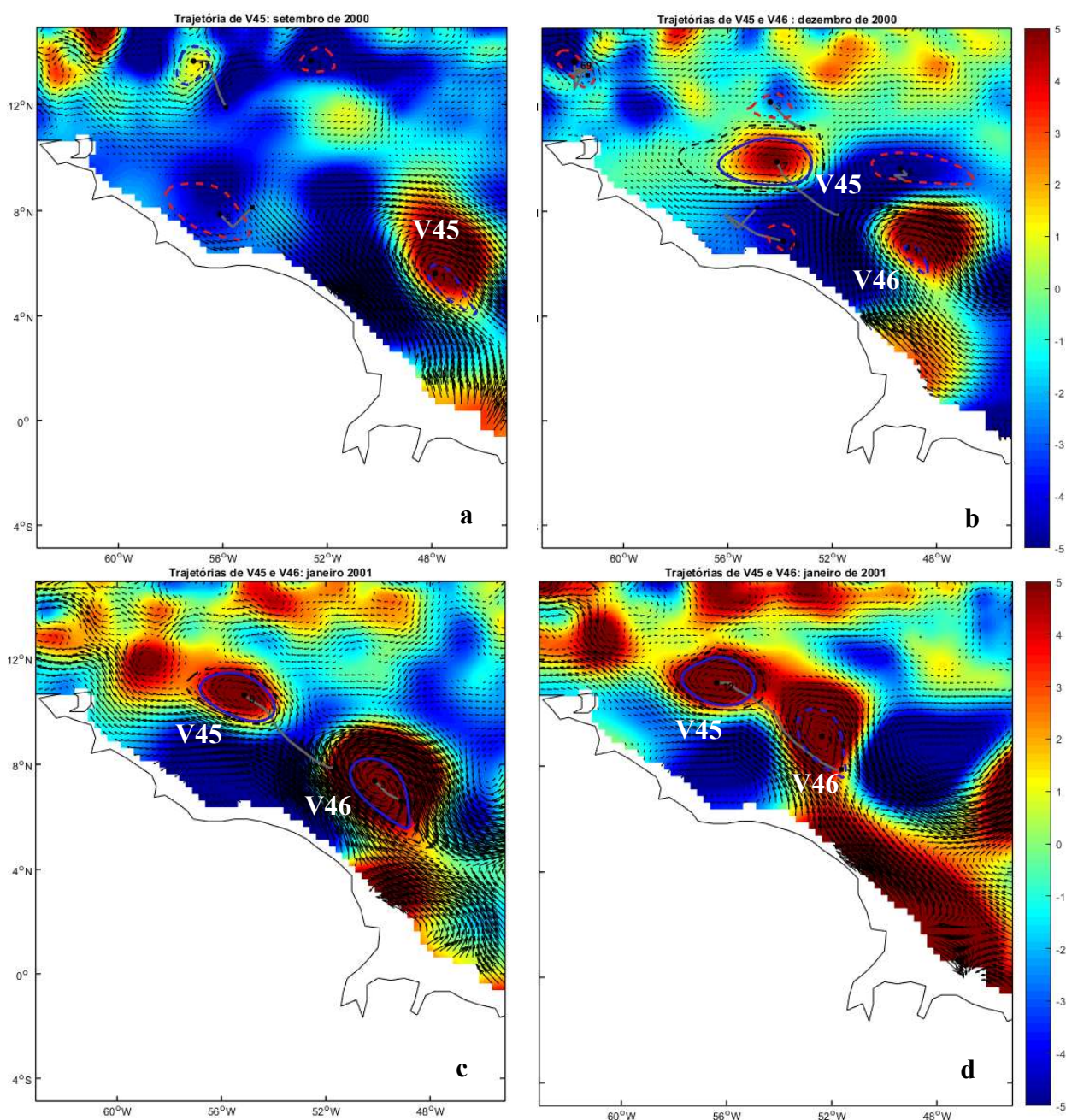
6.3.2 – Análise do evento de fusão entre vórtices

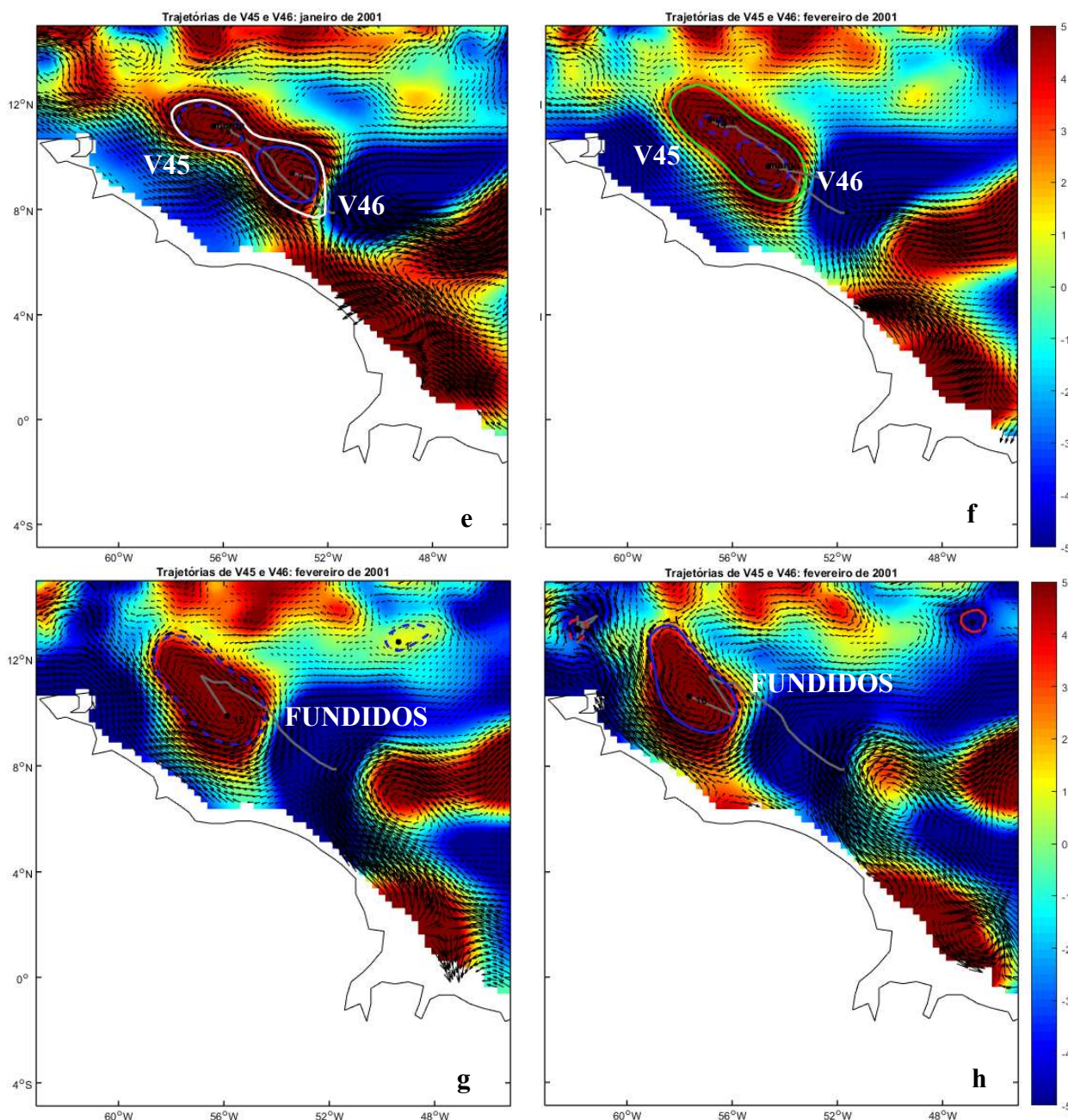
A análise de fusão entre dois vórtices da CNB foi realizada com os anéis V45 e V46. Os momentos de formação (Figura 10a-b, para V45 e V46, respectivamente), intensificação (Figura 10b-d) e enfraquecimento de cada vórtice (Figura 10e-f), além da semana de fusão entre eles (Figura 10g) e das semanas que permaneceram fundidos (Figura 10h) estão representados na Figura 10. Pode-se observar que ambos os vórtices se formaram da retroflexão na CNB, com V45 sendo gerado em aproximadamente 5°N e 48°W (Figura 10a), enquanto que V46 foi formado mais ao norte, em aproximadamente 6°N e 50°W (Figura 10b). Nestas semanas onde os vórtices foram liberados e na última semana (Figura 10a-b e 10h), nota-se a presença de pequenos vórtices ciclônicos e turbulências (em vermelho) identificadas pelo AMEDA. As trajetórias de ambos os vórtices seguiram em direção noroeste, com caminhos bem semelhantes, até se encontrarem. O contorno branco (Figura 10e) indica que nesta semana começou a haver interação entre os vórtices, onde o AMEDA não distingue se é evento de fusão ou separação de vórtices. Já o contorno verde (Figura 10f) indica o acontecimento da fusão entre V45 e V46, de forma que na semana seguinte (Figura 10g) a fusão já está consolidada e apenas um centro de vórtice é identificado. Nas semanas de interação entre vórtices sabe-se que a fusão não ocorreu ainda pois os mesmos permanecem tanto com seus centros identificados, quanto com seus contornos desenhados.

Além disso, todos os valores encontrados para os parâmetros analisados nas semanas específicas estão resumidos na Tabela 3. O V45 foi formado na 2^a semana de setembro de 2000 (Figura 10a) e durou, isoladamente, 26 semanas. O V46, por sua vez, foi formado na 4^a semana de dezembro de 2000 (Figura 10b) e permaneceu de maneira isolada por 11 semanas. A fusão entre tais vórtices ocorreu na 2^a semana de fevereiro de 2001. O vórtice fundido durou apenas 2 semanas antes de ser desestruturado pela ação das Antilhas (Figura 10g-h). V45 transladou 1117 km em seu período de ocorrência, enquanto que V46 percorreu 691 km. Desta forma, as velocidades médias de translação de cada um foram 6.14 km/dia e 8.97 km/dia para V45 e V46, respectivamente.

Assim como os V36 e V64 analisados anteriormente, o máximo de Ro observado para V45 (0.1995) também ocorreu na semana de sua formação (Tabela 3). No caso do V46, este máximo ocorreu na 1ª semana de janeiro de 2001, o que coincidiu também com o momento de máximos $R_{máx}$, $V_{máx}$, EC e $aASM$, que foram 0.1863, 119.8234 km, 0.4168 m/s, 3.1455 m²/s² e 15.2042 cm, respectivamente (Tabela 3). Para V45, os máximos $R_{máx}$ (137.8384 km) e EC (1.2523 m²/s²) foram observados também em dezembro de 2000 (Figura 10b). No entanto, o máximo de $aASM$ (9.2083 cm) ocorreu no mesmo momento que o máximo de $V_{máx}$ (0.2188 m/s), na 3ª semana de janeiro de 2001 (Tabela 3).

Figura 10 - Trajetórias de V45 e V46 em 8 semanas nos anos de 2000 e 2001.





a: 2ª semana de setembro; b: 4ª semana de dezembro; c: 1ª semana de janeiro; d: 3ª semana de janeiro; e: 4ª semana de janeiro; f: 1ª semana de fevereiro; g: 2ª semana de fevereiro; h: 3ª semana de fevereiro. Pontos pretos marcam posição inicial e atual do centro do vórtice. Setas pretas indicam direção do fluxo de corrente geostrófica. Contornos cheios indicam posição do $R_{m\acute{a}x}$, ou seja, onde ocorre a maior $V_{m\acute{a}x}$. Contornos pontilhados pretos indicam raio externo do vórtice. Contorno pontilhado colorido indica que $R_{m\acute{a}x}$ é equivalente ao contorno externo do vórtice. Vermelho indica vórtice ciclônicos e azul anticiclônicos. Contorno branco indica interação com possível fusão e separação. Contorno verde indica que apenas fusão está acontecendo. Linha cinza indica trajetória do vórtice. Escala de cor indica aASM, dada em centímetros (cm). Fonte: autoria própria.

Nota-se uma redução do tamanho tanto de V45 quanto de V46 à medida que os mesmos se aproximam um do outro (passam de valores de $R_{m\acute{a}x}$ de 118.8460 km e 119.8234 km para

44.1424 km e 90.2633 km, respectivamente) (Figura 10). Estas diminuições nos determinados diâmetros dos vórtices são ainda mais aparentes na semana que antecede a semana de fusão, ou seja, a 1ª semana de fevereiro de 2001 (Figura 10f). Além disso, percebe-se também que a EC de ambos os anéis é reduzida consideravelmente entre a última semana de janeiro e a primeira semana de fevereiro de 2001 (Tabela 3). Outro resultado observado foi o grande aumento no diâmetro do vórtice fundido em relação aos isolados (Figura 10g). O $R_{máx}$ do V45, por exemplo, aumentou em 30% em relação ao máximo observado para o vórtice isolado, enquanto que para V46 este aumento, em relação ao máximo já observado anteriormente, foi de 41%. O vórtice fundido apresentou valores de $R_{máx}$ e EC maiores do que os encontrados tanto em V45 quanto em V46 quando isolados (197.5362 km e 3.6622 m²/s², respectivamente) (Tabela 3). Valores de $V_{máx}$ e $aASM$ não apresentaram variação em relação aos mesmos obtidos com os vórtices solitários (Tabela 3). Apesar de $V_{máx}$ apresentar um aumento com a fusão, o valor obtido não é superior a alguns encontrados com os vórtices isolados. Destaca-se, por fim, que os Ro 's encontrados para o vórtice fundido (0.0555 na 2ª semana e 0.0512 na 3ª semana de fevereiro de 2001) foram menores do que qualquer outro valor obtido para cada vórtice quando separados, apesar de V45 apresentar valores em torno de 0.06 (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores dos parâmetros calculados para V45 e V46 isolados e após fusão.

ID	SEMANA DO MÊS	MÊS/ANO	$R_{máx}$ (km)	$V_{máx}$ (m/s)	Ro	EC (m ² /s ²)	$aASM$ (cm)
V45	2ª	Set/2000	74.3759	0.2115	0.1995	0.2967	6.0958
V45	4ª	Dez/2000	137.8384	0.2117	0.0616	1.2523	5.1625
V46	4ª	Dez/2000	45.3865	0.1059	0.1391	0.3162	5.0875
V45	1ª	Jan/2001	118.8460	0.1865	0.0585	0.6470	7.0250
V46	1ª	Jan/2001	119.8234	0.4168	0.1863	3.1455	15.2042
V45	3ª	Jan/2001	119.2142	0.2188	0.0654	1.0039	9.2083
V46	3ª	Jan/2001	109.5716	0.2499	0.0988	0.9940	11.5750
V45	4ª	Jan/2001	102.0905	0.1955	0.0682	0.5625	9.2000
V46	4ª	Jan/2001	117.1911	0.2912	0.1049	1.4934	10.9667
V45	1ª	Fev/2001	44.1424	0.1207	0.0953	0.0406	8.9917
V46	1ª	Fev/2001	90.2633	0.2011	0.0916	0.3855	9.6292
Fundido	2ª	Fev/2001	197.5362	0.2736	0.0555	3.6622	9.6375
Fundido	3ª	Fev/2001	176.5008	0.2424	0.0512	2.2020	8.7792

7 DISCUSSÃO

A análise de diversos parâmetros dos vórtices da CNB, baseada em dados de reanálise, e por um período de tempo dessa dimensão (i.e. 15 anos) nunca havia sido realizada antes. Jochumsen *et al.* (2010) realizou um tipo semelhante de análise, também por 15 anos, utilizando, porém, dados de modelo. O número médio de vórtices identificados por ano concordou com o já observado na literatura, que indica a presença de 3-7 vórtices por ano (GONI; JOHNS, 2001; FRATANTONI; GLICKSON, 2002; GARRAFFO *et al.*, 2003; GARZOLI *et al.*, 2003; GONI; JOHNS, 2003; JOHNS *et al.*, 2003; FRATANTONI; RICHARDSON, 2006; JOCHUMSEN *et al.*, 2010). Destaca-se aqui que até mesmo as datas em que os vórtices foram identificados no trabalho de Richardson e Glickson (2002) foram iguais as neste trabalho (ver Apêndice A). Desta forma, os resultados observados neste trabalho indicam, possivelmente, para uma boa confiabilidade na metodologia utilizada na identificação dos vórtices da CNB através do AMEDA. Ainda, estima-se uma possível variação decenal (aproximadamente entre 10-12 anos) na taxa de geração de vórtices, onde a cada período de tempo deste o número de vórtices gerados se repete (Figura 4). No entanto, o período de tempo analisado não é suficiente para se afirmar isso. Assim como estudos anteriores (CASTELÃO; JOHNS, 2011), o presente trabalho também observou a presença de pequenos vórtices ciclônicos.

A variabilidade interanual observada neste trabalho foi encontrada também por outros autores (GONI; JOHNS, 2001; FRATANTONI; GLICKSON, 2002; JOHNS *et al.*, 2003; FRATANTONI; RICHARDSON, 2006; JOCHUMSEN *et al.*, 2010). Acredita-se que quanto maior a latitude de penetração da retroflexão da CNB, maior é a chance de liberação de vórtice (GARZOLI *et al.*, 2003), indicando que os anos em que a CNB atingir mais vezes a sua máxima latitude seriam os anos com mais vórtices liberados. Desta forma, uma análise detalhada da posição de retroflexão da CNB nos anos analisados poderia dar um indicativo desta relação.

Destaca-se aqui, também, a sazonalidade observada nas taxas de geração dos vórtices, que também foi encontrada por outros autores (GARRAFFO *et al.*, 2003; JOCHUMSEN *et al.*, 2010), mas que não é unanimidade nos trabalhos analisados (GONI; JOHNS, 2001; JOHNS *et al.*, 2003). Tal sazonalidade aponta para uma maior taxa de geração de vórtices nos meses de primavera boreal (março-maio). A estimativa de 61% de redução na taxa de geração de vórtices dos meses de março-maio para os meses de setembro-novembro foi superestimada em relação a outro trabalho, que estimou redução de 30% (JOCHUMSEN *et al.*, 2010). Esta redução de apenas 30% é devida à maior taxa de geração de vórtices subsuperficiais nos meses de

setembro-novembro (JOCHUMSEN *et al.* 2010), vórtices estes não analisados no presente trabalho, gerando uma maior porcentagem de redução. De fato, Johns *et al.* (2003) e Garraffo *et al.* (2003) apontaram também para uma maior ocorrência de vórtices subsuperficiais mais rasos nos meses de verão e outono boreal, quando o número de vórtices superficiais é menor, enquanto que mais vórtices superficiais profundos ocorrem no inverno e primavera. Ainda, aponta-se que vórtices subsuperficiais e profundos tem suas maiores taxas de geração em estações que não se sobrepõem, com a geração dos últimos ocorrendo no momento que a CNB tem intensidade levemente maior, além de um maior gradiente vertical de velocidade entre superfície e 500m de profundidade (GARRAFFO *et al.* 2003; JOHNS *et al.*, 2003). Imagina-se que a sazonalidade observada na taxa de geração dos VCNB's possa se relacionar com a migração sazonal da ZCIT e, conseqüentemente, com a posição e intensidade da retroflexão da CNB. Jochumsen *et al.* (2010) indicou que uma conexão entre a taxa de geração de vórtices e a posição da retroflexão da CNB não é tão óbvia, haja vista que a posição da retroflexão é mais ao norte entre setembro e fevereiro, meses de ocorrência tanto de mínimos quanto de máximos de geração. No entanto, destaca-se que máxima retroflexão ocorre entre junho-novembro, exatamente o período de ocorrência das menores taxas de liberação de vórtices, enquanto que a retroflexão praticamente ausente entre dezembro e maio coincidem com os meses de maior liberação de vórtices.

Além disso, as análises permitiram a verificação de maiores energias cinéticas e anomalias de ASM na primeira metade do ano. Apesar de coincidir também com os períodos de mínima retroflexão e máxima liberação de vórtices, os meses exatos que apresentaram os máximos de *EC* e *aASM* (i.e. dezembro, janeiro, fevereiro) não correspondem aos meses de máxima geração de anéis (dezembro, janeiro, fevereiro). Este resultado indica que os vórtices formados entre dezembro-fevereiro apresentam maiores *EC* e *aASM* associados a eles do que os formados entre março-maio. Didden e Schott (1993) também observaram maiores *EC* e *aASM* entre os meses de dezembro e fevereiro de 1988 e 1989, mas não apontaram para nenhuma explicação aparente, relacionando o resultado apenas com a maior presença de vórtices nestes meses. Estima-se que haja uma relação não só entre o número de vórtices gerados, mas também do tipo de vórtice com as maiores *EC* e *aASM*. Desta forma, acredita-se que os vórtices profundos gerados no inverno boreal possuam maior *EC* e estejam associados à maiores valores de *aASM*, haja vista que mais vórtices profundos são gerados na primeira metade do ano, com a grande parte dos subsuperficiais gerados no outono boreal, e que os últimos são menores em tamanho que os primeiros (GARRAFFO *et al.* 2003). Como já demonstrado, *R_{máx}* e *EC* possuem, de fato, correlação, onde os maiores valores de *EC* estão provavelmente relacionadas aos maiores

Rmáx's. Além disso, destaca-se que os vórtices de subsuperfície apresentam seu núcleo de velocidade em ~200m de profundidade, com esta velocidade sendo praticamente nula na superfície (GARRAFFO *et al.* 2003). Esta velocidade mais profunda pode não gerar grande efeito na superfície, fazendo com que a assinatura de *aASM* para vórtices deste tipo não seja tão aparente.

Os resultados obtidos para os parâmetros indicaram que *Ro* e *Vmáx* apresentaram valores subestimados em relação a outros trabalhos (FRATANTONI; JOHNS, 1995; CASTELÃO; JOHNS, 2011). De fato, por *Vmáx* computado não coincidir com o momento de máxima velocidade azimutal do vórtice, e sim com o momento de máxima anomalia de *ASM* (que não são necessariamente os mesmos momentos), pode-se ter ocorrido uma observação de valores de *Vmáx* menores do que o esperado. Consequentemente, considerando-se que os *Rmáx*'s estimados correspondem aos encontrados na literatura, os valores de *Ro* foram, da mesma forma que *Vmáx*, subestimados. Além disso, observou-se através dos estudos de caso, que, em geral, o valor de *Ro* era máximo no momento de formação dos vórtices. Este fato aponta para uma máxima velocidade azimutal dos anéis no momento de sua formação. Das correlações observadas, duas eram esperadas: *Vmáx* x *Ro* e *Vmáx* x *EC*, já que os cálculos de *Ro* e de *EC* são baseados em *Vmáx*. Desta forma, tais relações apontam que quanto maior a velocidade de rotação do vórtice em torno de seu próprio eixo, maior também será sua intensidade (medida por *Ro*) e sua energia cinética. Destaca-se aqui a relação entre *Rmáx* x *EC*, não observada anteriormente em nenhum trabalho, e que indica que quanto maior o raio correspondente à máxima de velocidade azimutal do vórtice (que não é necessariamente o raio do vórtice), maior a energia cinética que o mesmo possui. Este resultado pode permitir a realização de novos estudos que analisem tal relação.

Em relação à análise das trajetórias e evolução dos vórtices, observou-se, através dos estudos de caso, que os mesmos possuem uma trajetória bem definida à noroeste na costa norte do Brasil. Apesar disso, é importante ressaltar que os vórtices são independentes entre si, e que, de acordo com as condições físicas de formação e de evolução dos mesmos, eles podem apresentar trajetórias e momentos variáveis de intensificação. V36 e V64, por exemplo, apresentaram características distintas de formação e desenvolvimento, onde o primeiro se forma com grandes dimensões e, à medida que se intensifica, diminui seu tamanho, e o segundo se forma com pequenas dimensões e cresce com sua intensificação. Destaca-se também que os vórtices podem possuir diferentes locais de dissipação. V36 apresentou alongamento ao atingir as Antilhas antes de se desfazer. Já V64 migrou tão próximo à costa que se dissipou no limite entre o extremo norte da América do Sul e as Ilhas Antilhas. Por fim, estima-se que a maior

velocidade de V36 em relação à V64 esteja relacionada às anomalias positivas e negativas de *TSM* em janeiro de 1999 e junho de 2004, respectivamente, já que quanto maior a temperatura do mar, menor sua densidade e, conseqüentemente, maior a velocidade da corrente, o que pode gerar maior V_{mtr} .

A estrutura de velocidade de um vórtice, estudada por Castelão e Johns (2011), indica a presença de um escudo dinâmico separando os VCNB's em uma parte interna e uma parte externa. Este escudo dinâmico é gerado por vorticidades opostas entre a parte interna do anel (vorticidade negativa) e a parte externa (vorticidade positiva), e desta forma, espera-se que eles sejam de grande importância nos eventos de interação entre os vórtices. Baseado nisso, acredita-se que os VCNB's não possuam muita capacidade de fusão, já que vórtices com escudos de vorticidade são improváveis de se fundirem (VALCKE; VERRON, 1997). Desta forma, a escassez de eventos de interação entre vórtices na região da CNB observada neste trabalho já era esperada. Estudos de eventos de fusão entre vórtices são muito importantes, pois eles podem influenciar substancialmente um ao outro, além de tais interações influenciarem também o tempo e posição que a água presa pelo vórtice será liberada (RICHARDSON *et al.* 2006). O estudo de caso analisado permitiu a observação da evolução dos vórtices e interação entre os mesmos. Primeiramente, ressalta-se que V46 transladou numa velocidade de 3km a mais por dia em relação à V45. Assim, haja vista que ambos seguiam a mesma trajetória, foi possível que V46 atingisse V45 e que o processo de interação entre os mesmos fosse iniciado. Desta forma, já que a interação ocorreu por mais de uma semana, acredita-se que dificuldades dinâmicas para a fusão entre os dois possam ter ocorrido. Além disso, foi observado a diminuição considerável no $R_{m\acute{a}x}$ de ambos os vórtices no momento em que os mesmos estão interagindo. O que se imagina, portanto, é que, devido à presença do escudo de vorticidade, a dificuldade para a fusão entre os dois vórtices seja tamanha que os mesmos precisem permanecer mais de uma semana próximos um do outro, além de ser necessária a diminuição do tamanho de seu raio de máxima velocidade, na tentativa de redução de intensidade deste escudo, e conseqüente permissão da fusão entre os anéis.

8 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

O presente trabalho realizou a identificação e caracterização, além de uma análise da geração e propagação, dos vórtices da CNB por um período de 15 anos (1993-2007). Para tal análise, foram utilizados dados de reanálise do Global ARMOR3D e o algoritmo AMEDA, o que permitiu uma avaliação não apenas da geração e propagação dos vórtices, mas também de suas características (indicadas por parâmetros), trajetórias, e dos eventos de interação entre estes vórtices. Observou-se um total de 83 vórtices com intensa variação interanual, que demonstraram também pequena sazonalidade em sua geração. A média de anéis gerados por ano observada neste trabalho foi também verificada em outros estudos. Estima-se uma variação aproximadamente decenal na taxa de geração dos mesmos. No entanto, a escala temporal utilizada não é suficiente para afirmar-se isso, e estudos seguintes com uma escala temporal maior podem corroborar essa hipótese. Variação sazonal foi também observada na taxa de energia cinética e na anomalia de ASM relacionadas aos vórtices, o que foi indicado por outros estudos. Não se sabe afirmar ainda as causas exatas para tal sazonalidade, estima-se, no entanto, que tenha relação com os diferentes tipos de vórtices gerados nas diferentes épocas do ano, onde os vórtices profundos e que apresentariam maior EC e melhor assinatura de $aASM$ são gerados na primeira metade do ano. Futuros trabalhos podem apontar os motivos reais desta sazonalidade.

Além disso, os resultados obtidos para os parâmetros dos vórtices demonstraram-se também fiéis à literatura, especialmente se tratando da duração deles, além de $R_{m\acute{a}x}$, EC e $aASM$. Para $V_{m\acute{a}x}$ e Ro , observou-se que tais parâmetros foram subestimados em relação a outros trabalhos. Ro apresentou seu máximo no momento de geração dos vórtices, o que pode estar relacionado às máximas velocidades azimutais ainda associadas à CNB no momento de geração do mesmo. No entanto, imagina-se que essa subestimação ocorreu devido aos momentos de escolha serem os de máxima assinatura na superfície, aqui indicada por $aASM$, que não são necessariamente os momentos de máxima $V_{m\acute{a}x}$ e, conseqüentemente, máximo Ro . Observou-se também correlação entre algumas variáveis ($V_{m\acute{a}x}$ x Ro ; $V_{m\acute{a}x}$ x EC ; $R_{m\acute{a}x}$ x EC) sendo as primeiras as mais esperadas, devido a Ro e EC estarem em função de $V_{m\acute{a}x}$, e a segunda ainda não retratada pela literatura. Futuros estudos podem apontar para a importância desta última relação, e de que forma ela pode ser utilizada na estimativa de transferência de energia, entre HS e HN, além de uma análise temporal maior permitir um melhor estabelecimento das correlações observadas neste trabalho.

Notou-se também que a trajetória, em geral, seguida pelos vórtices é muito semelhante, migrando em direção noroeste, geralmente próximos à costa. V36, porém, apresentou uma trajetória momentânea para norte. Ressalta-se também a importância de se estimar as velocidades de translação de cada vórtice, haja vista que ela determina também qual a duração do mesmo. Acredita-se, baseado nos estudos de caso, que vórtices que migram em situações de altas TSM's apresentam velocidades de translação maiores dos que os que transladam em baixas TSM's. Estudos mais detalhados das condições físicas do oceano nos momentos de translação dos vórtices podem indicar com maior clareza essa relação entre TSM e velocidade de translação. Além disso, a V_{mtr} também se mostrou importante para o momento de interação entre V45 e V46, haja vista que V46 transladou mais rapidamente que V45. No momento de fusão ocorreu diminuição no tamanho de cada vórtice, além desta interação durar duas semanas, indicando uma dificuldade entre os vórtices interagirem. Estima-se que essa dificuldade seja devida a presença de um escudo externo de vorticidade oposta (positiva) à vorticidade do anel (negativa), onde os vórtices teriam que vencer tal barreira dinâmica para conseguir sucesso no momento da fusão. O vórtice fundido apresentou dimensões muito superiores às observadas nos vórtices isolados, o que aponta também para um maior transporte de massa d'água e, conseqüentemente, de características inerentes a essa massa. Futuros estudos podem demonstrar mais precisamente os efeitos e impactos que a fusão entre vórtices podem causar em suas regiões de atuação. Destaca-se aqui, por fim, que cada vórtice apresentou dinâmica e características únicas, o que indica dificuldade no estabelecimento de características padrões inerentes a todos eles.

De fato, diversos trabalhos apontam para a importância do estudo de vórtices de mesoescala na dinâmica física, química, geológica e biológica dos oceanos. Sabe-se que os vórtices da CNB possuem capacidade de intensificar furacões, transportar grandes volumes de água, além de calor e sal para o HN, além de, ao atingir a região do Caribe, impactar o ecossistema presente nas Antilhas. Muitos trabalhos no ANTO, com a dinâmica e estrutura vertical dos vórtices da CNB, já foram realizados, porém não focaram em uma análise temporal longa, nem nos impactos biogeoquímicos que tais anéis podem exercer na região. Acredita-se, portanto, que mais estudos biogeoquímicos (e.g. distribuição da concentração de clorofila e de zonas mínimas de oxigênio) na região de atuação dos vórtices da CNB são importantes trabalhos a serem realizados.

REFERÊNCIAS

ANGEL, M. V., M. J. R. FASHAM. Eddies and biological processes. in **Eddies in Marine Science**, edited by A. R. Robinson, p. 492–524, 1983.

ARAÚJO, M.; NORIEGA, C.; HOUNSOU-GBO, G. A.; VELEDA, D.; ARAUJO, J.; BRUTO, L.; FEITOSA, F.; FLORES-MONTES, M.; LEFÈVRE, N.; MELO, P.; OTSUKA, A.; TRAVASSOS, K.; SCHWAMBORN, R.; NEUMANN-LEITÃO, S. A Synoptic Assessment of the Amazon River-Ocean Continuum during Boreal Autumn: From Physics to Plankton Communities and Carbon Flux. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, p. 1, 2017.

ARNAULT, S. Tropical Atlantic geostrophic currents and ship drifts. **Journal of Physical Oceanography**, v.18, p.1050–1060, 1987.

BAILLEUL, F., COTTE, C., GUINET, C. Mesoscale eddies as foraging area of a deep-diving predator, the southern elephant seal. **Marine Ecology Progress Series**, v. 408, p. 251–264, 2010.

BAKUN, A. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity adaptive response and competitive advantage. **Scientia Marina**, v.70, p.105–122, 2006.

BENITEZ-NELSON, C. R., BIDIGARE, R. R., DICKEY, T. D., LANDRY, M. R., LEONARD, C. L., BROWN, S. L., NENCIOLI, F., RII, Y. M., MAITI, K., BECKER, J. W., BIBBY, T. S., BLACK, W., CAI, W.-J., CARLSON, C. A., CHEN, F., KUWAHARA, V. S., MAHAFFEY, C., MCANDREW, P. M., QUAY, P. D., RAPPE, M. S., SELPH, K. E., SIMMONS, M. P., YANG, E. J. Mesoscale eddies drive increased silica export in the subtropical Pacific Ocean. **Science**, v.316, p.1017–1021, 2007.

BOURLÈS, B., GOURIOU, Y., CHUCHLA, R. On the circulation in the upper layer of the western equatorial Atlantic. **Journal of Geophysical Research**, v.104, p.21151–21170, 1999.

CARTON J. A. Effect of seasonal surface freshwater flux on sea surface temperature in the Tropical Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v.96, p.12593–12598, 1991.

CASTELÃO, G. P.; JOHNS, W. E. Sea surface structure of North Brazil Current rings derived from shipboard and moored acoustic Doppler current profiler observations, **Journal of Geophysical Research**, 116, 2011;

CHAIGNEAU, A., A. GIZOLME, C. GRADOS. Mesoscale eddies off peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. **Progress in Oceanography**, v.79, p.106–119, 2008.

CHELTON, D. B., DE SZOEKE, R. A., SCHLAX, M. G., EL NAGGAR, K., SIWERTZ, N. Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation, **Journal of Physical Oceanography**, v.28, p.433–459, 1998.

CHELTON, D. B., M. G. SCHLAX, R. M. SAMELSON, R. A. DE SZOEKE. Global observations of large oceanic eddies. **Geophysical Research Letters**, v.34, 5p., 2007.

CHELTON, D., P. GAUBE, M. SCHLAX, J. EARLY, R. SAMELSON. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll. **Science**, v.334, p.328–332, 2011.

CIONE, J., UHLHORN, E. Sea surface temperature variability in hurricanes: Implications with respect to intensity change. **Monthly Weather Review**, v.131, p.1783–1796, 2003.

COLIN, C., BOURLES, B. Western boundary currents and transports off French Guiana as inferred from Pegasus observations. **Oceanologica Acta**, v.7(2), p.143–157, 1994.

COWEN, R. K., L. R. CASTRO. Relation of coral reef fish larval distributions to island scale circulation around Barbados, West Indies. **Bulletin of Marine Science**, v.54, p.228–244, 1994.

COWEN, R. K., S. SPONAUGLE, C. B. PARIS, K. LWIZA, J. FORTUNA, S. DORSEY. Impact of North Brazil Current rings on local circulation and coral reef fish recruitment to Barbados, West Indies. **Interhemispheric Water Exchange in the Atlantic Ocean**, G. J. Goni and P. Malanotte-Rizzoli, Eds., Elsevier Oceanographic Series, v. 68, p.443–455, 2003.

CRAWFORD, W., P. BRICKLEY, A. THOMAS. Mesoscale eddies dominate surface phytoplankton in northern Gulf of Alaska. **Progress in Oceanography**, v.75, p.287–303, 2007.

CRUZ-GÓMEZ, R., SALCEDO-CASTRO, J. Analysis of Horizontal and Vertical Ring Structure based on Analytical Model and Satellite Data: Application to the North Brazil Current Rings. **Ocean Science Journal**, v.48(2), p.161–172, 2013.

DIDDEN, N., SCHOTT, F. Eddies in the North Brazil Current Retroflection Region Observed by Geosat Altimetry. **Journal of Geophysical Research**, v.98, p.121–131, 1993.

DOGLIOLI, A. M., B. BLANKE, S. SPEICH, G. LAPEYRE. Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: Application to cape basin eddies. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v.112, 2007.

D'OVIDIO, F., DE MONTE, S., DELLA PENNA, A., COTTE, C. & GUINET, C. 2013. Ecological implications of eddy retention in the open ocean: a Lagrangian approach. **Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical**, v. 46, 254023, 21p, 2013.

DONG, C., J. C. MCWILLIAMS, Y. LIU, D. CHEN. Global heat and salt transports by eddy movement. **Nature Communications**, V.5, 3294, 6p.,2014.

FFIELD, A. Amazon and Orinoco River plumes and NBC rings: Bystanders or participants in hurricane events?. **Journal of Climate**, v.20, p.316–333, 2006.

FIEDLER, B., GRUNDLE, D. S., SCHÜTTE, F., KARSTENSEN, J., LÖSCHER, C. R., HAUSS, H., WAGNER, H., LOGINOVA, A., KIKO, R., SILVA, P., TANHUA, T., KÖRTZINGER, A. Oxygen utilization and downward carbon flux in an oxygen-depleted eddy in the eastern tropical North Atlantic. **Biogeosciences**, v.13, p.5633–5647, 2016.

FUGLISTER, F. C. Cyclonic rings formed by the Gulf Stream 1965–66. **Studies in Physical Oceanography. A Tribute to Georg Wüst on his 80th Birthday**, ed. A. L. Gordon, v.1, p.137–168, 1972.

FONSECA, C. A., G. J. GONI, W. E. JOHNS, E. J. D. CAMPOS. Investigation of the North Brazil Current retroflection and North Equatorial Countercurrent variability. **Geophysical Research Letters**, 31, 2004, doi:10.1029/2004GL020054.

FU, Y-X. Statistical tests of neutrality of mutations against population growth, hitchhiking and background selection. **Genetics**, v.147, p.915-925, 1997.

FUGLISTER, F. C., WORTHINGTON, L. V. Some results of a multiple ship survey of the Gulf Stream. **Tellus**, v.3, p.1-14, 1951.

FRATANTONI, D. M., W. E. JOHNS, T. L. TOWNSEND. Rings of the North Brazil Current: Their structure and behavior inferred from observations and a numerical simulation. **Journal of Geophysical Research**, v.100, p.10633-10654, 1995.

FRATANTONI, D. M., W. E. JOHNS, T. L. TOWNSEND, H. E. HURLBURT. Low-latitude circulation and mass transport pathways in a model of the tropical Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v.30, p.1944–1966, 2000.

FRATANTONI, D. M., GLICKSON, D. A. North Brazil Current Ring generation and evolution observed with SeaWiFS. **Journal of Physical Oceanography**, v.32, p.1058–1074, 2002.

FRATANTONI, D. M., P. L. RICHARDSON. The evolution and demise of North Brazil Current rings. **Journal of Physical Oceanography**, v.36, p.1241–1264, 2006.

FRENGER, I., N. GRUBER, R. KNUTTI, M. MÜNNICH. Imprint of Southern Ocean eddies on winds, clouds and rainfall. **Nature Geosciences**, v.6(8), p.608–612, 2013.

GANGOPADHYAY, A., ROBINSON, A. Feature oriented regional modelling of Oceanic Fronts. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v.36, p.201-232, 2002.

GARRAFFO, Z., W. JOHNS, E. CHASSIGNET, G. GONI. North Brazil Current rings and transport of southern waters in a high resolution numerical simulation of the North Atlantic. **Interhemispheric Water Exchange in the Atlantic Ocean**, v. 68, p.375-410, 2003.

GARZOLI, S. L., FFIELD, A., YAO, Q. North Brazil Current Rings and the variability in the latitude of retroflection. **Interhemispheric Water Exchange in the Atlantic Ocean** v.68, p.357-373, 2003.

GARZOLI, S. L., A. FFIELD, W. E. JOHNS, Q. YAO. North Brazil Current retroflection and transports, **Journal of Geophysical Research**, v.109, 2004.

GILL, A. E., GREEN, J. S. A., SIMMONS, A. J. Energy partition in the large-scale ocean circulation and the production of mid-ocean eddies. **Deep-Sea Research**, v.21, p.499-528, 1974.

GOES J. I., GOMES H. R., CHEKALYUK A. M., CARPENTER E. J., MONTOYA J. P., COLES V. J., et al. Influence of the Amazon River discharge on the biogeography of phytoplankton communities in the western tropical north Atlantic. **Progress in Oceanography** v.120, p.29–40, 2014.

GONI, G. J.; W. E. JOHNS. A Census of North Brazil Current Rings observed from TOPEX/Poseidon Altimetry: 1992-1998. **Journal of Geophysical Research**, v.28, p.1-4, 2001.

GONI, G. J., W. E. JOHNS. Synoptic study of warm rings in the North Brazil Current retroflection region using satellite altimetry. **Interhemispheric Water Exchange in the Atlantic Ocean** v.68, p.335-356, 2003.

GORDON, A. L., HAXBY, W. F. Agulhas eddies invade the South Atlantic - evidence from GEOSAT altimeter and shipboard conductivity-temperature-depth survey. **Journal of Geophysical Research**, v.95, p.3117-3125, 1990.

GOWER, J. F. R., K. L. DENMAN, R. J. HOLYER. Phytoplankton patchiness indicates the fluctuation spectrum of mesoscale oceanic structure. **Nature**, v.288, p.157-159, 1980.

GRUBER, N., Z. LACHKAR, H. FRENZEL, P. MARCHESIELLO, M. MUNNICH, J. MCWILLIAMS, T. NAGAI, G. PLATTNER. Eddy-induced reduction of biological production in eastern boundary upwelling systems. **Nature Geosciences**, v.4, p.787-792, 2011.

GUINEHUT S., A.-L. DHOMPS, G. LARNICOL, P.-Y. LE TRAON. High resolution 3D temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations. **Ocean Sciences**, v.8, p.845-857, 2012.

GUINEHUT S., P.-Y. LE TRAON, G. LARNICOL, S. PHILIPPS. Combining Argo and remote-sensing data to estimate the ocean three-dimensional temperature fields - A first approach based on simulated observations. **Journal of Marine Systems**, v.46, p.85-98, 2004.

HALO, I., B. BACKEBERG, P. PENVEN, I. ANSORGE, C. REASON, J. ULLGREN. Eddy properties in the Mozambique Channel: A comparison between observations and two numerical ocean circulation models. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v.100, p.38-53, 2014.

HE, Q., H. ZHAN, S. CAI, G. ZHA. On the asymmetry of eddy-induced surface chlorophyll anomalies in the southeastern Pacific: The role of eddy-Ekman pumping. **Progress in Oceanography**, v.141, p.202-211, 2016.

HOUNSOU-GBO, G. A.; ARAUJO, M.; BOURLÈS, B.; VELEDA, D.; SERVAIN, J. Tropical Atlantic Contributions to Strong Rainfall Variability Along the Northeast Brazilian Coast. **Advances in Meteorology**, v. 2015, p. 1-13, 2015.

HUANG, J., F. XU, K. ZHOU, P. XIU, Y. LIN. Temporal evolution of near-surface chlorophyll over cyclonic eddy lifecycles in the southeastern Pacific. **Journal of Geophysical Research Oceans**, v.122, p.6165-6179, 2017.

ISELIN, C. O'D. Preliminary report on long-period variations in the transport of the Gulf Stream system. **Papers in Physical Oceanography and Meteorology**, v. 8, 40 pp, 1940.

ISERN-FONTANET, J., E. GARCA-LADONA, J. FONT. Identification of marine eddies from altimetric maps. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.20, p.772-778, 2003.

JAINE, F.R.A., ROHNER, C.A., WEEKS, S.J., COUTURIER, L. I. E., BENNETT, M. B., TOWNSEND, K. A., RICHARDSON, A. J. Movements and habitat use of reef manta rays off eastern Australia: offshore excursions, deep diving and eddy affinity revealed by satellite telemetry. **Marine Ecology Progress Series**, v.510, p. 73-86, 2016.

JOCHUMSEN, K., RHEIN, M., HÜTTL-KABUS, S., BÖNING, C. W. On the propagation and decay of North Brazil Current rings. **Journal of Geophysical Research**, v.115, 2010.

JOHNS, W. E., T. N. LEE, F. A. SCHOTT, R. J. ZANTOPP, R. H. EVANS. The North Brazil Current retroflection: Seasonal structure and eddy variability. **Journal of Geophysical Research**, v.95, p.22103–22120, 1990.

JOHNS, W. E., R. C. BEARDSLEY, J. CANDELA, R. LIMEBURNER, B. CASTRO. Annual cycle and variability of the North Brazil Current. **Journal of Physical Oceanography**, v.28, p.103–128, 1998.

JOHNS, W. E., R. J. ZANTOPP, G. J. GONI. Cross-gyre transport by North Brazil Current Rings. **Interhemispheric Water Exchange in the Atlantic Ocean**, G. J. Goni and P. Malanotte-Rizzoli, Eds., Elsevier Oceanographic Series, v. 68, p.411–441, 2003.

JOHNS, W.E., BEAL, L.M., BARINGER, M.O., MOLINA, J.R., CUNNINGHAM, S.A., KANZOW, T., RAYNER, D. Variability of shallow and Deep Western Boundary Currents off the Bahamas during 2004-05: Results from the 26°N RAPID-MOC array. **Journal of Physical Oceanography**, v.38, p.605–623, 2008.

JOSEPH, A. **Measuring Ocean Currents: Tools, Technology and Data**. Elsevier, 2013.

KAI, E.T., MARSAC, F. Influence of mesoscale eddies on spatial structuring of top predators' communities in the Mozambique Channel. **Progress in Oceanography**, v.86, p.214–223, 2010.

KAMENKOVICH, V.M., KOSHLyakOV, M.N., MONIN, A. S. **Synoptic Eddies in the Ocean**. Springer, 444pp., 1986.

KARSTENSEN, J., FIEDLER, B., SCHUTE, F., BRANDT, P., KORTZINGER, A., et al. Open ocean dead zones in the tropical North Atlantic Ocean. **Biogeosciences**, v.12, p.2597–2605, 2015.

KAWAI, H. Hydrography of the Kuroshio Extension. In **Kuroshio; its physical aspects**. H. STOMMEL and K. YOSHIDA, editors, p.235-352, 1972.

KELLY, P. S., K. M. M. LWIZA, R. K. COWEN, G. J. GONI. Low-salinity pools at Barbados, West Indies: Their origin, frequency, and variability. **Journal of Geophysical Research**, v.5, p.19669– 19708, 2000.

LEGECKIS, R.; GORDON, A. L. Satellite observations of the Brazil and Falkland currents-- 1975 to 1976 and 1978. **Deep-Sea Research**, v. 29, p.375-401, 1982.

LEVIN, L. A. Manifestation, Drivers, and Emergence of Open Ocean Deoxygenation. **Annual Reviews of Marine Science**, v.10, p.229–260, 2018.

LE VU, B., STEGNER, A., ARSOUZE, T. Angular Momentum Eddy Detection and tracking Algorithm (AMEDA) and its application to coastal eddy formation. **Journal of Atmospheric Oceanic Technology**, v.35, p.739–762, 2018.

LI, Q.-Y., L. SUN, S.-S. LIU, T. XIAN, Y.-F. YAN. A new mononuclear eddy identification method with simple splitting strategies. **Remote Sensing Letters**, v.5, p.65–72, 2014.

LIMA I. D., OLSON, D. B., DONEY, S. C. Biological response of frontal dynamics and mesoscale variability in oligotrophic environments: biological production and community structure. **Journal of Geophysical Research**, v.107, 2002.

LUMPKIN, R., S. L. GARZOLI. Near-surface circulation in the tropical Atlantic Ocean. **Deep-Sea Research II**, v.52, p.495–518, 2005.

LUSCHI, P. LUTJEHARMS, J. R. E., LAMBARDI, P., MENCACCI, R., HUGHES, G. R., HAYS, G. C. A review of migratory behaviour of sea turtles off southeastern Africa. **South African Journal of Science**, v.102, p.51-58, 2006.

MA, H. The dynamics of the North Brazil Current retroflection eddies. **Journal of Marine Research**, 54, 35–53, 1996.

MANN, K.H., LAZIER, J.R.N. **Dynamics of Marine Ecosystems: Biological – Physical Interactions in the Oceans**, 3rd ed. Wiley, Blackwell, 2006.

MASON, E., A. PASCUAL, J. C. MCWILLIAMS. A new sea surface height-based code for oceanic mesoscale eddy tracking. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.31 p.1181–1188, 2014.

MATEAR, R. J., M. A. CHAMBERLAIN, C. SUN, M. FENG. Climate change projection of the Tasman Sea from an Eddy resolving Ocean Model. **Journal of Geophysical Research Oceans**, v.118, p.2961–2976, 2013.

MCGILLICUDDY, D. J., ROBINSON, A. R., SIEGEL, D. A., JANNASCH, H. W., JOHNSON, T., DICKEY, T. D., MCNEIL, J., MICHAELS, A. F., KNAP, A. H. Influence of mesoscale eddies on new production in Sargasso Sea. **Nature**, v.394, p.263-266, 1998.

MCWILLIAMS, J.C. The vortices of two-dimensional turbulence. **Journal of Fluid Mechanics**, v.219, p.361–385, 1990.

MEINEN, C.S., JOHNS, W.E., GARZOLI, S.L., VAN SEBILLE, E., RAYNER, D., KANZOW, T., BARINGER, M.O. Variability of the Deep Western Boundary Current at 26.5°N during 2004-2009. **Deep-Sea Research Part II**, v.85, p.154–168, 2012.

MKHININI, N., COIMBRA, A. L. S., STEGNER, A., ARSOUZE, T., TAUPIER-LETAGE, I., BERANGER, K. Long-lived mesoscale eddies in the Eastern Mediterranean Sea: Analysis of 20 years of AVISO geostrophic velocities. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v.119, p.8603–8626, 2014.

MULET, S., M.-H. RIO, A. MIGNOT, S. GUINEHUT, R. MORROW. A new estimate of the global 3D geostrophic ocean circulation based on satellite data and in-situ measurements. **Deep Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography**, 77–80(0), p.70–81, 2012.

NEL D. C., LUTJEHARMS, J. R. E., PAKHOMOV, E. A., ANSORGE, I. J., RYAN, P. G., KLAGES, N. T. W. Exploitation of mesoscale oceanographic features by grey-headed albatross *Thalassarche chrysostoma* in the southern Indian Ocean. **Marine Ecology Progress Series**, v.217, p.15–26, 2001.

NENCIOLI, F., DONG, C., DICKEY, T., WASHBURN, L., MCWILLIAMS, J. A vector geometry-based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.27(3), p.564–579, 2010.

NURSER, A. J. G., BACON, S. The Rossby Radius in the Arctic Ocean. **Ocean Science**, v.10, p. 967-975, 2014.

OLSON, D.B. Rings in the ocean. **Annual Review of Earth Planetary Science**, v.19, p.283-311, 1990.

ORLANSKI, I., COX, M. Baroclinic instability in ocean currents. **Geophysical Fluid Dynamics**, v.4, p. 297-332, 1973

PALASTANGA, V., VAN LEEUWEN, P. J., DE RUIJTER, W. P. M. A link between low-frequency mesoscale eddy variability around Madagascar and the large-scale Indian Ocean variability. **Journal of Geophysical Research**, 111, 2006.

PASQUERO, C.; EMANUEL, K. Tropical Cyclones and Transient Upper-Ocean Warming. **Journal of Climate**, v. 21, p. 149-162, 2008.

PEDLOSKY, J. **Geophysical Fluid Dynamics**. New York: Springer-Verlag. 624 pp, 1979.

POLOVINA, J.J., BALAZS, G.H., HOWELL, E.A., PARKER, D.M., SEKI, M.P., DUTTON, P.H. Forage and migration habitat of loggerhead (*Caretta caretta*) and olive ridley (*Lepidochelys olivacea*) sea turtles in the central North Pacific Ocean. **Fisheries Oceanography**, v.13, p.36–51, 2004.

RICHARDSON, P., WALSH, D. Mapping climatological seasonal variations of surface currents in the Tropical Atlantic using ship drifts. **Journal of Geophysical Research** v.91, p.10537–10550, 1986.

RICHARDSON, P. L., REVERDIN, G. Seasonal cycle of velocity in the Atlantic North Equatorial Countercurrent as measured by surface drifters current meters and ship drifts. **Journal of Geophysical Research**, v.92 p.3691–3708, 1987.

RICHARDSON, P. L., G. E. HUFFORD, R. LIMEBURNER, W. S. BROWN. North Brazil Current retroflection eddies. **Journal of Geophysical Research**, v.99, p.5081–5093, 1994.

RICHARDSON, P. L. Caribbean Current and eddies as observed by surface drifters. **Deep-Sea Research II**. 52, 429–463, 2005.

ROBINSON, A.R. Overview and summary of eddy science. **In Eddies in Marine Science** (ed. A.R. Robinson), pp. 3–15. Springer-Verlag, New York, 1983.

ROCHA, L. A., ROBERTSON, D. R., ROCHA, C. R., VAN TASSELL, J. L., CRAIG, M. T., BOWEN, B. W. Recent invasion of the tropical Atlantic by an Indo-Pacific coral reef fish. **Molecular Ecology**, v.14, p.3921–3928, 2005.

RUDZIN, J. E., L. K. SHAY, B. JAIMES, J. K. BREWSTER. Upper ocean observations in eastern Caribbean Sea reveal barrier layer within a warm core eddy. **Journal of Geophysical Research Oceans**, v.122, p.1057–1071, 2017.

SADARJOEN, I. A.; POST, F. H. Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry. **Computers & Graphics**, v.24, p.333–341, 2000.

SCHMITZ, W. J., RICHARDSON, P. L. On the source of the Florida Current. **Deep Sea Research**, Part A, v.38, p. S379-S409, 1991.

SCHMITZ, W. J., MCCARTNEY, M. S. On the North Atlantic circulation. **Reviews of Geophysics**, v.31, p.29-49, 1993.

SCHOTT, F. A., FISCHER, J., STRAMMA, L. Transports and Pathways of the Upper-Layer Circulation in the Western Tropical Atlantic. **Journal of Oceanography**, v. 28, p. 1904-1928, 1998.

SCHÜTTE, F., KARSTENSEN, J., KRAHMANN, G., HAUSS, H., FIEDLER, B., BRANDT, P., VISBECK, M., ARNE, K. Characterization of "dead-zone" eddies in the eastern tropical North Atlantic. **Biogeosciences**. v.13. p.5865-5881, 2016.

SOUZA, J., B. CHAPRON, E. AUTRET. The surface thermal signature and air–sea coupling over the Agulhas rings propagating in the South Atlantic Ocean interior. **Ocean Sciences**, v.10(4), p.633–644, 2014.

SPRINTALL, J., M. TOMCZAK. Evidence of the barrier layer in the surface layer of the Tropics. **Journal of Geophysical Research**, v.97, p.7305–7316, 1992.

STRAMMA, L., SCHOTT, F. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. **Deep Sea Research**, v.46, p.279–303, 1999.

TYAQUIÇÃ, P.; VELEDA, D.; LEFÈVRE, N.; ARAUJO, M.; NORIEGA, C.; CANIAUX, G.; SERVAIN, J.; SILVA, T. Amazon Plume Salinity Response to Ocean Teleconnections. **Frontiers in Marine Science**, v. 4, p. 1, 2017.

VALCKE, S.; VERRON, J. Interactions of baroclinic isolated vortices: The dominant effect of shielding. **Journal of Physical Oceanography**, v. 27, p. 524–541, 1997.

VANDENBROUCK, F., BERTHIER, L., GHEUSI, F. Coriolis force in Geophysics: an elementary introduction and examples. **European Journal of Physics**, v.21(4), pp.359-366, 2000.

VELEDA, D. Seasonal and intraseasonal variability of the western boundary regime off the Eastern Brazilian Coast. **Tese**. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2008.

VELEDA, D., M. ARAUJO, R. ZANTOPP, R. MONTAGNE. Intraseasonal variability of the North Brazil Undercurrent forced by remote winds. **Journal of Geophysical Research**, 117, 2012.

VIANNA, M. L., V. V. MENEZES, A. B. PEZZA, I. SIMMONDS. Interactions between Hurricane Catarina (2004) and warm core rings in the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v.115, 2010.

VILLAS BÔAS, A. B., O. T. SATO, A. CHAIGNEAU, G. P. CASTELÃO. The signature of mesoscale eddies on the air-sea turbulent heat fluxes in the South Atlantic Ocean. **Geophysical Research Letters**, v.42, p.1856–1862, 2015.

WAITE, A. M., LYNNATH, E. B., GUIDI, L., LANDRUM, J. P., HOLLIDAY, D., ET AL. Cross shelf transport, oxygen depletion, and nitrate release within a forming mesoscale eddy in the eastern Indian Ocean. **Limnology and Oceanography: methods**, v.61(1), p.103-121, 2015.

WANG, C., ENFIELD, D. B., LEE, S-K., LANDSEA, C. W. Influences of the Atlantic Warm Pool on Western Hemisphere Summer Rainfall and Atlantic Hurricanes. **Journal of Climate**, v.19, p. 3011-3028, 2006.

WASHBURN, L., M. SWENSON, J. LARGIER, P. KOSRO, S. RAMP. Cross-shelf sediment transport by an anticyclonic eddy off northern California, **Science**, v.261, p.1560–1564, 1993.

WEIMERSKIRCH, H., LE CORRE, M., JAQUEMET, S., POTIER, M., MARSAC, F. Foraging strategy of a top predator in tropical waters: great frigatebirds in the Mozambique Channel. **Marine Ecology Progress Series**, v.275, p.297–308, 2004.

WIEBE, P. H., HULBURT, E. M., CARPENTER, E. J., JAHN, A. E., KNAPP, G. P., BOYD, S. H., ORTNER, P. B., COX, L. Gulf Stream cold core rings: large-scale interaction sites for open ocean plankton communities. **Deep-Sea Research**, v.23, p.695-710, 1976.

YI, J., Y. DU, Z. HE, C. ZHOU. Enhancing the accuracy of automatic eddy detection and the capability of recognizing the multi-core structures from maps of sea level anomaly. **Ocean Science**, v.10, p.39–47, 2014.

ZAINUDDIN, M., KIYOFUJI, H., SAITOH, K., SAITOH, S.I. Using multi-sensor satellite remote sensing and catch data to detect ocean hot spots for albacore (*Thunnus alalunga*) in the northwestern North Pacific. **Deep Sea Research Part II–Topical Studies in Oceanography**, v.53, p.419–431, 2006.

ZHANG, Z., WANG, W., QIU, B. Oceanic Mass Transport by Mesoscale Eddies. **Science Express**, 2p, 2014.

ZHARKOV, V., NOF, D. Why Does the North Brazil Current Regularly Shed Rings but the Brazil Current Does Not? **Journal of Physical Oceanography**, v.40, p. 354-367, 2010.

APÊNDICE A – Valores dos parâmetros calculados para os 83 vórtices.

Tabela 4 - Valores dos parâmetros analisados calculados para os 83 vórtices identificados (V1-V83).

ID	MÊS	ANO	DURAÇÃO (semanas)	Rmáx (km)	Vmáx (m/s)	Ro	EC (m ² /s ²)	aASM (cm)
V1	1	1993	8	142.9834	0.3603	0.1264	3.8340	4.36
V2	2	1993	14	138.6355	0.1669	0.0471	0.7568	3.80
V3	4	1993	11	127.0751	0.2976	0.1074	2.2149	8.86
V4	5	1993	11	119.4898	0.1746	0.0558	0.6064	6.31
V5	5	1993	7	165.2108	0.2250	0.0755	1.9769	0.24
V6	6	1993	16	180.1129	0.2868	0.0949	3.6422	1.09
V7	8	1993	23	132.8154	0.2676	0.0850	1.7861	5.86
V8	11	1993	10	117.3978	0.3433	0.1680	1.9804	6.38
V9	2	1994	3	213.9252	0.3098	0.0727	5.1189	3.78
V10	3	1994	5	139.1782	0.3025	0.0792	2.7337	14.24
V11	5	1994	6	111.1125	0.1303	0.0427	0.3044	4.01
V12	7	1994	16	105.7261	0.3369	0.2339	1.4738	3.19
V13	10	1994	9	64.6590	0.1920	0.1401	0.1846	7.07
V14	1	1995	14	186.5639	0.3028	0.0605	3.8912	9.18
V15	3	1995	12	151.4511	0.3022	0.0711	3.2383	11.15
V16	4	1995	4	150.9784	0.3274	0.1397	2.9197	5.47
V17	5	1995	7	212.4889	0.4097	0.1415	8.1634	1.52
V18	7	1995	20	121.7527	0.3852	0.1695	2.4094	6.07
V19	12	1995	14	161.0193	0.3730	0.0978	5.2145	12.78
V20	1	1996	15	152.2327	0.3658	0.1014	4.7034	12.27
V21	2	1996	5	157.2197	0.3903	0.1286	5.6584	5.62
V22	3	1996	12	193.1678	0.2685	0.0474	3.7768	6.29
V23	5	1996	16	190.2375	0.2060	0.0543	2.1186	3.60
V24	7	1996	7	130.7130	0.2401	0.0819	1.4946	6.15
V25	11	1996	16	138.8427	0.1894	0.0497	0.7957	6.21
V26	1	1997	4	152.7762	0.2978	0.0894	2.9862	5.23
V27	2	1997	3	168.8677	0.2626	0.0567	2.4657	8.82
V28	2	1997	15	98.9580	0.3398	0.1124	1.7545	14.60
V29	4	1997	17	117.6262	0.2000	0.0718	0.7289	-0.63
V30	10	1997	20	150.3232	0.3224	0.0882	3.3519	9.26
V31	2	1998	11	117.5985	0.2781	0.0774	1.5300	7.27
V32	4	1998	9	126.8132	0.1508	0.0443	0.5134	5.98
V33	5	1998	17	84.3270	0.1243	0.0537	0.1345	7.76
V34	7	1998	19	137.3510	0.1600	0.0492	0.7160	5.11
V35	11	1998	16	116.3418	0.1945	0.0638	0.6471	4.33
V36	1	1999	13	138.6629	0.3245	0.0962	2.8278	8.75
V37	3	1999	20	136.3603	0.2283	0.0571	1.3273	7.83
V38	7	1999	19	159.6123	0.1810	0.0455	1.1591	4.10
V39	8	1999	16	150.9143	0.1941	0.0529	1.1180	5.02
V40	12	1999	13	87.2485	0.2503	0.1244	0.5996	9.99
V41	1	2000	13	125.9858	0.2989	0.0810	2.0273	7.68
V42	4	2000	8	126.0239	0.2321	0.0896	1.1821	5.95
V43	5	2000	13	202.7636	0.3269	0.0961	6.3016	3.82
V44	7	2000	22	133.9466	0.1387	0.0395	0.5061	3.84
V45	9	2000	26	119.2142	0.2188	0.0654	1.0039	9.21
V46	12	2000	11	119.8234	0.4168	0.1863	3.1445	15.20
V47	2	2001	16	143.1239	0.2027	0.0554	1.0926	4.21
V48	3	2001	17	115.8241	0.1851	0.0802	0.6013	2.98
V49	5	2001	9	116.9112	0.1906	0.0747	0.6755	2.48
V50	6	2001	19	132.4131	0.3055	0.1000	2.2262	9.52
V51	11	2001	14	154.2609	0.4007	0.1096	5.7425	10.85
V52	1	2002	12	118.9150	0.1464	0.0420	0.3244	6.05
V53	2	2002	17	145.5028	0.2189	0.0483	1.6110	10.25

V54	4	2002	14	130.8104	0.2758	0.0768	1.7909	10.60
V55	5	2002	13	156.6731	0.3068	0.1316	3.5168	4.15
V56	6	2002	24	155.8308	0.3754	0.1335	4.8858	6.83
V57	8	2002	18	125.9864	0.1455	0.0501	0.4699	3.90
V58	1	2003	11	204.7932	0.2379	0.0414	3.1338	11.28
V59	2	2003	15	153.5491	0.2626	0.0741	2.4222	8.04
V60	3	2003	21	199.2625	0.3275	0.1018	6.0230	3.03
V61	7	2003	29	134.6373	0.1670	0.0497	0.7793	5.94
V62	11	2003	22	163.9133	0.2710	0.0631	2.7328	9.17
V63	5	2004	14	132.2546	0.2394	0.0830	1.4797	5.93
V64	6	2004	16	123.8938	0.2780	0.1000	1.6279	10.64
V65	7	2004	31	152.9725	0.3043	0.0863	3.2087	9.13
V66	1	2005	16	193.8380	0.1827	0.0398	1.6461	5.82
V67	3	2005	12	168.6548	0.2820	0.0638	2.7313	10.53
V68	4	2005	14	109.0505	0.2861	0.1691	1.0194	4.57
V69	5	2005	12	150.1475	0.3171	0.1308	3.1414	4.36
V70	6	2005	16	151.1217	0.2973	0.1268	2.8272	6.58
V71	7	2005	12	142.4070	0.2511	0.0725	1.8814	11.38
V72	10	2005	15	157.4522	0.2808	0.0733	2.8966	10.81
V73	11	2005	17	102.3813	0.2672	0.1398	0.9604	4.31
V74	1	2006	15	157.2605	0.3605	0.0919	4.3983	13.24
V75	3	2006	19	180.7636	0.1933	0.0408	1.6233	11.42
V76	7	2006	20	142.1236	0.3139	0.0932	2.8620	12.62
V77	9	2006	22	148.7908	0.2116	0.0585	1.3710	7.88
V78	2	2007	12	169.3953	0.3016	0.0752	3.8948	11.44
V79	2	2007	17	124.9234	0.1557	0.0588	0.5222	2.47
V80	4	2007	13	179.3519	0.2721	0.0871	3.1237	6.61
V81	5	2007	16	109.8025	0.1652	0.0710	0.4313	3.51
V82	7	2007	17	130.6021	0.1825	0.0606	0.8834	7.42
V83	8	2007	25	148.1965	0.3023	0.0839	2.8497	9.81

