

TRANSPORTE DE VOLUME E CALOR PELOS VÓRTICES DA CORRENTE  
NORTE DO BRASIL

Luana Ferraz Bueno

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Rio de Janeiro

Abril de 2018

TRANSPORTE DE VOLUME E CALOR PELOS VÓRTICES DA CORRENTE  
NORTE DO BRASIL

Luana Ferraz Bueno

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

---

Prof. Afonso de Moraes Paiva, Ph.D.

---

Prof. Marcos Nicolas Gallo, D.Sc.

---

Prof. Mauro Cirano, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2018

Bueno, Luana Ferraz

Transporte de Volume e Calor pelos Vórtices da Corrente Norte do Brasil/Luana Ferraz Bueno. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XV, 54 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 46 – 54.

1. AMOC. 2. Atlântico Equatorial. 3. perfiladores Argo. I. Paiva, Afonso de Moraes. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

# Agradecimentos

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Ao meu orientador pelo seu apoio, dedicação e por ter acreditado no meu potencial desde o início. Jamais conheci um professor tão apaixonado e comprometido com a Oceanografia - é motivador! Agradeço aos colegas do Laboratório de Oceanografia (LOF) por todo o conhecimento compartilhado e, principalmente, pela ótima convivência. Agradeço especialmente ao Vladimir pelas incontáveis horas de trabalho ao meu lado e por ter se tornado mais do que um coorientador, um grande amigo. Ao Guilherme pela sua calma e serenidade (e pelos chocolates, eles fizeram toda a diferença, especialmente nas TPMs). Você é um exemplo de humildade e competência na pesquisa científica. Ter um coorientador é bom, mas dois é melhor ainda (risos). Ao Pedro Paulo, pelas infinitas conversas e conselhos. O jeito com que você leva a vida é encantador. À Mariela pela preocupação e apreço. Acredito que nos identificamos desde o início do mestrado e guardo um carinho enorme por você. Ao Bruno por, além dos ensinamentos e conselhos, não permitir que eu passasse nem ao menos um dia triste e calada no laboratório. Às minhas amigas de turma, Lara e Aline, pelo companherismo e amizade que levarei pelo resto da vida. Aos amigos dos demais laboratórios, conhecer e compartilhar essas experiências com vocês foi um presente. À Marise e Cristina, amplamente conhecidas como os anjos da guarda dos alunos, dispensando maiores elogios e aos demais professores do Programa de Engenharia Oceânica pelas excelentes aulas. Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

Agradeço enormemente aos grandes amigos do Colégio Zaccaria, Amanda, Carolina, Bruna, Luís, Leandro, Ana Júlia, Douglas, Pepe, Arouca, Gustavinho, Gabriel e Marina. Conhecer vocês foi a peripécia mais linda e certa que o universo me proporcionou até hoje. Vocês fizeram do Rio de Janeiro o meu lugar no mundo -

obrigada! Ao Lucas, que mesmo longe, se fez presente nos momentos mais importantes ao longo desses dois anos. Agradeço e dedico este trabalho a minha família carioca, Giuliana, Mariana, Tia Cristina e Tio Zé. Obrigada por terem me acolhido com tanto carinho e por terem me presenteado com a irmã que não tive. Ao lado de vocês experimentei momentos de união jamais vividos e serei eternamente grata. Por último, mas não menos importante, aos meus irmãos Nery e Eduardo que abriram mão de muito pela irmã caçula aqui (risos), e aos meus pais José Raimundo Bueno e Leyla Ferraz Bueno pelo constante apoio e confiança, sei o quanto vocês batalharam para que eu chegasse até aqui. Vocês foram, e sempre serão, a minha maior motivação.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## TRANSPORTE DE VOLUME E CALOR PELOS VÓRTICES DA CORRENTE NORTE DO BRASIL

Luana Ferraz Bueno

Abril/2018

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Programa: Engenharia Oceânica

Um método que combina uma base de dados global com 24 anos de duração (janeiro de 1993 a dezembro de 2016) de trajetórias de vórtices (CHELTON *et al.*, 2011), obtidas a partir de altimetria, com a base EN4.2.0 de perfis verticais de temperatura (T) e salinidade (S), provenientes de XBTs/MBTs, CTDs e perfiladores Argo (GOOD *et al.*, 2013), foi utilizado para reconstruir a estrutura vertical média dos vórtices da Corrente Norte do Brasil (CNB) e calcular algumas de suas propriedades. A formação anual média de vórtices foi estimada em  $6,4 \pm 1,8$ , apresentando grande variabilidade inter-anual, com o desprendimento de 2 a 10 vórtices por ano. Um total 1466 (698) perfis de T (S) foram utilizados na reconstrução do vórtice médio, cujo transporte meridional de volume foi calculado em  $1,3 \text{ Sv}$  ( $1\text{Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), levando a um transporte anual total de  $8,3 \pm 2,3 \text{ Sv}$ . Segundo esta estimativa, os vórtices da CNB seriam responsáveis por 64% do transporte líquido do ramo quente da Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC), chegando a 80% nos anos de máxima formação. O vórtice médio apresentou máxima anomalia de T (S) de  $5,7^\circ\text{C}$  (0,6) em torno de 150 (180) m de profundidade. O transporte anual de calor pelos vórtices da CNB foi estimado em  $0,4 \pm 0,13 \text{ PW}$ , representando aproximadamente 40% do transporte meridional total de calor na latitude de  $11^\circ\text{N}$ .

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

Luana Ferraz Bueno

April/2018

Advisor: Afonso de Moraes Paiva

Department: Ocean Engineering

A methodology that combines a 24-year long (January 1993 to December 2016) global dataset of eddy trajectories (CHELTON *et al.*, 2011), derived from altimetry, with vertical temperature (T) and salinity (S) profiles from EN4.2.0 dataset (GOOD *et al.*, 2013), derived from XBTs/MBTs, CTDs and Argo floats, was used to reconstruct the mean vertical structure of North Brazil Current (NBC) rings, and to calculate some of their properties. The annual-mean formation of NBC rings was estimated in  $6.4 \pm 1.8$ . High inter-annual variability was observed, with 2 to 10 rings being shed at different years. A total of 1466 (698) T (S) profiles were used in order to reconstruct the mean-ring vertical structure. The meridional volume transport of the mean-ring was estimated in 1.3 Sv ( $1\text{Sv} = 10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), leading to a annualized transport of  $8.3 \pm 2.3$  Sv. According to these estimates, the NBC rings are responsible for 64% of the northward transport by the upper limb of the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), reaching 80% in years of maximum ring formation. The mean NBC ring showed a maximum T (S) anomaly of  $5.7^\circ\text{C}$  (0.6), at depths of  $\sim 150$  (180) m. The contribution of NBC rings was estimated in approximately 40% of the total meridional heat transport across  $11^\circ\text{N}$ .

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Metodologia</b>	<b>8</b>
2.1 Identificação superficial dos Vórtices da CNB . . . . .	8
2.2 Reconstrução da Estrutura Vertical do Vórtice Médio da CNB . . . . .	11
2.3 Propriedades do Vórtice . . . . .	15
2.3.1 Transporte de Volume, Calor e Água Doce . . . . .	15
2.3.2 Energia Potencial Disponível e Energia Cinética . . . . .	16
<b>3 Resultados e Discussões</b>	<b>18</b>
3.1 Ocorrência e Características Gerais dos Vórtices da CNB . . . . .	18
3.2 Amostragem Sinótica dos Vórtices da CNB . . . . .	21
3.2.1 Vórtice A (seção de CTD) . . . . .	22
3.2.2 Vórtice B (seção de XBT) . . . . .	26
3.2.3 Vórtice C (perfilagem por Argo) . . . . .	29
3.3 Vórtice Médio . . . . .	32
3.3.1 Características Superficiais . . . . .	32
3.3.2 Reconstrução da Estrutura Vertical . . . . .	33
3.3.3 Transporte de Volume, Calor e Água Doce . . . . .	39
3.3.4 Energia Potencial Disponível (EPD) e Energia Cinética (EC) . . . . .	41
<b>4 Conclusões</b>	<b>43</b>



# Lista de Figuras

- 1.1 Desenho esquemático da circulação no Atlântico Equatorial Oeste. A Corrente Sul Equatorial (CSE), a Corrente Norte do Brasil (CNB) e a Contracorrente Norte Equatorial fecham o Giro Equatorial. A retroflexão da CNB em torno de  $7^{\circ}\text{N}$  forma vórtices anticiclônicos que transladam para noroeste em direção às Pequenas Antilhas. Adaptado de FRATANTONI e GLICKSON (2002). . . . . 2
- 2.1 Trajetória de um dos vórtices identificados pela base CH11V4 e seus perfis disponíveis de T e S. As linhas cinzas representam as isóbatas de 200 e 1000 m. A linha verde a trajetória do vórtice, em que a posição inicial é marcada pelo círculo e a posição final pelo marcador x. Os retângulos contínuos representam a área de origem dos vórtices entre as latitudes de  $3\text{-}10^{\circ}\text{N}$  e  $43,7\text{-}55^{\circ}\text{W}$ , e o pontilhado a área de busca de perfis entre  $3\text{-}12^{\circ}\text{N}$  e  $43\text{-}60^{\circ}\text{W}$ . Os círculos preenchidos representam os perfis pares de T e S, e os vazios os perfis somente de T. A cor vermelha dos círculos representa os perfis considerados dentro (DV) e a azul os perfis considerados fora do vórtice (FV). . . . . 9
- 2.2 Distribuição espacial dos 1466 perfis DV de temperatura (esquerda - círculos vermelhos abertos), dos 698 perfis DV de salinidade (direita - círculos vermelhos fechados). Abaixo distribuição espacial dos 4859 perfis FV de temperatura (esquerda - círculos azuis abertos) e 2461 perfis FV de salinidade (direita- círculos azuis fechados). O retângulo nas figuras representa a área de busca de perfis ( $3\text{-}12^{\circ}\text{N}$  e  $43\text{-}55^{\circ}\text{W}$ ) e as linhas cinzas as isóbatas de 200 e 1000 m . . . . . 14

3.1	Trajetoária dos 153 vórtices da CNB identificados a partir da base CH11V4 entre janeiro de 1993 e dezembro de 2016. Os círculos em verde e roxo representam a posição inicial e final das trajetórias dos vórtices, respectivamente, exceto para os 41 vórtices que tiveram suas trajetórias limitadas a 12°N e 60°W. O retângulo vermelho delimita a área de busca de perfis (3-12°N e 60-43°W). As linhas cinzas representam as isóbatas de 200 e 1000 m. . . . .	19
3.2	Frequência anual (acima) e mensal (abaixo) do número de vórtices identificados através da base CH11V4. A curva em vermelho (alisada) representa o índice do Atlântico Norte Tropical (TNA) de anomalia de temperatura da superfície do mar (T'). . . . .	20
3.3	Instantâneo da anomalia de SSH para o dia 19/07/2004 quando o vórtice A foi amostrado por uma seção de CTD, próximo a longitude de 59°W (círculo branco). O círculo tracejado em verde mostra a área do vórtice calculada a partir do seu raio de máxima velocidade e a seção é representada pela sequência de perfis DV (círculos vermelhos) e perfis FV (círculos azuis). Em preto tem-se a trajetória completa do vórtice, sendo a posição inicial em 30/05/2004 (círculo preto) e a posição final em 01/08/2004 (marcador x). As linhas cinzas finas destacam as isóbatas de 200 e 1000 m. . . . .	23
3.4	Seções de T (a) e S (b) do vórtice A construídas a partir da seção de CTD, onde as isolinhas brancas contornam regiões de mesma temperatura e salinidade, respectivamente. As linhas tracejadas indicam o limite dos perfis DV da seção. . . . .	25
3.5	No painel a (b) tem-se a seção de anomalia de T (S) reconstruída para o vórtice A, onde as isolinhas em branco contornam valores iguais de temperatura (salinidade). Em c tem-se a seção de velocidade geostrófica calculada a partir do nível de referência de 420 m, onde as isolinhas em preto representam a velocidade em $ms^{-1}$ - tons amarelos são velocidades positivas (para norte) e tons azuis são negativos (para sul). As linhas tracejadas demonstram o limite dos perfis DV. . . . .	26

3.6	Instantâneo da anomalia de SSH para o dia 02/04/2013 quando o vórtice B foi amostrado por uma seção de XTD, próximo a longitude de 52°W (círculo branco). O círculo tracejado em verde mostra a área do vórtice calculada a partir do seu raio de máxima velocidade, e a seção é representada pela sequência de perfis DV (círculos vermelhos) e perfis FV (círculos azuis). Em preto tem-se a trajetória completa do vórtice, sendo a posição inicial em 19/03/2013 (círculo preto) e a posição final em 09/05/2013 (marcador x). As linhas cinzas finas destacam as isóbatas de 200 e 1000 m. . . . .	27
3.7	Seções de T (a) e de anomalia de T (b) do vórtice B construídas a partir das sondagens de XBT, onde as isolinhas em branco contornam valores iguais de temperatura e de anomalia de temperatura, respectivamente. Seção de velocidade geostrófica em c calculada a partir do nível de referência de 400 m, onde as isolinhas em preto representam a velocidade em $ms^{-1}$ - tons amarelos são velocidades positivas (para norte) e tons azuis negativos (para sul). As linhas tracejadas demonstram o limite dos perfis DV. . . . .	28
3.8	Sequência de instantâneos de anomalia de SSH desde a formação do vórtice C (08/01/2014) até o final do seu ciclo de vida (31/03/14). Para cada instantâneo, tem-se a trajetória do vórtice, onde a posição do seu centro é evidenciada pelo círculo branco e o círculo tracejado em verde mostra a área do vórtice calculada a partir do seu raio de máxima velocidade para o dia em questão. No último instantâneo, a sequência de círculos vermelhos representa as amostragens realizadas pelos perfiladores Argo dentro do vórtice durante o seu ciclo de vida. A linha cinza fina destaca a isóbata de 1000 m. . . . .	30
3.9	(a) Distância do centro do vórtice C das perfilagens realizadas pelos perfiladores Argo (em km). (b e d) Seção de anomalia de T e S construídas a partir das perfilagens entre os dias 13 de janeiro a 18 de março de 2014.(c e e) Perfil médio de anomalia de T e S em linha contínua e desvio padrão em linhas tracejadas das seções em b e d, respectivamente. . . . .	32

3.10	(a) Número de perfis DV de T (barras vazias) e S (barras preenchidas) compreendidos em cada um dos 12 segmentos que formam o vórtice médio (raio total de $\sim 324$ km). (b) Distribuição espacial dos perfis DV de T (círculos preenchidos) e de S (círculos vazios) no vórtice médio. (c) Número de perfis DV de T (barras vazias) e de S (barras preenchidas) distribuídos entre as longitudes de 43 e 60°W. . . . .	34
3.11	Em a (b) a linha vermelha representa a anomalia de T (S) estimada em relação aos perfis FV, a linha tracejada azul a anomalia de T (S) estimada em relação a climatologia WOA13, e a linha tracejada em preto a diferença de T (S) entre a climatologia criada a partir dos perfis DV e FV e do WOA13 para a área de busca de perfis. . . . .	35
3.12	Em a (b) a seção de anomalia de T (S) reconstruída para o vórtice médio e estimada em relação aos perfis FV, em que as isolinhas espessas em branco contornam os valores de 0°C (0 de salinidade). (c) Seção de velocidade geostrófica calculada a partir do nível de referência de 500 dbar, onde as isolinhas em branco contornam as velocidades em $\text{ms}^{-1}$ - tons amarelos são velocidades positivas (para norte) e tons azuis são negativos (para sul). . . . .	37

# Lista de Tabelas

1.1	Principais características dos vórtices da CNB segundo a bibliografia, incluindo o número de vórtices formados por ano, a profundidade de alcance vertical, o raio total (duas vezes o raio de máxima velocidade), a velocidade de rotação e translação, e o transporte de volume e calor.	4
2.1	Porcentagem dos perfis de temperatura (total de 1466 perfis DV e 4859 perfis FV) e de salinidade (total de 698 perfis DV e 2461 perfis FV) utilizados para a reconstrução do vórtice médio da CNB amostrados por sondas de XBT e MBT, perfiladores Argo e CTDs.	14
3.1	Características dos vórtices A e B identificados neste trabalho pela base CH11V4, dos vórtices M2, M5 e M6 segundo FRATANTONI <i>et al.</i> (1995), e dos vórtices 2, 3 e 4 segundo WILSON <i>et al.</i> (2002); JOHNS <i>et al.</i> (2003) e FRATANTONI e RICHARDSON (2006). Incluem-se a profundidade em que a estrutura vertical de velocidade está confinada (prof), o raio de máxima velocidade ( $R_m$ ), a velocidade de rotação (vel), o volume (vol) e os transportes de volume (Tr.volume), calor (Tr.calor) e água doce (Tr.AD).	24
3.2	Características superficiais do vórtice médio estimadas a partir dos 153 vórtices identificados e dos 134 que apresentaram ao menos 1 perfil DV (dentro do vórtice) de T e/ou S.	33

3.3	Comparação entre as dimensões verticais e horizontais, o número de vórtices formados anualmente e o transporte de volume associados aos vórtices da CNB no presente estudo e pela literatura. A extensão horizontal desses vórtices foi expressa em raio total, que equivale a 2 vezes o raio de máxima velocidade, já que a literatura mais antiga não faz distinção entre ambas as definições. . . . .	40
3.4	Comparação entre o raio total, a velocidade máxima de rotação e as energias potencial disponível (EPD) e cinética (EC) entre os vórtices da CNB e outros vórtices espalhados pelo mundo. . . . .	42

# Capítulo 1

## Introdução

Os vórtices da Corrente Norte do Brasil (CNB) são vórtices anticiclônicos formados pelas retroflexões da CNB em diferentes níveis de profundidade, alimentando o sistema equatorial de correntes no Atlântico. A CNB (Figura 1.1) é formada em torno de  $5^{\circ}\text{S}$  pela combinação entre o ramo central da Corrente Sul Equatorial (CSEc) em superfície e pela Subcorrente Norte do Brasil (SNB) em subsuperfície (DA SILVEIRA *et al.*, 1994). Na termoclina, uma porção desta corrente retroflete em aproximadamente  $45^{\circ}\text{W}$ , gerando a Subcorrente Equatorial e alimentando a Subcorrente Norte Equatorial (SCHOTT *et al.*, 1998; GOES *et al.*, 2005). Durante essa retroflexão são formados os vórtices da CNB subsuperficiais descritos por WILSON *et al.* (2002); JOHNS *et al.* (2003) e STRAMMA *et al.* (2005), apresentando pouca ou nenhuma assinatura superficial e núcleo de máxima velocidade e extensão vertical variáveis. Em superfície, a CNB retroflete próximo a  $7^{\circ}\text{N}$  e alimenta a Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) (SCHOTT *et al.*, 1998) (Figura 1.1). Na retroflexão são formados os vórtices da CNB intensificados em superfície, fundamentais para a manutenção do equilíbrio da dinâmica da corrente que, ao adentrar o hemisfério norte e retornar em direção à leste, retira uma parcela de quantidade de movimento do seu fluxo médio, buscando o ajuste de sua vorticidade potencial (NOF, 1996; NOF e PICHEVIN, 1996; JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI, 2003). Vórtices com uma estrutura mista, ou seja, intensificados em superfície e subsuperfície, também foram identificados, mesmo que em uma menor frequência, a partir de observações de fundeios correntográficos (JOHNS *et al.*, 2003) e de modelagem numérica (KRELLING, 2010). Esses vórtices podem representar a sobre-

posição de vórtices superficiais e subsuperficiais (JOHNS *et al.*, 2003) ou a divisão de um vórtice profundo que foi sobreposto por um vórtice intensificado em superfície (FRATANTONI e RICHARDSON, 2006).

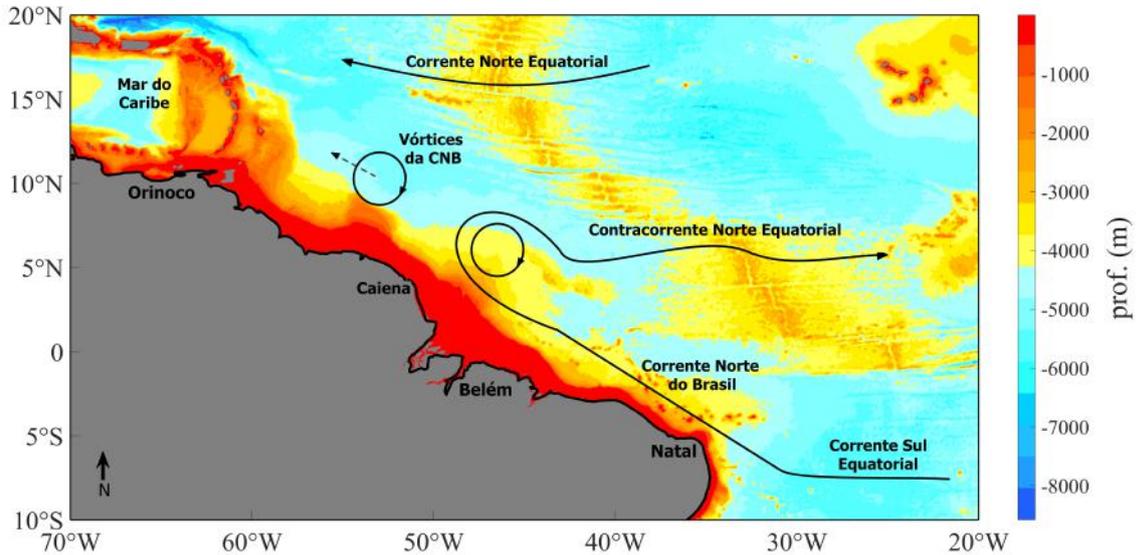


Figura 1.1: Desenho esquemático da circulação no Atlântico Equatorial Oeste. A Corrente Sul Equatorial (CSE), a Corrente Norte do Brasil (CNB) e a Contracorrente Norte Equatorial fecham o Giro Equatorial. A retroflexão da CNB em torno de 7°N forma vórtices anticiclônicos que transladam para noroeste em direção às Pequenas Antilhas. Adaptado de FRATANTONI e GLICKSON (2002).

Do ponto de vista prático, a região de ocorrência dos vórtices da CNB merece destaque por estar sendo alvo de intensas atividades marítimas da indústria do petróleo. Desde 2010, com a perfuração do poço de maior lâmina d'água no Brasil (~3 km) (CHIARETTI, 2016), a região equatorial tem experimentado intensas atividades de exploração, produção e transporte de petróleo e gás natural. Dessa forma, os vórtices podem gerar impacto não só nas instalações como também nas operações rotineiras relacionadas a essas atividades. Devido a ausência do histórico de exploração na região e, conseqüentemente, de infraestrutura de respostas a possíveis acidentes, é extremamente importante conhecer a estrutura vertical dos vórtices da CNB e as possíveis variações nos campos de corrente gerados por eles.

Do ponto de vista climático, os vórtices da CNB representam no Oceano Atlântico o principal mecanismo de transporte de águas quentes e salinas pelo ramo superficial da Célula de Revolvimento Meridional (sigla AMOC do inglês *Atlantic Meridional Overturning Circulation*) em direção às altas latitudes do Atlântico Norte

(JOHNS *et al.*, 1990). Esse transporte é forçado pela circulação profunda da AMOC em direção ao Atlântico Sul, dado pela Corrente de Contorno Oeste Profunda na porção oeste tropical do oceano. Essa corrente transporta entre os hemisférios Norte e Sul a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), fria e menos salina, formada no Atlântico Norte e no Oceano Austral (STRAMMA e SCHOTT, 1999). Esse sistema de corrente superficiais e profundas conecta a superfície dos oceanos e a atmosfera com o mar profundo e afeta os padrões climáticos globais e regionais (BROECKER, 1991; SCHMITTNER *et al.*, 2007). Assim, os vórtices representam então um dos mecanismos essenciais para o entendimento da variabilidade da AMOC e, consequentemente, da variabilidade e mudança climática.

Segundo estimativas baseadas em dados altimétricos (DIDDEN e SCHOTT, 1993; RICHARDSON *et al.*, 1994; FRATANTONI *et al.*, 1995; GONI e JOHNS, 2001, 2003; FRATANTONI e GLICKSON, 2002) e observacionais (JOHNS *et al.*, 2003; GARZOLI *et al.*, 2003), a taxa de formação dos vórtices da CNB varia de 2 a 7 por ano. Estimativas da taxa de formação dos vórtices subsuperficiais, por outro lado, são mais difíceis de serem realizadas, já que o sinal em altimetria é ausente ou muito fraco (JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI, 2003), fazendo com que sejam detectados somente a partir de cruzeiro ou moorings. A única estimativa da taxa de despreendimento desses vórtices foi realizada por JOHNS *et al.* (2003) que, apesar de pouco representativo devido ao curto período amostral de dois anos, estimaram a formação de 2 vórtices subsuperficiais por ano. Por meio de um mooring situado em aproximadamente 9°N e 53°W, os autores verificaram ainda que esses vórtices são formados preferencialmente entre os meses de setembro a outubro e março a abril.

Os vórtices da CNB são considerados os maiores vórtices do mundo com raio de máxima velocidade entre 100-160 km, velocidade de rotação de até 1  $\text{ms}^{-1}$  e máximos de anomalia da altura da superfície do mar de 5 a 30 cm (DIDDEN e SCHOTT, 1993; FRATANTONI e RICHARDSON, 2006). Esses vórtices transladam a cerca de 15  $\text{cms}^{-1}$  (JOHNS *et al.*, 1990; FRATANTONI e GLICKSON, 2002; GARZOLI *et al.*, 2003), podendo variar entre 9 e 30  $\text{cms}^{-1}$ , segundo as estimativas de GONI e JOHNS (2003). A Tabela 1.1 sintetiza, além dessas características principais dos vórtices da CNB, estimativas realizadas pela bibliografia do número de vórtices formados por ano e do transporte de volume e calor associados a eles.

Tabela 1.1: Principais características dos vórtices da CNB segundo a bibliografia, incluindo o número de vórtices formados por ano, a profundidade de alcance vertical, o raio total (duas vezes o raio de máxima velocidade), a velocidade de rotação e translação, e o transporte de volume e calor.

N <sup>o</sup> vort/ano	Prof. (m)	Raio (~ km)	Vel. Rot. (m s <sup>-1</sup> )	Vel. Trans. (cm s <sup>-1</sup> )	Tr. Vol (Sv)	Tr. Calor (PW)
10 a 15 <sup>1</sup>	200	200	-	-	1	-
3 <sup>2</sup>	1000	250	0,3	9-10	1	-
2-3 <sup>3</sup>	700	250	1	8-16	1	0,003
5,3 <sup>4</sup>	-	200	-	14	1	-
8-9 <sup>5</sup>	420	260	-	10-15	1,1	-
7,3 <sup>6</sup>	300	196	-	15	1,1	0,007

<sup>1</sup>JOHNS *et al.* (1990); <sup>2</sup>RICHARDSON *et al.* (1994); <sup>3</sup>FRATANTONI *et al.* (1995); <sup>4</sup>GONI e JOHNS (2001); <sup>5</sup>JOHNS *et al.* (2003), e <sup>6</sup>GARZOLI *et al.* (2003)

Durante o deslocamento até o arco de ilhas das Pequenas Antilhas (entre 61-62°W), os vórtices da CNB experimentam variações batimétricas que vão desde 500 a 4000 m de profundidade (FRATANTONI *et al.*, 1995; FRATANTONI e GLICKSON, 2002). Incluem-se nessas variações dois platôs, um em torno de 46-48°W e outro entre 52-54°W (PEDROSA, 2016), além das ilhas de Trinidad, Tobago e Barbados localizadas entre 59-60°W. Devido à complexa batimetria da região, as trajetórias dos vórtices sofrem modificações, deslocando-se para norte nas proximidades da Ilha de Barbados e bordejando a região das Pequenas Antilhas, podendo, eventualmente, atravessar o arco de ilhas e adentrar o Mar do Caribe (FRATANTONI e RICHARDSON, 2006). Observam-se alterações não somente na trajetória dos vórtices, mas também na sua forma, dinâmica e estrutura vertical ao interagirem com essas barreiras topográficas ao longo do caminho, além de uma modificação abrupta do campo de massa para aqueles que adentram o Mar do Caribe (RICHARDSON, 2005; FRATANTONI e RICHARDSON, 2006; MERTENS *et al.*, 2009).

Os estudos que se propuseram a quantificar o transporte de volume associado aos vórtices da CNB utilizaram diversas bases de dados, como altimetria (DIDDEN e SCHOTT, 1993), derivadores lagrangianos (RICHARDSON *et al.*, 1994), clorofila a (FRATANTONI e GLICKSON, 2002), observações de fundeios (JOHNS *et al.*, 1990; FRATANTONI *et al.*, 1995; FRATANTONI e GLICKSON, 2002; JOHNS *et al.*, 2003), e resultados de simulação numérica (GARRAFFO *et al.*, 2003; JOCHUM-

SEN *et al.*, 2010). Inicialmente, o transporte de volume foi estimado somente a partir das características superficiais dos vórtices, como altura e raio, e inferências sobre sua extensão vertical a partir do estabelecimento prévio de uma forma cônica para vórtices (JOHNS *et al.*, 1990; DIDDEN e SCHOTT, 1993; RICHARDSON *et al.*, 1994). Posteriormente, graças à disponibilidade de observações subsuperficiais no interior dos vórtices, as estimativas do transporte de volume se tornaram mais confiáveis já que foi possível conhecer sua extensão horizontal e vertical (FRATANTONI *et al.*, 1995; FRATANTONI e GLICKSON, 2002; JOHNS *et al.*, 2003). Entretanto, apesar das diferentes suposições sobre a estrutura horizontal e vertical desde o início dos estudos dos vórtices da CNB e do curto período de dados observacionais analisados até o presente momento (máximo de 10 anos analisados por GONI e JOHNS, 2003), a literatura concorda com a estimativa de  $\sim 1$  Sv de transporte de volume por vórtice (Tabela 1.1).

Com relação ao transporte anual de volume pelos vórtices da CNB, observa-se uma grande variação nas estimativas realizadas pela literatura como consequência da discordância a respeito da frequência anual de formação desses vórtices verificada em cada estudo (Tabela 1.1). Segundo FRATANTONI *et al.* (1995), por exemplo, os vórtices seriam responsáveis pelo transporte anual de cerca de 3-4 Sv proveniente da formação de 2-3 vórtices por ano. Por outro lado, seguindo a estimativa mais recente realizada por JOHNS *et al.* (2003) e GARZOLI *et al.* (2003) a partir de dados observacionais ao verificarem a formação média anual de 8-9 e 7 vórtices, respectivamente, os vórtices seriam responsáveis pelo transporte anual de volume de  $\sim 9$  Sv. Sendo o transporte inter-hemisférico de volume que constitui o ramo quente da AMOC estimado em 13 Sv por SCHMITZ e MCCARTNEY (1993), e considerando a estimativa de transporte anual de volume de JOHNS *et al.* (2003) e GARZOLI *et al.* (2003), os vórtices seriam responsáveis por aproximadamente 70% do transporte da AMOC. Visto que a AMOC é uma das componentes fundamentais para o fechamento da circulação termohalina global, compreender o papel efetivo dos vórtices da CNB não só no seu transporte de volume, mas também no seu transporte de calor e água doce, é fundamental.

Os vórtices da CNB transportam água dos níveis superficiais, de termoclina e intermediários com características do Atlântico Sul, sendo as assinaturas de tempe-

ratura (T) e salinidade (S) diferentes da APAN (WÜST, 1964; EMERY e DEWAR, 1982; JOHNS *et al.*, 1990; SCHMITZ e RICHARDSON, 1991; WILSON *et al.*, 1994; BOURLES *et al.*, 1999). Esse contraste de temperatura entre o fluxo de água da APAN para sul e o fluxo para norte pelos vórtices, reflete em um intenso transporte de calor pela AMOC (HASTENRATH, 1982). FRATANTONI *et al.* (1995) a partir de um ano de dados provenientes de fundeio, estimaram a média do transporte de calor por vórtice em 0,03 PW, enquanto que GARZOLI *et al.* (2003), a partir da diferenças de temperatura teórica entre a água carregada pelos vórtices e a APAN ( $\Delta T = 15^{\circ}C$ ), estimaram em 0,07 PW. Sendo o transporte anual de calor que cruza a latitude de  $11^{\circ}N$  estimado em 1,1 PW por FRIEDRICHS e HALL (1993) e, considerando o número de vórtices identificado anualmente por FRATANTONI *et al.* (1995) e GARZOLI *et al.* (2003) (Tabela 1.1), os vórtices da CNB seriam responsáveis por cerca de 20% e 54% desse transporte, respectivamente. Com relação ao transporte de sal/água doce, a contribuição dos vórtices da CNB jamais foi estimada.

Atualmente, o estudo da contribuição dos vórtices da CNB com o transporte anual de volume, calor e água doce pela AMOC é possível graças à disponibilidade de uma extensa e contínua série de observações remotas da superfície oceânica, que permite estimar a formação média anual desses vórtices por longos períodos de tempo. Além disso, a disponibilidade de medições subsuperficiais de T e S no interior dos vórtices juntamente a uma metodologia de reconstrução da estrutura tridimensional de vórtices amplamente utilizada pela literatura, torna possível responder questões pouco ou jamais respondidas anteriormente. Como exemplo da utilização dessa metodologia de reconstrução, tem-se o estudo de PEGLIASCO *et al.* (2015) que a partir de perfiladores Argo estimaram a estrutura vertical média dos vórtices ciclônicos e anticiclônicos de regiões características de ressurgência. Utilizando a mesma base de dados proveniente de perfiladores Argo, SOUZA *et al.* (2011) e YANG *et al.* (2015) não só reconstruíram a estrutura vertical dos vórtices das Agulhas e dos vórtices ciclônicos e anticiclônicos do Oceano Índico Sul Tropical, respectivamente, como também calcularam o transporte de volume, calor e sal associado a eles.

Assim, a partir de uma análise integrada entre a base de identificação e acompanhamento de vórtices durante um período de 24 anos desenvolvida por CHELTON *et al.* (2011) e da base global de dados de T e S da EN4.2.0 disponibilizada pela

*Met Office Hadley Centre Observations* ([www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/](http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/)) provenientes de perfilagens de XBT, MBT, CTD e perfiladores Argo, esta dissertação tem como objetivo geral estimar a contribuição dos vórtices da CNB no transporte meridional de volume, calor e água doce. Para tanto, os objetivos específicos são:

- Caracterizar os vórtices da CNB quanto a frequência de geração, a variabilidade interanual e intra-anual e a estrutura superficial (raio, amplitude, velocidades de rotação e translação);
- Construir e caracterizar a estrutura vertical do vórtice médio da CNB em termos de temperatura, salinidade e velocidade geostrófica;
- Quantificar a energia cinética, energia potencial disponível e os transportes de volume, calor e água doce associados ao vórtice médio da CNB.

A dissertação foi dividida em quatro capítulos, sendo este primeiro uma introdução em que é apresentada as características dos vórtices da CNB e o estado da arte a respeito de seu transporte de volume e propriedades. O segundo capítulo apresenta a base de identificação superficial e acompanhamento de vórtices utilizada para identificar os vórtices da CNB, além da metodologia aplicada para a reconstrução vertical do vórtice médio e algumas das formulações utilizadas nas estimativas de transporte e energia. Os resultados e discussões são apresentados no terceiro capítulo, que inicia-se com uma estatística geral das principais características dos vórtices da CNB formados durante os anos de 1993 e 2016, partindo para a análise instantânea de três vórtices amostrados sinoticamente que demonstram a representatividade do vórtice médio, apresentado na sequência. E por último, o quarto capítulo que apresenta a contribuição anual dos vórtices da CNB no transporte de volume, calor e água doce como conclusão.

# Capítulo 2

## Metodologia

Para atingir os objetivos deste trabalho, foram utilizadas duas bases de dados principais: a versão mais atual da base global de identificação e acompanhamento de vórtices desenvolvida e validada por D. Chelton e M. Schlax (*Mesoscale Eddy Trajectory Atlas Product*) em parceria com a AVISO, aqui chamada de CH11V4, para identificar a trajetória dos vórtices da CNB; e a base global EN4 (*Met Office Hadley Centre - versão 4.2.0*) de dados de temperatura (T) e salinidade (S), para examinar a distribuição vertical dos parâmetros físicos no interior dos vórtices e reconstruir o vórtice médio da CNB. A área de estudo em que esses dados foram analisados abrange as latitudes de 3 a 12°N e as longitudes de 43 a 60°W (Figura 2.1).

### 2.1 Identificação superficial dos Vórtices da CNB

As trajetórias dos vórtices da CNB foram obtidas a partir da CH11V4 entre janeiro de 1993 a dezembro de 2016. A metodologia utilizada pela base de identificação de vórtices, como será chamada a partir de agora neste trabalho, foi descrita inicialmente por CHELTON *et al.* (2007), posteriormente revista para o lançamento de uma base global por CHELTON *et al.* (2011) e recentemente atualizada por SCHLAX e CHELTON (2016). Atualmente, a base dispõe de mais de 24 anos que se estende até junho de 2017 e pode ser encontrada no endereço eletrônico *wom-*

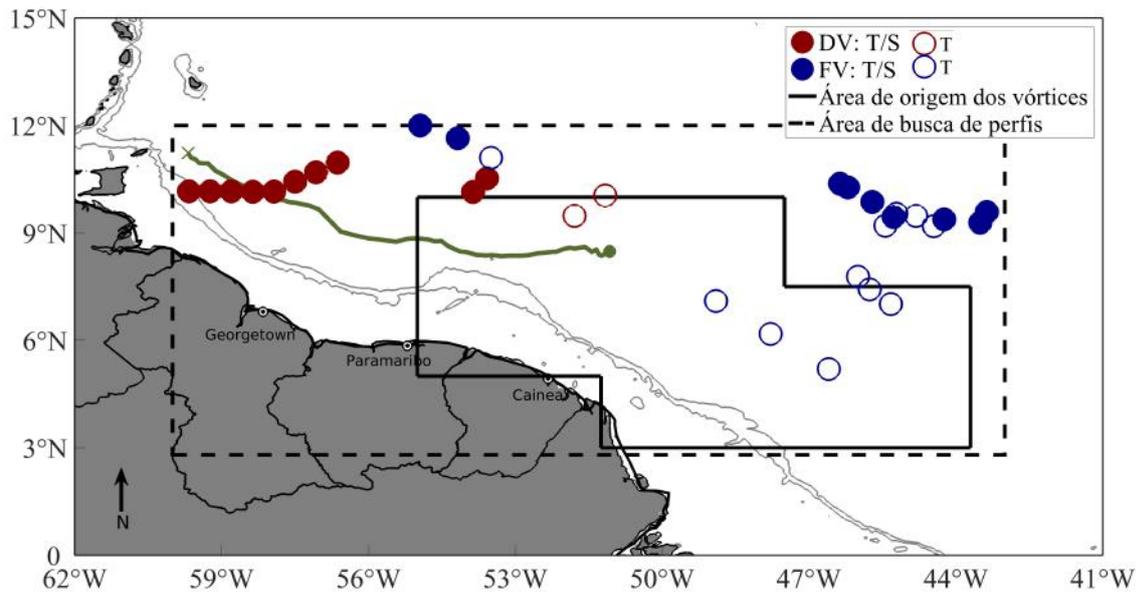


Figura 2.1: Trajetória de um dos vórtices identificados pela base CH11V4 e seus perfis disponíveis de T e S. As linhas cinzas representam as isóbatas de 200 e 1000 m. A linha verde a trajetória do vórtice, em que a posição inicial é marcada pelo círculo e a posição final pelo marcador x. Os retângulos contínuos representam a área de origem dos vórtices entre as latitudes de 3-10°N e 43,7-55°W, e o pontilhado a área de busca de perfis entre 3-12°N e 43-60°W. Os círculos preenchidos representam os perfis pares de T e S, e os vazios os perfis somente de T. A cor vermelha dos círculos representa os perfis considerados dentro (DV) e a azul os perfis considerados fora do vórtice (FV).

Na metodologia de CHELTON *et al.* (2011) é utilizado um algoritmo automático de detecção e acompanhamento de vórtices em mapas diários de anomalia de SSH (*Sea Surface Height*) com resolução de  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$  (DT-2014) produzidos pela AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*) e distribuídos pela Agência Espacial Europeia através do programa Copernicus ([www.marine.copernicus.eu](http://www.marine.copernicus.eu)). Os mapas de anomalia de SSH utilizados são construídos para todo o período de análise a partir da combinação de dois altímetros com operação simultânea e órbita de 10 e 35 dias para obtenção de um mapa homogêneo de altimetria, sendo eles Jason 1 e 2, Envisat, Topex/Poseidon, ERS 1 e 2 e GFO. A detecção dos vórtices é feita com base na identificação de máximos e mínimos locais nos campos de anomalia de SSH (SCHLAX e CHELTON, 2016). Para os vórtices anticiclônicos, que apresentam disposição convexa, sua detecção foi

iniciada com o pixel em um máximo local de SSH e encontrando, sucessivamente, todos os pixels vizinhos, estabelecendo o processo de "crescimento" do interior do vórtice. Esse processo de crescimento segue até o momento em que a manutenção da estrutura compacta e coerente do vórtice seja violada de acordo com os critérios previamente impostos às variações de SSH, definindo assim o limite horizontal do vórtice. A detecção dos vórtices ciclônicos foi realizada seguindo o mesmo procedimento, mas considerando o início do processo de detecção do pixel no mínimo local por apresentarem disposição côncava nos campos de anomalia de SSH. Para cada vórtice detectado, foram definidas propriedades como: (i) amplitude, a partir do valor máximo de anomalia de SSH no vórtice, (ii) raio de máxima velocidade, a partir do raio de um círculo com área igual a do núcleo de máxima velocidade do vórtice, e (iii) velocidade de rotação, conforme a velocidade geostrófica média no perímetro do vórtice definido raio de máxima velocidade.

O acompanhamento dos vórtices detectados foi realizado por um algoritmo que, no passo de tempo inicial, encontra as coordenadas do centro do vórtice (máximo ou mínimo de SSH), e nos passos seguintes procura numa região restrita valores de amplitude e raio entre 0,25 e 2,5 vezes os valores considerados inicialmente. Uma vez fora desse intervalo, o vórtice desaparece e sua trajetória é concluída e somente vórtices com no mínimo 4 semanas de vida são considerados. Segundo os autores, essa metodologia pode levar a uma identificação equivocada da data inicial e final dos vórtices. No entanto, como uma dos principais objetivos deste trabalho foi construir um vórtice médio da CNB, a definição exata da data de início e fim das trajetórias tem pouca influência, já que não afeta fortemente a determinação da amplitude, raio, velocidade de propagação e da direção dos vórtices identificados (CHELTON *et al.*, 2011). Maiores detalhes da metodologia utilizada na base CH11V4 podem ser encontrados em CHELTON *et al.* (2011) e SCHLAX e CHELTON (2016).

Na base CH11V4, os vórtices da CNB caracterizados por apresentarem núcleo quente, anomalia positiva de SSH no centro e sentido horário de rotação, foram identificados como os vórtices anticiclônicos formados na área de origem dos vórtices

entre as latitudes de 3 a 10°N e 43,7-55°W (área de origem dos vórtices - retângulos contínuos na Figura 2.1). A definição da área de origem dos vórtices considerou a posição média da retroflexão da CNB (5-7°N e 49-50°W) (DIDDEN e SCHOTT, 1993; RICHARDSON *et al.*, 1994), sua variabilidade sazonal que chega a atingir a longitude de 45°W e 55°W (FLAGG *et al.*, 1986; SCHOTT *et al.*, 1998; GARZOLI *et al.*, 2004; GOES *et al.*, 2005), e a identificação documentada de vórtices da CNB até a latitude de 10°N (RICHARDSON *et al.*, 1994; GONI e JOHNS, 2001; FRATANTONI e GLICKSON, 2002; GARZOLI *et al.*, 2003). Devido a interação dos vórtices da CNB com o obstáculo batimétrico imposto pela região das Pequenas Antilhas, as trajetórias dos vórtices identificados foram limitadas a 60°W e 12°N, evitando porções das trajetórias que tenham sofrido intensas modificações e gerado possíveis alterações na forma, dinâmica e estrutura vertical dos vórtices.

## 2.2 Reconstrução da Estrutura Vertical do Vórtice Médio da CNB

A estrutura vertical dos vórtices da CNB foi investigada a partir da combinação entre as trajetórias dos vórtices e os perfis de T e S identificados diariamente em suas proximidades. Esses perfis foram obtidos por meio da base de dados EN4.2.0 de T e S que se estende desde o ano 1900 até o presente, englobando as bases WOD09 (*World Ocean Database*), GTSP (Global Temperature and Salinity Profile Program) e Argo Global Data Assembly Centers (sigla em inglês - GDACs) e, em função do equipamento de coleta, que compreende MBTs (*mechanical bathythermograph*), XBTs (*expendable bathythermograph*), CTDs (*Conductivity, Temperature, and Depth*) e perfiladores Argo, são coletados dados de T e/ou de S.

Os perfis de T e S identificados próximos às trajetórias dos vórtices foram utilizados para reconstruir a estrutura vertical do vórtice médio da CNB e para estimar suas anomalias de T e S. Dependendo da distância do perfil ao centro do vórtice, o perfil foi utilizado ou para a reconstrução ou para a estimativa das anomalias do

vórtice médio, e jamais para ambos os casos. Neste contexto, a demarcação do raio do vórtice é bastante crítica pois, além de definir os limites da feição, indicará a distância em que o perfil se encontra do centro do vórtice. Assim como a maior parte da literatura, a base CH11V4 estima o raio de máxima velocidade do vórtice que representa a borda do núcleo que se encontra próximo a rotação de corpo sólido. Afastando-se deste núcleo, tem-se a região de "penumbra" que continua a rotacionar a uma velocidade que diminui progressivamente até o máximo raio de influência do vórtice (HOSKINS *et al.*, 1985). Assim, neste trabalho, entende-se como raio (R) o raio de máxima velocidade e 2R como toda a região de influência do vórtice, na qual a região de penumbra está inclusa.

Dessa forma, para a reconstrução do vórtice médio foram utilizados os perfis de T e S que estiveram no limite de 2R, classificados como perfis dentro do vórtice (DV). Já para estimar suas anomalias de T e S, os perfis a uma distância de 2,5R do centro do vórtice e no interior da área 3-12°N e 43-60°W (área de busca de perfis - retângulo pontilhado na Figura 2.1) foram utilizados e classificados como perfis fora do vórtice (FV). Os perfis que estiveram entre 2R e 2,5R não foram utilizados devido à incerteza sobre a real extensão de influência dos vórtices, podendo ser subestimada pela definição de raio total em 2R. A área de busca de perfis, por sua vez, foi imposta com o objetivo de restringir a identificação dos perfis à região de abrangência das trajetória dos vórtices e evitar variações abruptas no campo de massa por se tratar de uma região próxima ao equador. Os perfis FV somente foram identificados em dias de ocorrência de vórtices e em casos de ocorrência simultânea de dois ou mais vórtices, certificou-se de que um mesmo perfil FV não fosse considerado mais de uma vez. Além disso, certificou-se também que uma vez classificado como dentro do vórtice, o perfil jamais tenha sido classificado como fora para outro vórtice.

Esse método, que combina perfis verticais com as trajetórias dos vórtices, tem sido bastante utilizado pela literatura para a reconstrução da estrutura vertical de vórtices espalhados por todos os oceanos (SOUZA *et al.*, 2011; YANG *et al.*, 2013, 2015; PEGLIASCO *et al.*, 2015). Como um exemplo desta metodologia empregada,

a Figura 2.1 exibe a trajetória de um dos vórtices identificados pela base CH11V4 como exemplo e os perfis de T e S classificados como dentro (DV - círculos vermelhos) e fora do vórtice (FV - círculos azuis). Para o vórtice em questão foram identificados 10 e 11 perfis de pares T/S DV (círculos vermelhos preenchidos) e FV (círculos azuis preenchidos), respectivamente, e 2 e 13 perfis de T DV (círculos vermelhos vazios) e FV (círculos azuis vazios), respectivamente.

Apesar da base de dados EN4 ter sido submetida a um controle de qualidade e a análises objetivas mensais (GOOD *et al.*, 2013), dados espúrios ainda se faziam presentes e os perfis de T e S foram submetidos a um novo controle de qualidade baseado em PEGLIASCO *et al.* (2015). Neste controle de qualidade, os perfis cujos valores de T e S fossem inferiores a 0°C e 30 de salinidade ou superiores a 32°C e 40 de salinidade, respectivamente, foram desconsiderados e apenas foram considerados os perfis T e S em que: (1) a amostragem ultrapassou a profundidade de 500 m, (2) a diferença de profundidade entre dois dados consecutivos não ultrapassou o limite de 25 m para a camada entre 0-150 m, 50 m para a camada entre 150-300 m, 75 m para a camada entre 300-500 m e 100 m para a camada abaixo de 500 m de profundidade, e (3) os dados que estiveram dentro do intervalo de  $\pm 3$  desvios padrões da média dos perfis DV. Posteriormente, os perfis foram interpolados de forma linear a cada 10 m desde a superfície até a maior profundidade disponível.

No total, foram mantidos 6325 perfis de T e 3159 perfis de S que representam cerca de 70% e 63% do perfis identificados inicialmente, respectivamente. Em média, aproximadamente 22% foram classificados em perfis dentro do vórtice e 78% fora, como mostra a Tabela 2.1. A Figura 2.2 apresenta a distribuição espacial desses perfis na área de busca de perfis (retângulo em preto), separando-os em perfis de T e S DV e FV. Cerca de 50% dos perfis de T foram obtidos através de XBTs/MBTs, o que explica o número de perfis de T ser praticamente o dobro do número de perfis de S. Conseqüentemente, cerca da metade dos perfis de T ocupam somente os primeiros mil metros de coluna d'água, enquanto que os perfis de S se estendem a maiores profundidades por terem sido amostrados, quase que em totalidade, por perfiladores

Argo. Dentre o número total de vórtices da CNB identificados, aproximadamente 88% deles foram amostrado por pelo menos um perfil de T ou S.

Tabela 2.1: Porcentagem dos perfis de temperatura (total de 1466 perfis DV e 4859 perfis FV) e de salinidade (total de 698 perfis DV e 2461 perfis FV) utilizados para a reconstrução do vórtice médio da CNB amostrados por sondas de XBT e MBT, perfiladores Argo e CTDs.

Amostrados por:	Perfis dentro do vórtice (DV)		Perfis fora do vórtice (FV)	
	Temp.	Sal.	Temp.	Sal.
XBT/MBT	49%	-	45%	-
ARGO	46%	90%	51%	92%
CTD	5%	10%	4%	8%

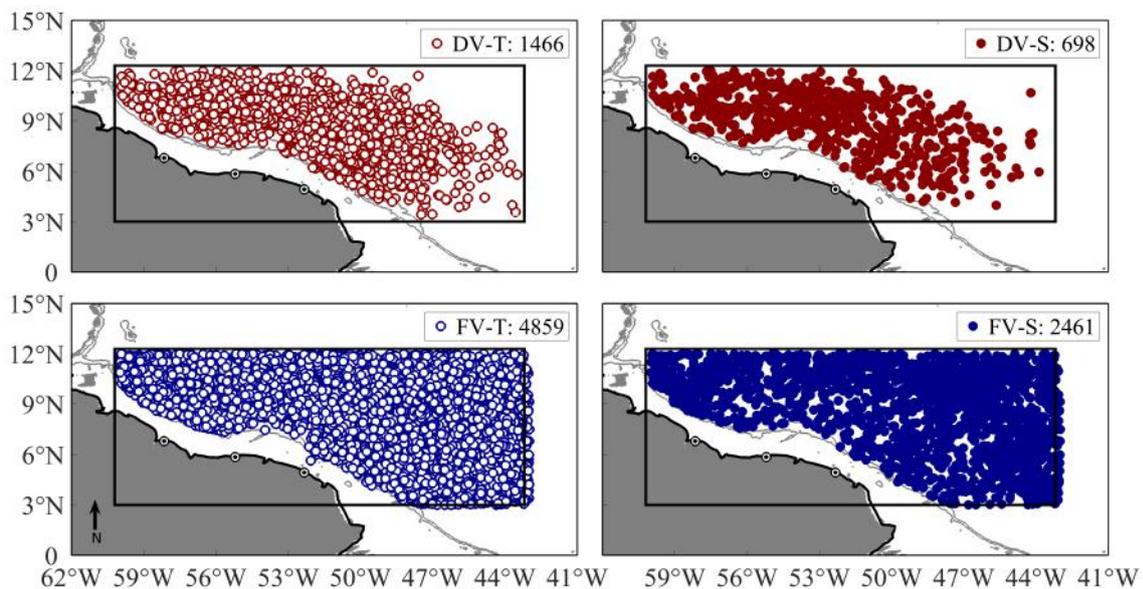


Figura 2.2: Distribuição espacial dos 1466 perfis DV de temperatura (esquerda - círculos vermelhos abertos), dos 698 perfis DV de salinidade (direita - círculos vermelhos fechados). Abaixo distribuição espacial dos 4859 perfis FV de temperatura (esquerda - círculos azuis abertos) e 2461 perfis FV de salinidade (direita- círculos azuis fechados). O retângulo nas figuras representa a área de busca de perfis (3-12°N e 43-55°W) e as linhas cinzas as isóbatas de 200 e 1000 m .

Para a reconstrução do vórtice médio, a posição dos perfis DV foram projetadas para o seu interior a partir da equação 2.1, que exprime a razão entre a distância do perfil ao centro do vórtice em que foi considerado ( $D_V$ ) e o raio deste vórtice ( $R_V$ ),

multiplicado pelo raio do vórtice médio ( $R_{VM}$ ).

$$D_{VM} = \frac{D_V}{R_V} R_{VM} \quad (2.1)$$

onde  $D_{VM}$  representa a distância estimada do perfil ao centro do vórtice médio.

O vórtice médio foi considerado um vórtice simétrico, de modo que todos os perfis foram projetados apenas para um lado da seção do vórtice, a qual foi reconstruída e espelhada para o lado oposto. As seções do vórtice foram obtidas ajustando-se, em cada camada de profundidade, as anomalias de T e S e a distância na horizontal para um polinômio Lagrangeano de sétimo grau. Esse polinômio foi escolhido para representar as características Gaussianas das anomalias do vórtice como na metodologia aplicado por SOUZA *et al.* (2011). Estes processos de normalização e ajuste dos perfis de T e S foram essenciais para obter a estrutura vertical do vórtice médio da CNB.

Uma vez construída a seção do campo de massa do vórtice médio, estimou-se suas anomalias de T e S em relação ao campo de massa médio da área que abrange as trajetórias dos vórtices da CNB neste trabalho, a área de busca de perfis (Figura 2.1). Como este campo de massa médio a ser definido irá condicionar a magnitude das anomalias de T e S associadas ao vórtice médio, foi realizada uma comparação entre o estado médio dessa área estimado pela média dos perfis FV (eg. YANG *et al.*, 2015) e pela média mensal climatológica do *World Ocean Atlas 2013* (sigla em inglês WOA13 - disponível em [www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/)) (LOCARNINI e SEIDOV, 2013; ZWENG, 2013).

## 2.3 Propriedades do Vórtice

### 2.3.1 Transporte de Volume, Calor e Água Doce

A partir da reconstrução do vórtice médio foi possível estimar a contribuição anual associada aos vórtices da CNB nos transportes de volume, calor e água doce através do equador como parte do ramo superficial da AMOC.

Assumindo que toda a água do Atlântico Sul carregada pelos vórtices da CNB após a retroflexão é compensada pela APAN, então o transporte de calor ( $T_C$ ) anual pelo vórtice médio da CNB foi estimado segundo a Equação 2.2 e dividindo por  $3,156 \times 10^7$  s/ano. O transporte de calor anual associado aos vórtices da CNB formados em um ano foi estimado pelo produto entre o transporte de calor anual do vórtice médio e o número médio de vórtices formados por ano.

$$T_C = \rho C_p \Delta T V \quad (2.2)$$

onde  $\rho$  é a densidade média do vórtice médio,  $C_p$  é o calor específico da água do mar ( $4187 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre o vórtice médio, estimada a partir da média das anomalias de T em torno do raio de máxima velocidade, e  $3^\circ\text{C}$  como a temperatura média do fluxo pra sul da APAN sugerida por SVERDRUP *et al.* (1942). O volume V é estimada por  $\pi r^2 H$ , sendo r o raio de máxima velocidade e H a profundidade de alcance do vórtice.

De forma análoga, o transporte de água doce ( $T_{AD}$ ) anual pelo vórtice médio da CNB foi estimado segundo a Equação 2.3.

$$T_{AD} = \rho \frac{(1 - \Delta S)}{1000} V \quad (2.3)$$

onde  $\Delta S$  é a diferença de salinidade entre o vórtice médio, estimada a partir da média das anomalias de S em torno do raio de máxima velocidade, e 34,9 como a salinidade média do fluxo pra sul da APAN sugerida por SVERDRUP *et al.* (1942).

### 2.3.2 Energia Potencial Disponível e Energia Cinética

Os vórtices são feições de mesoescala que sofrem interação com os campos médios de escoamento pela transferência direta de energia entre eles. A energia associada à distribuição do campo de massa no interior do vórtice é definida como Energia Potencial Disponível (EPD). Segundo REID *et al.* (1981), a EPD representa a fração da energia armazenada no campo de densidade deformado do vórtice que está dis-

ponível para ser convertida em Energia Cinética (EC). A EPD e a EC no interior do vórtice médio foram calculadas a partir das seções de velocidade geostrófica e do campo de massa, seguindo a metodologia aplicada por SCHMID *et al.* (1995). Adotou-se a isopicnal de  $1029 \text{ kg m}^3\text{s}^{-1}$ , que corresponde à densidade da profundidade máxima de alcance do vórtice ( $\sim 500 \text{ m}$ , como será mostrado posteriormente), como referência na integração vertical para o cálculo de EPD e EC. Assim, tem-se a EPD:

$$EPD = \int g' \rho (h - h_r) dV \quad (2.4)$$

onde  $g'$  é a gravidade reduzida expressa na forma  $g(\frac{\Delta\rho}{\rho})$ ,  $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$  e  $\Delta\rho$  é a variação de  $\rho$  com a profundidade,  $\rho$  é a densidade que varia com a profundidade,  $h$  e  $h_r$  é a profundidade da isopicnal de referência dentro e fora do vórtice, respectivamente, e  $V$  é o volume do vórtice médio. A EC é calculada a partir da equação:

$$EC = \frac{1}{2} \int \rho V_g^2 dV \quad (2.5)$$

onde  $V_g$  é a velocidade geostrófica estimada para a seção do vórtice a partir das equações do vento térmico (PEDLOSKY, 2013).

Dentre os vórtices da CNB identificados neste trabalho, três deles foram amostrados de forma conveniente para a reconstrução de sua estrutura vertical. São eles: o vórtice A, amostrado por uma seção de CTD no final da sua trajetória; o vórtice B, amostrado por uma seção de XBT no início de sua trajetória, e o vórtice C, amostrado de forma lagrangeana por perfiladores Argo durante grande parte de sua trajetória. A partir da estrutura vertical dos vórtices A e B foram estimados os transportes de volume, calor e água doce, e os conteúdos de energia potencial disponível e energia cinética associados a eles. Com isso foi possível obter uma visão instantânea dos vórtices da CNB em diferentes estágios de desenvolvimento, permitindo avaliar a representatividade do vórtice médio reconstruído.

# Capítulo 3

## Resultados e Discussões

### 3.1 Ocorrência e Características Gerais dos Vórtices da CNB

Entre janeiro de 1993 e dezembro de 2016 foram identificados 153 vórtices da CNB, que tiveram sua formação entre as latitudes de 3-10°N e as longitudes de 43-55°W segundo a base CH11V4. A média de vórtices por ano foi de  $6,4 \pm 1,8$ , ultrapassando o limite superior de formação estimado pela literatura de 2 a 7 vórtices/ano (FRATANTONI *et al.*, 1995; GONI e JOHNS, 2001; FRATANTONI e GLICKSON, 2002; GONI e JOHNS, 2003; JOHNS *et al.*, 2003). Considerando todo o seu ciclo de vida, os vórtices da CNB identificados exibiram tempo de vida médio de  $75 \pm 48$  dias e percorreram uma distância média de  $830 \pm 477$  km com deslocamento de leste para noroeste, como descrito pela literatura (e.g. JOHNS *et al.* 1990). Do total de vórtices identificados, 112 concluíram sua trajetória ainda no domínio da área de busca de perfis e 41 permaneceram bordejando ao Arco das Pequenas Antilhas além de 12°N e 60°W. Destes 41, 9 atravessaram o arco em direção ao Mar do Caribe. Esse pequeno número de vórtices capaz de atingir a região do Caribe se deve, possivelmente, ao fato de que ao cruzar a região das Pequenas Antilhas e adentrar o Mar do Caribe a maior parte dos vórtices se desintegra e o sinal superficial se torna pequeno para ser acompanhado por altimetria (GONI e JOHNS, 2003). Na Figura

3.1 é possível visualizar a trajetória dos 153 vórtices, onde 41 delas foram limitadas a 12°N e 60°W.

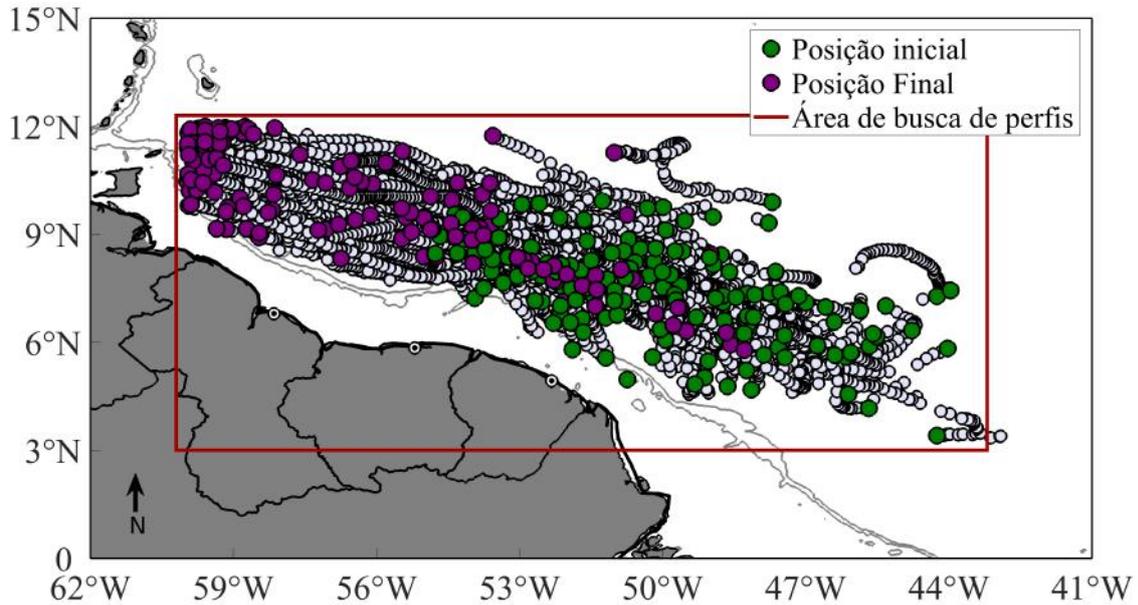


Figura 3.1: Trajetória dos 153 vórtices da CNB identificados a partir da base CH11V4 entre janeiro de 1993 e dezembro de 2016. Os círculos em verde e roxo representam a posição inicial e final das trajetórias dos vórtices, respectivamente, exceto para os 41 vórtices que tiveram suas trajetórias limitadas a 12°N e 60°W. O retângulo vermelho delimita a área de busca de perfis (3-12°N e 60-43°W). As linhas cinzas representam as isóbatas de 200 e 1000 m.

Ao longo de 24 anos, o número de vórtices identificados indicou uma variabilidade interanual forte com o número de formação de vórtices da CNB variando de 2 a 10 vórtices/ano (painel superior da Figura 3.2). O ano de 2016 apresentou o máximo valor de identificação e o ano de 2006 o mínimo. Forte variabilidade interanual na formação de vórtices também foi encontrada por GONI e JOHNS (2001) e GONI e JOHNS (2003) ao verificarem a formação de 3 a 7 vórtices da CNB a partir de pouco mais de 6 (outubro de 1992 a dezembro de 1998) e 10 anos (novembro de 1992 a dezembro de 2001) de dados altimétricos, respectivamente. Comparativamente a esses períodos, foram identificados neste trabalho 6 e 8 vórtices a mais, respectivamente. Essa diferença no número de vórtices identificados possivelmente se deve tanto ao produto do satélite utilizado pelos autores que, diferentemente da base CH11V4, utiliza um produto de SSH de três satélites simultâneos e baseia-se em uma média de 9 anos, quanto ao método de identificação dos vórtices. GONI e JOHNS (2001)

e GONI e JOHNS (2003) identificam os vórtices da CNB a partir da alternância de sinais positivos e negativos de anomalia de SSH à medida que o vórtice percorre seu trajeto em uma região onde a variabilidade de SSH é comparável à anomalia do vórtice.

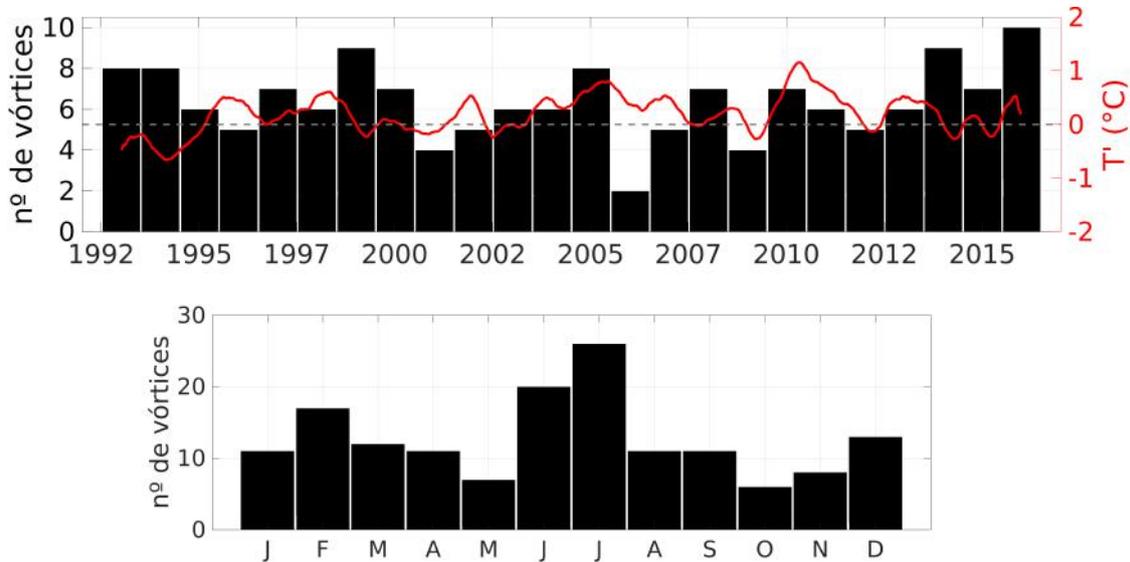


Figura 3.2: Frequência anual (acima) e mensal (abaixo) do número de vórtices identificados através da base CH11V4. A curva em vermelho (alisada) representa o índice do Atlântico Norte Tropical (TNA) de anomalia de temperatura da superfície do mar ( $T'$ ).

GONI e JOHNS (2003) especulam que existe uma relação entre eventos de maior e menor temperatura do Oceano Atlântico Norte com a formação dos vórtices da CNB a partir da análise do índice do Atlântico Norte Tropical (do inglês *Tropical Northern Atlantic Index* - TNA). O TNA é um indicador da temperatura superficial da região leste tropical do Oceano Atlântico Norte, obtido a partir de médias semanais de anomalia de temperatura da superfície do mar entre  $55-15^{\circ}\text{W}$  e  $5-25^{\circ}\text{N}$  e disponibilizado pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration* - [stateoftheocean.osmc.noaa.gov/sur/atl/tna.php](http://stateoftheocean.osmc.noaa.gov/sur/atl/tna.php)). Diferentemente desses autores, não foi possível verificar uma relação direta entre a formação de vórtices com períodos de maior ou menor anomalia de  $T$  (Figura 3.2). Comparado a GONI e JOHNS (2003) que verificaram maior formação de vórtices no período de aquecimento entre 1995 e 1999 (21 vórtices) e menor no período de resfriamento entre 1993 a 1995 (12 vórtices), neste trabalho observou-se o contrário, a formação de 22 e 18 vórtices

nos respectivos períodos. Outros períodos longos de aquecimento ocorreram entre 2003 e 2007, com a formação de 21 vórtices, e entre 2010 e 2012, com 18 vórtices formados. No entanto, anos seguidos de resfriamento não foram observados além do período entre 1993 e 1995.

Quanto à variabilidade intra-anual na formação dos vórtices, observou-se uma maior formação de vórtices nos meses de verão boreal (46 vórtices formados entre junho e julho, durante todo o período de dados), com um segundo máximo nos meses de inverno boreal (42 vórtices formados entre dezembro e fevereiro). A menor formação foi observada nos meses de maio e outubro, com apenas 6 e 5 vórtices formados em cada mês, respectivamente. Não foi possível, porém, determinar uma sazonalidade na formação dos vórtices da CNB, em acordo com estudos prévios (FRATANTONI *et al.*, 1995; FRATANTONI e GLICKSON, 2002; GONI e JOHNS, 2003; JOHNS *et al.*, 2003).

Considerando os 153 vórtices identificados e considerando todo o seu ciclo de vida, o raio médio de máxima velocidade, definido como a distância do centro do vórtice à isolinha de máxima velocidade, foi de  $137 \pm 22$  km; a amplitude média, definida a partir do valor máximo de anomalia de SSH no centro do vórtice, foi de  $8 \pm 3$  cm, e as velocidades médias de rotação e de translação foram de  $0,4 \pm 0,1$   $\text{ms}^{-1}$  e  $17 \pm 4$   $\text{cms}^{-1}$ , respectivamente. Essas estimativas encontram-se em concordância com a literatura (JOHNS *et al.*, 1990; DIDDEN e SCHOTT, 1993; RICHARDSON *et al.*, 1994; FRATANTONI *et al.*, 1995; GONI e JOHNS, 2001; FRATANTONI e GLICKSON, 2002; WILSON *et al.*, 2002; GARZOLI *et al.*, 2003; GARRAFFO *et al.*, 2003; GONI e JOHNS, 2003; JOHNS *et al.*, 2003) que verificou raios de máxima velocidade de 100 a 160 km, amplitudes de 5 a 30 cm, velocidades de rotação de até  $1$   $\text{ms}^{-1}$ , e velocidades de translação de 9 a 30  $\text{cms}^{-1}$  (Tabela 1.1).

## 3.2 Amostragem Sinótica dos Vórtices da CNB

Dentre os 153 vórtices da CNB identificados a partir da base CH11V4, três deles foram amostrados continuamente por seções de CTD, XBT e por perfiladores Argo,

permitindo uma visão instantânea dos vórtices da CNB em diferentes estágios de desenvolvimento. A reconstrução da estrutura vertical desses vórtices foi realizada aplicando a metodologia descrita na seção 2.2 e proporcionou uma avaliação da representatividade do vórtice médio, cuja reconstrução será apresentada na Seção 3.3.2.

### 3.2.1 Vórtice A (seção de CTD)

O vórtice A foi identificado no dia 30 de maio de 2004 próximo a latitude de  $8,5^{\circ}\text{N}$  e longitude de  $51^{\circ}\text{W}$ , deslocando-se por 64 dias em direção ao Arco das Pequenas Antilhas (Figura 3.3), sem ultrapassar os limites da região de estudo ( $12^{\circ}\text{N}$  e  $60^{\circ}\text{W}$ ). Durante seu ciclo de vida, o vórtice apresentou raio de máxima velocidade médio de  $\sim 130 \pm 20$  km, amplitude média de  $\sim 7 \pm 2$  cm, velocidade de rotação média de  $\sim 0,4 \pm 0,1$   $\text{ms}^{-1}$  e velocidade de translação média de  $20 \pm 5,7$   $\text{cms}^{-1}$ . Comparado a média dos 153 vórtices, o vórtice A apresentou características superficiais bastante próximas, com exceção da velocidade de translação, superior a  $16$   $\text{cms}^{-1}$ .

O estudo da estrutura vertical do vórtice A foi realizado a partir da seção de CTD durante os dias 18, 19 e 20 de julho de 2004 (Figura 3.3). Mediante a um raio de máxima velocidade de cerca 134 km no dia 19, das 11 perfilagens de CTD realizadas, 8 delas foram consideradas dentro (círculos vermelhos) e 3 fora do vórtice (círculos azuis). Espaçadas em média em  $\sim 53$  km, as perfilagens atingiram a profundidade de até 2600 m e a perfilagem mais próxima ao centro do vórtices esteve a aproximadamente 8 km. A partir da seção de T foi possível visualizar de forma clara a disposição côncava das isolinhas até  $\sim 300$  m, com temperaturas entre 10 e  $30^{\circ}\text{C}$  (painel à esquerda da Figura 3.4). À direita nessa mesma figura a seção de S evidenciou uma forma lenticular, com variação das isohalinas até  $\sim 300$  m, com máximo de 37 de salinidade em torno de 100 m de profundidade.

Tomando-se por base a média dos perfis FV identificados para os 153 vórtices, visando a comparação posterior com o vórtice médio reconstruído (Seção 3.3.2), foram estimadas as seções de anomalia de T e S do vórtice A (Figura 3.5 a e b,

respectivamente). Ambas anomalias se concentraram aproximadamente entre 50 e 400 m com núcleos de 5°C e 0,9 de salinidade em torno de 200 m de profundidade. Considerando a extensão vertical das anomalias, o nível de referência foi definido em 420 m e, a partir do método dinâmico, a seção de velocidade geostrófica do vórtice foi calculada para o dia 19 de julho de 2004 (Figura 3.5 c). O máximo de velocidade ocorreu em superfície centrado em 50 m, e a estrutura vertical de velocidade se concentrou nos primeiros 200 m de profundidade. O escoamento para norte, na borda oeste do vórtice, apresentou-se mais estreito e intenso que o do bordo contrário, possivelmente devido à interação com a batimetria da região que torna sua forma mais elíptica (Figura 3.3).

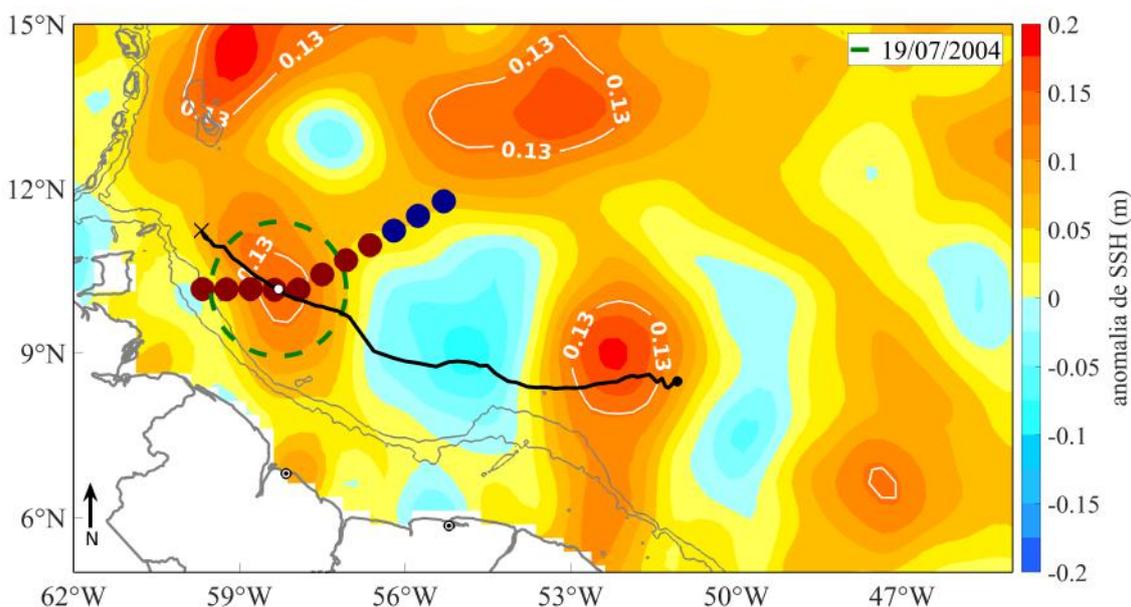


Figura 3.3: Instantâneo da anomalia de SSH para o dia 19/07/2004 quando o vórtice A foi amostrado por uma seção de CTD, próximo a longitude de 59°W (círculo branco). O círculo tracejado em verde mostra a área do vórtice calculada a partir do seu raio de máxima velocidade e a seção é representada pela sequência de perfis DV (círculos vermelhos) e perfis FV (círculos azuis). Em preto tem-se a trajetória completa do vórtice, sendo a posição inicial em 30/05/2004 (círculo preto) e a posição final em 01/08/2004 (marcador x). As linhas cinzas finas destacam as isóbatas de 200 e 1000 m.

A estrutura vertical de velocidade do vórtice se apresentou similar aos vórtices M2, M5 e M6 e 2, 3 e 4 classificados como intensificados em superfície por FRA-TANTONI *et al.* (1995) e WILSON *et al.* (2002) a partir de amostragem direta por fundeio e levantamentos à bordo, respectivamente. A maior parte dos vórtices

foi amostrada no início de suas trajetórias entre as longitudes de 50 e 55°W, com exceção do vórtice 2 que, assim como o vórtice A, foi amostrado entre as longitudes de 50 e 55°W. Exibindo núcleo de máxima velocidade próximo a superfície e estrutura vertical de velocidade confinada principalmente nos primeiros 200 m de coluna d'água, as principais características do vórtice A e dos vórtices descritos pela literatura foram condensadas na Tabela 3.1. Em comparação com os vórtices M2, M5 e M6, o vórtice A apresentou raio de máxima velocidade superior e velocidade máxima de rotação similares e, em comparação aos vórtices 2, 3 e 4, apresentou raio de máxima velocidade próximo e velocidade máxima de rotação inferior. É importante ressaltar que, embora se estenda até cerca 2000 m de profundidade, o vórtice 2 foi classificado como vórtice intensificado em superfície (WILSON *et al.*, 2002) e apresenta propriedades similares aos outros vórtices, como mostrado na tabela.

Tabela 3.1: Características dos vórtices A e B identificados neste trabalho pela base CH11V4, dos vórtices M2, M5 e M6 segundo FRATANTONI *et al.* (1995), e dos vórtices 2, 3 e 4 segundo WILSON *et al.* (2002); JOHNS *et al.* (2003) e FRATANTONI e RICHARDSON (2006). Incluem-se a profundidade em que a estrutura vertical de velocidade está confinada (prof), o raio de máxima velocidade (Rm), a velocidade de rotação (vel), o volume (vol) e os transportes de volume (Tr.volume), calor (Tr.calor) e água doce (Tr.AD).

	<b>Prof.</b> (m)	<b>Rm</b> (km)	<b>Vel.</b> ( $m s^{-1}$ )	<b>Vol.</b> ( $10^{13} m^3$ )	<b>Tr.Volume</b> (Sv)	<b>Tr.Calor</b> (PW)	<b>Tr.AD</b> ( $10^9 kg s^{-1}$ )
<b>A</b>	<b>200</b>	<b>134</b>	<b>0,5</b>	<b>2,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,04</b>	<b>0,0002</b>
<b>B</b>	<b>200</b>	<b>114</b>	<b>0,9</b>	<b>1,6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,03</b>	-
<b>M2</b>	300	150	0,4	$3,5 \pm 1$	$1,1 \pm 0,3$	$0,06 \pm 0,02$	-
<b>M5</b>	200	110	0,4	$1,3 \pm 0,7$	$0,4 \pm 0,2$	$0,03 \pm 0,01$	-
<b>M6</b>	200	70	0,2	$0,5 \pm 0,4$	$0,2 \pm 0,1$	$0,01 \pm 0,08$	-
<b>2</b>	2000	160	1,0	4,6	1,5	-	-
<b>3</b>	350	150	0,8	4,4	1,4	-	-
<b>4</b>	200	150	0,6	2,1	0,7	-	-

O volume e o transporte de volume do vórtice A foi estimado em  $2,4 \times 10^{13} m^3$  e 0,7 Sv, respectivamente. Em comparação aos vórtices descritos pela literatura, o volume e o transporte de volume responderam às extensões vertical e horizontal dos mesmos. O volume e o transporte de água do Atlântico Sul para os vórtices 2, 3 e 4 descritos primeiramente por WILSON *et al.* (2002), foram estimados por JOHNS *et al.* (2003) a partir de uma análise mais completa dos dados obtidos e são

mostrados na Tabela 3.1. Além desses, dentre os 30 vórtices analisados por esses autores, 23 deles foram classificados como vórtices intensificados em superfície e, portanto, também similares ao vórtice A com raio de máxima velocidade entre 85 e 160 km, extensão vertical de no mínimo 120 m a no máximo 600 m e transporte de volume de 0,9 Sv.

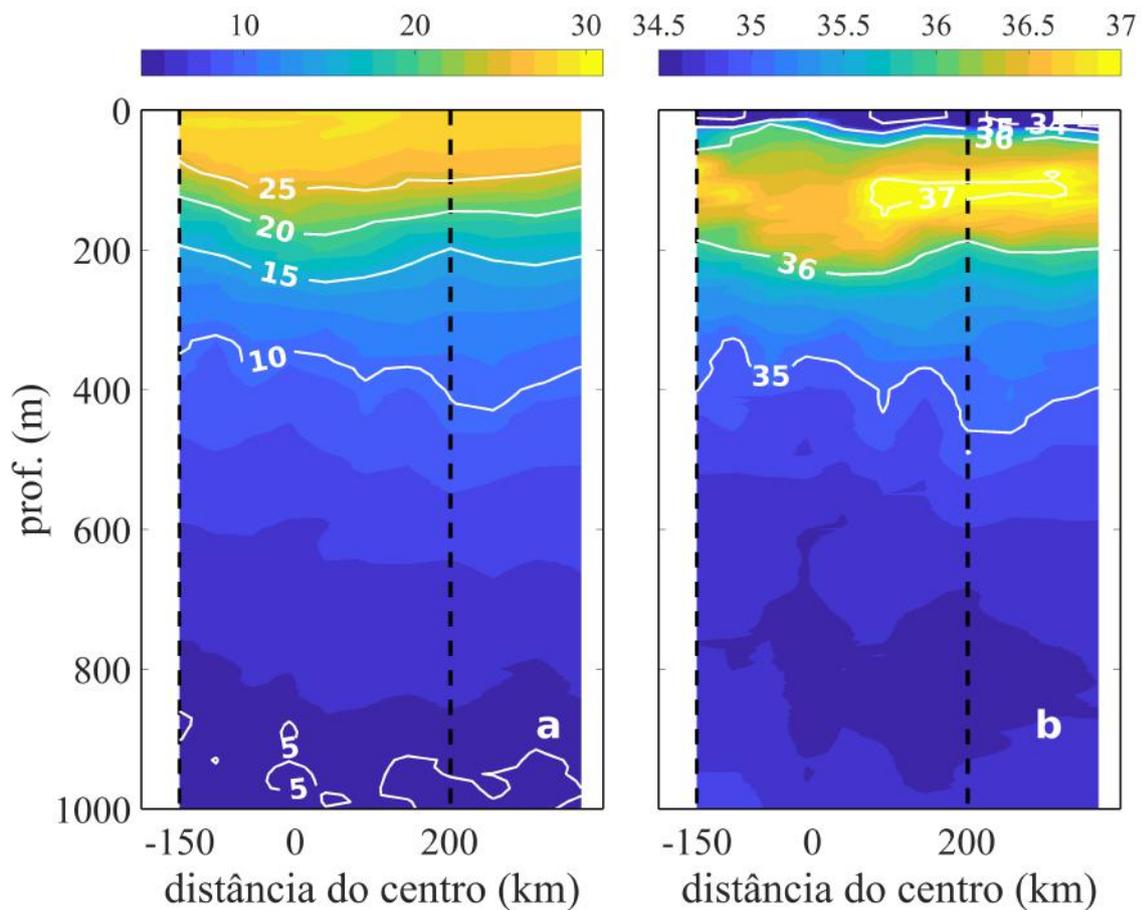


Figura 3.4: Seções de T (a) e S (b) do vórtice A construídas a partir da seção de CTD, onde as isolinhas brancas contornam regiões de mesma temperatura e salinidade, respectivamente. As linhas tracejadas indicam o limite dos perfis DV da seção.

Com temperatura e salinidade médias próximas a  $16,5^{\circ}\text{C}$  e  $35,5$ , e utilizando os valores de referência de  $3^{\circ}\text{C}$  e  $34,9$  de salinidade da APAN segundo SVERDRUP *et al.* (1942), o vórtice A apresentou transporte de calor de  $0,04$  PW e de água doce de  $0,0002 \times 10^9 \text{ kgs}^{-1}$ . Em comparação aos vórtices M2, M5 e M6, apesar de apresentarem temperaturas médias maiores ( $17,9$ ,  $20,5$  e  $19,1^{\circ}\text{C}$ , respectivamente) possivelmente por terem sido amostrados no início de suas trajetórias, os transportes

de calor se mostraram próximos ao do vórtice A. A EPD do vórtice A foi estimada em aproximadamente 11 PJ e a EC em 1,5 PJ ( $1PJ = 1 \times 10^{15}J$ ), próximas às energias estimadas para os vórtices M2, M5 e M6. Já para os vórtices 2, 3 e 4 o transporte de calor, a EPD e a EC não foram estimados pelos autores.

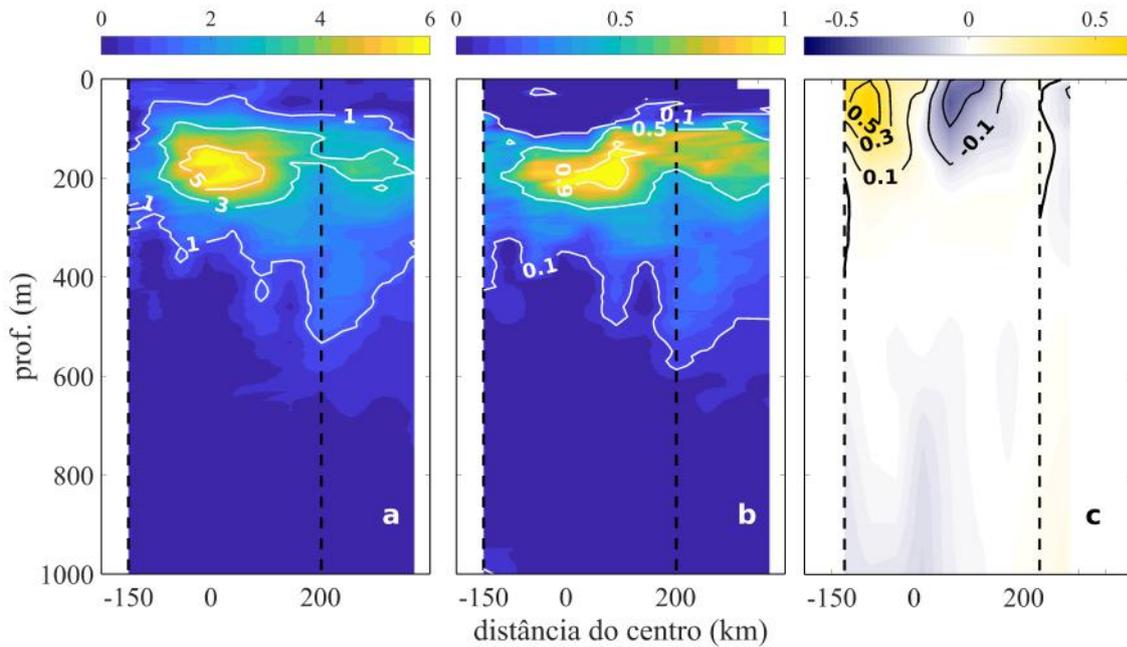


Figura 3.5: No painel a (b) tem-se a seção de anomalia de T (S) reconstruída para o vórtice A, onde as isolinhas em branco contornam valores iguais de temperatura (salinidade). Em c tem-se a seção de velocidade geostrófica calculada a partir do nível de referência de 420 m, onde as isolinhas em preto representam a velocidade em  $ms^{-1}$  - tons amarelos são velocidades positivas (para norte) e tons azuis são negativos (para sul). As linhas tracejadas demonstram o limite dos perfis DV.

### 3.2.2 Vórtice B (seção de XBT)

O vórtice B foi identificado no dia 19 de março de 2013 próximo a latitude de  $8^{\circ}N$  e longitude de  $50^{\circ}W$ , deslocando-se por 52 dias em direção ao Arco das Pequenas Antilhas (Figura 3.6), também sem ultrapassar os limites da região de estudo. Durante seu ciclo de vida, o vórtice apresentou raio de máxima velocidade médio de  $\sim 139 \pm 37$  km, amplitude média de  $\sim 8 \pm 3$  cm, velocidade de rotação média de  $\sim 0,4 \pm 0,08$   $ms^{-1}$  e velocidade de translação média de  $18 \pm 6,6$   $cms^{-1}$ .

O estudo da estrutura vertical do vórtice B foi realizado a partir da amostragem por sondas de XBT durante um cruzeiro realizado nos dias 01 e 02 de abril de

2013 (Figura 3.6). Nessa seção, os lançamentos foram espaçados em média em  $\sim 28$  km e as sondas atingiram a profundidade máxima de aproximadamente 880 m, e a perfilagem mais próxima do centro do vórtice esteve a aproximadamente 14 km. Baseado em um raio de máxima velocidade de  $\sim 114$  km no dia 02, dos 29 lançamentos 15 deles foram consideradas dentro (círculos vermelhos) e 14 fora do vórtice (círculos azuis). A partir da seção de T do vórtice (Figura 3.7 a) foi possível visualizar claramente a disposição concava das isolinhas até aproximadamente 350 m com temperatura variando entre 10 e  $30^{\circ}\text{C}$ , assim como no vórtice A (ver seção anterior).

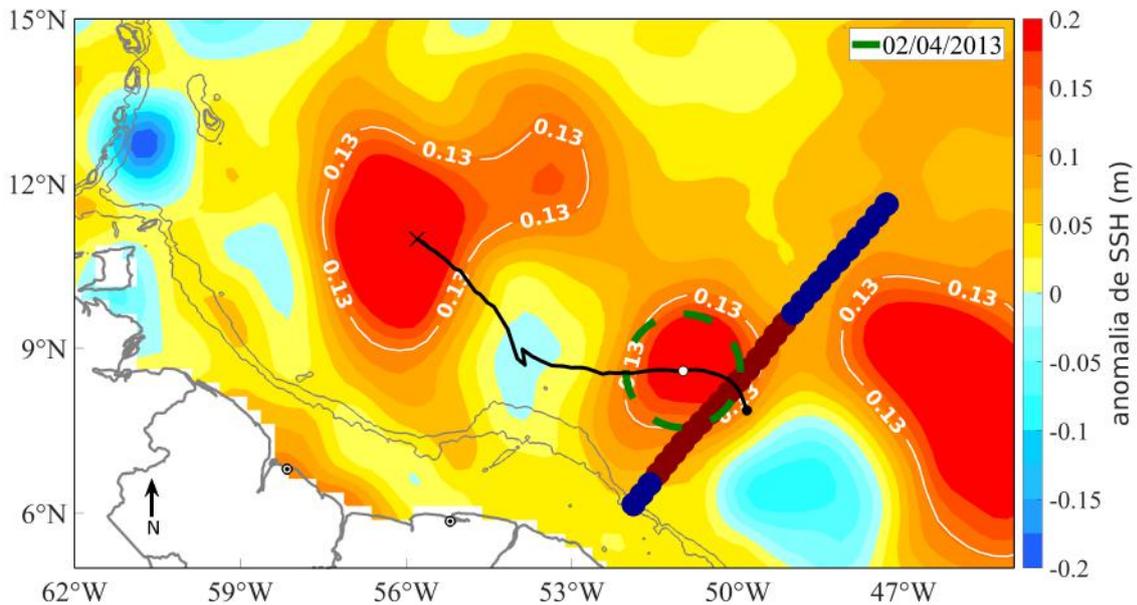


Figura 3.6: Instantâneo da anomalia de SSH para o dia 02/04/2013 quando o vórtice B foi amostrado por uma seção de XTD, próximo a longitude de  $52^{\circ}\text{W}$  (círculo branco). O círculo tracejado em verde mostra a área do vórtice calculada a partir do seu raio de máxima velocidade, e a seção é representada pela seqüência de perfis DV (círculos vermelhos) e perfis FV (círculos azuis). Em preto tem-se a trajetória completa do vórtice, sendo a posição inicial em 19/03/2013 (círculo preto) e a posição final em 09/05/2013 (marcador x). As linhas cinzas finas destacam as isóbatas de 200 e 1000 m.

Baseando-se na média dos perfis FV, visando a comparação com o vórtice médio posteriormente, a seção de anomalia de T do vórtice B foi estimada (Figura 3.7 b). A anomalia de T se concentrou entre aproximadamente 50 e 300 m, com núcleo de  $5^{\circ}\text{C}$  em aproximadamente 150 m. Quando comparado ao vórtice A, o vórtice B apresentou-se mais raso, com máxima anomalia de T similar, e núcleo bem mais

desenvolvido, ocupando cerca de 200 m do interior do vórtice (entre 100 e 300 m). Segundo FRATANTONI e GLICKSON (2002) no processo de evolução, a água do núcleo dos vórtices da CNB é perdida ou modificada a partir de processos laterais e verticais de mistura. Dessa forma, a presença de um núcleo maior no vórtice B pode evidenciar o fato deste vórtice ter sido amostrado no início do seu ciclo de vida, sofrendo poucos processos de mistura e garantindo menor perda de suas propriedades originais, ou simplesmente uma diferença intrínseca entre os vórtices.

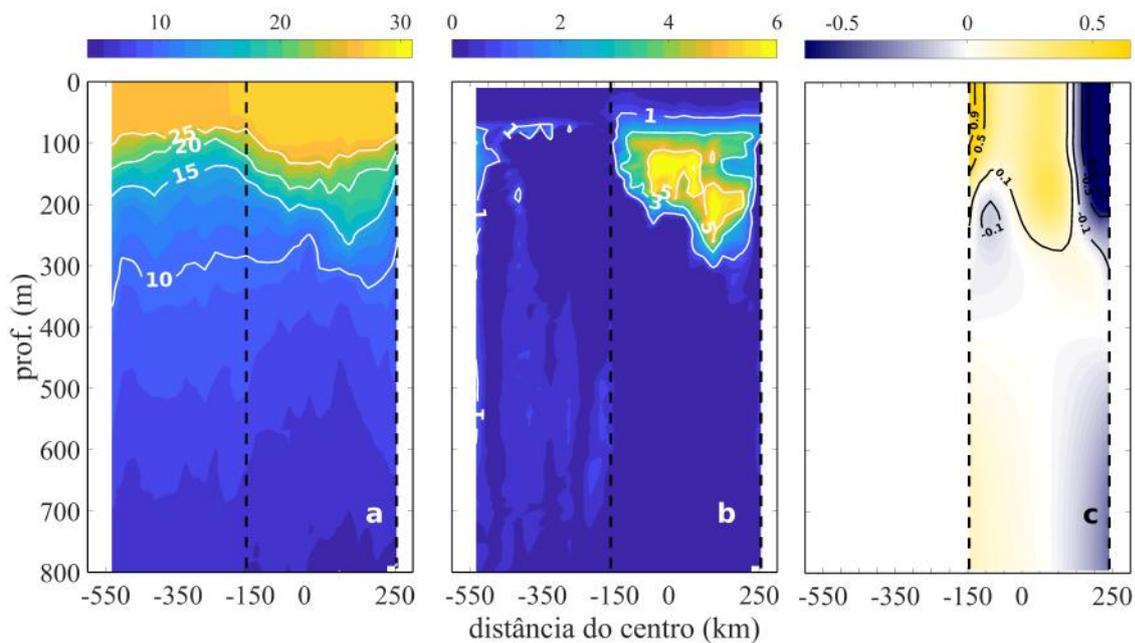


Figura 3.7: Seções de T (a) e de anomalia de T (b) do vórtice B construídas a partir das sondagens de XBT, onde as isolinhas em branco contornam valores iguais de temperatura e de anomalia de temperatura, respectivamente. Seção de velocidade geostrófica em c calculada a partir do nível de referência de 400 m, onde as isolinhas em preto representam a velocidade em  $\text{ms}^{-1}$  - tons amarelos são velocidades positivas (para norte) e tons azuis negativos (para sul). As linhas tracejadas demonstram o limite dos perfis DV.

Para calcular a velocidade geostrófica do vórtice B, foi estimada uma seção de S sintética baseando-se na metodologia descrita por THACKER *et al.* (2004) a partir da interpolação da climatologia WOA13 para os meses de março e abril. A partir do método dinâmico, estimou-se a seção de velocidade geostrófica para o dia 2 de abril de 2013, tomando como nível de referência 400 m, profundidade máxima de alcance das anomalias de T do vórtice (Figura 3.7 c). O máximo de velocidade ocorreu em superfície, com núcleo de máxima velocidade se estendendo abaixo de

100 m, e estrutura vertical confinada nos primeiros 300 m de coluna d'água. Ambos os escoamentos, para norte e para sul, exibiram a mesma intensidade ( $0,9 \text{ ms}^{-1}$ ) com a borda oeste do vórtice mais larga e com núcleo de máxima velocidade menos profundo ( $\sim 100 \text{ m}$ ). Esse padrão possivelmente se deve à interação do vórtice com a batimetria local, tornando sua forma mais elíptica como mostra o campo de SLA da Figura 3.6, expandindo horizontalmente e comprimindo verticalmente esse bordo mais afetado pela batimetria.

Comparado ao vórtice A, o vórtice B apresentou-se menor, com raio de máxima velocidade de cerca de 114 km, porém mais intenso com velocidade de  $0,9 \text{ ms}^{-1}$  se estendendo até 200 m (Tabela 3.1). Assim como a grande extensão do núcleo de anomalia de T (entre 100 e 300 m), o alcance vertical do núcleo de máxima velocidade geostrófica do vórtice B pode representar o estágio de vida inicial do vórtice, com pouca perda ou modificação na sua estrutura vertical devido a processos de interação com o meio externo.

Com volume de aproximadamente  $1,6 \times 10^{13} \text{ m}^3$ , o transporte de volume do vórtice B foi estimado em 0,5 Sv. Com temperatura média de  $17^\circ\text{C}$  estimada a partir da seção de anomalia de T dentro do raio de máxima velocidade do vórtice, o transporte de calor foi estimado em 0,03 PW em relação a APAN, bem próximo ao do vórtice A (Tabela 3.1). Como as temperaturas médias dos vórtices são próximas, as estimativas de transporte de calor respondem aos seus volumes e, por esse motivo, vórtices mais profundos transportam mais calor. A EPD e a EC foram estimadas em 16 e 1,5 PJ e apresentaram-se próximas às energias do vórtice A.

### 3.2.3 Vórtice C (perfilagem por Argo)

O vórtice C foi identificado no dia 08 de janeiro de 2014 próximo a latitude de  $8^\circ\text{N}$  e longitude de  $49^\circ\text{W}$ , deslocando-se por 85 dias em direção ao Arco das Pequenas Antilhas, sem ultrapassar o limite oeste da região de estudo. A metodologia utilizada pela base CH11V4 se mostrou bastante eficiente ao identificar e acompanhar a trajetória do vórtice (Figura 3.8), identificando-o como uma feição coerente

durante todo o seu ciclo de vida, com contornos de SLA definidos e fechados. No entanto, como pode ser observado, inicialmente o centro do vórtice não coincidiu com o máximo de SLA possivelmente devido a diferença do produto altimétrico utilizado neste trabalho e pela base CH11V4. Diferentemente da base que utiliza dados combinados de apenas dois satélites, os campos de anomalia de SSH da Figura 3.8 foram produzidos a partir de dados altimétricos multi-satélite que englobam até quatro satélites, garantindo uma maior resolução na representação de feições de mesoscala.

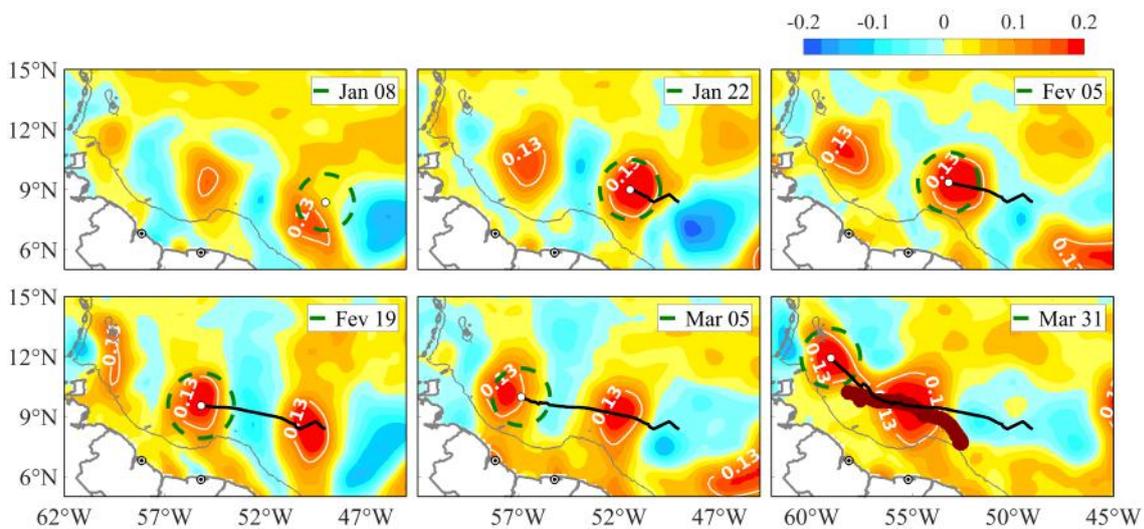


Figura 3.8: Sequência de instantâneos de anomalia de SSH desde a formação do vórtice C (08/01/2014) até o final do seu ciclo de vida (31/03/14). Para cada instantâneo, tem-se a trajetória do vórtice, onde a posição do seu centro é evidenciada pelo círculo branco e o círculo tracejado em verde mostra a área do vórtice calculada a partir do seu raio de máxima velocidade para o dia em questão. No último instantâneo, a sequência de círculos vermelhos representa as amostragens realizadas pelos perfiladores Argo dentro do vórtice durante o seu ciclo de vida. A linha cinza fina destaca a isóbata de 1000 m.

Durante seu ciclo de vida, o vórtice C apresentou raio de máxima velocidade médio de  $\sim 157 \pm 19$  km, amplitude média de  $\sim 17 \pm 2,5$  cm, velocidade de rotação média de  $\sim 0,6 \pm 0,1$   $\text{ms}^{-1}$  e velocidade de translação média de  $16 \pm 3,4$   $\text{cms}^{-1}$ . No decorrer de sua trajetória, após ultrapassar a barreira topográfica localizada entre  $52$  e  $54^\circ\text{W}$ , a forma do vórtice se tornou elíptica devido à interação com a batimetria. Um pouco adiante, nas proximidades das ilhas de Trinidad, Tobago e Barbados, o vórtice experimentou novamente o efeito da batimetria, sendo comprimido na direção

noroeste-sudeste e virando para o norte no final de sua trajetória. Nas proximidades de  $52^{\circ}\text{W}$  o vórtice capturou perfiladores Argo poucos dias após sua formação, no dia 13 de janeiro de 2014, os quais foram transportados por cerca de 670 km, ao longo de 64 dias, realizando um total de 41 perfilagens, resultando em amostragens durante praticamente todo o ciclo de vida do vórtice.

Segundo as seções de anomalia de T e S (Figura 3.9 b e d, respectivamente), construídas a partir dos dados do perfilador e da média dos perfis FV identificados para os 153 vórtices, o vórtice C se estendeu desde 50 m abaixo da superfície até cerca 400 m de profundidade. A profundidade de alcance do vórtice variou conforme a distância do perfil Argo do seu centro, apresentando seu menor alcance vertical no mês de janeiro, quando o perfilador esteve localizado além do raio de máxima velocidade do vórtice (Figura 3.9 a). A partir do dia 06 de fevereiro, quando o perfilador se manteve a uma distância média de 61 km do centro do vórtice, foram exibidas as anomalias mais intensas de T e S centradas em  $\sim 180$  e 200 m, chegando a atingir temperatura de  $\sim 10^{\circ}\text{C}$  e 0,9, respectivamente (Figura 3.9 c e e, respectivamente). A atenuação dos núcleos de anomalia de T e S após o dia 12 de março pode indicar o final do ciclo de vida do vórtice, já que o perfilador não se afastou significativamente do seu centro nesse período.

Em comparação aos vórtices A e B, o vórtice C apresentou maior raio de máxima velocidade, praticamente o dobro da amplitude, 1,5 vezes a velocidade de rotação (Tabela 3.1), e teve 1 mês a mais de vida. A anomalia de T foi cerca de  $5^{\circ}\text{C}$  superior e a de S foi similar, acima de 0,3. Esta seção é a que melhor representa a estrutura vertical instantânea de T e S dos vórtices da CNB identificados neste trabalho pois se manteve próxima ao centro da feição por mais tempo, amostrando grande parte do seu ciclo de vida.

Comparado aos vórtices M2, M5, M6, 2, 3 e 4 descritos pela literatura (FRATANTONI *et al.*, 1995; WILSON *et al.*, 2002; JOHNS *et al.*, 2003; FRATANTONI e RICHARDSON, 2006), o vórtice C apresentou maior raio de máxima velocidade próximo ao do vórtice 2 (160 km), e velocidade de rotação similar ao do vórtice 4

( $0,6 \text{ ms}^{-1}$ ).

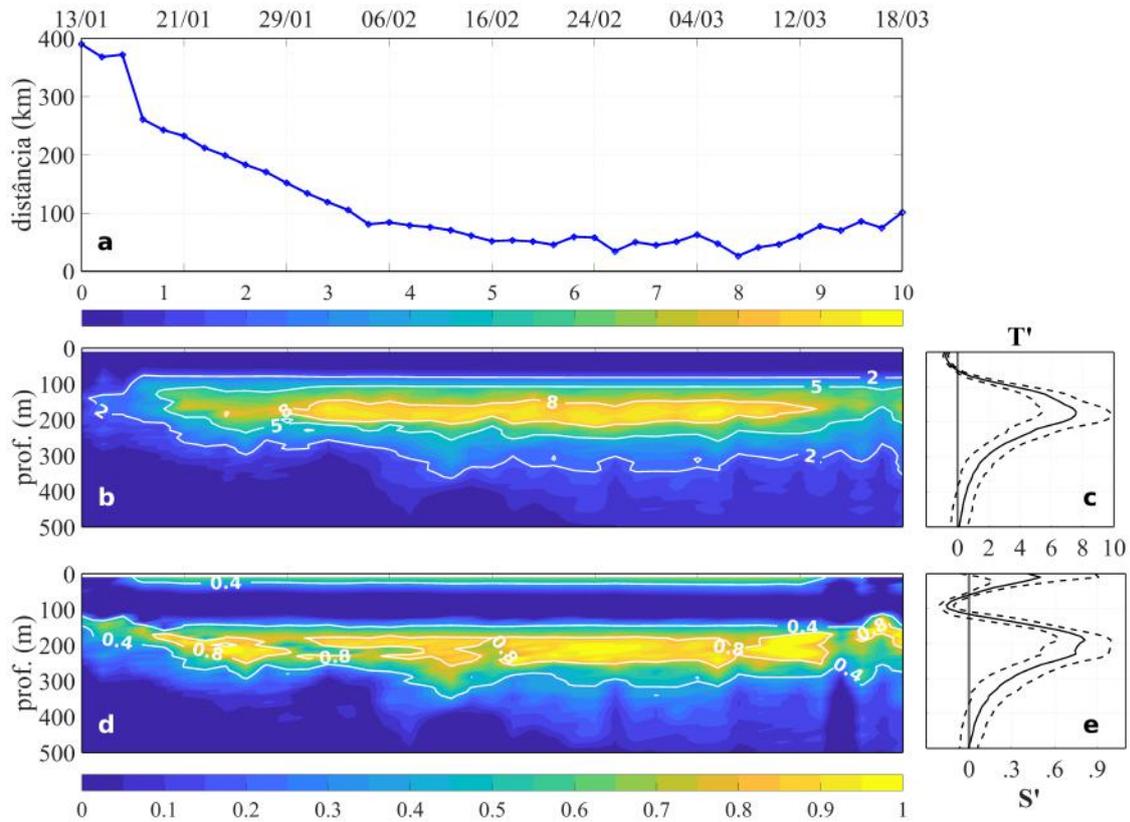


Figura 3.9: (a) Distância do centro do vórtice C das perfilagens realizadas pelos perfiladores Argo (em km). (b e d) Seção de anomalia de T e S construídas a partir das perfilagens entre os dias 13 de janeiro a 18 de março de 2014.(c e e) Perfil médio de anomalia de T e S em linha contínua e desvio padrão em linhas tracejadas das seções em b e d, respectivamente.

Embora as perfilagens forneçam uma série temporal da estrutura termohalina do vórtice, não foi possível estimar seu volume, transporte de volume e propriedades e conteúdo energético, uma vez que a posição do perfilador não é fixa em relação ao centro do vórtice.

### 3.3 Vórtice Médio

#### 3.3.1 Características Superficiais

Considerando apenas os 134 vórtices que apresentaram ao menos 1 perfil DV de T e/ou S, as estimativas das características superficiais do vórtice médio foram realizadas e mantiveram-se próximas ao considerar os 153 vórtices, com exceção

do raio de máxima velocidade e da amplitude que foram superiores (Tabela 3.2). Apresentando raio de máxima velocidade de  $162 \pm 41$  km, amplitude de  $10 \pm 4$  cm, velocidade de rotação de  $0,4 \pm 0,1$   $\text{ms}^{-1}$  e velocidade média de translação de  $17 \pm 4$   $\text{cms}^{-1}$ , o vórtice médio representou bem as características superficiais do conjunto de 153 vórtices identificados nesse trabalho.

Em comparação com os vórtices A (seção 3.2.1), B (seção 3.2.2) e C (seção 3.2.3), o vórtice médio apresenta raio de máxima velocidade similar ao vórtice C ( $\sim 157$  km), amplitude maior que a dos vórtices A e B e velocidade de rotação similar (7 e 8 cm de amplitude, respectivamente, e  $0,4$   $\text{ms}^{-1}$  de velocidade para ambos).

Tabela 3.2: Características superficiais do vórtice médio estimadas a partir dos 153 vórtices identificados e dos 134 que apresentaram ao menos 1 perfil DV (dentro do vórtice) de T e/ou S.

Número de Vórtices	Raio Max. (km)	Amplitude (cm)	Vel. Rotação ( $\text{m s}^{-1}$ )	Vel. Translação ( $\text{cm s}^{-1}$ )
<b>153</b>	$137 \pm 22$	$8 \pm 3$	$0,4 \pm 0,1$	$17 \pm 4$
<b>134</b>	$162 \pm 41$	$10 \pm 4$	$0,4 \pm 0,1$	$17 \pm 4$

### 3.3.2 Reconstrução da Estrutura Vertical

Para a reconstrução da estrutura vertical de volume do vórtice médio da CNB, os perfis DV de T e S foram projetados linearmente para o vórtice médio, respeitando a distância que cada perfil apresentava do centro do vórtice em que foi amostrado. Tanto os perfis de T quanto os de S se distribuíram de forma uniforme na área do vórtice médio (Figura 3.10 b superior e inferior, respectivamente). Longitudinalmente, cerca da metade dos perfis de T e S estiveram distribuídos entre  $50$  e  $54^\circ\text{W}$  (Figura 3.10 c), onde estão localizados os vórtices com pouco tempo de vida ou ainda recém formados, apresentando estrutura vertical pouco influenciada e/ou modificada pelo meio externo. Esses perfis dão um peso maior das condições originais dos vórtices da CNB na reconstrução do vórtice médio.

Ao dividir a área do vórtice médio em distâncias radiais (segmentos) de aproximadamente  $27$  km a partir do seu centro até duas vezes o raio de máxima velocidade

( $\sim 324$  km), os perfis de T (total de 1466) e S (total de 698) foram distribuídos em 12 segmentos (Figura 3.10 a). A maior quantidade de perfis se concentrou nos segmentos externos, tendo em vista a maior área dos mesmos e, para cada um dos segmentos, um perfil médio de T e S foi calculado e interpolado para a criação do campo de T e S do vórtice médio.

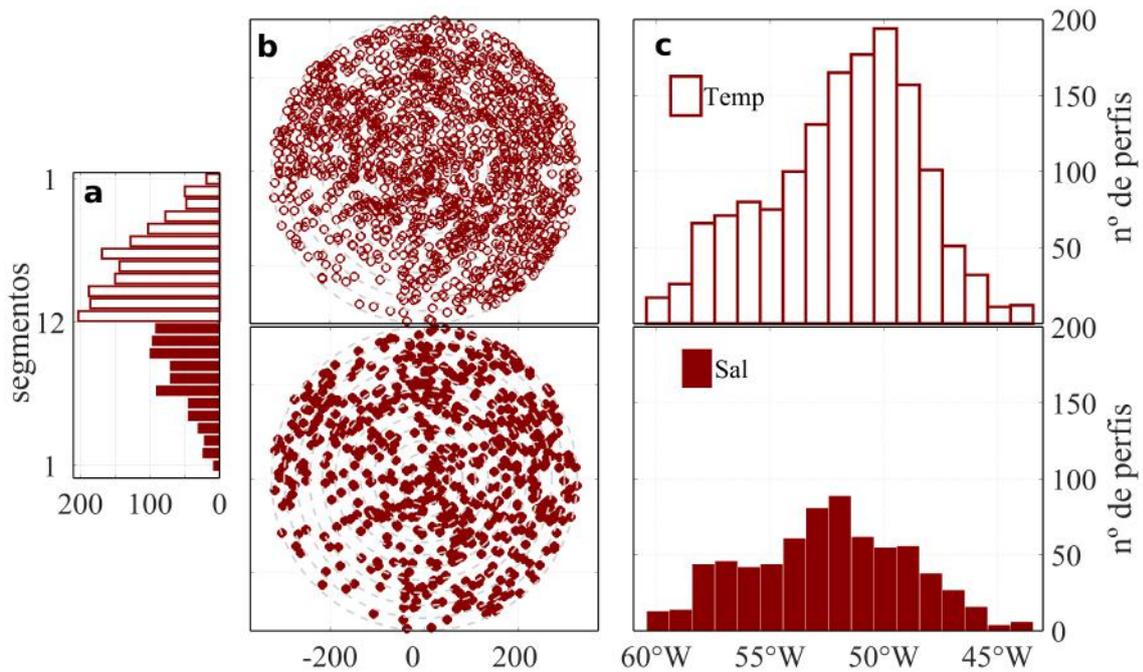


Figura 3.10: (a) Número de perfis DV de T (barras vazias) e S (barras preenchidas) compreendidos em cada um dos 12 segmentos que formam o vórtice médio (raio total de  $\sim 324$  km). (b) Distribuição espacial dos perfis DV de T (círculos preenchidos) e de S (círculos vazios) no vórtice médio. (c) Número de perfis DV de T (barras vazias) e de S (barras preenchidas) distribuídos entre as longitudes de 43 e 60°W.

Os perfis de T e S disponíveis oferecem informações da estrutura vertical de massa do vórtice médio e, conseqüentemente, de velocidade geostrófica. Para verificar a anomalia do campo de massa do vórtice médio em relação à região externa, as anomalias de T e S foram estimadas de duas maneiras distintas, (i) em relação à média climatológica do WOA13 da área de busca de perfis e (ii) em relação a média dos perfis FV. Integrando horizontalmente a seção de T (S) do vórtice médio e subtraindo o perfil médio de T (S) do WOA13, obteve-se um perfil de anomalia de T (S) com pico de 2,5°C (menor que 0,3 de salinidade) em torno de 150 m (180 m) de profundidade (Figura 3.11 a (b) - perfis tracejados em azul). Subtraindo o mesmo

perfil de T (S) agora da média dos perfis FV, obteve-se um perfil de anomalia de T (S) com pico de 2,7°C (0,3 de salinidade) na mesma profundidade (Figura 3.11 a (b) - perfis em vermelho). Verificou-se, portanto, que as magnitudes das anomalias de T, principalmente, do vórtice médio estimadas em relação a média climatológica da região são inferiores do que quando estimadas em relação aos perfis FV.

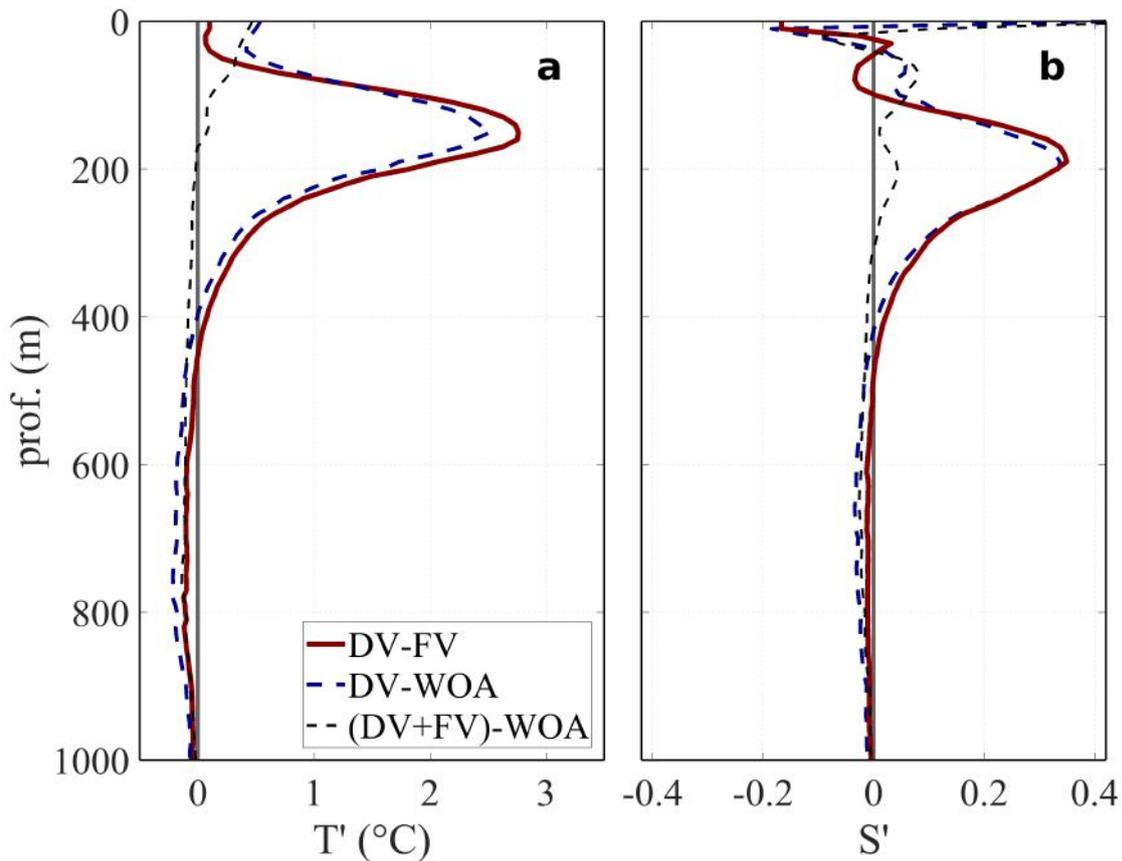


Figura 3.11: Em a (b) a linha vermelha representa a anomalia de T (S) estimada em relação aos perfis FV, a linha tracejada azul a anomalia de T (S) estimada em relação a climatologia WOA13, e a linha tracejada em preto a diferença de T (S) entre a climatologia criada a partir dos perfis DV e FV e do WOA13 para a área de busca de perfis.

Construindo um perfil médio da área de busca perfis a partir dos perfis de T e S DV e FV identificados nesse trabalho e subtraindo da climatologia média do WOA13, foram observadas diferenças quase nulas de T abaixo de 90 m (Figura 3.11 a - perfil tracejado em preto) e de S abaixo de 50 m (Figura 3.11 b - perfil tracejado em preto). Isso mostra que abaixo da camada de mistura, a climatologia WOA13 da região é praticamente formada pelos perfis DV e FV identificados nesse trabalho. Dessa

forma, a diminuição da magnitude das anomalias de T e S ao utilizar a climatologia WOA13 se deve ao fato de a mesma englobar todos os perfis identificados ou não nesse trabalho, sem fazer distinção de perfis dentro e fora dos vórtices, gerando assim um estado médio da região mais aquecido e salino. A diferença positiva em superfície entre a climatologia criada a partir dos perfis DV e FV e a do WOA13 se deve possivelmente ao fato de a maior parte dos perfis terem sido identificados durante a primavera e o verão. Como essas diferenças de T e S superficiais foram inferiores às anomalias do vórtice médio em pelo menos uma ordem de grandeza, optou-se por utilizar as anomalias estimadas em relação aos perfis FV para evitar que a magnitude das propriedades do vórtice médio fossem mascaradas.

As seções de anomalia de T e S indicaram a influência do vórtice médio até cerca de 600 m de profundidade (Figura 3.12 a e b), com valores máximos de 5,7°C e 0,6 centrados em 150 e 180 m, respectivamente. Centrado a 30 m abaixo do máximo de anomalia de T, o máximo de S reflete o núcleo subsuperficial da Água de Máxima Salinidade, formada na região tropical onde a taxa de evaporação é superior à taxa de precipitação, e identificada na região de ocorrência dos vórtices da CNB (MÉMERY *et al.*, 2000; URBANO *et al.*, 2008). Máximos de S abaixo dos máximos de T em vórtices anticiclônicos também foram observados por RYKOVA *et al.* (2017) em seus estudos sobre os vórtices formados pelas correntes Leste Australiana, das Agulhas, do Golfo, Kuroshio e Confluência Brasil-Malvinas. Relacionando-se esse padrão ao movimento vertical de água no interior do vórtice.

Em superfície, as seções revelaram uma ausência de sinal e T e S homogêneas com uma camada de mistura de aproximadamente 60 m, característica da região equatorial. A perda de sinal superficial dos vórtices da CNB é relatada na literatura e está associada às intensas trocas de calor e massa entre o oceano e a atmosfera, já que os vórtices da CNB são feições duradouras que se deslocam por grandes distâncias durante grande período de tempo. Comparado aos estudos de SOUZA *et al.* (2011) e YANG *et al.* (2013, 2015) que reconstruíram a estrutura vertical dos vórtices das Agulhas, dos vórtices anticiclônicos do oceano Pacífico Subtropical e do

Oceano Índico, respectivamente, o vórtice médio apresentou núcleo de T e S mais intenso. Em comparação com os vórtices das Agulhas, o vórtice da CNB apresentou um núcleo com temperatura maior em  $\sim 4,5^{\circ}\text{C}$ , e em  $\sim 2,7^{\circ}\text{C}$  em relação aos outros vórtices. Com relação a máxima salinidade encontrada, o vórtice médio apresentou o dobro da salinidade comparado aos vórtices descritos por YANG *et al.* (2013, 2015).

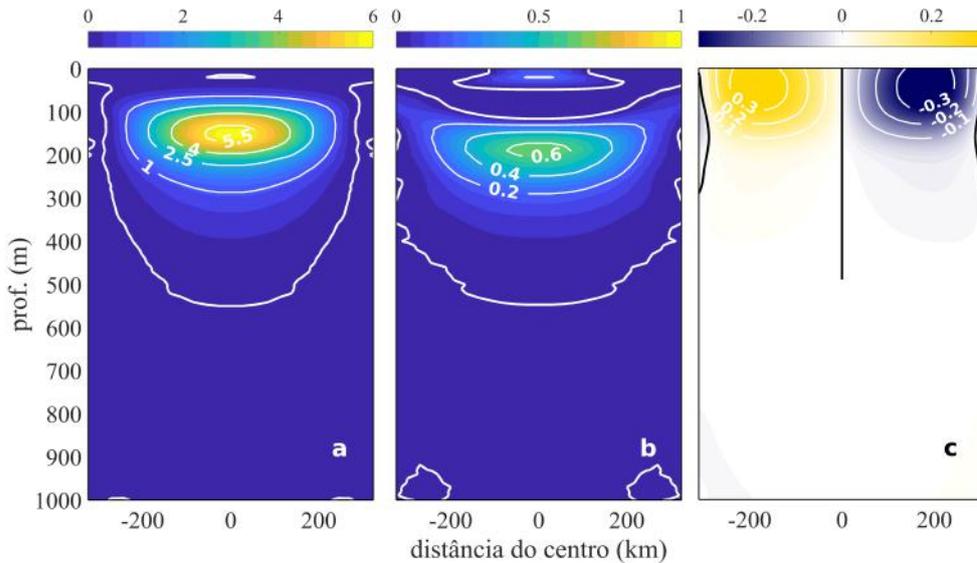


Figura 3.12: Em a (b) a seção de anomalia de T (S) reconstruída para o vórtice médio e estimada em relação aos perfis FV, em que as isolinhas espessas em branco contornam os valores de  $0^{\circ}\text{C}$  (0 de salinidade). (c) Seção de velocidade geostrófica calculada a partir do nível de referência de 500 dbar, onde as isolinhas em branco contornam as velocidades em  $\text{ms}^{-1}$  - tons amarelos são velocidades positivas (para norte) e tons azuis são negativos (para sul).

Comparando as seções integradas horizontalmente (Figura 3.11 a e b - perfis em vermelho) com os perfis médios de anomalia de T e S associadas a vórtices anticiclônicos ao redor do mundo construídos por RYKOVA *et al.* (2017), o vórtice médio da CNB apresentou pico de anomalia de T e S similares aos vórtices das Agulhas (entre 2 e  $3^{\circ}\text{C}$  e 0,2 e 0,3 de salinidade). Já em comparação aos vórtices anticiclônicos gerados pelas correntes de Kuroshio, do Golfo e da confluência Brasil-Malvinas, o vórtice médio apresentou valores inferiores em cerca de  $1,3^{\circ}\text{C}$  e 0,2 de salinidade.

O campo de densidade do vórtice médio (não mostrado) calculada a partir das seções de T e S, apresentou disposição das isopicnais típicas de vórtices an-

ticiclônicos, com núcleo quente e rebaixamento côncavo das isopicnais, exibindo uma deformação máxima de 40 m. A seção de velocidade geostrófica (Figura 3.12 c) foi calculada para a profundidade de referência de 500 m a partir das equações do vento térmico (PEDLOSKY, 2013). Observou-se uma máxima velocidade de  $0,36 \text{ ms}^{-1}$  em superfície e o confinamento da estrutura vertical de velocidade nos primeiros 200 m de coluna d'água. A disposição dos máximos de velocidade indicou uma diminuição da velocidade e do raio do vórtice médio com a profundidade.

O vórtice médio da CNB apresentou estrutura vertical de T, S e velocidade bastante semelhante ao vórtice A e B (ver seções 3.2.1 e 3.2.2). Em termos de temperatura, os vórtices apresentaram núcleo de máxima anomalia acima de  $5^{\circ}\text{C}$  e centrado entre 100 e 200 m, já a salinidade, os vórtices médio e o A apresentaram núcleo de máxima anomalia de 0,6 e 0,9, respectivamente, centrados em torno de 180 m. Quanto ao campo de velocidade geostrófica, o vórtice médio apresentou-se núcleo com velocidade máxima de  $0,36 \text{ ms}^{-1}$  inferior aos vórtices A e B (com máximos de  $0,5$  e  $0,9 \text{ ms}^{-1}$ , respectivamente), mas extensão vertical do mesmo semelhante até cerca de 100 m, e estrutura vertical também confinada nos primeiros 200 m de coluna d'água.

O vórtice médio representou bem os vórtices A e B independente do estágio de vida, já que um foi amostrado no final e outro no início de sua trajetória. Com relação aos vórtices da CNB descritos pela literatura, o vórtice médio se mostrou semelhante aos vórtices superficiais descritos por FRATANTONI *et al.* (1995); WILSON *et al.* (2002); JOHNS *et al.* (2003) e FRATANTONI e RICHARDSON (2006).

Como mencionado anteriormente, os vórtices da CNB podem ser classificados em intensificados em superfície, em subsuperfície, ou em vórtices profundos (WILSON *et al.*, 2002). Nesse contexto o presente trabalho, por utilizar uma base de identificação de vórtices por imagem de satélite (CH11V4), somente considera os vórtices da CNB que exibem um sinal superficial de anomalia de altura da superfície do mar. Segundo JOHNS *et al.* (2003); FRATANTONI e RICHARDSON (2006), os vórtices subsuperficiais na CNB exibem pouco ou nenhum sinal superficial e, por-

tanto, não foram considerados neste trabalho. No entanto, dos 30 vórtices analisados por JOHNS *et al.* (2003), 7 foram classificados como intensificados em subsuperfície, resultando em uma estimativa de formação média de apenas 2 vórtices subsuperficiais formados por ano. Além disso, vórtices intensificados tanto em superfície quanto em subsuperfície foram identificados por esses autores, que verificaram que grande parte deles seriam na realidade a sobreposição de um vórtice intensificado em superfície e outro em subsuperfície. Assim, considerando que existe a possibilidade de vórtices subsuperficiais com pouco sinal em superfície terem sido identificados pela base CH11V4 neste trabalho e, levando em conta a pequena formação anual de vórtices subsuperficiais segundo JOHNS *et al.* (2003) e o fato de que muitos deles são, na realidade, o acoplamento entre vórtices superficiais e subsuperficiais, é possível dizer que o vórtice médio reconstruído nesse trabalho representam bem os vórtices da CNB.

### 3.3.3 Transporte de Volume, Calor e Água Doce

Um dos objetivos deste trabalho é estimar o transporte de volume, calor e água doce pelo vórtice médio da CNB. Assim, a partir de um raio de máxima velocidade de  $\sim 162$  km e se estendendo até a profundidade de  $\sim 500$  m, o volume do vórtice médio foi estimado em  $4 \times 10^{13} m^3$ . O transporte anual de volume, calculado a partir da razão entre o volume e o número de segundo em 1 ano ( $3,15 \times 10^7$  s/ano), foi de 1,3 Sv. Essa estimativa corrobora com a literatura (JOHNS *et al.*, 1990; DIDDEN e SCHOTT, 1993; RICHARDSON *et al.*, 1994; FRATANTONI *et al.*, 1995; GARRAFFO *et al.*, 2003; GARZOLI *et al.*, 2003; JOHNS *et al.*, 2003; FRATANTONI e RICHARDSON, 2006) que, independente das diferentes estruturas verticais dos vórtices da CNB e da metodologia utilizada no cálculo do seu volume, estimam o transporte anual de volume em torno de 1 Sv por vórtice (Tabela 3.3).

Além do transporte de massa, os vórtices da CNB são também responsáveis por grande parte da variabilidade temporal de transporte de calor (ROEMMICH *et al.*, 2001) e água doce entre os oceanos como parte da AMOC. Para quantificar

esses transportes, as anomalias de T e S foram estimadas entre o volume de água trapeado pelo vórtice e assumindo um volume similar carregado pela APAN. Com valores médios de T e S do vórtice médio em torno de 15°C e 35,5 e, considerando os valores médios de 3°C e de 34,9 de salinidade da APAN (SVERDRUP *et al.*, 1942), as anomalias associadas ao vórtice reconstruído foram de aproximadamente 12°C e 0,6 de salinidade, respectivamente. O transporte de calor e água doce do vórtice médio foram então estimados em aproximadamente 0,07 PW (1 PW = 1 x 10<sup>15</sup>W) e 0,0005 x 10<sup>9</sup>kg s<sup>-1</sup>.

Tabela 3.3: Comparação entre as dimensões verticais e horizontais, o número de vórtices formados anualmente e o transporte de volume associados aos vórtices da CNB no presente estudo e pela literatura. A extensão horizontal desses vórtices foi expressa em raio total, que equivale a 2 vezes o raio de máxima velocidade, já que a literatura mais antiga não faz distinção entre ambas as definições.

	<b>Raio Total</b> (~ km)	<b>Prof.</b> (m)	<b>Nº vort/ano</b>	<b>Tr. volume</b> (Sv)	<b>Referências</b>
<b>Vórtice médio</b>	324	500	6,4 ± 1,8	1,3	presente estudo
<b>Vórtices da CNB</b>	200	200	10 a 15	1	<i>Johns et al. (1990)</i>
	125	1000	3	1	<i>Richardson et al. (1994)</i>
	210	316	2-3	0,7	<i>Fratantoni et al. (1995)</i>
	100	-	5,3	1	<i>Goni e Johns (2001)</i>
	300	250	8-9	0,8	<i>Johns et al. (2003)</i>
	350	300	7	1,1	<i>Garzoli et al. (2003)</i>

O transporte de calor associado aos vórtices da CNB somente foi estimado por FRATANTONI *et al.* (1995) e GARZOLI *et al.* (2003) até o presente, e o transporte de água doce jamais foi quantificado anteriormente. Em comparação com os vórtices descritos por FRATANTONI *et al.* (1995), em que os autores utilizaram os limites térmicos da APAN, assim como neste trabalho, o vórtice médio apresentou transporte de calor próximo ao vórtice M2 (0,06 ± 0,02 PW) e superior a média dos transportes dos vórtices M2, M3, M4, M5 e M6 (0,03 ± 0,01 PW). As estimativas realizadas por GARZOLI *et al.* (2003), por outro lado, consideraram um ΔT fixo de 15°C, representativo da diferença de T entre a Água do Atlântico Sul carregada pelos vórtices da CNB e a APAN, chegando em média de seus 11 vórtices analisados,

ao mesmo valor de transporte do vórtice médio de 0,07 PW.

### 3.3.4 Energia Potencial Disponível (EPD) e Energia Cinética (EC)

Segundo OLSON (1991), além das estimativas da extensão horizontal e vertical dos vórtices, bem como do volume de água transportado por eles, a EPD e a EC são parâmetros úteis na comparação do tamanho e da intensidade de vórtices espalhados pelos oceanos. A partir das equações 2.4 e 2.5 descritas na metodologia (ver seção 2.3.2), a EPD e EC do vórtice médio foram estimadas em aproximadamente 13,4 PJ e 2,3 PJ, respectivamente.

Estimativas de energia somente foram realizadas para os vórtices da CNB por FRATANTONI *et al.* (1995). Os autores calcularam, em média para os vórtices M5 e M6 similares ao vórtice médio, EPD de 5 PJ e EC de 2,4 PJ como mostra a Tabela 3.4. O vórtice M2, apesar de similar ao vórtice médio, não foi considerado pois, por apresentar velocidade de  $0,1 \text{ ms}^{-1}$  em 1200 m de profundidade, os autores assumiram esta como sua profundidade de alcance, embora o mesmo apresente características verticais de um vórtice superficial. Diferentemente da EC deste vórtice, sua EPD foi estimada em 7,5 PJ, valor este próximo às energias dos vórtices M5 e M6 (4,7 e 5,6 PJ, respectivamente). Assim, além da estrutura vertical do vórtice M2 (Figura 6 de FRATANTONI *et al.*, 1995), a proximidade nas estimativa de EPD gera questionamento a respeito da profundidade do vórtice considerada pelos autores e, por esse motivo, somente as estimativas dos vórtices M5 e M6 foram consideradas para a comparação com as energias do vórtice médio.

A Tabela 3.4 sintetiza as características de vórtices ciclônicos e anticiclônicos espalhados pelos oceanos que, com exceção dos vórtices do Pacífico Leste, são formados por correntes intensas de contorno oeste. O vórtice médio da CNB possui a maior extensão horizontal e, juntamente com os vórtices da Corrente do Golfo, a segunda maior EPD do Oceano Atlântico ( $\sim 13 \text{ PW}$ ). Em relação ao vórtice médio, os vórtices de Vitória e do Cabo de São Tomé apresentam as menores EPD e EC, e o

vórtice das Agulhas as maiores. Por outro lado, as energias associadas aos vórtices do Leste da Austrália, da Corrente do Golfo e do Golfo do México estiveram próximas às do vórtice médio.

Tabela 3.4: Comparação entre o raio total, a velocidade máxima de rotação e as energias potencial disponível (EPD) e cinética (EC) entre os vórtices da CNB e outros vórtices espalhados pelo mundo.

Local	Raio Total (km)	Vel. Rotação (m/s)	EC (PJ)	EPD (PJ)
<b>Vórtice Médio</b>	<b>324</b>	<b>0,4</b>	<b>2,3</b>	<b>13,4</b>
CNB <sup>1</sup>	220	0,6	2,4	5,1
Kuroshio <sup>2</sup>	180	0,9	-	22
Leste da Austrália <sup>3</sup>	170	0,9	-	13,5
Agulhas <sup>4</sup>	245	0,7	7,5	41
Corrente do Golfo <sup>5</sup>	-	-	1	4-13
Golfo do México <sup>6</sup>	300	0,8	3,6	10
Pacífico Leste <sup>7</sup>	250	1	2,9	4
Vórtice de Vitória <sup>8</sup>	60	0,2	0,09	0,2
Cabo de São Tomé <sup>9</sup>	110	0,4	0,7	1,5

<sup>1</sup>FRATANTONI *et al.* (1995) (vórtices M5 e M6); <sup>2</sup>TOMASADA (1978); <sup>3</sup>NILSSON e CRESSWELL (1980); <sup>4</sup>OLSON e EVANS (1986); <sup>5</sup>OLSON e EVANS e JOYCE *et al.* (1984); <sup>6</sup>ELLIOTT (1982); <sup>7</sup>HANSEN e MAUL (1991); <sup>8</sup>SCHMID *et al.* (1995), e <sup>9</sup>MILL *et al.* (2015)

# Capítulo 4

## Conclusões

A estrutura vertical do vórtice médio da Corrente Norte do Brasil (CNB) foi reconstruída a partir de uma análise integrada de duas bases de dados globais de distribuição livre: uma base de identificação superficial e acompanhamento de vórtices (de janeiro de 1993 a dezembro de 2016) a partir de altimetria por satélite (CHELTON *et al.*, 2011); e a base EN4.2.0 de dados de temperatura e salinidade, provenientes de perfilagens de XBTs/MBTs, CTDs e perfiladores Argo (GOOD *et al.*, 2013). Esta análise permitiu atualizar a contabilidade da formação de vórtices da CNB e calcular algumas de suas principais características, incluindo sua contribuição para o transporte meridional de volume e calor, com uma quantidade de informações significativamente superior a estudos anteriores.

Considerando os 153 vórtices da CNB formados nesse período de 24 anos, a média anual de formação foi de  $6,4 \pm 1,8$  vórtices, apresentando uma forte variabilidade interanual, com o número de formação variando de 2 a 10 vórtices por ano. A CNB apresentou maior formação de vórtices nos meses de verão boreal (46 vórtices formados entre junho e julho, durante todo o período de dados), com um segundo máximo nos meses de inverno boreal (42 vórtices formados entre dezembro e fevereiro). A menor formação foi observada nos meses de maio e outubro, com apenas 6 e 5 vórtices formados em cada mês, respectivamente. Não foi possível, porém, determinar uma sazonalidade na formação dos vórtices da CNB, em acordo com estudos prévios. Com base nos dados de altimetria, os vórtices da CNB apre-

sentam aproximadamente raio de máxima velocidade de  $137 \pm 22$  km, amplitude da elevação da superfície do mar de  $8 \pm 3$  cm e velocidade de rotação de  $0,4 \pm 0,1$   $\text{ms}^{-1}$ . Considerando toda a sua trajetória de vida, os vórtices apresentam velocidade de translação de  $17 \pm 4$   $\text{cms}^{-1}$  e tempo de duração de  $75 \pm 48$  dias.

Considerando-se apenas os vórtices amostrados por perfis hidrográficos (um total de 134, com 1466 perfis de temperatura e 698 perfis de salinidade), foi reconstruído então um vórtice médio da CNB. Este vórtice médio, com cerca de 500 m de profundidade e velocidade máxima de rotação em superfície de  $0,36$   $\text{ms}^{-1}$ , apresenta energia potencial disponível (EPD) de 13,4 PJ e energia cinética (EC) de 2,3 PJ. Mesmo considerando-se que estes valores são possivelmente subestimados, uma vez que correspondem à energia do campo médio e não à média da energia dos vórtices, eles colocam os vórtices da CNB entre os mais energéticos do oceano, com valores comparáveis aos formados por outras correntes de contorno oeste.

O vórtice médio da CNB transporta 1,3 Sv o que, conjuntamente com a determinação de número de vórtices formados, leva a uma estimativa anual de  $8,3 \pm 2,3$  Sv de transporte de volume. Considerando o transporte meridional da Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC) que cruza o equador estimado em 13 Sv (SCHMITZ e MCCARTNEY, 1993), os vórtices da CNB seriam então responsáveis em média por 64% desse transporte, podendo chegar a até  $\sim 80\%$  nos anos de máxima formação, como em 2016. Estimativas mais recentes (SIEDLER *et al.*, 2001), baseadas em um balanço de massa a partir de seções hidrográficas transatlânticas, indicam que o transporte da AMOC apresenta grande variabilidade interanual, com valores entre 11 e 18 Sv. Por um lado, isto sugere que a contribuição relativa dos vórtices da CNB pode variar significativamente para diferentes anos. Por outro lado, porém, a variabilidade do transporte da AMOC poderia refletir a variabilidade interanual na formação de vórtices.

O vórtice médio da CNB apresenta anomalia positiva de salinidade, com valores máximos de  $\sim 0,6$  a cerca de 180 m de profundidade. O transporte anual de água doce associado foi estimado em  $0,003 \pm 0,0009 \times 10^9 \text{ kgs}^{-1}$ , representando menos de

1% do transporte anual de água doce através da latitude de 11°N (estimado em  $-0,6 \times 10^9 \text{kg s}^{-1}$ , segundo FRIEDRICHS e HALL, 1993).

O vórtice médio da CNB apresenta anomalia significativa de temperatura, com valores máximos de  $\sim 5,5^\circ\text{C}$  em torno de 150 m de profundidade, correspondendo a um transporte de calor de 0,07 PW. Levando-se em conta o número total de vórtices formados por ano, os vórtices da CNB seriam então responsáveis por um transporte anual de  $\sim 0,4 \pm 0,13$  PW, correspondendo a cerca de 40% do transporte anual de calor através da latitude de 11°N (estimado em 1,1 PW por FRIEDRICHS e HALL, 1993). A presente estimativa é mais robusta do que a apresentada em estudos anteriores, em função do maior período de análise e do número de vórtices amostrados, e ressalta a importância dos vórtices da CNB para estudos climáticos no oceano Atlântico.

# Referências Bibliográficas

- BOURLES, B., MOLINARI, R., JOHNS, E., et al., 1999, “Upper layer currents in the western tropical North Atlantic (1989–1991)”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 104, n. C1, pp. 1361–1375.
- BROECKER, W. S., 1991, “The great ocean conveyor”, *Oceanography*, v. 4, n. 2, pp. 79–89.
- CHELTON, D. B., SCHLAX, M. G., SAMELSON, R. M., et al., 2007, “Global observations of large oceanic eddies”, *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 15. doi: <https://doi.org/10.1029/2007GL030812>, 2007.
- CHELTON, D. B., SCHLAX, M. G., SAMELSON, R. M., 2011, “Global observations of nonlinear mesoscale eddies”, *Progress in Oceanography*, v. 91, n. 2, pp. 167 – 216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002>.
- CHIARETTI, D., 2016. “Nova frente de exploração de petróleo no país ameaça o litoral da Amazonia”. Disponível em: <<http://amazonia.org.br/>>.
- DA SILVEIRA, I. C., MIRANDA, L. B., BROWN, W. S., 1994, “On the origins of the North Brazil Current”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 99, n. C11, pp. 22501–22512.
- DIDDEN, N., SCHOTT, F., 1993, “Eddies in the North Brazil Current retroflection region observed by Geosat altimetry”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 98, n. C11, pp. 20121–20131.

- ELLIOTT, B. A., 1982, "Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico", *Journal of Physical Oceanography*, v. 12, n. 11, pp. 1292–1309.
- EMERY, W. J., DEWAR, J., 1982, "Mean temperature-salinity, salinity-depth and temperature-depth curves for the North Atlantic and the North Pacific", *Progress in Oceanography*, v. 11, n. 3, pp. 219–256.
- FLAGG, C. N., GORDON, R. L., MCDOWELL, S., 1986, "Hydrographic and current observations on the continental slope and shelf of the western equatorial Atlantic", *Journal of Physical Oceanography*, v. 16, n. 8, pp. 1412–1429.
- FONSECA, C. A., GONI, G. J., JOHNS, W. E., et al., 2004, "Investigation of the north Brazil current retroflexion and north equatorial countercurrent variability", *Geophysical Research Letters*, v. 31, n. 21. doi: 10.1029/2004GL020054,2004.
- FRATANTONI, D. M., GLICKSON, D. A., 2002, "North Brazil Current Ring Generation and Evolution Observed with SeaWiFS", *Journal of Physical Oceanography*, v. 32, n. 3, pp. 1058–1074. doi: 10.1175/1520-0485(2002)032<1058:NBCRGA>2.0.CO;2.
- FRATANTONI, D. M., RICHARDSON, P. L., 2006, "The evolution and demise of North Brazil Current rings", *Journal of Physical Oceanography*, v. 36, n. 7, pp. 1241–1264.
- FRATANTONI, D. M., JOHNS, W. E., TOWNSEND, T. L., 1995, "Rings of the North Brazil Current: Their structure and behavior inferred from observations and a numerical simulation", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 100, n. C6, pp. 10633–10654. doi: 10.1029/95JC00925.
- FRIEDRICHS, M. A., HALL, M. M., 1993, "Deep circulation in the tropical North Atlantic", *Journal of Marine Research*, v. 51, n. 4, pp. 697–736.

- GARRAFFO, Z. D., JOHNS, W. E., CHASSIGNET, E. P., et al., 2003, “North Brazil Current rings and transport of southern waters in a high resolution numerical simulation of the North Atlantic”. In: *Elsevier Oceanography Series*, v. 68, Elsevier, pp. 375–409.
- GARZOLI, S. L., FFIELD, A., YAO, Q., 2003, “North Brazil Current rings and the variability in the latitude of retroflexion”. In: *Elsevier Oceanography Series*, v. 68, Elsevier, pp. 357–373.
- GARZOLI, S. L., FFIELD, A., JOHNS, W. E., et al., 2004, “North Brazil Current retroflexion and transports”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 109, n. C1. doi: 10.1029/2003JC001775,2004.
- GOES, M., MOLINARI, R., DA SILVEIRA, I., et al., 2005, “Retroreflections of the north brazil current during february 2002”, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, v. 52, n. 4, pp. 647–667.
- GONI, G. J., JOHNS, W. E., 2001, “A census of North Brazil Current rings observed from TOPEX/POSEIDON altimetry: 1992–1998”, *Geophys. Res. Lett*, v. 28, n. 1, pp. 1–4.
- GONI, G. J., JOHNS, W. E., 2003, “Synoptic study of warm rings in the North Brazil Current retroflexion region using satellite altimetry”, *Elsevier Oceanography Series*, v. 68, pp. 335–356.
- GOOD, S. A., MARTIN, M. J., RAYNER, N. A., 2013, “EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 118, n. 12, pp. 6704–6716.
- HANSEN, D. V., MAUL, G. A., 1991, “Anticyclonic current rings in the eastern tropical Pacific Ocean”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 96, n. C4, pp. 6965–6979.

- HASTENRATH, S., 1982, “On meridional heat transports in the world ocean”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 12, n. 8, pp. 922–927.
- HOLFORT, J., SIEDLER, G., 2001, “The meridional oceanic transports of heat and nutrients in the South Atlantic”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 31, n. 1, pp. 5–29.
- HOSKINS, B. J., MCINTYRE, M., ROBERTSON, A. W., 1985, “On the use and significance of isentropic potential vorticity maps”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 111, n. 470, pp. 877–946.
- JOCHUM, M., MALANOTTE-RIZZOLI, P., 2003, “On the generation of North Brazil Current rings”, *Journal of Marine Research*, v. 61, n. 2, pp. 147–173.
- JOCHUMSEN, K., RHEIN, M., HÜTTL-KABUS, S., et al., 2010, “On the propagation and decay of North Brazil Current rings”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 115, n. C10.
- JOHNS, W. E., LEE, T. N., SCHOTT, F. A., et al., 1990, “The North Brazil Current retroflection: Seasonal structure and eddy variability”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 95, n. C12, pp. 22103–22120.
- JOHNS, W. E., LEE, T., BEARDSLEY, R., et al., 1998, “Annual cycle and variability of the North Brazil Current”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 28, n. 1, pp. 103–128.
- JOHNS, W. E., ZANTOPP, R. J., GONI, G. J., 2003, “Cross-gyre transport by North Brazil Current rings”. In: *Elsevier Oceanography Series*, v. 68, Elsevier, pp. 411–441.
- JOYCE, T., BACKUS, R., BAKER, K., et al., 1984, “Rapid evolution of a Gulf Stream warm-core ring”, *Nature*, v. 308, n. 5962, pp. 837–840.

- KLEIN, B., MOLINARI, R. L., MÜLLER, T. J., et al., 1995, “A transatlantic section at 14.5 N: Meridional volume and heat fluxes”, *Journal of Marine Research*, v. 53, n. 6, pp. 929–957.
- KRELLING, A. P. M., 2010, *A Estrutura Vertical dos Vortices da Corrente Norte do Brasil*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- LAVIN, A., BRYDEN, H., PARRILLA, G., 1998, “Meridional transport and heat flux variations in the subtropical North Atlantic”, *The Global atmosphere and ocean system*, v. 6, n. 3, pp. 269–293.
- LOCARNINI, R. A., A. V. M. J. I. A. T. P. B. H. E. G. O. K. B. M. M. Z. C. R. P. J. R. R. D. R. J. M. H., SEIDOV, D., 2013, “World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.” *NOAA Atlas NESDIS 73*, p. 40.
- MÉMERY, L., ARHAN, M., ALVAREZ-SALGADO, X., et al., 2000, “The water masses along the western boundary of the south and equatorial Atlantic”, *Progress in Oceanography*, v. 47, n. 1, pp. 69–98.
- MERTENS, C., RHEIN, M., WALTER, M., et al., 2009, “Modulation of the inflow into the Caribbean Sea by North Brazil Current rings”, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, v. 56, n. 7, pp. 1057–1076.
- MILL, G. N., DA COSTA, V. S., LIMA, N. D., et al., 2015, “Northward migration of Cape São Tomé rings, Brazil”, *Continental Shelf Research*, v. 106, pp. 27–37.
- NILSSON, C., CRESSWELL, G., 1980, “The formation and evolution of East Australian Current warm-core eddies”, *Progress in Oceanography*, v. 9, n. 3, pp. 133–183.
- NOF, D., 1996, “Why are rings regularly shed in the western equatorial Atlantic but not in the western Pacific?” *Progress in Oceanography*, v. 38, n. 4, pp. 417–451.

- NOF, D., PICHEVIN, T., 1996, “The retroflection paradox”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 26, n. 11, pp. 2344–2358.
- OLSON, D., EVANS, R., “RW Schmitt, M. Kennelly, and TM Joyce, 1985: A twolayer diagnostic model of the long-term physical evolution of warm-core ring 82B”, *J. Geophys. Res.*, v. 90, pp. 8813–8822.
- OLSON, D. B., 1991, “Rings in the ocean”, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 19, n. 1, pp. 283–311.
- OLSON, D. B., EVANS, R. H., 1986, “Rings of the Agulhas current”, *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, v. 33, n. 1, pp. 27–42.
- PEDLOSKY, J., 2013, *Geophysical fluid mechanics*. Springer Science and Business Media.
- PEDROSA, J., 2016, *Interacao dos Vortices da Corrente Norte do Brasil com as Pequenas Antilhas Caribe*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- PEGLIASCO, C., CHAIGNEAU, A., MORROW, R., 2015, “Main eddy vertical structures observed in the four major Eastern Boundary Upwelling Systems”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 120, n. 9, pp. 6008–6033. doi: 10.1002/2015JC010950.
- REID, R., ELLIOTT, B., OLSON, D., 1981, “Available potential energy: A clarification”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 11, n. 1, pp. 15–29.
- RICHARDSON, P. L., 2005, “Caribbean Current and eddies as observed by surface drifters”, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 52, n. 3, pp. 429–463.
- RICHARDSON, P., HUFFORD, G., LIMEBURNER, R., et al., 1994, “North Brazil Current retroflection eddies”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 99, n. C3, pp. 5081–5093.

- ROEMMICH, D., GILSON, J., CORNUELLE, B., et al., 2001, “Mean and time-varying meridional transport of heat at the tropical/subtropical boundary of the North Pacific Ocean”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 106, n. C5, pp. 8957–8970.
- RYKOVA, T., OKE, P. R., GRIFFIN, D. A., 2017, “A comparison of the structure, properties, and water mass composition of quasi-isotropic eddies in western boundary currents in an eddy-resolving ocean model”, *Ocean Modelling*, v. 114, pp. 1–13.
- SCHLAX, M. G., CHELTON, D. B., 2016, “The Growing Method of Eddy Identification and Tracking in Two and Three Dimensions”, *College of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences*.
- SCHMID, C., SCHÄFER, H., ZENK, W., et al., 1995, “The Vitória eddy and its relation to the Brazil Current”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 25, n. 11, pp. 2532–2546.
- SCHMITTNER, A., CHIANG, J. C., HEMMING, S. R., 2007, “Introduction: The ocean’s meridional overturning circulation”, *Ocean Circulation: Mechanisms and Impacts-Past and Future Changes of Meridional Overturning*, pp. 1–4.
- SCHMITZ, W. J., MCCARTNEY, M. S., 1993, “On the north Atlantic circulation”, *Reviews of Geophysics*, v. 31, n. 1, pp. 29–49.
- SCHMITZ, W. J., RICHARDSON, P. L., 1991, “On the sources of the Florida Current”, *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, v. 38, pp. S379–S409.
- SCHOTT, F. A., FISCHER, J., STRAMMA, L., 1998, “Transports and pathways of the upper-layer circulation in the western tropical Atlantic”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 28, n. 10, pp. 1904–1928.

- SIEDLER, G., GOULD, J., CHURCH, J. A., 2001, "Ocean circulation and climate: observing and modelling the global ocean". v. 103, pp. 455–488, Academic Press.
- SOUZA, J. M. A. C., DE BOYER MONTAËGUT, C., CABANES, C., et al., 2011, "Estimation of the Agulhas ring impacts on meridional heat fluxes and transport using ARGO floats and satellite data", *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 21, pp. n/a–n/a. ISSN: 1944-8007. doi: 10.1029/2011GL049359. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2011GL049359>>. L21602.
- SPEER, K., HOLFORT, J., REYNAUD, T., et al., 1996, "South Atlantic heat transport at 11 S, The South Atlantic: Present and Past Circulation", pp. 105–120.
- STRAMMA, L., SCHOTT, F., 1999, "The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean", *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 46, n. 1, pp. 279–303.
- STRAMMA, L., RHEIN, M., BRANDT, P., et al., 2005, "Upper ocean circulation in the western tropical Atlantic in boreal fall 2000", *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, v. 52, n. 2, pp. 221–240.
- SVERDRUP, H. U., JOHNSON, M. W., FLEMING, R. H., et al., 1942, "The Oceans: Their physics, chemistry, and general biology". pp. 605–761, Prentice-Hall New York.
- THACKER, W., LEE, S.-K., HALLIWELL JR, G., 2004, "Assimilating 20 years of Atlantic XBT data into HYCOM: a first look", *Ocean Modelling*, v. 7, n. 1-2, pp. 183–210.
- TOMASADA, A., 1978, "Oceanographic characteristics of a warm eddy detached from the Kuroshio east of Honshu, Japan", *Bull. Tokai Reg. Fish. Res. Lab*, v. 94, pp. 59–103.

- URBANO, D., DE ALMEIDA, R., NOBRE, P., 2008, “Equatorial Undercurrent and North Equatorial Countercurrent at 38 W: A new perspective from direct velocity data”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 113, n. C4. doi: 10.1029/2007JC004215,2008.
- WILSON, W. D., JOHNS, E., MOLINARI, R., 1994, “Upper layer circulation in the western tropical North Atlantic Ocean during August 1989”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 99, n. C11, pp. 22513–22523.
- WILSON, W. D., JOHNS, W. E., GARZOLI, S. L., 2002, “Velocity structure of North Brazil Current rings”, *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 8. doi: 10.1029/2001GL013869,2002.
- WÜST, G., 1964, “Stratification and circulation in the Antillean-Caribbean basins”. p. 201, Columbia University Press.
- YANG, G., WANG, F., LI, Y., et al., 2013, “Mesoscale eddies in the northwestern subtropical Pacific Ocean: Statistical characteristics and three-dimensional structures”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 118, n. 4, pp. 1906–1925.
- YANG, G., YU, W., YUAN, Y., et al., 2015, “Characteristics, vertical structures, and heat/salt transports of mesoscale eddies in the southeastern tropical Indian Ocean”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 120, n. 10, pp. 6733–6750. doi: 10.1002/2015JC011130.
- ZWENG, M.M, J. R. J. A. R. L. A. M. T. B. H. G. O. B. D. J. D. M. B., 2013, “World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.” *NOAA Atlas NESDIS 74*, p. 39.