



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR – LABOMAR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

MARIA EDUARDA MESQUITA BRAZ PALMEIRA

MODELAGEM NUMÉRICA DA CONSTITUIÇÃO E DINÂMICA DA CORRENTE
NORTE DO BRASIL

FORTALEZA – CE

2026

MARIA EDUARDA MESQUITA BRAZ PALMEIRA

MODELAGEM NUMÉRICA DA CONSTITUIÇÃO E DINÂMICA DA CORRENTE
NORTE DO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Ceará como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

Coorientador: Prof. Dr. Esaú Aguiar Carvalho.

FORTALEZA – CE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P198m Palmeira, Maria Eduarda Mesquita Braz.
MODELAGEM NUMÉRICA DA CONSTITUIÇÃO E DINÂMICA DA CORRENTE NORTE DO
BRASIL / Maria Eduarda Mesquita Braz Palmeira. – 2026.
41 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do
Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.
Coorientação: Prof. Dr. Esáu Aguiar Carvalho.
1. Corrente Norte do Brasil. 2. Backtracking. 3. OpenDrift. I. Título.

CDD 551.46

MARIA EDUARDA MESQUITA BRAZ PALMEIRA

MODELAGEM NUMÉRICA DA CONSTITUIÇÃO E DINÂMICA DA CORRENTE
NORTE DO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Ceará como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

Coorientador: Prof. Dr. Esaú Aguiar Carvalho.

Aprovada em 22/01/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Gbekpo Aubains Hounsou Gbo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Francisco Rafael de Lima Xavier
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro na manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. Carlos Teixeira, pela excelente orientação, pelos conselhos, direcionamento, confiança e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Esaú Aguiar Carvalho, pela orientação, pelo amparo e pela confiança depositada em mim ao longo da graduação.

Aos colegas da turma de graduação, pelos momentos felizes e desafiadores compartilhados. Às minhas amigas, que acompanharam meu amadurecimento, me apoiaram, incentivaram e tornaram minha experiência universitária ainda mais especial.

Aos meus familiares, cujo apoio tornou possível a minha permanência na faculdade. Aos meus pais, pelo exemplo de vida que me inspira a ser melhor como pessoa e profissional. Ao meu irmão, pelos momentos de descontração e por toda ajuda e incentivo ao longo deste período. A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta trajetória e contribuíram para o meu crescimento.

E, por fim, a mim mesma, por, apesar de todas as dificuldades, não ter desistido e ter concluído uma etapa desafiadora, mas extremamente gratificante da minha vida acadêmica.

Para compreender o estado atual do oceano, é necessário rastrear os caminhos de suas águas.

Carl Wunsch (adaptado)

RESUMO

A Corrente Norte do Brasil (CNB) é uma corrente de contorno oeste do Oceano Atlântico que exerce papel primordial na comunicação inter-hemisférica. Essa corrente é formada tanto pelo aporte da Subcorrente Norte do Brasil (SNB), originada a partir de um ramo sul da Corrente Sul Equatorial (CSEs), em torno de 15°S, quanto pelo ramo central da Corrente Sul Equatorial (CSEc), aproximadamente entre 2°S e 4°N. Apesar de sua relevância, ainda existem lacunas na literatura quanto à quantificação dessas contribuições e à dinâmica associada à formação da CNB. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo geral analisar a dinâmica e a constituição da CNB por meio de modelagem numérica. A ferramenta utilizada foi o *OpenDrift*, um pacote de software destinado à modelagem de trajetórias de partículas e substâncias no oceano. Aplicou-se o método *backward* (retrocesso no tempo), que permite rastrear a origem de uma ou mais partículas. Para a alimentação do modelo, utilizaram-se dados de correntes provenientes do *Copernicus Marine Data*, a partir de um conjunto de dados de reanálise diária, considerando o período de 1993 a 2021 para a geração dos mapas de correntes e de 2024 a 2025 para os mapas de dispersão de partículas. A área de estudo foi delimitada pelas coordenadas 55°W a 25°W e 20°S a 15°N, abrangendo a região de distribuição e influência da CNB. Para a construção dos mapas de correntes, foi utilizada a média temporal de todo o período disponível (1993–2021), totalizando 28 anos de dados. Para os mapas de dispersão de partículas, o período adotado considerou a sazonalidade da CNB, com simulações realizadas entre fevereiro e junho de 2024, período de menor intensidade das correntes, e entre julho de 2024 e janeiro de 2025, período caracterizado por maior intensidade. O ponto de lançamento das partículas foi definido nas coordenadas aproximadas de 46°W e 2°S, na região terminal de influência da CNB. As simulações *backward* realizadas em três faixas de profundidade (0–50 m, 50–150 m e 150–250 m) indicaram que, em superfície, a CSEc desempenha papel primordial na constituição da CNB. Entre 50 e 150 m, observa-se um aumento significativo do aporte subsuperficial da SNB, enquanto entre 150 e 250 m a dinâmica da SNB é majoritariamente responsável pela formação da CNB. As limitações do estudo estão associadas à dependência da qualidade dos dados utilizados. Ainda assim, os resultados obtidos foram satisfatórios, confirmando a viabilidade do método *backward* e do *OpenDrift* para o rastreamento de partículas, bem como sua aplicação no estudo da dinâmica e da constituição da Corrente Norte do Brasil.

Palavras-chave: Corrente Norte do Brasil; *Backtracking*; *OpenDrift*.

ABSTRACT

The North Brazil Current (NBC) is a western boundary current of the Atlantic Ocean that plays a key role in interhemispheric communication. This current is formed by the contribution of both the North Brazil Subcurrent (NBS), originating from a southern branch of the South Equatorial Current (SECs) around 15°S, and the central branch of the South Equatorial Current (SECc), approximately between 2°S and 4°N. Despite its relevance, there are still gaps in the literature regarding the quantification of these contributions and the dynamics associated with the formation of the NBC. Therefore, the present study aimed to analyze the dynamics and constitution of the NBC through numerical modeling. One tool used was OpenDrift, a software package designed for modeling the trajectories of particles and substances in the ocean. The backward method (regression in time) was applied, which allows tracing the origin of one or more particles. For model input, current data from Copernicus Marine Data were used, based on a daily reanalysis dataset, considering the period from 1993 to 2021 for generating current maps and from 2024 to 2025 for particle dispersion maps. The study area was delimited by the coordinates 55°W to 25°W and 20°S to 15°N, encompassing the distribution and influence region of the Brazilian North Atlantic Convergence (BNCC). For the construction of current maps, the temporal average of the entire available period (1993–2021) was used, totaling 28 years of data. For the particle dispersion maps, the period adopted moderately reflects the seasonality of the BNCC, with simulations performed between February and June 2024, a period of lower current intensity, and between July 2024 and January 2025, a period characterized by higher intensity. The particle launch point was defined in the approximate regions of 46°W and 2°S, in the terminal region of influence of the North Brazil Current (NBC). Reverse simulations performed at three depth ranges (0–50 m, 50–150 m, and 150–250 m) indicated that, at the surface, the CSEc plays a primary role in the formation of the NBC. Between 50 and 150 m, a significant increase in the subsurface transport of the North Brazil Current (NBC) is observed, while between 150 and 250 m the dynamics of the NBC are mainly responsible for the formation of the NBC. The limitations of the study are associated with the dependence on the quality of the data used. Even so, the results obtained were overwhelming, confirming the vision of the backward method and OpenDrift for particle tracking, as well as its application in the study of the dynamics and constitution of the North Brazil Current.

Keywords: North Brazil Current; Backward movement; OpenDrift.

LISTA DE FIGURA

- Figura 1 Mapa esquemático das principais correntes que compõem a circulação do Atlântico Tropical, com destaque para a Corrente Norte do Brasil (CNB), a Corrente Sul Equatorial (CSE) e seus ramos norte, central e sul (CSEn, CSEc e CSEs), a Subcorrente Norte do Brasil (SNB), a Corrente do Brasil (CB), bem como as contracorrentes e subcorrentes equatoriais. As setas indicam o sentido médio do escoamento. Adaptado de Nogueira Neto (2013), com base na síntese proposta por Stramma & Schott (1999), Schott et al. (2002) e Lumpkin & Garzoli (2005) 18
- Figura 2 Mapa de localização da área de estudo no Atlântico Tropical, destacada pelo retângulo em vermelho, abrangendo a região de atuação da Corrente Norte do Brasil e suas correntes contribuintes 20
- Figura 3 Mapas da magnitude média da velocidade das correntes oceânicas na área de estudo, obtidos a partir de uma média temporal de 28 anos de dados de reanálise, para as profundidades de: (a) 0 m, (b) 50 m, (c) 100 m, (d) 150 m, (e) 200 m e (f) 250 m 23
- Figura 4 Mapa da velocidade média superficial indicando a seção meridional localizada em 35°W, entre 5°S e 0°, utilizada para a análise do núcleo da Corrente Norte do Brasil (CNB) ao longo da coluna d'água 25
- Figura 5 Distribuição da média temporal da magnitude da velocidade ao longo da seção meridional em 35°W, evidenciando a posição e a intensidade do núcleo da Corrente Norte do Brasil para as diferentes latitudes analisadas. Os pontos vermelhos denotam as maiores intensidades da corrente para cada latitude 26
- Figura 6 Mapas da média temporal da magnitude da velocidade em diferentes profundidades. Em destaque a Corrente Sul Equatorial (CSE) em sua área de influência, obtidos para diferentes profundidades, a partir da média temporal de 28 anos de dados 28
- Figura 7 Média temporal da magnitude das velocidades evidenciando a Subcorrente Norte do Brasil em diferentes profundidades 29
- Figura 8 Mapas de dispersão backward de 10.000 partículas lançadas a 10km ao redor 31

do ponto $46^{\circ}\text{W}-2^{\circ}\text{S}$, simuladas com o modelo OpenDrift, para três faixas de profundidade (0–50 m, 50–150 m e 150–200 m) e dois períodos distintos: junho a fevereiro de 2024 e janeiro de 2025 a julho de 2024. As trajetórias representam a possível origem das massas d'água que contribuem para a formação da Corrente Norte do Brasil (CNB) no ponto de lançamento

Figura 9 Mapas de densidade de partículas obtidos a partir de simulações Lagrangeanas backward, associados à formação da Corrente Norte do Brasil (CNB). Os mapas representam a frequência de visita das partículas ao domínio para as faixas de profundidade de 0–50 m, 50–150 m e 150–250 m, considerando dois períodos distintos: junho a fevereiro de 2024 e janeiro de 2025 a julho de 2024. As regiões de maior densidade indicam os principais ramos contribuintes para a formação da CNB 33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMOC	<i>Atlantic Meridional Overturning Circulation</i> (Circulação Meridional do Atlântico)
CB	Corrente do Brasil
CCNE	Contracorrente Equatorial Norte
CCOs	Correntes de Contorno Oeste
CCSE	Contracorrente Equatorial Sul
CNB	Corrente do Norte do Brasil
CSE	Corrente Equatorial Sul
CSEc	Ramo Central da Corrente Equatorial Sul
CSEn	Ramo Norte da Corrente Equatorial Sul
CSEs	Ramo Sul da Corrente Equatorial Sul
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
PCNB	Plataforma Continental Norte do Brasil
SCNE	Subcorrente Equatorial Norte
SCSE	Contra-Corrente Equatorial Subsuperficial
SE	Subcorrente Equatorial
SNB	Subcorrente Norte do Brasil
ONU	Organização das Nações Unidas
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	Circulação oceânica	15
<i>3.1.1</i>	<i>Motores da circulação</i>	<i>15</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Correntes como reguladoras climáticas</i>	<i>16</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Modelagem numérica da dinâmica oceânica</i>	<i>17</i>
3.2	Dinâmica Atlântica	17
3.3	Corrente Norte do Brasil	19
<i>3.3.1</i>	<i>Formação da Corrente Norte do Brasil</i>	<i>19</i>
4	METODOLOGIA	21
4.1	Área de estudo	21
4.2	Dados utilizados	22
4.3	Modelo numérico e configuração	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1	Resultados	25
<i>5.1.1</i>	<i>Padrão de circulação</i>	<i>25</i>
<i>5.1.2</i>	<i>Contribuição da CSE e da SNB na constituição da CNB</i>	<i>26</i>
<i>5.1.3</i>	<i>Mapas de dispersão de partículas</i>	<i>32</i>
5.2	Discussão	37
6	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

As correntes marítimas desempenham um papel fundamental no transporte de calor, nutrientes e carbono em escala global, influenciando de forma significativa o clima. No Oceano Atlântico, a interconexão entre correntes quentes de latitudes médias e correntes de contorno oeste é responsável pelo transporte de calor em direção a latitudes mais elevadas (Hogg & Johns, 1995). O balanço térmico resultante contribui para o aquecimento do Hemisfério Norte (HN) e o resfriamento das águas do Hemisfério Sul (HS).

No Atlântico Sul, a oeste do Meridiano de Greenwich, entre as latitudes 10°S e 25°S, há uma corrente de água ampla e de fluxo lento que se desloca de leste a oeste, denominada Corrente Equatorial Sul (CES, *South Equatorial Current – SEC*). Conforme a síntese sobre o sistema de correntes equatoriais apresentada por Stramma *et al.* (1990, 1991), a SEC é subdividida em duas faixas: a faixa norte, localizada acima de 10°S, e a faixa sul, situada ao sul desta latitude, conhecida como ramo sul da Corrente Equatorial Sul (CSEs, *Southern South Equatorial Current – SSEC*).

À medida que a SSEC se aproxima da costa da América do Sul, ocorre uma mudança em sua direção. Parte de seu volume de água desloca-se para o sul, dando origem à Corrente do Brasil (CB), enquanto a maior parcela segue para o norte e, posteriormente, para noroeste, contribuindo para a formação da Corrente Norte do Brasil (CNB, *North Brazil Current – NBC*). Outra fração da SSEC desvia-se para o leste, originando a Contracorrente Equatorial Sul (*South Equatorial Countercurrent – SECC*), que flui em sentido oposto ao da Corrente Equatorial Sul. Dessa forma, a SSEC, ao alcançar a costa brasileira, divide-se em duas componentes principais: a CB, e a CNB.

A CNB, uma corrente de contorno oeste, transporta águas superficiais equatoriais em direção ao Atlântico Norte. Essa corrente desempenha papel essencial no fechamento do giro equatorial e no transporte transequatorial de águas, contribuindo de forma significativa para a manutenção da Circulação Meridional do Atlântico (AMOC) (Johns *et al.*, 1998).

Estudos sobre a CNB são fundamentais para compreender a dinâmica da circulação no Atlântico, especialmente no que diz respeito às suas interações com outras correntes, como a Subcorrente Norte do Brasil (SNB, *North Brazil Undercurrent – NBUC*) e a Corrente Central Sul Equatorial (CSEc). Dentro dessa dinâmica, destaca-se a importância do núcleo da corrente, a região onde a velocidade do fluxo é máxima, como um possível indicador de sua constituição e trajetória, bem como de suas conexões com sistemas de circulação de larga escala.

Apesar de sua importância, a constituição vertical da Corrente Norte do Brasil e a contribuição relativa das correntes de superfície e subsuperfície ainda apresentam incertezas, especialmente no que se refere à identificação de seus limites dinâmicos, à profundidade de transição entre os principais aportes de massa e à estrutura do núcleo da corrente.

No contexto da circulação oceânica do Atlântico Tropical, a modelagem numérica tem se consolidado como uma ferramenta essencial para investigar a estrutura, a origem e a variabilidade de correntes de contorno oeste, como a Corrente Norte do Brasil. Devido à sua capacidade de representar fenômenos complexos da dinâmica oceânica, essa abordagem vem sendo amplamente utilizada em estudos que buscam projetar cenários ambientais sob diferentes condições físicas e climáticas.

Entretanto, a precisão das simulações depende diretamente da qualidade dos dados utilizados. Modelagens baseadas exclusivamente em dados teóricos ou não validados podem gerar resultados com significativas discrepâncias em relação ao comportamento real do oceano, comprometendo a confiabilidade das análises. Considerando essa limitação, o presente trabalho emprega dados hidrodinâmicos oriundos de modelos globais amplamente validados, a fim de garantir maior solidez e realismo nas simulações realizadas.

Parte-se da hipótese de que, até aproximadamente 100 m de profundidade, a principal contribuição para a constituição da CNB é proveniente da CES. Em níveis mais profundos, a SNB passa a exercer papel predominante na formação e manutenção da CNB.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a constituição e a dinâmica da Corrente Norte do Brasil (CNB) por meio de modelagem numérica, com foco na utilização do *OpenDrift* como ferramenta indicadora de sua formação e de suas interações com outras correntes oceânicas.

2.2 Objetivos Específicos

- Investigar a dinâmica associada à formação da Corrente Norte do Brasil.
- Simular a dispersão de partículas a fim de quantificar a contribuição da Subcorrente Norte do Brasil e da Corrente Sul Equatorial na constituição da CNB.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Circulação oceânica

3.1.1 Motores da circulação

A circulação das massas d'água oceânicas é impulsionada, principalmente, por dois mecanismos físicos fundamentais: a ação dos ventos e as variações de densidade. Esses forçantes promovem o deslocamento contínuo e a mistura das massas de água, influenciando diretamente a estrutura vertical da coluna d'água (Alexandre, 2008).

A atuação dos ventos está associada ao balanço térmico entre o oceano e a atmosfera e afeta predominantemente a circulação superficial, podendo alcançar profundidades da ordem de até 1.000 m. Essa forçante gera correntes de resposta rápida, cujo escoamento sofre desvios em relação à direção original do vento em função da interação entre a turbulência oceânica e a rotação da Terra, por meio da força de Coriolis.

De acordo com a teoria da espiral de Ekman, o vento induz uma corrente superficial desviada em relação à sua direção, para a direita no Hemisfério Norte (HN) e para a esquerda no Hemisfério Sul (HS), formando uma estrutura helicoidal na qual o momentum é progressivamente transferido para camadas mais profundas, com redução da intensidade e defasagem do escoamento. Esse efeito tende a se dissipar a algumas centenas de metros, sendo a espessura da camada de Ekman dependente da latitude (Alexandre, 2008; Garrison, 2010). O efeito de Coriolis, diretamente associado à rotação terrestre, desempenha papel central na deflexão e organização dos fluxos oceânicos em escala global. Adicionalmente, variações de densidade decorrentes de diferenças de temperatura e salinidade, associadas a processos como aquecimento solar, evaporação e precipitação, impulsionam movimentos verticais e horizontais que estruturam a circulação termohalina, responsável pela redistribuição de calor e propriedades físico-químicas em escala planetária (Alexandre, 2008; Garrison, 2010).

Estima-se que o transporte de energia realizado pelas correntes oceânicas represente cerca de 10 a 20% da redistribuição global de calor (Garrison, 2010; Saes *et al.*, 2018). Nas regiões equatoriais, a elevada incidência solar aquece as águas superficiais, tornando-as menos densas. Em contrapartida, em altas latitudes, águas mais frias e frequentemente mais salinas apresentam maior densidade, favorecendo seu afundamento e contribuindo para o transporte meridional de massas d'água (Alexandre, 2008).

Esse contraste de densidade impulsiona a circulação termohalina, também denominada Circulação Meridional de Revolvimento (AMOC, na sigla em inglês *Atlantic Meridional Overturning Circulation*), responsável por aproximadamente 90% do volume de água abaixo da camada superficial (Garrison, 2010). Essa circulação profunda tem origem em zonas de afundamento, geralmente localizadas em latitudes elevadas, onde águas superficiais densificadas convergem e penetram nas camadas profundas, favorecendo a oxigenação dessas massas. Por outro lado, regiões de divergência promovem a ressurgência de águas profundas ricas em nutrientes, sustentando a produtividade primária ao atingirem a zona eufótica.

A AMOC possibilita o transporte meridional de calor e desempenha papel fundamental no equilíbrio entre os fluxos de energia oceânico e atmosférico, sendo a principal responsável pela assimetria térmica inter-hemisférica e pelo consequente deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Aimola, 2016), o que evidencia sua relevância na dinâmica do Oceano Atlântico.

Esses movimentos obedecem ao princípio da conservação da massa, segundo o qual qualquer entrada de fluido em um volume delimitado exige uma saída correspondente, não ocorrendo acúmulo permanente (Alexandre, 2008). De forma integrada, o efeito de Coriolis, a força gravitacional e o atrito influenciam a direção, a intensidade e a estrutura vertical das correntes, tanto superficiais quanto profundas (Saes *et al.*, 2018).

3.1.2 Correntes como reguladoras climáticas

As correntes oceânicas não apenas transportam massa e energia dentro do oceano, mas exercem papel fundamental na regulação climática do planeta, conectando diferentes regiões e influenciando padrões atmosféricos (Alexandre, 2008). Na Oceanografia Física, o estudo da dinâmica das correntes marinhas, principal mecanismo de transporte de partículas no oceano, é essencial para a compreensão da comunicação inter-hemisférica e da variabilidade climática (Cruz, 2016).

Nesse contexto, a CNB destaca-se como um dos principais vetores de transporte inter-hemisférico no Atlântico, promovendo a transferência de calor, massa e propriedades físico-químicas do hemisfério sul em direção ao hemisfério norte. Esse papel confere à CNB importância estratégica na modulação da circulação Atlântica e em suas interações com o sistema climático.

A Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável, instituída pela Organização das Nações Unidas (ONU) para o período de 2021 a 2030, reforça a necessidade

de estudos voltados à compreensão e à preservação dos oceanos. Nesse cenário de intensificação das mudanças climáticas, a investigação da circulação oceânica fornece subsídios fundamentais para a interpretação das alterações atualmente observadas no sistema Terra.

As correntes da margem norte-nordeste do Brasil inserem-se nesse contexto, constituindo um sistema sensível às variações da termoclina global e, portanto, relevante para diagnósticos sobre a circulação oceânica e suas interações com o clima, com destaque para a atuação da CNB como elo entre as escalas regional e global (Cruz, 2016).

3.1.3 Modelagem numérica da dinâmica oceânica

O avanço tecnológico impulsionou a oceanografia em direção à integração entre dados observacionais, fundamentos teóricos e simulações computacionais. Esse progresso decorre da implementação de sistemas numéricos capazes de traduzir equações matemáticas complexas em modelos computacionais aplicáveis, permitindo a representação e a análise de processos físico-dinâmicos no sistema oceano-atmosfera (Saes *et al.*, 2018).

A modelagem numérica tornou-se, assim, uma ferramenta fundamental para a compreensão da circulação oceânica, especialmente frente à complexidade dos processos multiescalares que governam a variabilidade espaço-temporal do oceano. A integração entre observações, teoria e simulações permite investigar quantitativamente a redistribuição de massa, momentum e energia, além de avaliar a resposta do sistema oceânico às mudanças climáticas e seus impactos regionais e globais (Saes *et al.*, 2018).

Nesse contexto, abordagens lagrangeanas têm se mostrado especialmente adequadas para investigar trajetórias, conectividade e origem das massas d'água, permitindo reconstruir os caminhos percorridos pelas correntes oceânicas a partir de um ponto de interesse.

3.2 Dinâmica Atlântica

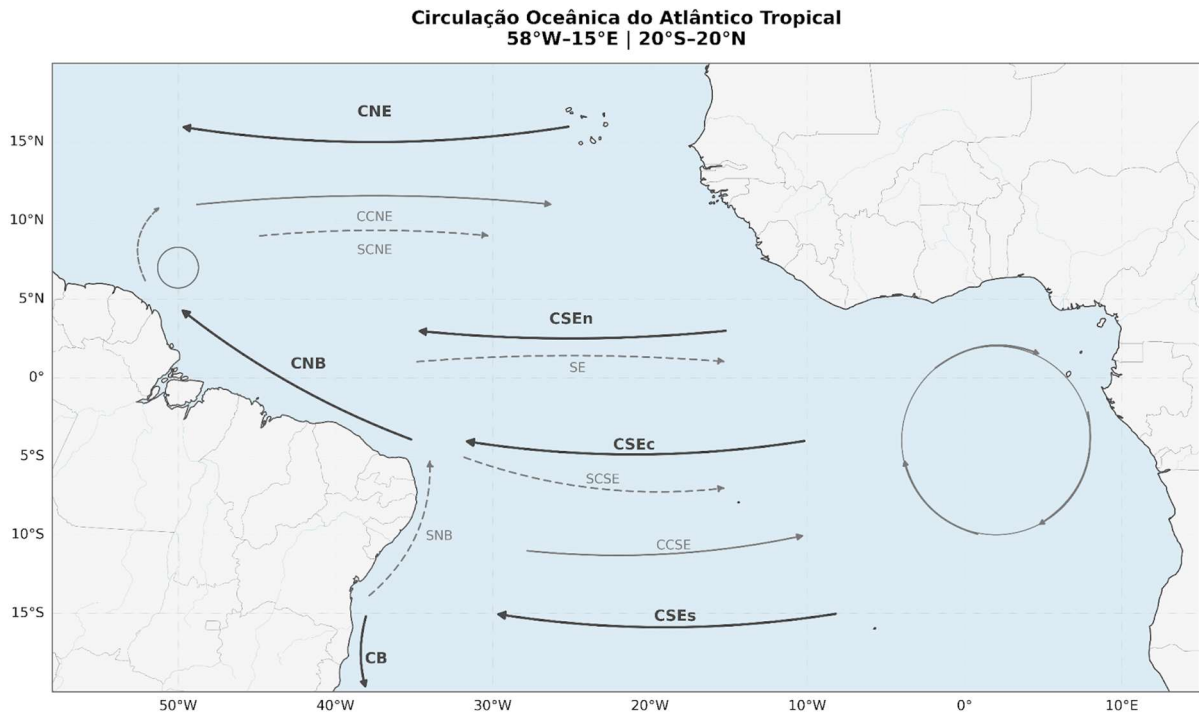
Na região da quebra da Plataforma Continental Norte do Brasil (PCNB), a CNB atua como uma corrente de contorno oeste que domina a dinâmica regional (Nogueira Neto, 2013), fechando o giro equatorial do Oceano Atlântico ao longo do talude da costa norte da América do Sul (Krelling, 2010). Em torno de 7°N, parte do fluxo da CNB retroflete, alimentando a Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) e gerando vórtices que se propagam para noroeste, contribuindo para o transporte inter-hemisférico de massa e propriedades (Krelling, 2010).

As Correntes de Contorno Oeste (CCOs) são, em geral, mais intensas que suas correspondentes no lado leste dos giros oceânicos, característica explicada pela variação latitudinal do parâmetro de Coriolis, conforme descrito por Stommel (1948) e discutido por Marin (2009).

No Atlântico, o sistema de CCOs associado ao giro equatorial é constituído pela SNB, cujo núcleo situa-se entre aproximadamente 150 e 200 m de profundidade e se estende desde cerca de 20°S até latitudes próximas a 5°S, e pela CNB, localizada ao norte dessa latitude, adjacente ao talude continental. A CNB apresenta núcleo predominantemente superficial, resultado do aporte da Corrente Sul Equatorial, especialmente de seu ramo central (CSEc), conforme descrito por Silveira *et al.* (1994) e Stramma e England (1999), citados por Marin (2009).

A delimitação meridional do sistema é dada, ao sul, pelo ramo sul da Corrente Sul Equatorial (CSEs), que separa os giros equatorial e subtropical do Atlântico Sul. Esse ramo, localizado ao sul do Equador, aproximadamente entre 10°S e 20°S, encontra a plataforma continental brasileira e se bifurca em dois fluxos principais: um mais fraco, que se dirige para sul e alimenta a Corrente do Brasil (CB), e outro mais intenso, que flui para norte, constituindo o núcleo de subsuperfície da SNB. Ao norte, a Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) estabelece a divisão entre os giros equatorial e tropical, enquanto, no limite leste, a Corrente de Angola completa o fechamento do giro equatorial (Peterson e Stramma, 1991; Stramma e England, 1999, citados por Marin, 2009).

Figura 1 – Mapa esquemático das principais correntes que compõem a circulação do Atlântico Tropical, com destaque para a Corrente Norte do Brasil (CNB), a Corrente Sul Equatorial (CSE) e seus ramos norte, central e sul (CSEn, CSEc e CSEs), a Subcorrente Norte do Brasil (SNB), a Corrente do Brasil (CB), bem como as contracorrentes e subcorrentes equatoriais. As setas indicam o sentido médio do escoamento. Adaptado de Nogueira Neto (2013), com base na síntese proposta por Stramma & Schott (1999), Schott *et al.* (2002) e Lumpkin & Garzoli (2005).



Fonte: Autora (2026).

3.3 Corrente Norte do Brasil

3.3.1 Formação da Corrente Norte do Brasil

A formação da CNB está diretamente associada à reorganização dos fluxos da CSE ao longo da margem continental nordeste da América do Sul. Ao se aproximar da costa, a CSE se divide em diferentes componentes, sendo parte de seu escoamento direcionada para o norte e incorporada ao sistema de contorno oeste, contribuindo para a constituição da CNB. Esse processo envolve a interação entre fluxos superficiais e subsuperficiais, especialmente por meio da SNB, que desempenha papel fundamental na alimentação da corrente em profundidade (Goes *et al.*, 2005).

A SNB é uma componente permanente da circulação de fronteira oeste no Atlântico equatorial (Goes *et al.*, 2005) e apresenta núcleo tipicamente localizado entre 150 e 200 m de profundidade. À medida que essa subcorrente flui para o norte ao longo do talude continental, seu núcleo torna-se progressivamente mais raso, enquanto as velocidades superficiais se intensificam devido ao aporte dos ramos da CSE. Esse processo favorece a transferência de momentum e propriedades das camadas subsuperficiais para a superfície, resultando na intensificação da CNB ao norte de aproximadamente 5°S (Marin, 2009).

Evidências observacionais indicam que a formação da CNB envolve a intrusão de massas d'água originadas no HS em diferentes níveis da coluna d'água, característica evidenciada pela extensão de contornos de baixa vorticidade potencial (PV) em direção ao hemisfério norte (Da Silveira *et al.*, 2000). A distribuição do campo de PV sugere uma forte conectividade dinâmica entre os fluxos subsuperficiais associados à SNB e a intensificação da corrente em superfície, reforçando o papel combinado da SNB e dos ramos da CSE na constituição da CNB.

As propriedades termohalinas associadas à CNB apresentam características típicas da Água Subtropical do Atlântico Sul, o que reforça sua origem predominantemente no hemisfério sul (Goes *et al.*, 2005). Dessa forma, a CNB pode ser compreendida como o resultado de um processo integrado de transporte, reorganização e ascensão de fluxos provenientes do Atlântico Sul, cuja identificação das rotas de origem e da contribuição relativa dos diferentes ramos da circulação equatorial constitui um aspecto central para a compreensão de sua formação e dinâmica.

Embora estudos observacionais e análises eulerianas tenham sido fundamentais para a descrição da estrutura, da variabilidade e das propriedades associadas à CNB, a compreensão detalhada de sua formação exige a identificação das rotas de origem e da conectividade entre os diferentes ramos da circulação equatorial e de contorno oeste. Nesse contexto, abordagens lagrangeanas oferecem uma perspectiva complementar ao possibilitarem o rastreamento do movimento de partículas no oceano, permitindo inferir a contribuição relativa das massas d'água provenientes da SNB e dos ramos da CSE. Em particular, a aplicação de simulações retroativas (*backward*) a partir de um ponto de interesse na CNB constitui uma estratégia consistente para reconstruir os caminhos percorridos pelas partículas e investigar os processos físicos associados à constituição da corrente, motivando a escolha metodológica adotada neste estudo.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

A área de estudo delimitada compreende as coordenadas 55°W, 25°E, 20°S e 15°N, abrangendo parte do Atlântico Tropical Ocidental. Essa delimitação foi escolhida por representar a principal região de atuação da CNB, possibilitando a observação de sua formação e da contribuição de outras correntes para sua dinâmica, como a CSE e a SCNB.

As simulações realizadas nessa área evidenciaram um padrão de escoamento que permite delimitar o núcleo da CNB desde a superfície até aproximadamente 300 m de profundidade, intervalo vertical no qual se observa a máxima magnitude da velocidade da corrente. Abaixo desse estrato, a CNB apresenta uma desaceleração acentuada, justificando, assim, a restrição da análise aos 250 metros superiores da coluna d'água.

Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo no Atlântico Tropical, destacada pelo retângulo em vermelho, abrangendo a região de atuação da Corrente Norte do Brasil e suas correntes contribuintes.



Fonte: Autora (2026).

4.2 Dados utilizados

Foram utilizados dados diários das componentes zonal (uo) e meridional (vo) da velocidade das correntes oceânicas, referentes ao período de 1993 a 2021, totalizando 28 anos. Esses dados foram empregados inicialmente para a análise do padrão de circulação da área de estudo. Um segundo conjunto de dados, correspondente ao período de 2024 a 2025, foi utilizado para a análise de dispersão de partículas. Ambos os conjuntos de dados foram obtidos a partir do produto de reanálise oceanográfica global *GLORYS12V1*, com resolução horizontal de $1/12^\circ$ e 50 níveis verticais, disponibilizado pelo *Copernicus Marine Service*, o qual é globalmente validado e amplamente empregado em estudos de circulação oceânica.

A utilização de diferentes períodos temporais neste estudo atende a objetivos metodológicos distintos. O intervalo de 1993 a 2021 foi adotado para a construção de médias temporais da circulação oceânica, permitindo a caracterização do padrão médio e climatológico da área de estudo, bem como a redução da influência da variabilidade interanual e de eventos de curta duração. Por sua vez, o período de 2024 a 2025 foi empregado nas simulações de dispersão de partículas, por corresponder ao conjunto de dados mais recente disponível. A utilização de dados atualizados é fundamental para representar de forma mais realista as condições dinâmicas atuais do oceano, especialmente em estudos de dispersão lagrangiana, que são sensíveis à variabilidade temporal das correntes.

Adicionalmente, foram utilizados dados batimétricos provenientes do *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO), com o objetivo de integrar as informações de circulação oceânica às características do relevo submarino da região de estudo.

As análises foram realizadas em múltiplos níveis de profundidade, com o objetivo de identificar o núcleo da CNB e investigar sua variabilidade espaço-temporal, considerando tanto a estrutura horizontal quanto vertical da corrente.

4.3 Modelo numérico e configuração

O modelo numérico empregado neste estudo foi o *OpenDrift*, um modelo Lagrangeano de código aberto desenvolvido para simulações de dispersão de partículas no ambiente oceânico. O modelo permite o rastreamento de partículas passivas em campos hidrodinâmicos

tridimensionais, a partir de dados oriundos de modelos globais de circulação oceânica, sendo amplamente utilizado em estudos de transporte, conectividade e dinâmica de correntes.

As simulações foram executadas em ambiente *Linux*, sistema operacional compatível com os requisitos do modelo, utilizando o terminal *IPython* e o ambiente *Jupyter Lab*. A configuração do modelo foi realizada em linguagem *Python*, com a definição dos parâmetros iniciais do experimento, incluindo a fonte dos dados hidrodinâmicos, o intervalo temporal das simulações, a localização geográfica de liberação das partículas, as profundidades de interesse e o número total de partículas lançadas.

A visualização e a análise dos resultados foram conduzidas no ambiente *Jupyter Lab*, possibilitando a geração de mapas e perfis verticais representativos das trajetórias das partículas e da magnitude das correntes oceânicas. Esses produtos permitiram uma análise detalhada dos padrões de escoamento e da estrutura vertical da circulação associada à CNB.

A integração entre os campos de corrente e a batimetria possibilitou a sobreposição das informações de circulação oceânica e relevo submarino, contribuindo para uma interpretação mais precisa da influência da topografia sobre o comportamento da CNB e das demais componentes da circulação equatorial.

O lançamento das partículas foi realizado nas coordenadas aproximadas de 46°W e 2°N , região associada ao limite da área de influência da CNB, adotando-se uma dispersão radial de 10 km, com o objetivo de representar a variabilidade espacial local da corrente. As simulações foram conduzidas por meio de um retropropagação Lagrangeano (*backward simulation*), permitindo identificar a origem das partículas d'água, em vez de seu destino final.

O modelo foi integrado utilizando um passo de tempo de 3 horas, com armazenamento das saídas a cada 6 horas, garantindo resolução temporal adequada para a análise das trajetórias. A batimetria foi utilizada como campo auxiliar para impedir a penetração das partículas em regiões continentais ou abaixo do fundo oceânico, assegurando a consistência física das simulações.

As simulações foram divididas em dois períodos distintos: o primeiro compreendendo o intervalo de fevereiro de 2024 a junho de 2024, e o segundo de julho de 2024 a janeiro de 2025. O número total de partículas lançadas ao longo dos experimentos foi de 10.000. As partículas foram inicializadas em profundidades fixas, não sendo permitida a movimentação vertical ao longo da simulação, dessa forma, o deslocamento ocorreu exclusivamente no plano horizontal, controlado pelas componentes zonal e meridional do campo de velocidade. Essa abordagem teve como objetivo isolar a contribuição das correntes oceânicas nas faixas de

profundidade estabelecidas. Para a elaboração dos mapas de dispersão, visando reduzir a poluição visual, foi adotada a visualização de uma partícula a cada cem lançadas.

Posteriormente, os dados de dispersão obtidos para cada faixa de profundidade e período analisado foram representados por meio de mapas de densidade, os quais permitem identificar a frequência de passagem das partículas em determinadas regiões, evidenciando os principais trajetos associados à CNB e às correntes contribuintes para sua constituição.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

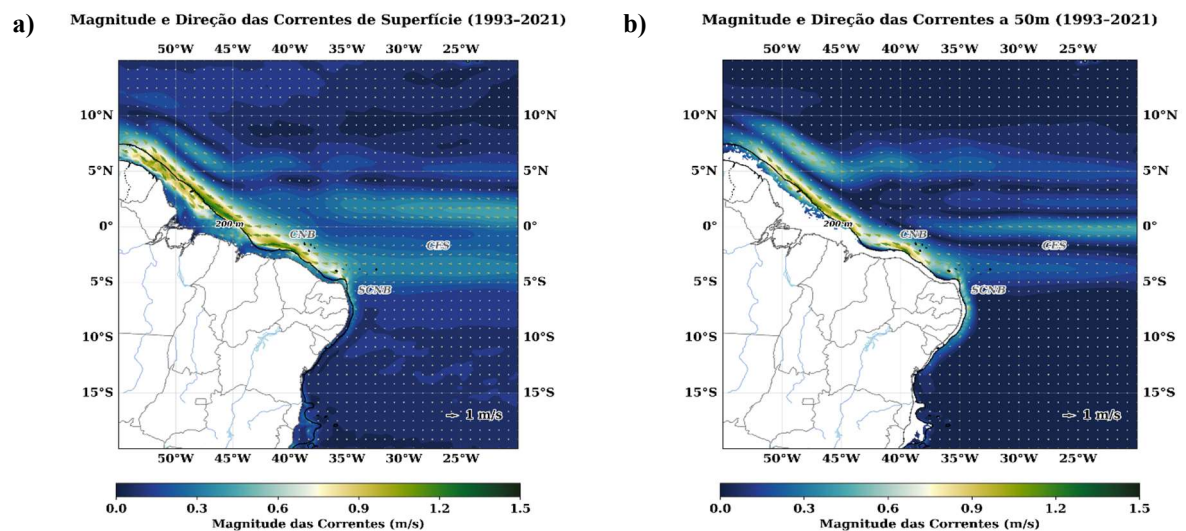
5.1 Resultados

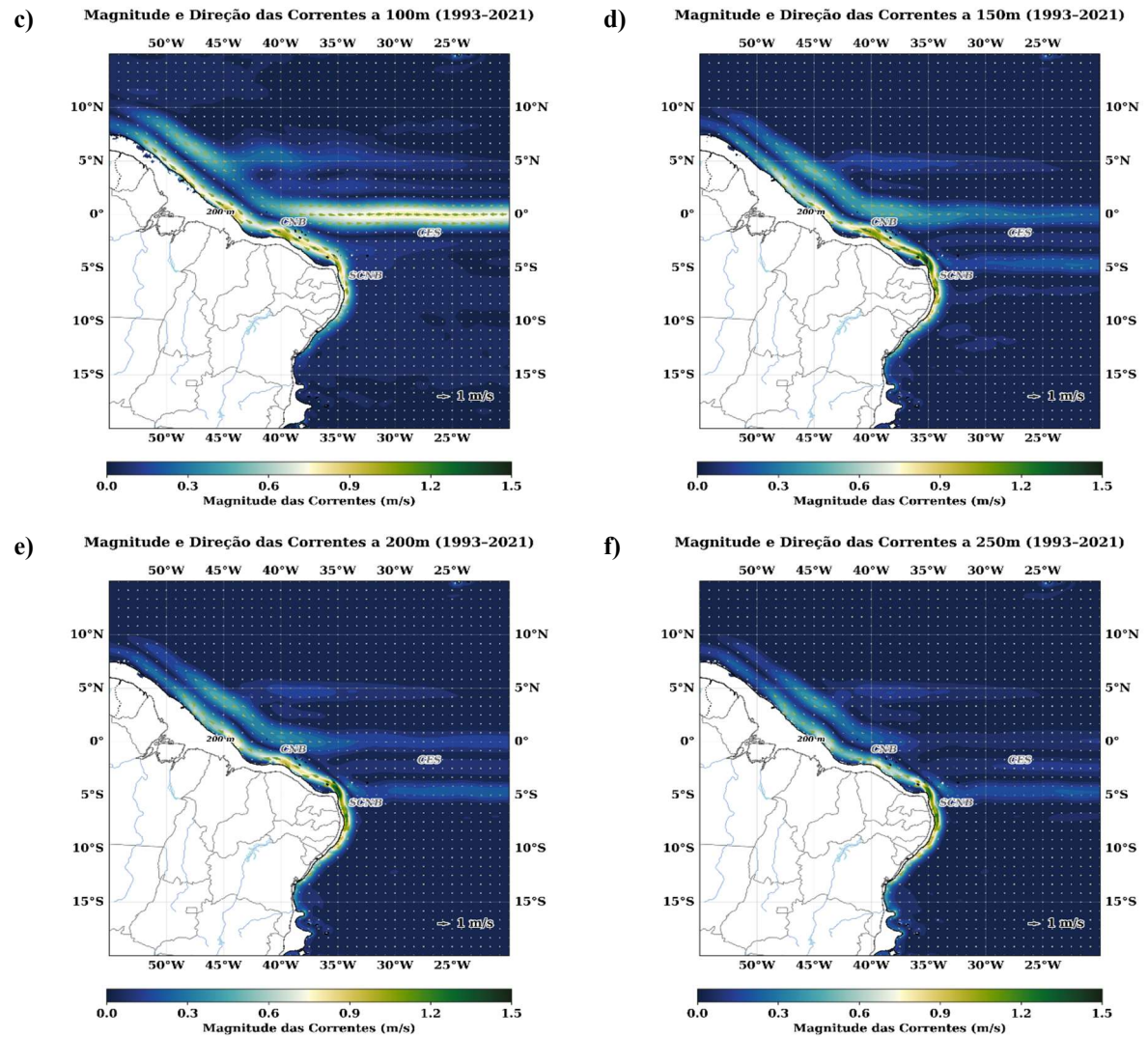
5.1.1 Padrão geral de Circulação

O conjunto de imagens geradas a partir da média temporal de 28 anos (1993–2021) de dados diários evidencia o padrão de circulação desde a superfície até aproximadamente 250 m de profundidade (figura 3). A análise desses mapas permite identificar, a partir da magnitude das correntes, a presença de um núcleo superficial cuja principal contribuição está associada ao CSEs, responsável pela alimentação da CNB.

Em contrapartida, a partir de cerca de 100 m de profundidade, com maior destaque em torno de 150 m, observa-se a formação de um núcleo de subsuperfície, associado predominantemente ao escoamento da SCNB.

Figura 3 – Mapas da magnitude média da velocidade das correntes oceânicas na área de estudo, obtidos a partir de uma média temporal de 28 anos de dados de reanálise, para as profundidades de: (a) 0 m, (b) 50 m, (c) 100 m, (d) 150 m, (e) 200 m e (f) 250 m.



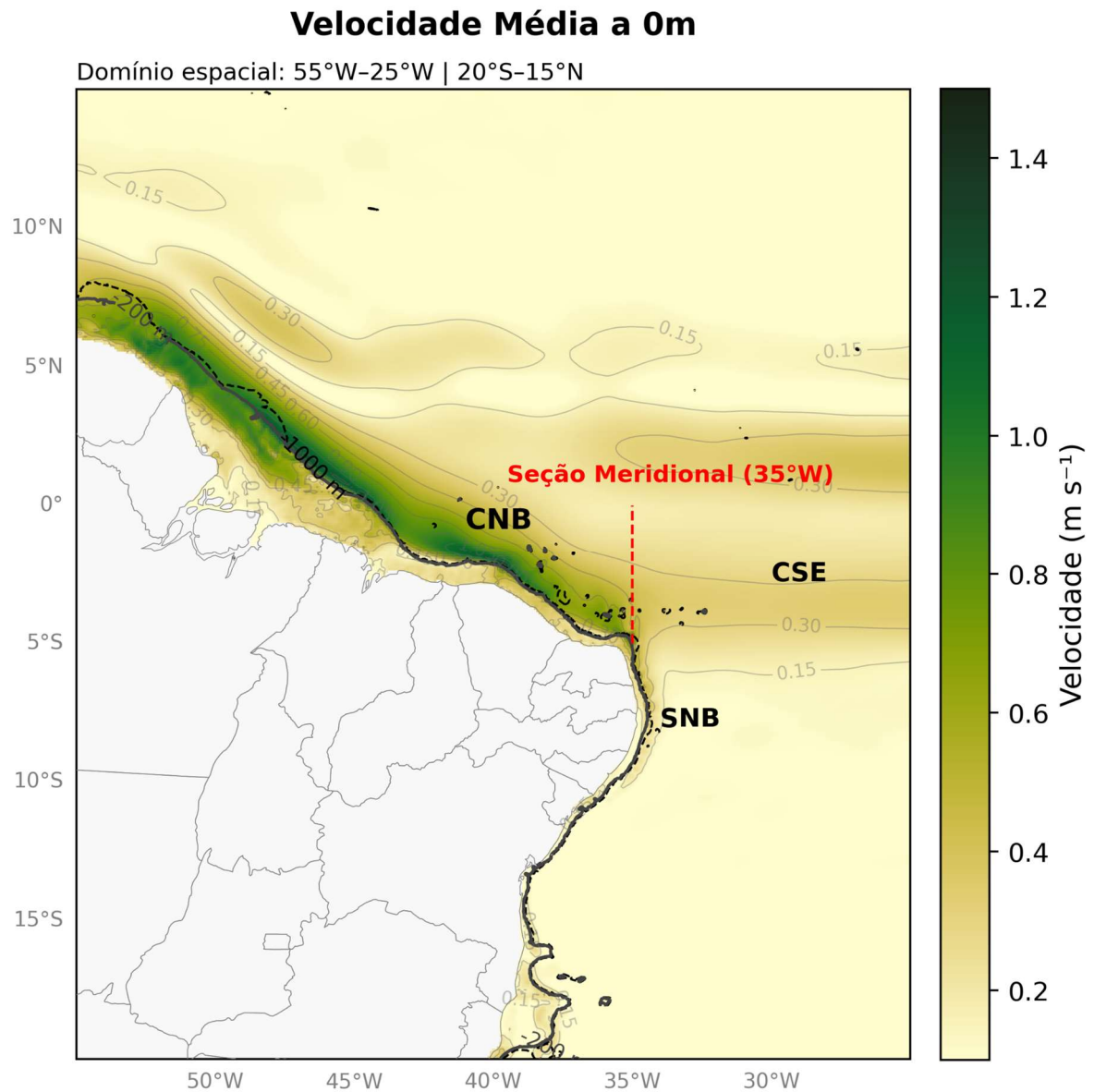


Fonte: Autora (2026).

5.1.2 Contribuição da CSE e da SNB na constituição da CNB

Com o objetivo de compreender a formação da CNB, foram realizadas análises ao longo da longitude de 35°W, região onde se observa o início de sua área de influência. Para isso, foi definida uma seção meridional nessa longitude, abrangendo a faixa latitudinal entre o Equador (0°) e 5°S.

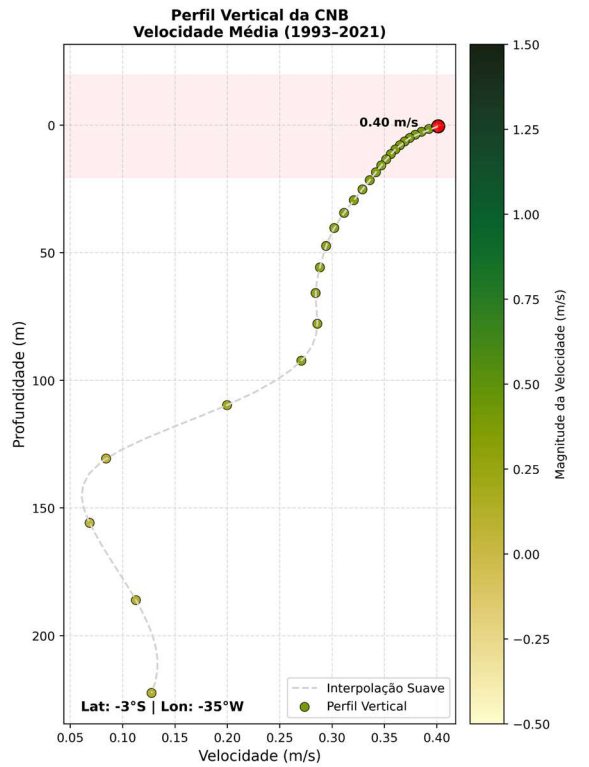
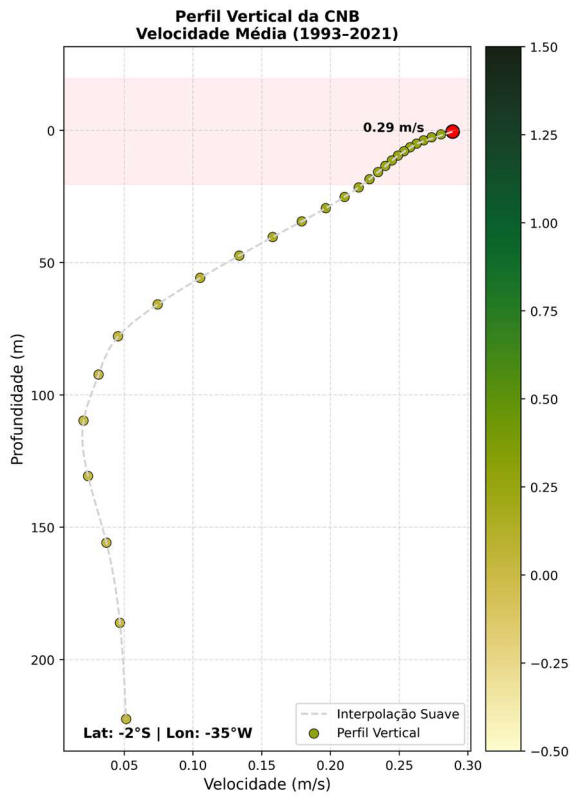
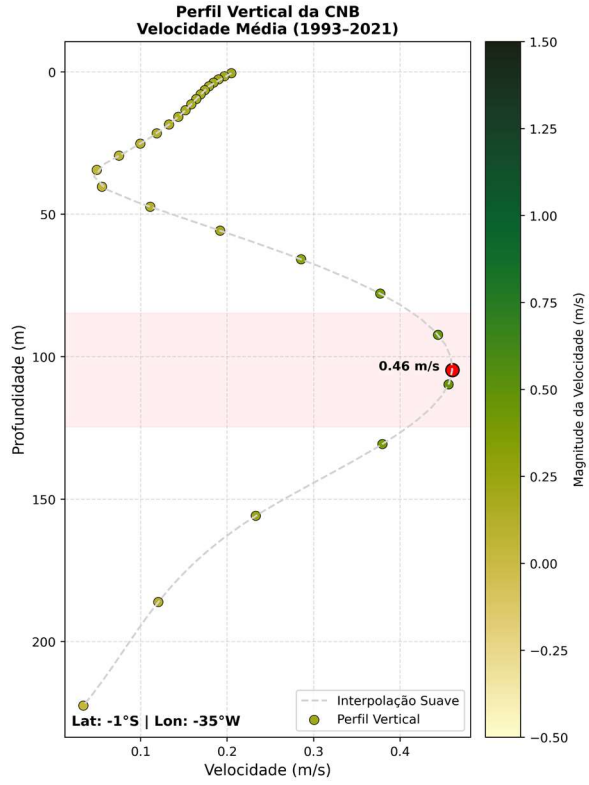
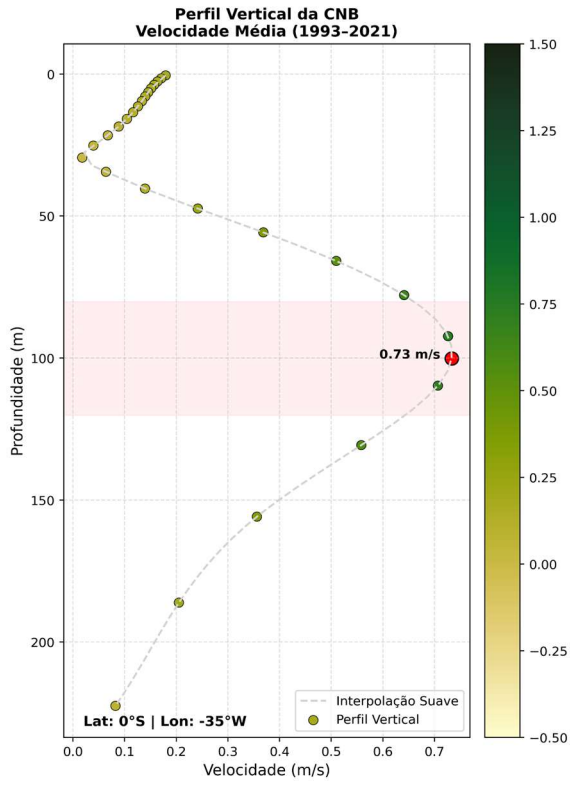
Figura 4 – Mapa da velocidade média superficial indicando a seção meridional localizada em 35°W, entre 5°S e 0°, utilizada para a análise do núcleo da Corrente Norte do Brasil (CNB) ao longo da coluna d’água.

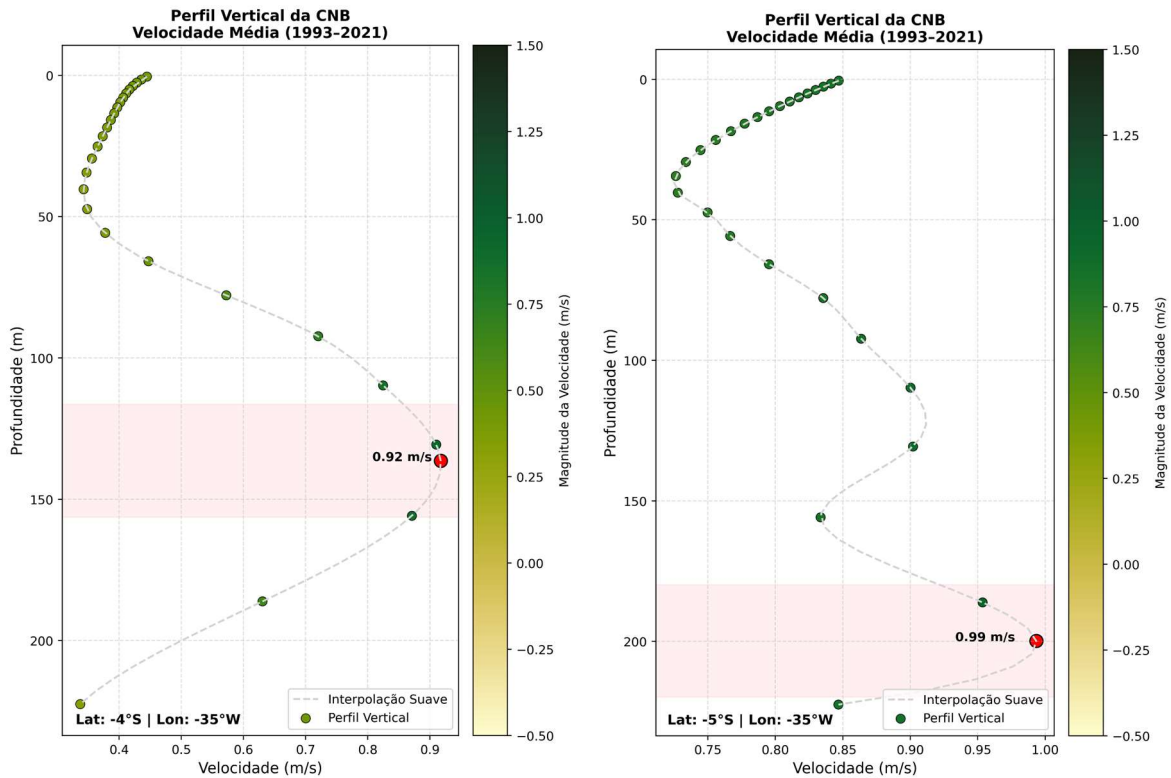


Fonte: Autora (2026).

A seção meridional definida foi utilizada como referência para a construção de perfis verticais da magnitude da velocidade, permitindo a caracterização da estrutura vertical da circulação e a identificação do núcleo da CNB ao longo da coluna d'água, para as diferentes latitudes analisadas.

Figura 5 – Distribuição da média temporal da magnitude da velocidade ao longo da seção meridional em 35°W, evidenciando a posição e a intensidade do núcleo da Corrente Norte do Brasil para as diferentes latitudes analisadas. Os pontos vermelhos denotam as maiores intensidades da corrente para cada latitude.





Fonte: Autora (2026).

Os perfis obtidos a partir da análise vertical dessa seção, utilizando o núcleo da corrente como indicador de formação, evidenciam a presença de um núcleo de subsuperfície entre 4°S e 5°S, localizado predominantemente entre 100–150 m e 150–250 m de profundidade. Esse padrão indica a latitude em que se inicia o aporte da SNB para a constituição da CNB.

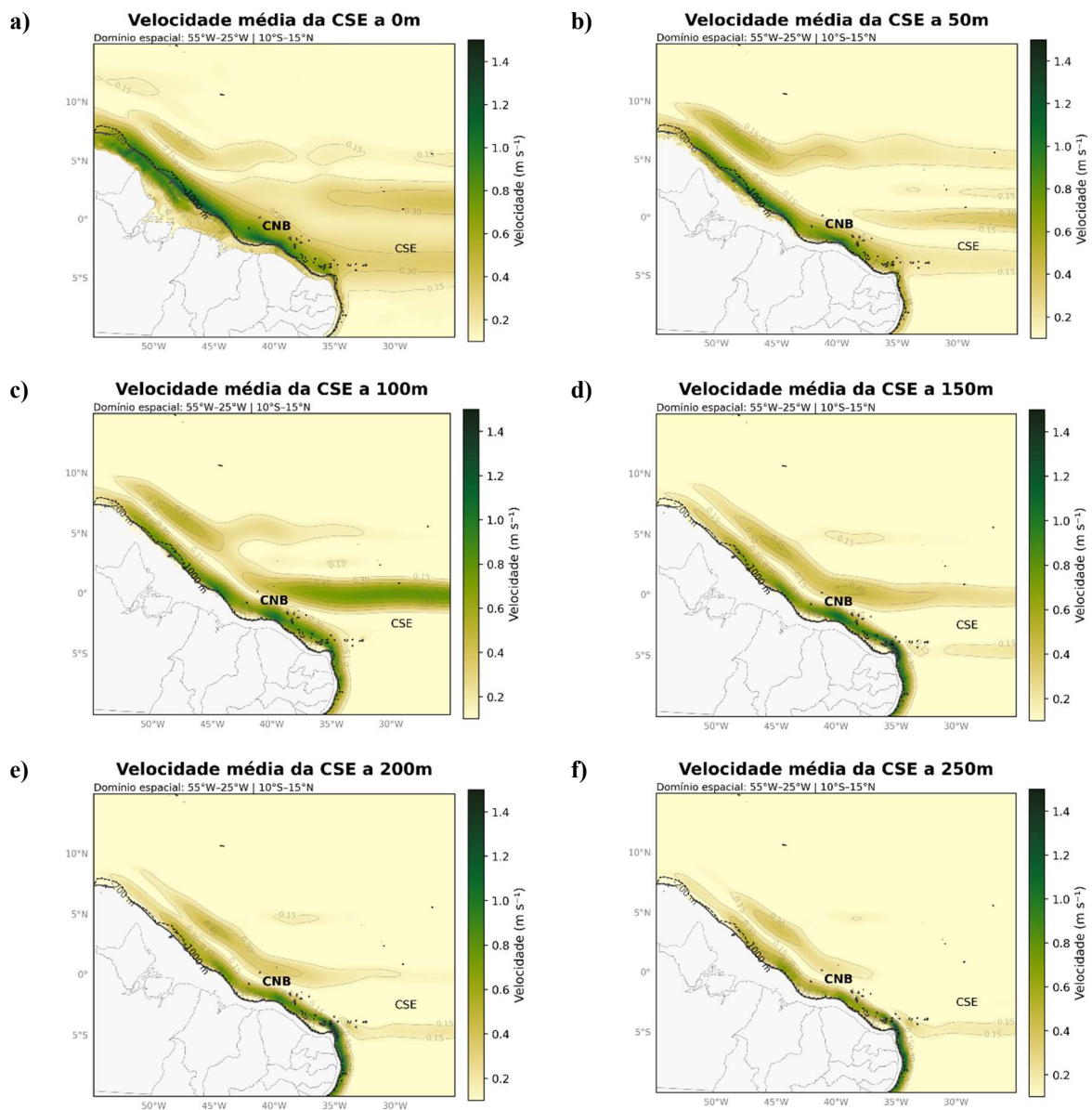
Entre as latitudes de 2°S e 3°S, o núcleo passa a ser observado em superfície, refletindo a intensificação do escoamento associada à CSEc. Já entre 1°S e o Equador, o núcleo se estabelece em torno de 100 m de profundidade, indicando a predominância da influência de uma subcorrente nesse trecho.

Os perfis ao longo da longitude fixa de 35°W permitiram identificar as regiões de maior influência das diferentes correntes, a partir do comportamento vertical e latitudinal do núcleo obtido, evidenciando a transição entre os regimes de superfície e subsuperfície na formação da CNB.

Com o objetivo de complementar a caracterização da estrutura vertical das correntes associadas à CNB, foram elaborados mapas de velocidade média. Essa etapa da pesquisa permitiu aprofundar o entendimento da dinâmica da área de estudo, servindo como base para as análises subsequentes.

A análise foi organizada de forma a contemplar separadamente as áreas de domínio de cada corrente, de modo a evidenciar suas características específicas. Assim, para a CSEc, o domínio espacial considerado foi delimitado pelas coordenadas 55°W a 25°E e 10°S a 10°N (Figura 6).

Figura 6 – Mapas da média temporal da magnitude da velocidade em diferentes profundidades. Em destaque a Corrente Sul Equatorial (CSE) em sua área de influência, obtidos para diferentes profundidades, a partir da média temporal de 28 anos de dados.

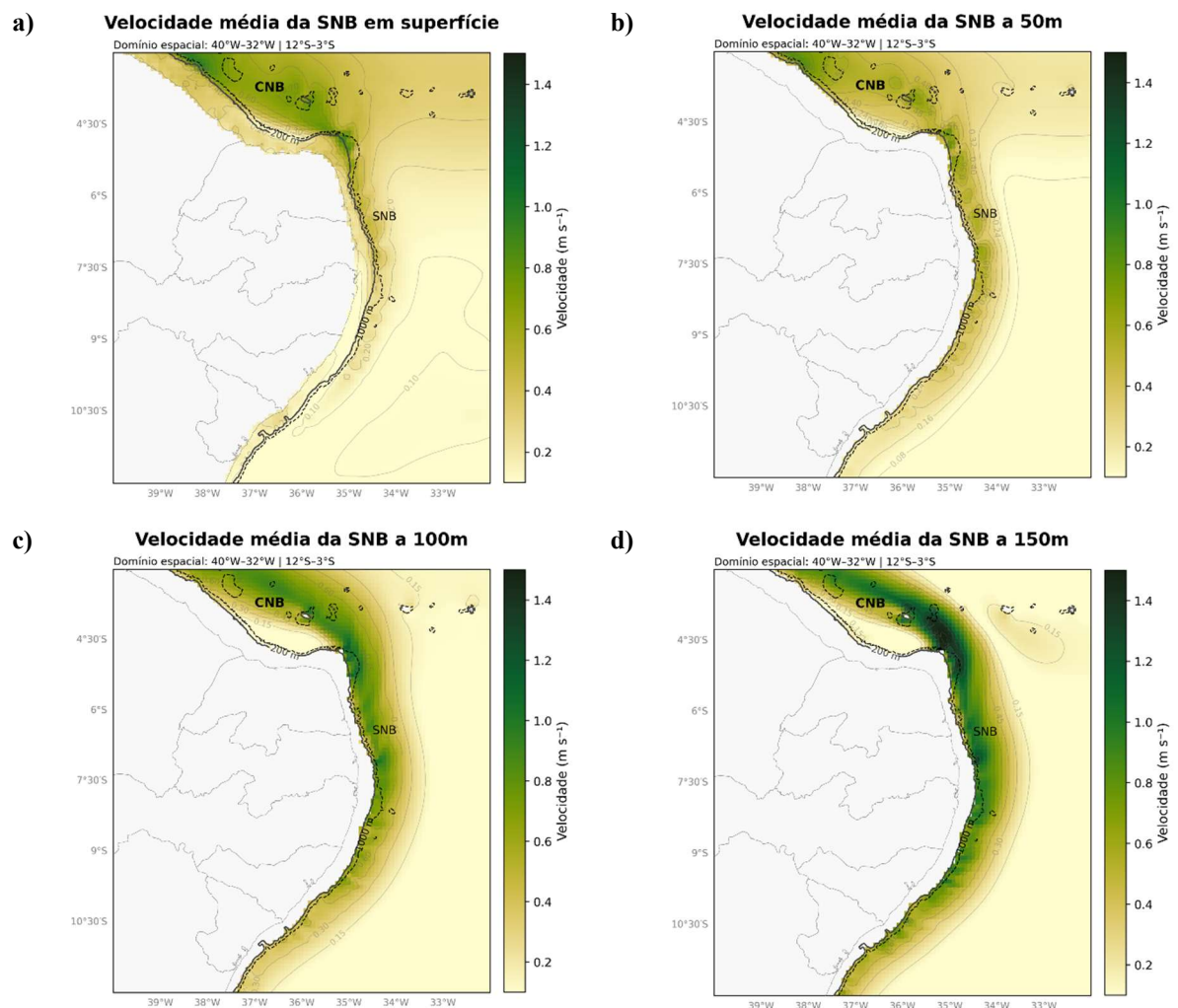


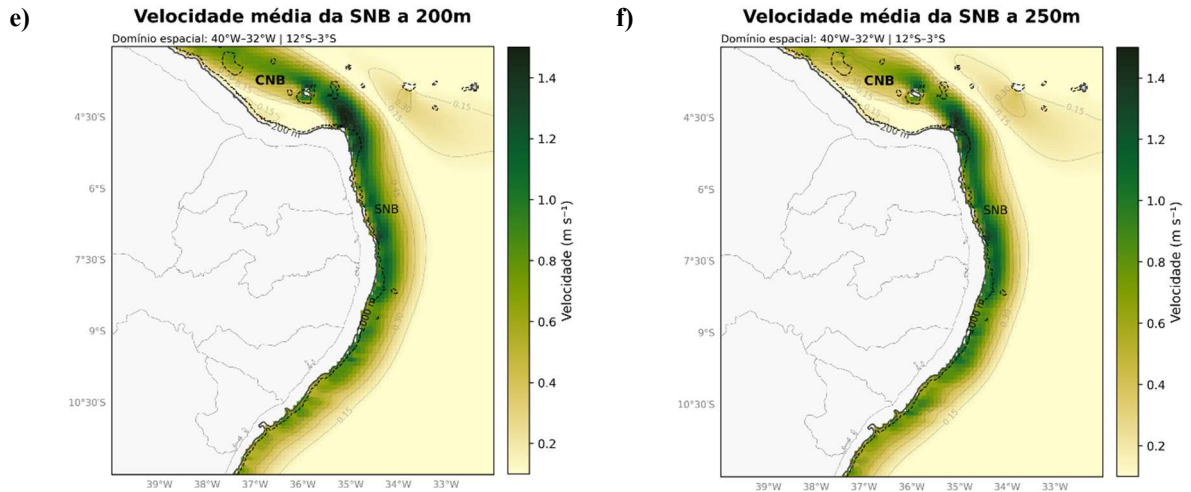
Fonte: Autora (2026).

Ao analisar a dinâmica da CSEc (Figura 6), observa-se a presença de um núcleo superficial com escoamento predominante em direção oeste, o qual domina a circulação na camada superior. A partir de aproximadamente 100 m de profundidade, verifica-se um aporte de subsuperfície, concomitante à diminuição da intensidade da CSEc na superfície, o que pode estar associado ao contrafluxo da Subcorrente Equatorial (SE) (Figura 1).

Para a SNB, a área de domínio foi definida entre as longitudes 40°W e 32°W e as latitudes 12°S e 3°S (Figura 7).

Figura 7 – Média temporal da magnitude das velocidades evidenciando a Subcorrente Norte do Brasil em diferentes profundidades.





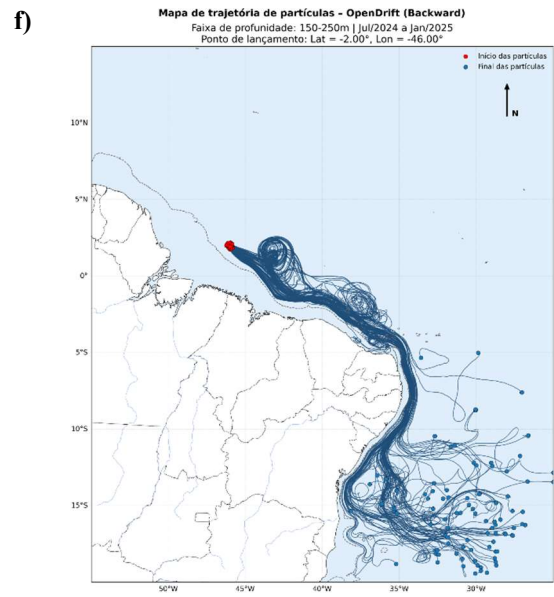
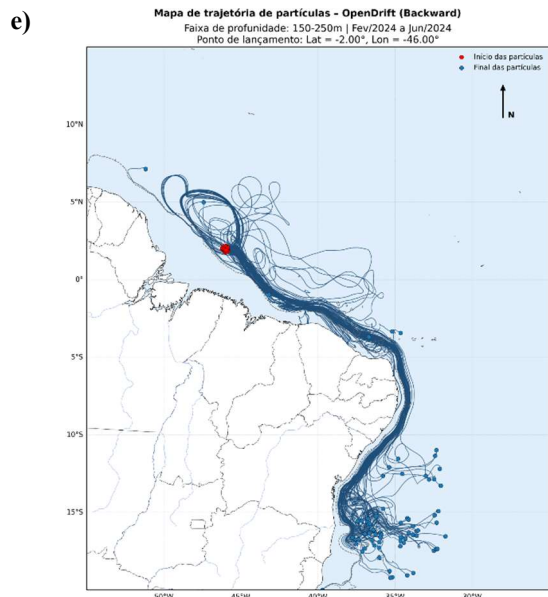
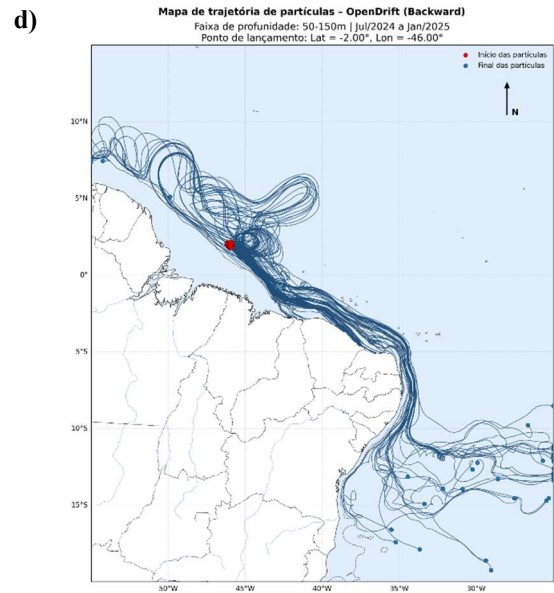
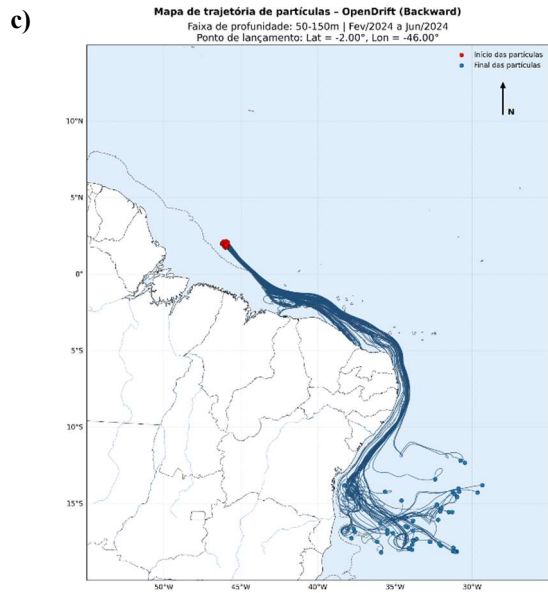
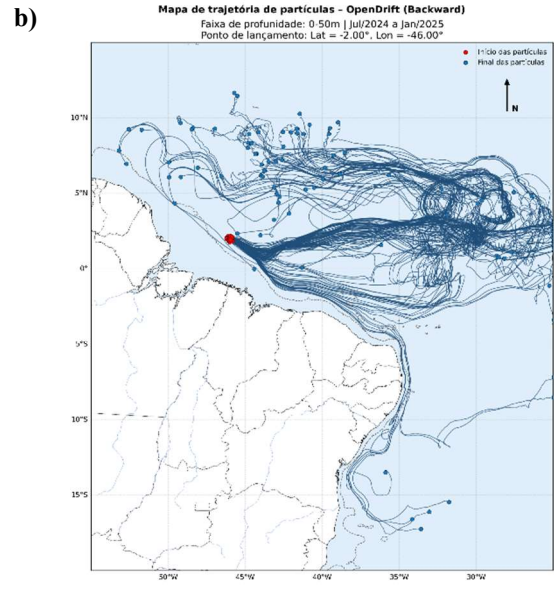
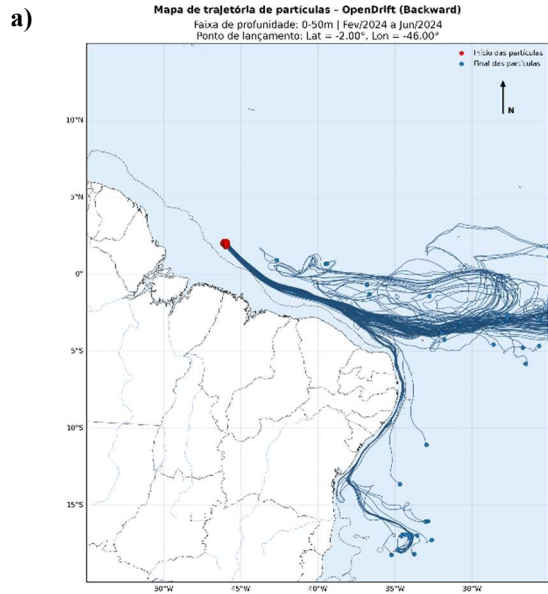
Fonte: Autora (2026).

Na análise da SNB, observa-se que, até aproximadamente 50 m de profundidade, a velocidade média da corrente permanece, em geral, inferior a 1 m s^{-1} . Esse comportamento se altera a partir de cerca de 100 m, onde ocorre uma intensificação significativa da velocidade, com a formação de um núcleo bem definido entre 150 e 250 m de profundidade, evidenciando o papel da SNB na circulação de subsuperfície e na CNB.

5.1.3 Mapas de dispersão de partículas

Com a dinâmica da região previamente caracterizada, a etapa subsequente consistiu na análise dos mapas de dispersão de partículas. Para isso, foram realizadas simulações Lagrangeanas *backward* com o lançamento de partículas na posição de 46°W e 2°N , utilizando um total de 10.000 partículas, distribuídas em dois períodos distintos de análise: fevereiro a junho e julho a janeiro. As partículas foram lançadas entre as profundidades de 0 a 50m, 50 e 150m e 150 e 250m, permitindo a avaliação da variabilidade associada à possível influência da CSEc e da SNB na formação da CNB.

Figura 8 – Mapas de dispersão *backward* de 10.000 partículas lançadas a 10km ao redor do ponto 46°W – 2°S , simuladas com o modelo *OpenDrift*, para três faixas de profundidade (0–50 m, 50–150 m e 150–200 m) e dois períodos distintos: junho a fevereiro de 2024 e janeiro de 2025 a julho de 2024. As trajetórias representam a possível origem das massas d’água que contribuem para a formação da Corrente Norte do Brasil (CNB) no ponto de lançamento.

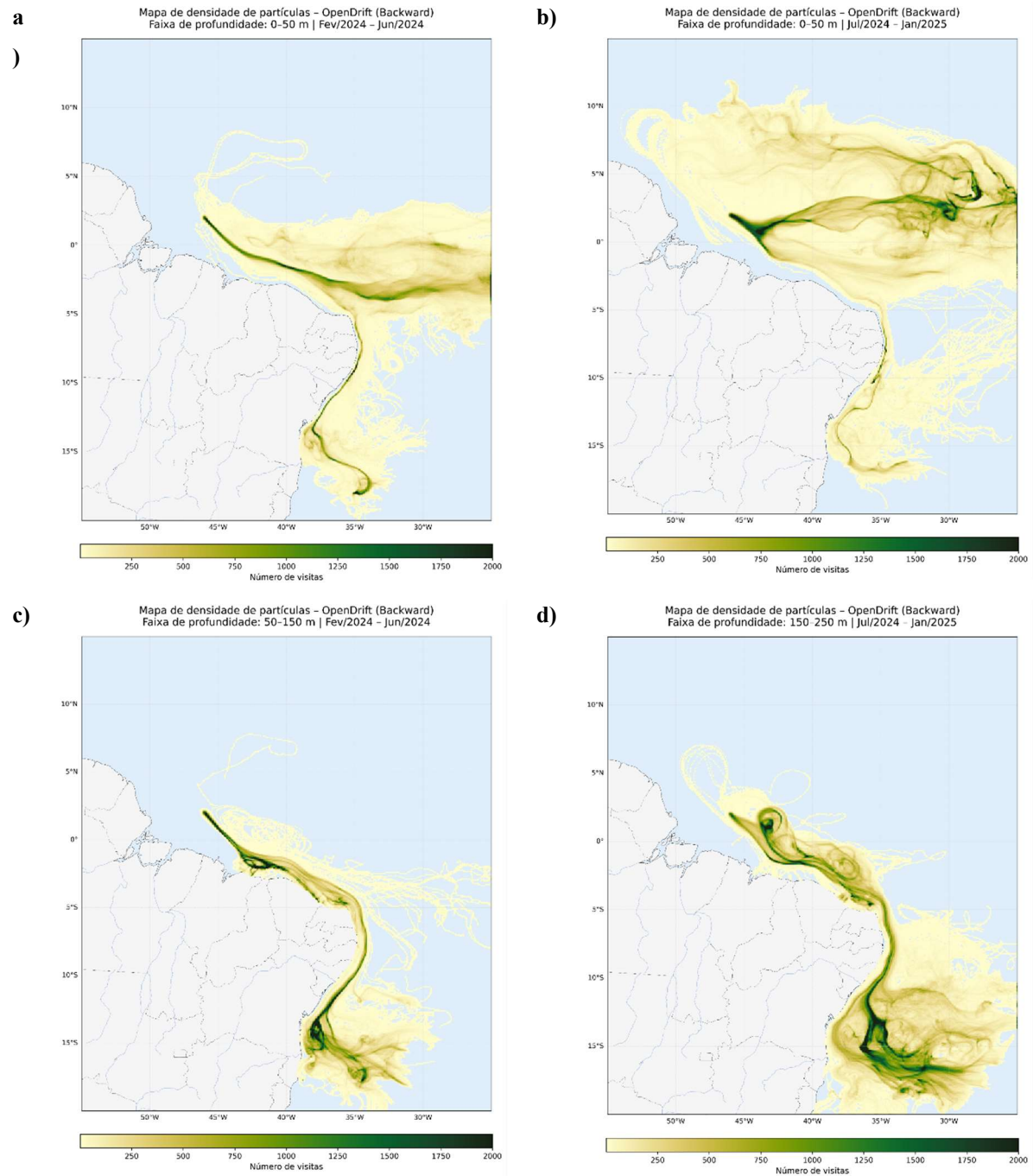


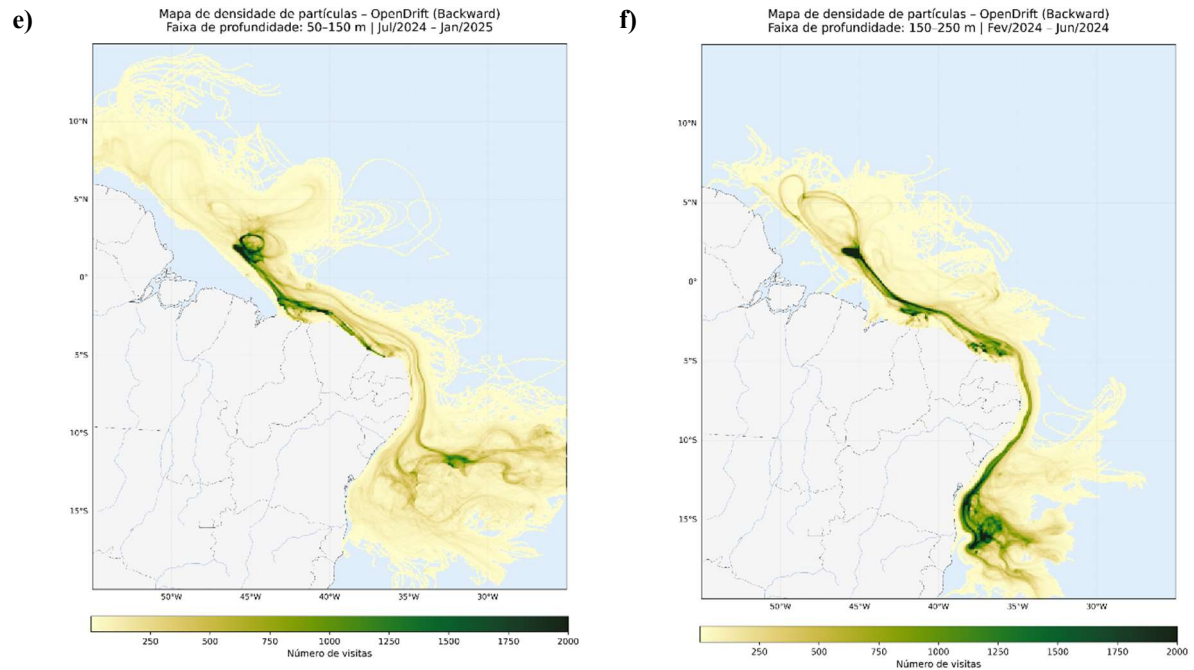
Fonte: Autora (2026).

O primeiro período analisado (Figura 8a, c e e), correspondente aos meses de junho a fevereiro de 2024, apresenta menor dispersão das partículas, com trajetórias predominantemente confinadas à região costeira. No intervalo entre a superfície e 50 m (Figura 8a), observa-se que a maioria das partículas é advectada a partir de uma componente leste, comportamento consistente com o fluxo da CSEc, conforme evidenciado nos mapas de dinâmica previamente apresentados. Entre 100 m e 150 m de profundidade (Figura 8c), as partículas são majoritariamente oriundas do fluxo da SNB, formando trajetórias ascendentes que acompanham o contorno do norte e nordeste da Margem Equatorial do Brasil até aproximadamente 15°S onde as mesmas se desprendem do talude em direção a águas mais profundas devido a influência da CSEs. No estrato mais profundo, entre 150 m e 250 m (Figura 8e), as partículas também há um deslocamento junto ao talude devido a influência da SNB, mas as partículas passam a sofrer a influência de estruturas vorticiais além de parte delas ter origem na retroflexão da CNB mostrando claramente um mecanismo de retroalimentação da mesma.

As representações correspondentes ao período de janeiro de 2025 a julho de 2024 (Figura 8b, d e f) apresentam maior dispersão das partículas quando comparadas ao primeiro período analisado. Esse padrão está associado a um comportamento sazonal da circulação, que agora é deslocada para o norte devido ao deslocamento meridional dos ventos alísios. No estrato superficial, entre 0 e 50 m (Figura 8b), as partículas são oriundas predominantemente da CSE, com destaque para o seu ramo norte (CSEn) também se nota a influência da retroalimentação da CNB que não está presente nos primeiros meses do ano. Entre 50 e 100 m (Figura 8d), observa-se uma dispersão mais pronunciada ao longo do eixo da CNB. Nesse intervalo de profundidade, a influência direta da CSEc deixa de ser evidente, e grande parte do aporte à CNB passa a estar associada ao fluxo da SNB que agora desprende-se da costa em menores latitudes quando comparadas ao primeiro período. É neste período e profundidade que as partículas têm origem e/ou transitam mais a oeste na região de estudo, também se observa a influência de vórtices a oeste da retroflexão da CNB. No estrato mais profundo, entre 150 e 250 m (Figura 8f), as trajetórias das partículas sofrem a influência de vórtices localizados principalmente nas proximidades das longitudes 45°W e 35°W, mantendo origem associada ao fluxo da SNB, o que reforça seu papel na alimentação subsuperficial da CNB durante esse período. Nesta profundidade e período não há trânsito de partículas na região da retroflexão.

Figura 9 – Mapas de densidade de partículas obtidos a partir de simulações Lagrangeanas *backward*, associados à formação da Corrente Norte do Brasil (CNB). Os mapas representam a frequência de visita das partículas ao domínio para as faixas de profundidade de 0–50 m, 50–150 m e 150–250 m, considerando dois períodos distintos: junho a fevereiro de 2024 e janeiro de 2025 a julho de 2024. As regiões de maior densidade indicam os principais ramos contribuintes para a formação da CNB.





Fonte: Autora (2026).

Com o objetivo de reforçar os padrões de trajetória associados à CNB e quantificar a influência de seus contribuintes, foram gerados mapas de densidade de partículas. Essas representações expressam a frequência de visita das partículas em *pixels* de 10 x 10 km nas diferentes regiões do domínio, e não o número absoluto de partículas que atravessam cada área. O padrão espacial observado é consistente com o comportamento de dispersão descrito nas análises anteriores (Figuras 3 e 8).

Adicionalmente, os mapas de densidade (Figura 9) possibilitaram a identificação dos principais ramos que contribuem para a formação da CNB. Observa-se que, entre aproximadamente 2°S e 3°S, durante os meses de fevereiro a junho (Figura 9a), a influência da CSEc é mais intensa em superfície. Já no caso da SNB, o ramo predominante responsável por seu aporte localiza-se em torno de 15°S, associado a CSEs, evidenciando o papel desse fluxo na alimentação subsuperficial da CNB.

Cabe destacar que, por se tratar de uma simulação *backward*, as trajetórias reconstruídas representam a origem das massas d'água que contribuem para a formação da CNB no ponto de lançamento, permitindo identificar a contribuição relativa dos ramos da CSE e da SNB em diferentes profundidades. De forma geral, os dois períodos analisados apresentaram padrões distintos de dispersão, com trajetórias mais organizadas no primeiro período e maior espalhamento espacial no segundo.

5.2 Discussão

Os resultados apresentados evidenciam uma estrutura vertical e horizontal bem definida da CNB, permitindo analisar sua constituição e dinâmica a partir de uma abordagem de modelagem numérica lagrangeada. A formação da CNB mostrou-se diretamente associada ao acoplamento entre o aporte superficial da CSEc e o fluxo subsuperficial da SNB, confirmando o papel conjunto dessas correntes na alimentação da circulação de contorno oeste na margem equatorial do Atlântico.

As diferenças observadas entre os períodos analisados indicam uma variabilidade sazonal na origem das massas d'água que contribuem para a CNB, possivelmente associada à modulação e à migração latitudinal dos ventos alísios e da ZCIT, processos reconhecidos por influenciar a circulação equatorial e a comunicação inter-hemisférica no Atlântico (Johns *et al.*, 1998; Richardson & Walsh, 1986; Waliser & Gautier, 1993; Coelho *et al.*, 2004).

A aplicação de simulações Lagrangeanas *backward* mostrou-se uma ferramenta adequada para investigar a formação da CNB, ao permitir a reconstrução objetiva da origem das massas d'água associadas ao ponto de interesse. Essa abordagem forneceu uma perspectiva complementar aos estudos observacionais tradicionais, baseados principalmente em seções hidrográficas.

Apesar de os resultados estarem fundamentados em dados de reanálise e simulações numéricas, a utilização de uma série temporal extensa conferiu robustez às análises, possibilitando a identificação de padrões médios de formação da CNB e de sua variabilidade sazonal, com menor influência de eventos transitórios.

Como perspectivas para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação do período de simulação *backward* com o objetivo de investigar a variabilidade interanual da formação da CNB, bem como a aplicação da metodologia a diferentes intervalos temporais, visando aprofundar a compreensão dos mecanismos que modulam a dinâmica dessa corrente.

6 CONCLUSÃO

As simulações realizadas ao longo deste estudo confirmam as hipóteses iniciais, fundamentadas no levantamento bibliográfico, ao evidenciar que a contribuição primordial em superfície para a formação da CNB é proveniente da CSEc, responsável pelo núcleo superficial observado nos mapas de velocidade média. Em contrapartida, entre 150 e 250 m de profundidade, o padrão de escoamento associado à SNB indica a presença de um núcleo subsuperficial, que também compõe de forma significativa a estrutura da CNB.

As simulações de dispersão de partículas realizadas para os períodos de fevereiro a junho e de julho a janeiro demonstram que a sazonalidade exerce papel determinante no padrão de formação e na origem das massas d'água da CNB. No primeiro período, a hidrodinâmica regional favorece trajetórias mais organizadas e menor dispersão, enquanto no segundo período observa-se uma ampliação das trajetórias, associada a maior dispersão e à influência de estruturas vorticais.

As limitações do presente estudo estão relacionadas à ausência de dados observacionais *in situ*, de modo que o realismo das simulações depende diretamente da qualidade dos campos de reanálise utilizados. Ainda assim, a aplicação do método de *backtracking* por meio do modelo *OpenDrift* mostrou-se adequada para o rastreamento da origem das massas d'água associadas à CNB, evidenciando o potencial da abordagem Lagrangeana *backward* como ferramenta para investigações sobre a formação e a dinâmica de correntes oceânicas.

Como perspectiva para trabalhos futuros, recomenda-se o aprofundamento da análise por meio da ampliação do período de simulação, da inclusão de diferentes escalas temporais e da quantificação mais precisa das contribuições relativas das correntes envolvidas, bem como a aplicação da metodologia a outros sistemas de circulação, considerando a influência da sazonalidade e de múltiplos forçantes físicos.

REFERÊNCIAS

- AIMOLA, L. A influência da circulação de revolvimento meridional do Atlântico tropical no balanço de momento e no transporte meridional de calor. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, v. 31, n. 4 (suppl.), p. 555–563, 2016.
- ALEXANDRE, J. A. A. As correntes marinhas. Coimbra: Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, 2008.
- COELHO, M. S.; GAN, M. A.; CONFORTE, J. C. Estudo da variabilidade da posição e da nebulosidade associada à ZCIT do Atlântico, durante a estação chuvosa de 1998 e 1999 no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 19, p. 23–34, 2004.
- CRUZ, A. P. S. Mudanças milenares na dinâmica das massas de água do Atlântico Equatorial Oeste. 2016. 112 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.
- DA SILVEIRA, I. C. A.; SCHMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S.; IKEDA, Y. A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Revista Brasileira de Oceanografia*, São Paulo, v. 48, n. 2, p. 171–183, 2000.
- GARRISON, T. **Fundamentos de Oceanografia**. 7. ed. rev. e atual. Tradução de Essentials of Oceanography, 7th edition. São Paulo, SP: Cengage Learning Edições Ltda., 2016. ISBN 978-85-221-2421-3.
- GOES, M.; MOLINARI, R.; DA SILVEIRA, I.; WAINER, I. Retroreflections of the North Brazil Current during February 2002. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, v. 52, n. 4, p. 647–667, 2005.
- HOGG, N. G.; JOHNS, W. E. Western boundary currents. *Reviews of Geophysics*, Washington, v. 33, n. 4, p. 1311–1334, 1995.

JOHNS, W. E.; LEE, T. N.; BEARDSLEY, R. C.; CANDELA, J.; LIMEBURNER, R.; CASTRO FILHO, B. M. Annual cycle and variability of the North Brazil Current. *Journal of Physical Oceanography*, Boston, v. 28, n. 1, p. 103–128, 1998.

KRELLING, A. P. M. A estrutura vertical dos vórtices da Corrente Norte do Brasil. 2010. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

NOGUEIRA NETO, A. V. Variabilidade da Corrente Norte do Brasil associada aos padrões termohalinos na borda da Plataforma Continental Norte do Brasil. 2013. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

RICHARDSON, P. L.; WALSH, D. Mapping climatological seasonal variations of surface currents in the tropical Atlantic using ship drifts. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 91, n. C9, p. 10537–10550, 1986.

SAES, R. V. S. T.; VALENTIM, S. S.; BUCHMANN, F. S.; VASCONCELOS DE MORAIS, P. C.; BEZERRA, M. F.; PIEDRAS, F. R.; GAETA, J. C.; MOREIRA, L. B.; SAHM, B. D. B.; DAMASCENO, É. P. **Princípios de Oceanografia**. Teresina, PI: Associação Brasileira das Editoras Universitárias; EDUFPI, 2018. ISBN 978-85-509-0288-3.

STOMMEL, H. The westward intensification of wind-driven ocean currents. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Washington, v. 29, n. 2, p. 202–206, abr. 1948.

STRAMMA, L. Geostrophic transport of the South Equatorial Current in the Atlantic. *Journal of Marine Research*, New Haven, v. 49, n. 2, 1991.

STRAMMA, L.; IKEDA, Y.; PETERSON, R. G. Geostrophic transport in the Brazil current region north of 20°S. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, v. 37, n. 12, p. 1875–1886, dez. 1990.

STRAMMA, L.; PETERSON, R. G. Geostrophic transport in the Benguela Current region. *Journal of Physical Oceanography*, v. 19, n. 10, p. 1440–1448, out. 1989.

WALISER, D. E.; GAUTIER, C. A satellite-derived climatology of the ITCZ. *Journal of Climate*, v. 6, n. 11, p. 2162–2174, nov. 1993.