



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE - CCBS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E LIMNOLOGIA - DEOLI
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

THAINA PFLUEGER DA SILVA

**VARIABILIDADE E TENDÊNCIAS DO TRANSPORTE MERIDIONAL DE CALOR
PELA CORRENTE NORTE DO BRASIL AO LARGO DO MARANHÃO**

SÃO LUÍS - MA

2025

Pflueger da Silva, Thaina.

VARIABILIDADE E TENDÊNCIAS DO TRANSPORTE MERIDIONAL DE
CALOR PELA CORRENTE NORTE DO BRASIL AO LARGO DO MARANHÃO /
Thaina Pflueger da Silva. - 2025.

37 f.

Coorientador(a) 1: Heitor Perotto.

Orientador(a): Claudia Klose Parise.

Curso de Oceanografia, Universidade Federal do
Maranhão, Universidade Federal do Maranhão/ccbs/deoli,
2025.

1. Corrente Norte do Brasil. 2. Transporte de Calor.
3. Circulação Superficial Equatorial. 4. Margem
Equatorial Brasileira. 5. Mudanças Climáticas. I. Klose
Parise, Claudia. II. Perotto, Heitor. III. Título.

THAINA PFLUEGER DA SILVA

**VARIABILIDADE E TENDÊNCIAS DO TRANSPORTE MERIDIONAL DE CALOR
PELA CORRENTE NORTE DO BRASIL AO LARGO DO MARANHÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Oceanografia da Universidade
Federal do Maranhão para obtenção do grau de
bacharelado em Oceanografia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Claudia Klose Parise

Co-orientador: Prof. Dr. Heitor Perotto

SÃO LUÍS - MA

2025

**VARIABILIDADE E TENDÊNCIAS DO TRANSPORTE MERIDIONAL DE CALOR
PELA CORRENTE NORTE DO BRASIL AO LARGO DO MARANHÃO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de Oceanografia da
Universidade Federal do Maranhão para
obtenção do grau de bacharel em
Oceanografia.

APROVADO EM: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Claudia Klose Parise (Orientadora)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA

Prof. Dr. João Luiz Baptista de Carvalho (Titular)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA

Prof. Dr. Antônio Carlos Leal de Castro (Titular)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA

Prof. Dr. Denilson da Silva Bezerra (Suplente)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA

Dedico este trabalho à minha avó, pelo incentivo e fé na educação, e à Cláudia, por acreditar em meu potencial e me apoiar. Minha gratidão a ambas, pois este trabalho também é de vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me dar força e disposição para concluir essa etapa tão importante da minha vida.

À minha família, em especial, quero agradecer a Madalena, Juliana, Rômulo e Leonardo, que estiveram ao meu lado de forma ainda mais próxima durante toda a minha jornada na faculdade, oferecendo suporte, encorajamento e confiança mesmo nos dias mais desafiadores. Cada gesto de carinho e cada palavra de motivação foram fundamentais.

Ao meu amor, Gabriel, minha eterna gratidão pelos conselhos sábios, pelo apoio nos momentos difíceis e por cada conversa motivacional que me ajudou a seguir em frente. Obrigada por estar ao meu lado nos desafios e nas conquistas, por acreditar em mim mesmo quando eu duvidava, e por compartilhar sonhos, risadas e pequenos momentos do dia a dia que tornam a vida mais leve e significativa. Muito do que sou hoje devo à história linda que estamos construindo juntos, à cumplicidade que nos une e ao amor que transforma cada obstáculo em aprendizado.

À minha sogra, Zilda, por todo o apoio que sempre me ofereceu. Pela torcida constante e, especialmente, por ter me emprestado tantas vezes o seu notebook, permitindo que eu avançasse em meus trabalhos. Reconheço cada gesto seu como uma verdadeira prova de carinho, paciência e generosidade, e me sinto muito afortunada por poder contar com você.

À minha amiga, prima e irmã de coração, Luiza, que esteve ao meu lado nos momentos mais desafiadores, enxugou muitas lágrimas e me ofereceu apoio emocional incondicional. Sua presença constante, seu colo amigo e suas palavras de conforto fizeram toda a diferença na minha jornada, transformando dias difíceis em lembranças de cuidado, carinho e cumplicidade. Sou profundamente grata por poder contar com você e por compartilhar essa amizade que transcende laços de sangue.

Aos meus eternos amigos, Jacielly e Felipe, que conheci na faculdade e que se tornaram parte da minha vida. Obrigada por tornarem cada passo dessa jornada mais leve, divertida e cheia de risadas, pelos momentos de estudo compartilhados, pelas conversas intermináveis e pela convivência. As saudades são imensas!!

Agradeço também ao meu coorientador, Heitor, que foi essencial no meu aprendizado em Python e me ajudou a crescer academicamente, além da amizade que construímos.

Aos meus amigos do laboratório do LACLIMA, em especial a Tayssa, Janylle e Julianna, que tornaram as tardes mais leves e engraçadas com suas companhias.

E a todos com quem troquei experiências e que, de alguma forma, contribuíram para quem me tornei: muito obrigada.

Por fim, agradeço a mim mesma, por não ter desistido.

“A maré alta levanta todos os barcos”

(John F. Kennedy)

RESUMO

As mudanças climáticas globais têm se intensificado nas últimas décadas, com impactos diretos nos sistemas atmosféricos e oceânicos. O oceano, que absorve mais de 90% do excesso de calor proveniente do efeito estufa, desempenha papel essencial na redistribuição dessa energia por meio do transporte meridional de calor. No Atlântico Tropical, esse transporte está associado à Circulação Meridional de Revolvimento do Atlântico (AMOC), que transfere calor das baixas para as altas latitudes, sendo a Corrente Norte do Brasil (CNB), corrente de contorno oeste da Margem Equatorial Brasileira (MEB), uma de suas principais componentes superficiais. A relevância do estudo da CNB aumenta frente às recentes evidências de enfraquecimento da AMOC, o que pode implicar alterações significativas nos regimes climáticos regionais e globais. Apesar da importância da CNB, ainda existem lacunas quanto à compreensão da variabilidade do transporte de calor realizado por essa corrente ao largo da Plataforma Continental do Maranhão (PCMA). Investigar a sazonalidade, a intensidade e as tendências de longo prazo do transporte meridional de calor pela CNB nessa região é fundamental para melhorar as previsões climáticas e fornecer subsídios científicos para políticas de adaptação frente às mudanças climáticas. Este trabalho analisou o transporte meridional de calor realizado pela CNB ao largo da PCMA, no período entre janeiro de 1993 e dezembro de 2024, com base em dados de reanálise oceânica (GLORYS12V1). Foram utilizados perfis verticais médios e diagramas de Hovmöller para identificar a região de maior intensidade da CNB na região e quantificar sua variabilidade espacial e temporal. Os resultados apontam que em frente ao Maranhão a corrente atua com maior intensidade entre as latitudes de 1°S e 1°N, especialmente ao longo da longitude de 44°W e até 100 m de profundidade. O transporte meridional de calor pela CNB apresenta clara sazonalidade, com máximos ocorrendo entre junho e julho, concentrando-se nas camadas superiores do oceano. Observou-se ainda uma tendência negativa de longo prazo no transporte meridional de calor, com declínio médio de $-0,0084$ PW/ano ($1 \text{ PW} = 1 \times 10^{15} \text{ W}$), possivelmente associado ao enfraquecimento da AMOC frente à aceleração das mudanças climáticas. Tal redução pode implicar mudanças relevantes na redistribuição energética do Oceano Atlântico Tropical e no clima regional.

Palavras-chave: Corrente Norte do Brasil. Transporte de Calor. Circulação Superficial Equatorial. Margem Equatorial Brasileira. Mudanças Climáticas.

ABSTRACT

Global climate change has intensified in recent decades, with direct impacts on atmospheric and oceanic systems. The ocean, which absorbs more than 90% of the excess heat from the greenhouse effect, plays an essential role in redistributing this energy through meridional heat transport. In the Tropical Atlantic, this transport is associated with the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), which transfers heat from low to high latitudes, with the North Brazil Current (NBC), the western boundary current of the Brazilian Equatorial Margin (BEM), being one of its main surface components. The relevance of studying the NBC increases in the face of recent evidence of a weakening of the AMOC, which could imply significant changes in regional and global climate regimes. Despite the importance of the NBC, there are still gaps in the understanding of the variability of heat transport carried out by this current off the Maranhão Continental Shelf (MCS). Investigating the seasonality, intensity and long-term trends of the meridional transport of heat by the NBC in this region is essential for improving climate forecasts and providing scientific support for adaptation policies in the face of climate change. This study analyzed the meridional transport of heat by the NBC off the MCS between January 1993 and December 2024, based on ocean reanalysis data (GLORYS12V1). Mean vertical profiles and Hovmöller diagrams were used to identify the region of greatest NBC intensity in the region and quantify its spatial and temporal variability. The results show that in front of Maranhão the current acts with greater intensity between the latitudes of 1°S and 1°N, especially along the longitude of 44°W and up to 100 m deep. The meridional transport of heat by the NBC shows clear seasonality, with maximums occurring between June and July, concentrated in the upper layers of the ocean. A negative long-term trend in meridional heat transport was also observed, with an average decline of -0.0084 PW/year ($1 \text{ PW} = 1 \times 10^{15} \text{ W}$), possibly associated with the weakening of the AMOC in the face of accelerating climate change. This reduction could imply significant changes in the energy redistribution of the Tropical Atlantic Ocean and in the regional climate.

Key words: Brazil's North Current. Heat transport. Equatorial Surface Circulation. Brazilian Equatorial Margin. Climate Change.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Circulação na região equatorial do Oceano Atlântico relacionada à dinâmica da Corrente Norte do Brasil (CNB). Estão representadas: a Corrente Norte Equatorial (CEN), o ramo norte da Contracorrente Norte Equatorial (nCCEN), a Contracorrente Norte Equatorial (CCEN), o ramo norte da Corrente Sul Equatorial (nCSE), a Subcorrente Equatorial (SCE), a CNB, o ramo central da Corrente Sul Equatorial (cCES), a Subcorrente Norte do Brasil (SNB), o ramo sul da Corrente Sul Equatorial (sCES) e a Corrente do Brasil (CB). Fonte: Adaptado de Vilela et al. (2018).....	13
Figura 2: Representação da área de estudo com a velocidade da corrente média a 1 m de profundidade, com os vetores indicando a direção do fluxo, baseada na média de todos os períodos analisados. Fonte: O próprio autor.....	16
Figura 3: Perfil vertical da velocidade meridional, a partir da média de todos os anos (1993 - 2024), latitudes (3°S - 3°N) e longitudes (47°W - 41°W).....	19
Figura 4: Diagrama de Hovmoller (tempo vs. latitudes), a partir das médias das longitudes (47°W - 41°W) e profundidade de até 318 m.....	20
Figura 5: Diagrama de Hovmoller da média anual das latitudes, a partir das médias das longitudes (47°W - 41°W) e média das profundidades até 318m.....	21
Figura 6: Diagrama de Hovmoller (longitudes vs tempo), a partir das médias das latitudes (1°S - 1°N) e para as profundidades de até 318 m.....	22
Figura 7: Diagrama de Hovmoller do ciclo anual da variação zonal da velocidade meridional média da CNB, a partir das latitudes (1°S - 1°N) e profundidade de até 318 m.....	23
Figura 8: a) Hovmoller das anomalias das longitudes com linhas tracejadas selecionando os 5 anos com maiores e menores fluxos; b) Série temporal das anomalias anuais da componente meridional da corrente.....	24
Figura 9: Diagrama de Hovmoller (tempo vs profundidade), considerando-se a longitude de 44°W e latitudes (1°S - 1°N).....	25
Figura 10: Diagrama de Hovmoller do ciclo anual das profundidades, considerando a longitude de 44°W e a média das latitudes (1°S - 1°N).....	26
Figura 11: Distribuição espacial das velocidades máximas da CNB, a partir dos valores máximos de todos os anos (1993 - 2024) e longitude de 44°W.....	27
Figura 12: Série temporal do transporte calor meridional (em PW), a partir da longitude de 44°O e das médias das latitudes (1°N - 1°S) e profundidades (1m - 110m), com tendência tracejada em vermelho.....	28
Figura 13: Série temporal do transporte meridional de calor (em PW) diário, cujas cores representam períodos de 10 anos da série de dados: azul (1993–2003), laranja (2004–2013) e verde (2014–2024), com suas respectivas tendências lineares decadais indicadas por linhas tracejadas.....	29
Figura 14: Wavelet da série temporal do transporte meridional de calor.....	30

SIGLAS

AMM - *Atlantic Meridional Mode*

AMOC - *Atlantic Meridional Overturning Circulation*

AR - *Assessment Report*

CB - Corrente do Brasil

CCO - Correntes de Contorno Oeste

CCNE - Contracorrente Norte Equatorial

CMEMS - *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*

CNB - Corrente Norte do Brasil

CNE - Corrente Norte Equatorial

cCSE - ramo central da Corrente Equatorial Sul

sCSE - ramo sul da Corrente Equatorial Sul

nCSE - ramo norte da Corrente Equatorial Sul

GLORYS - *Global Ocean Reanalysis and Simulation*

TC - *Transporte de calor*

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

NEMO - *Nucleus for European Modelling of the Ocean*

PCMA - Plataforma Continental do Maranhão

SCE - Subcorrente Equatorial

SCNB - Subcorrente Norte do Brasil

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo geral.....	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	12
4. METODOLOGIA.....	15
4.1 Área de estudo.....	15
4.2 Dados.....	16
4.3 Análises.....	17
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
5.1 Perfil médio e diagramas de Hovmoller.....	18
5.2 Transporte meridional de calor pela CNB ao largo da PCMA	27
6. CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

O primeiro Relatório de Avaliação (*Assessment Report – AR*), publicado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) em 1990, destacou a necessidade urgente de considerar os possíveis impactos significativos das emissões de gases de efeito estufa no clima global. Relatórios subsequentes reforçaram essa conclusão, e, no sexto e último relatório (AR6), publicado em março de 2023, o IPCC declarou de forma inequívoca que as atividades humanas são as principais responsáveis pelo aquecimento global observado, que já elevou a temperatura média global em 1,1°C (IPCC, 2023).

Nesse contexto, o oceano retém mais de 90% do calor excedente da forçante radiativa, redistribuindo essa energia principalmente por meio do transporte meridional de calor (Goodwin; Williams; Ridgwell, 2015; Bronselaer; Zanna, 2020). No oceano Atlântico esse transporte é realizado principalmente pela Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico (*Atlantic Meridional Overturning Circulation – AMOC*), que transfere calor das baixas para as altas latitudes (Johns et al., 2011).

Munk e Wunsch (1998) explicam que ventos e marés geram ondas internas que se dissipam em movimentos de pequena escala, promovendo mistura turbulenta nas águas. Essa mistura gera aquecimento e torna as massas de água menos densas, permitindo sua elevação em baixas latitudes. Em contrapartida, nas altas latitudes, as águas superficiais perdem calor e liberam sal durante a formação do gelo marinho, tornando-se densas e afundando. Esse ciclo estabelece a circulação das massas profundas, criando um gradiente meridional de densidade (a partir das variações de temperatura e salinidade) entre as altas e as baixas latitudes (Zhang et al., 2011; Lentini et al., 2021).

A Corrente Norte do Brasil (CNB), uma importante corrente de contorno oeste (CCO) que atua no Giro Equatorial do Atlântico, atua tanto no fechamento do giro, ao alimentar um sistema de contracorrentes zonais, quanto constituindo o ramo superior da AMOC. Estudos como o de Zang et al. (2011) indicam que a variabilidade multidecadal da CNB está ligada às flutuações da AMOC, tornando-a um possível indicador de mudanças na circulação oceânica global. Ou seja, variações na CNB podem impactar diretamente a estabilidade e intensidade da AMOC. Pesquisas recentes já apontam para um possível enfraquecimento dessa célula, com potenciais consequências graves para o clima global (Weaver et al., 2012; Zhu et al., 2015; Bellomo & Mehling, 2024; Curtis & Fedorov, 2024).

Apesar da importância da CNB na circulação oceânica global e regional, ainda há lacunas sobre a variabilidade do seu transporte de calor, especialmente ao largo do Maranhão. Estudos anteriores focaram na quantidade de calor transportado pelos vórtices ou anéis desprendidos da CNB (e.g., Bueno et al., 2022). Entretanto, estudos que quantifiquem o transporte pelo fluxo da corrente em si são bastante limitados. A Plataforma Continental do Maranhão (PCMA), área estratégica da Margem Equatorial Brasileira (MEB), é carente de estudos sobre a magnitude e a sazonalidade do transporte de calor pela CNB, o que dificulta a compreensão dos impactos climáticos na região.

Diante dessa lacuna, este estudo se justifica pela necessidade de compreender melhor os padrões de transporte de calor na região da PCMA, contribuindo para o aprimoramento do conhecimento da circulação oceânica regional na região. A análise detalhada do comportamento da CNB ao largo do Maranhão permitirá avaliar sua variabilidade e tendências de médio e longo prazo, fornecendo subsídios para a previsão de possíveis mudanças no clima regional e suas consequências globais. Assim, a pesquisa busca oferecer uma base científica sólida para futuras investigações na região, como a análise de cenários climáticos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a assinatura de longo termo do transporte de calor realizado pela Corrente Norte do Brasil (CNB) ao largo da Plataforma Continental do Maranhão (PCMA).

2.2 Objetivos específicos

- Determinar a região (latitude, longitude e profundidade) de maior atuação da CNB ao largo da PCMA.
- Avaliar a variabilidade sazonal do transporte de calor associado à CNB.
- Analisar a tendência de médio (a cada 10 anos) e longo prazo (31 anos) do transporte de calor oceânico na região de maior influência da CNB na PCMA.

3. REVISÃO DA LITERATURA

A partir da bifurcação do ramo sul da Corrente Sul Equatorial (sCSE), origina-se a Corrente do Brasil (CB), que flui para o sul, e a Subcorrente Norte do Brasil (SNB), que flui para o norte. Quando a SNB se junta ao ramo central da Corrente Sul Equatorial (cCSE), nas proximidades de 10°S, a CNB é formada (Figura 1). A CNB flui para noroeste, margeando o talude continental brasileiro entre 10°S e 8°N como uma CCO que segundo o modelo de circulação de Stommel (1948), as CCO são intensas, profundas e estreitas, sendo necessárias para o fechamento dos giros subtropicais.

Ao alcançar a MEB, a CNB pode adotar dois comportamentos distintos: (i) continuar seu fluxo para noroeste alcançando latitudes próximas de 10°N, onde após essa latitude a CNB não é mais reconhecida como uma corrente individualizada (como ocorre ao longo da MEB). Seu fluxo se torna menos intenso e mais disperso, e sua estrutura se mistura com outras correntes zonais, como a Corrente Norte Equatorial (CNE); ou (ii) retrofletir para leste, principalmente entre 5°N e 8°N, alimentando a Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) e a Subcorrente Equatorial (SCE). Esse processo de retroflexão é mais intenso durante os meses de julho a setembro, período em que há maior interação com outras estruturas da circulação equatorial (Johns et al., 1990).

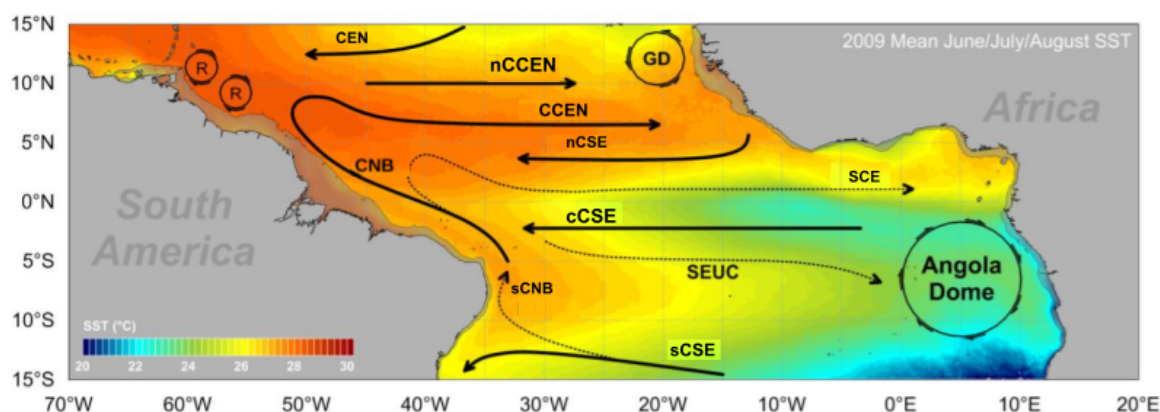


Figura 1 – Circulação na região equatorial do Oceano Atlântico relacionada à dinâmica da Corrente Norte do Brasil (CNB). Estão representadas: a Corrente Norte Equatorial (CEN), o ramo norte da Contracorrente Norte Equatorial (nCCEN), a Contracorrente Norte Equatorial (CCEN), o ramo norte da Corrente Sul Equatorial (nCSE), a Subcorrente Equatorial (SCE), a CNB, o ramo central da Corrente Sul Equatorial (cCSE), a Subcorrente Norte do Brasil (SNB), o ramo sul da Corrente Sul Equatorial (sCSE) e a Corrente do Brasil (CB). **Fonte:** Adaptado de Vilela et al. (2018).

A Tabela 1 apresenta uma síntese comparativa de diferentes estudos sobre a CNB, destacando os principais parâmetros observados, como velocidade, profundidade do núcleo, transporte em Sverdrups (Sv) e a localização geográfica das medições. De modo geral, os estudos indicam que a CNB possui velocidades que variam de aproximadamente 45 cm/s a 120 cm/s, com núcleo concentrado entre 50 e 200 m de profundidade. O transporte estimado varia entre 13 e 36 Sv, a depender da latitude e da época do ano. As principais medições da CNB foram realizadas entre as latitudes de 10°S e 8°N, com destaque para seções realizadas nas coordenadas de 4°N e 5°S, próximas à longitude de 44°W.

Fonte	Velocidade	Profundidade do núcleo	Transporte (Sv)	Coordenadas (°)
Silveira et al. (1994)	~50 cm/s	100–200 m	20–21 Sv (até 36 Sv ao norte)	10°30'S–5°S e ~31°–38°W
Johns et al. (1998)	45–100 cm/s	50–200 m	13–35 Sv (média 26 Sv)	4°N e 44°W
Bourlès et al. (1999)	até 100 cm/s	100–150 m	24–26 Sv	44°W
Schott et al. (2005)	50–80 cm/s	~150 m	até 36 Sv	5°S–5°N e 44°–35°W
Neto e Da Silva. (2014)	até 120 m/s	~100 m	—	0°–4°N e 44°W–49°W

Tabela 1 : Comparação entre estudos sobre velocidade, transporte e propriedades da CNB.

De acordo com Dimoune et al. (2023), a sazonalidade da CNB apresenta comportamentos opostos ao norte e ao sul do Equador, a qual é influenciada pelo Modo Meridional do Atlântico (MMA), que é um padrão de variabilidade climática no Oceano Atlântico que se manifesta como uma diferença de temperatura entre as partes norte e sul do oceano. Na fase positiva do MMA, a CNB se intensifica ao norte do Equador e enfraquece ao sul, devido ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para latitudes mais ao norte e à alteração do cisalhamento do estresse do vento. Ainda assim, o ramo principal da corrente permanece ao sul do Equador, com maior intensidade próxima a 44°W, no inverno boreal (dezembro a março). No entanto, análises baseadas na velocidade

geostrófica mostram que o máximo sazonal de transporte meridional da CNB ocorre entre junho e julho (Johns et al., 1990).

Ao longo de sua trajetória, a CNB sofre retroflexões que geram anéis anticiclônicos. Estima-se que cada anel transporte, em média, entre 1,1 e 1,3 Sv, o que corresponde a 7 a 9 Sv por ano, conforme mostrado por Fratantoni et al. (1995) e Garzoli, Ffield e Yao (2003). Em termos de calor, esses anéis carregam de 0,036 a 0,07 PW ($1 \text{ PW} = 1 \times 10^{15} \text{ W}$) por evento, com uma média anual de até 0,54 PW. Esses valores representam entre 20% e 50% do transporte de calor da AMOC em baixas latitudes, cujo valor médio estimado é de 1 PW (Bueno et al., 2022).

Em termos quantitativos, o transporte meridional de calor na latitude de $26,5^\circ\text{N}$, medido por programas como o RAPID-MOCHA-WBTS, é da ordem de 1,2 PW, sendo aproximadamente 90% desse valor associado à AMOC (Johns et al., 2023). Parte desse calor é trazido pela CNB desde o Atlântico Sul, realçando a importância da corrente como mecanismo de redistribuição de calor.

Diante do atual cenário de aquecimento global, a AMOC vem demonstrando sinais de enfraquecimento, conforme mostrado por Smeed et al. (2014), onde foi observada uma redução média de aproximadamente 0,6 Sv por ano no transporte da AMOC entre 2007 e 2011. Essa redução pode influenciar diretamente a intensidade da CNB e sua capacidade de transportar calor, tornando-a um indicador importante das mudanças climáticas em curso na região de estudo.

4. METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

Com base nas áreas previamente investigadas por outros trabalhos na região e ao largo do estado do Maranhão, a área de interesse deste estudo foi delimitada entre as longitudes de 42°W e 47°W e as latitudes de 3°S a 3°N (Figura 2), até a profundidade de 500 m.

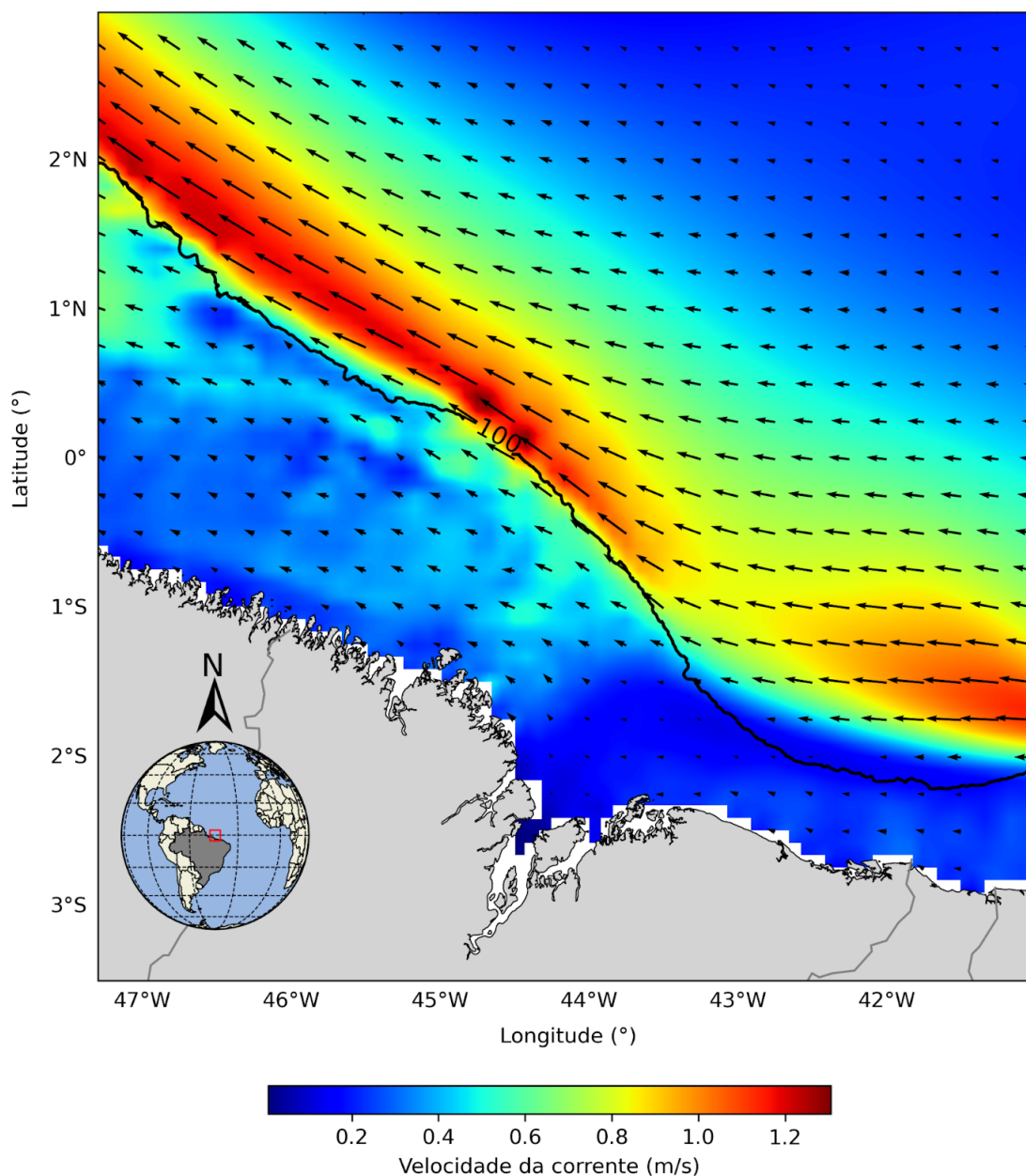


Figura 2 - Representação da área de estudo com a velocidade da corrente média a 1 m de profundidade, com os vetores indicando a direção do fluxo, baseada na média de todos os períodos analisados. **Fonte:** O próprio autor.

4.2 Dados

Neste estudo, foram utilizados dados diários da componente meridional da velocidade da corrente e da temperatura potencial, provenientes do produto de reanálise oceânica global GLORYS12V1 (*Global Ocean Reanalysis and Simulation*, versão 12V1), que abrange o período de 1° de janeiro de 1993 até 31 de dezembro de 2024. O GLORYS12V1 é um produto

global fornecido pelo *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS), com resolução horizontal de $1/12^\circ$ (aproximadamente 9 km) e 50 níveis verticais. As simulações baseiam-se no modelo oceânico NEMO (*Nucleus for European Modelling of the Ocean*), forçado na superfície por dados atmosféricos oriundos das reanálises do ECMWF (ERA-Interim e ERA5) (Copernicus Marine Service, 2023).

4.3 Análises

A fim de representar a influência do fluxo da CNB ao longo da PCMA, gerou-se diagramas de Hovmöller, amplamente utilizados para mostrar a evolução temporal e espacial de sistemas, processos e/ou fenômenos meteorológicos e oceanográficos (Hovmöller, 1949), como é o caso da CNB. Os eixos dos diagramas representam a longitude ou latitude (eixo x) e o tempo (eixo y), com o valor da velocidade meridional da corrente representado por cores ou isolinhas. Os diagramas de Hovmöller (longitude/latitude/profundidade vs tempo) construídos neste estudo objetivaram conhecer a distribuição horizontal e vertical da CNB a médio e longo prazo, a fim de detalhar a variabilidade sazonal, interanual e decadal da atuação da CNB na PCMA.

Conforme discutido por Sancho et al. (2015), Bou-Haya et al. (2023) e Mecking e Drijfhout (2023), o transporte meridional de calor na camada superficial do oceano (ou somente transporte de calor - TC), pode ser calculado usando a Equação (1). Nessa equação, o TC resulta da multiplicação da densidade da água pelo calor específico, seguido pela integração dupla do produto entre a componente meridional da velocidade e a temperatura potencial em relação à seção.

$$TC = \rho \cdot c_p \cdot \int_{L(x)-h(z)}^x \int_0^{\theta} v \cdot \theta \cdot dz dx \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

TC: Transporte de calor (PW);

ρ : Densidade da água do mar (1030 kg.cm^{-3});

c_p : Calor específico da água do mar ($3998 \text{ J.kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);

v : Componente meridional da corrente (x, z, t)

θ : Temperatura potencial (x, z, t)

L : Limite de dimensão latitudinal (zonal);

$-h(z)$: Profundidade limite de integração;

Em uma etapa posterior, com o objetivo de investigar a variabilidade temporal do TC, foi aplicada a análise de ondaletas contínuas (Wavelets), utilizando a função-mãe de Morlet. Essa metodologia permite a decomposição da série temporal simultaneamente nos domínios do tempo e da frequência, sendo particularmente eficaz na identificação de sinais periódicos não estacionários, ou seja, que variam ao longo do tempo. A técnica foi implementada conforme a metodologia proposta por Torrence e Compo (1998), que fornece uma estrutura prática para análise espectral multiescala, incluindo testes de significância baseados em ruído vermelho. A série de transporte de calor foi previamente convertida em anomalias diárias, com remoção da climatologia e da tendência linear, assegurando que a análise se concentrasse apenas na variabilidade interna do sinal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um dos objetivos deste trabalho é identificar a área de maior atuação da CNB. Para isso, inicialmente serão apresentados o perfil vertical e os diagramas de Hovmöller (tempo vs. longitude e tempo vs. latitude) da velocidade a partir da componente meridional da corrente, com o intuito de localizar as regiões de maior intensidade do escoamento. Em seguida, será analisada a série temporal do transporte de calor meridional na área previamente identificada, a fim de avaliar sua variabilidade e o papel da CNB.

5.1 Perfil médio e diagramas de Hovmoller

A Figura 3 mostra o perfil vertical médio dos valores positivos da CNB na região de estudo. Observa-se que a máxima velocidade meridional, de 32 cm/s, ocorre a aproximadamente 75 m de profundidade, diminuindo gradualmente com o aumento da profundidade e apresentando uma redução gradual, com valores de velocidade bem baixos a partir de 318 m.

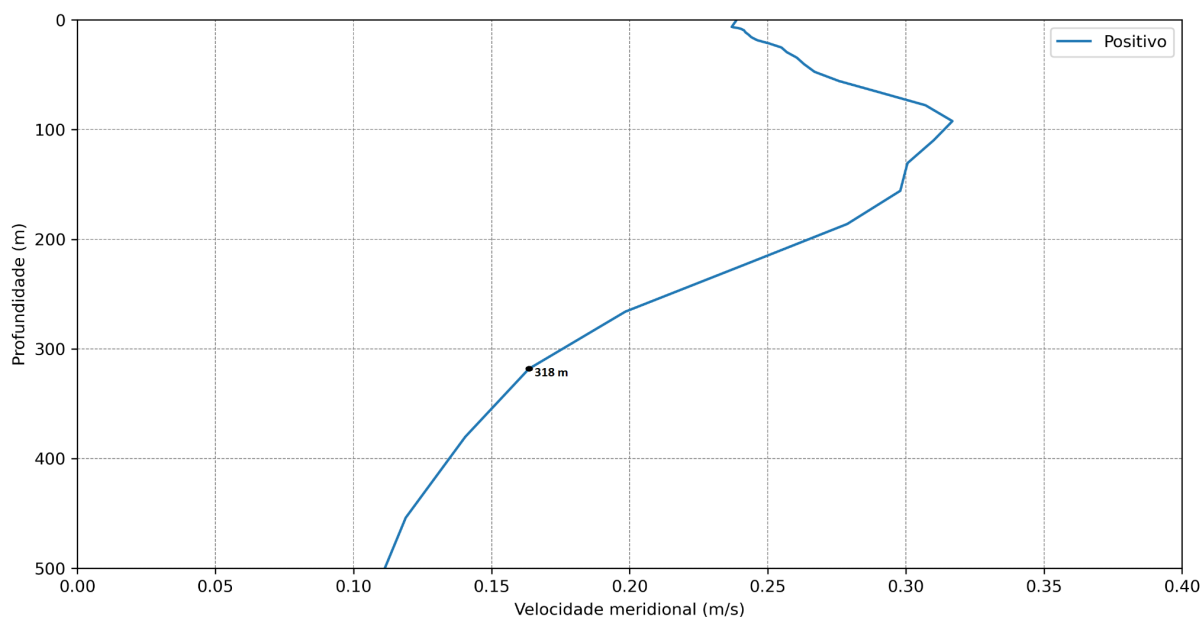


Figura 3: Perfil vertical da velocidade meridional, a partir da média de todos os anos (1993 - 2024), latitudes (3°S - 3°N) e longitudes (47°W - 41°W).

Considerando o limite de 318 m identificado na Figura 3, foram então gerados os diagramas de Hovmöller para as análises subsequentes.

O diagrama da Figura 4 revela um padrão sazonal da corrente bem estabelecido, com velocidades médias mais altas (de 0,5 m/s) concentradas principalmente entre as latitudes de 1°S e 1°N, evidenciando sua maior atuação nessa faixa, exceto pelos anos de 1996, 1999, 2002, 2012 e 2014, quando os máximos ocorreram fora desse intervalo. Além disso, observa-se uma variação meridional da corrente, ora apresentando-se mais próxima à costa (fevereiro - junho), ora se distanciando da costa (julho - janeiro).

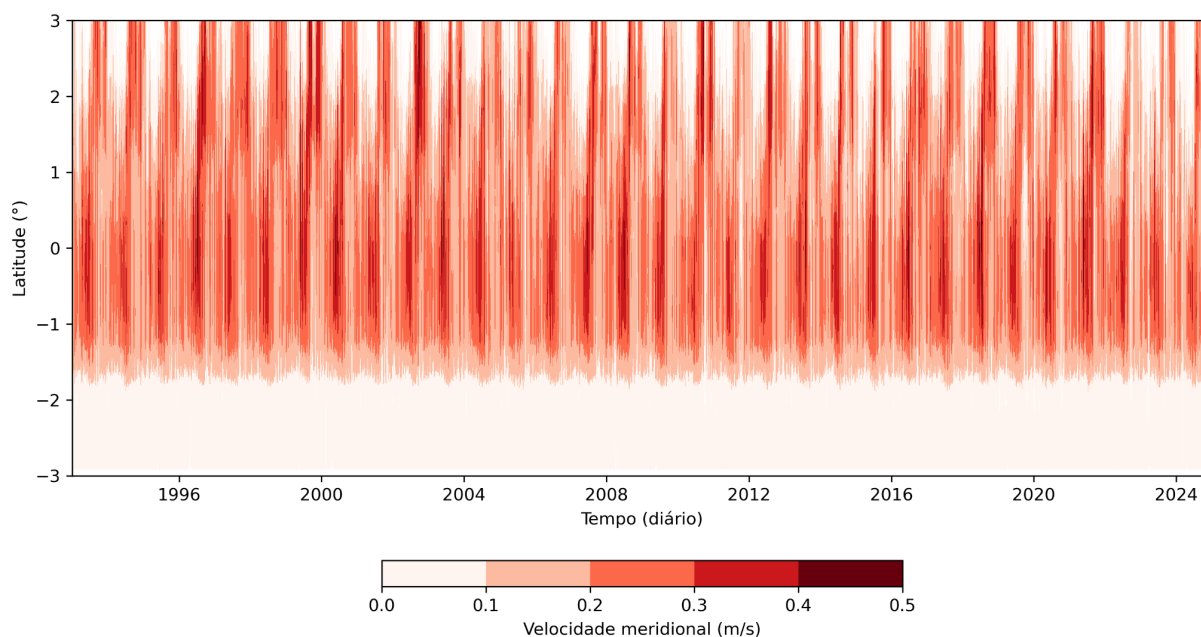


Figura 4: Diagrama de Hovmoller da velocidade meridional (tempo vs. latitudes), a partir das médias das longitudes (47°W - 41°W) e profundidade de até 318 m.

A figura 5 mostra a variabilidade sazonal da corrente ao longo do ciclo anual, evidenciando as diferenças significativas entre o primeiro e o segundo semestre. Os resultados mostram que nos primeiros meses, a corrente se mantém mais próxima da plataforma continental maranhense, com velocidades médias superiores a 0,25 m/s entre abril e julho, atingindo o pico da velocidade (0,30 m/s) em junho. Já na segunda metade do ano, observa-se um alargamento da CNB, com o núcleo se afastando da plataforma continental, atingindo latitudes acima de 1°N, acompanhada de uma redução na sua intensidade, com valores médios em torno de 0,20 m/s.

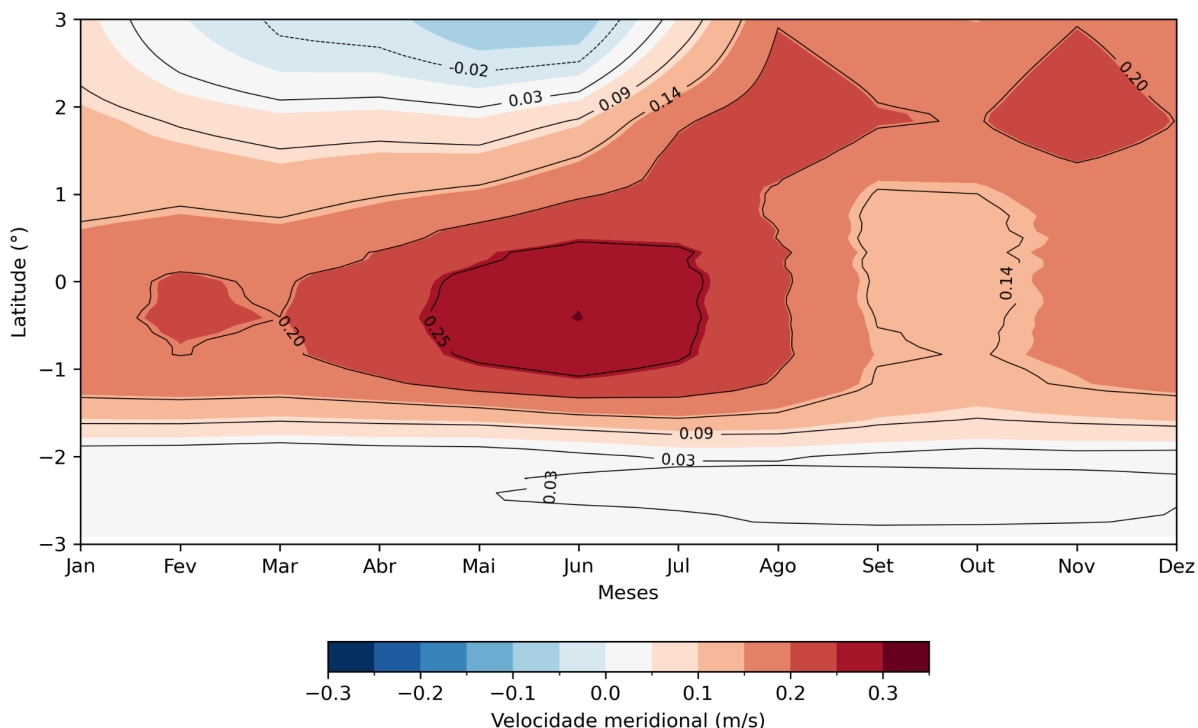


Figura 5: Diagrama de Hovmöller da velocidade meridional com média anual, a partir das médias das longitudes (47°W - 41°W) e média das profundidades até 318m.

Durante o primeiro semestre (fevereiro a junho), observam-se valores negativos da velocidade, que indicam um fluxo voltado para o sul. Esse escoamento está associado à atuação da SCE, a qual é alimentada pela retroflexão da CNB (Metcalf e Stalcup, 1967 e Cochrane et al., 1979). Esse processo de retroflexão inicia-se tipicamente entre as latitudes de 5°N e 8°N, variando conforme a época do ano, e é responsável por redirecionar parte do fluxo da CNB em direção ao sistema de correntes equatorial (zonal).

Com a faixa de latitude delimitada entre 1°S e 1°N e a profundidade de até 318 m, foi gerada a Figura 6. O diagrama revela uma atuação mais evidente da CNB entre as longitudes de 43°W e 45,5°W, com os máximos de velocidade ocorrendo ao longo da longitude de 44°W, chegando a velocidades médias de 0,9 m/s.

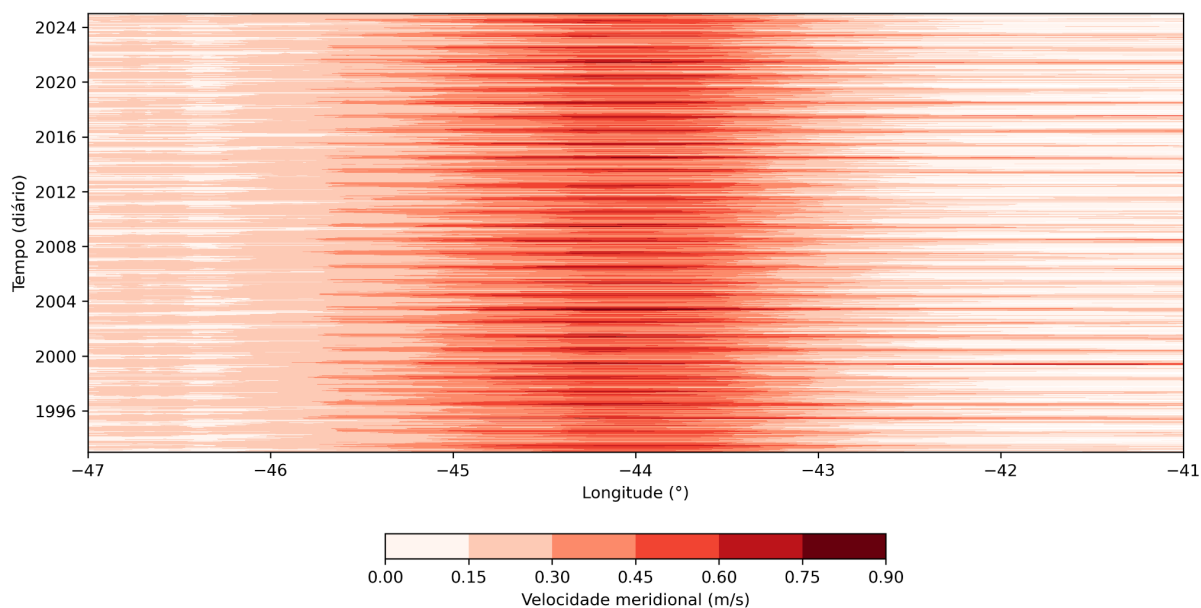


Figura 6: Diagrama de Hovmoller da velocidade meridional (longitudes vs tempo), a partir das médias das latitudes (1°S - 1°N) e para as profundidades de até 318 m.

O ciclo anual da variação zonal da CNB (Figura 7) é mais intenso na longitude de 44°W , com maior atuação entre abril e agosto. Durante esse período, a velocidade média é de 0,30 m/s, atingindo um máximo de 0,50 m/s nos meses de junho e julho, que está de acordo com os resultados encontrados para essa longitude por Johns et al. (1998), Bourlès et al. (1999) e Schott et al. (2005), obtidos em latitudes mais ao norte (4°N e 5°N) a partir de dados de diferentes campanhas oceanográficas e do uso de métodos como perfiladores acústicos de corrente Doppler (*acoustic Doppler current profiler* - ADCP).

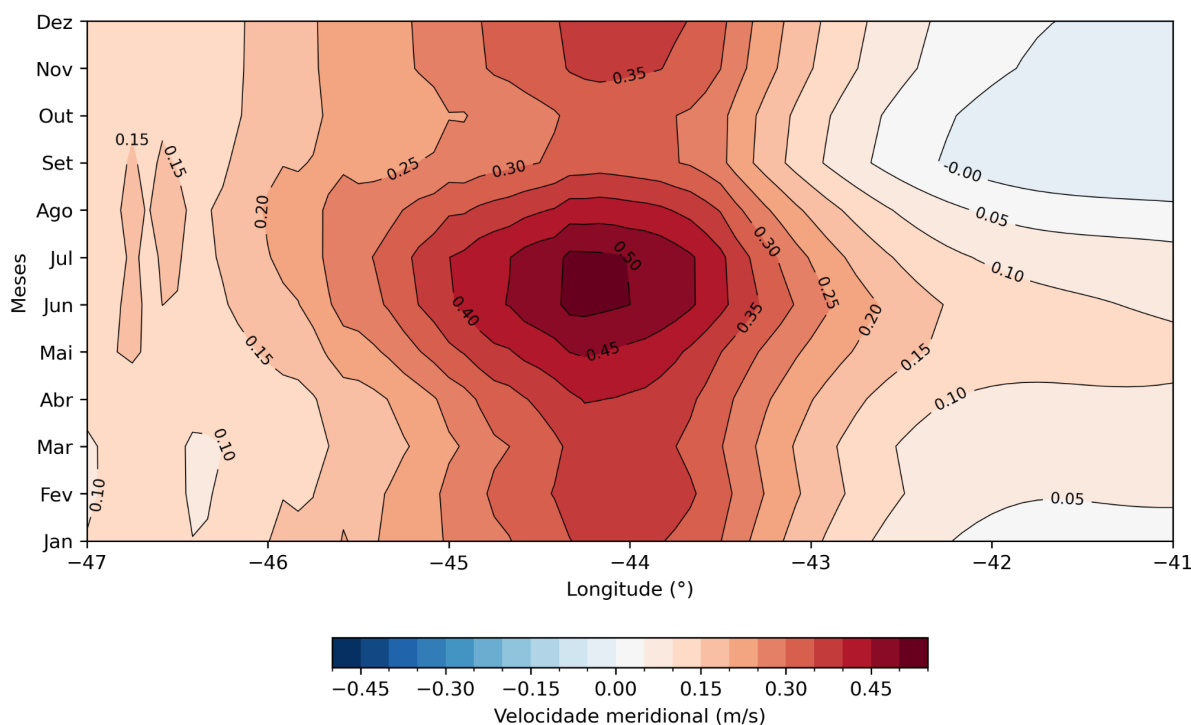


Figura 7: Diagrama de Hovmöller do ciclo anual da variação zonal da velocidade meridional média da CNB, a partir das latitudes (1°S - 1°N) e profundidade de até 318 m.

Essa variação sazonal na velocidade está associada ao padrão de transporte da CNB, que apresenta valores mínimos entre dezembro e fevereiro e máximos entre junho e agosto, com um aumento rápido a partir de junho (Schott et al., 1993; Bourlès et al., 1999). Em 44°W, por exemplo, Bourlès et al. (1999) identificaram um transporte médio de 22,1 Sv, compatível com os valores reportados por Schott et al. (1993), reforçando a consistência do ciclo sazonal. Além disso, todos esses estudos destacam o rápido aumento do transporte da CNB em junho e que seu máximo é normalmente observado no final de junho ou início de julho.

A figura 8 mostra as anomalias da componente meridional da velocidade da corrente na região (vo), com tons avermelhados indicando anomalias positivas (fluxo intensificado) e tons azulados representando anomalias negativas (fluxo reduzido) (Figura 8a). As linhas tracejadas destacam os anos com os valores extremos da velocidade meridional da corrente na região, que também são evidenciados na Figura 8b, onde se observa a série temporal das anomalias médias anuais.

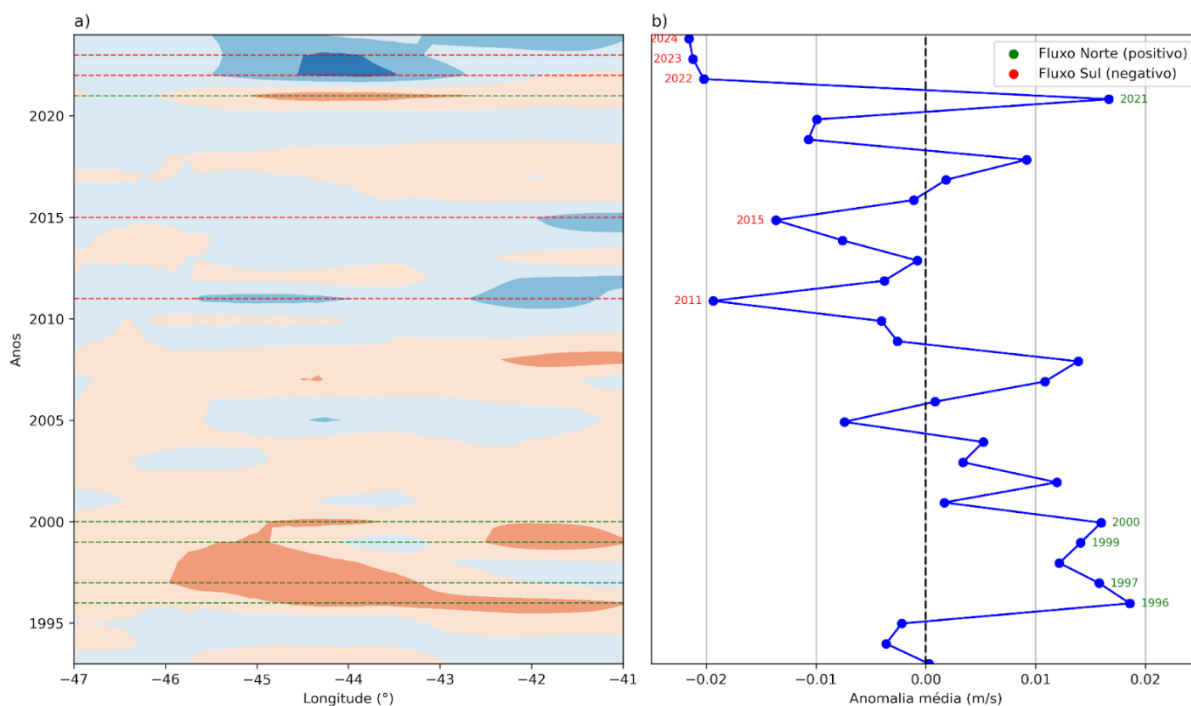


Figura 8: a) Hovmoller das anomalias de velocidade com linhas tracejadas selecionando os 5 anos com maiores e menores fluxos; b) Série temporal das anomalias anuais da componente meridional da corrente.

Os cinco anos com as maiores anomalias positivas da corrente foram 1996, 2021, 2000, 1997 e 1999, com valores superiores a 0,014 m/s, indicando períodos de fluxo anômalo mais intensos. Por outro lado, os anos de 2024, 2023, 2022, 2011 e 2015 apresentaram as anomalias negativas mais acentuadas, com valores inferiores a -0,013 m/s, refletindo episódios de diminuição do fluxo da CNB na região de estudo.

	Anos
Fluxo intenso (0,014 m/s)	1996, 2021, 2000, 1997 e 1999
Fluxo reduzido (-0,013 m/s)	2024, 2023, 2022, 2011 e 2015

Tabela 2 : Anos correspondentes aos valores extremos da anomalia da velocidade meridional da CNB, ordenados por intensidade.

Após definir a área de maior atuação da CNB diante da PCMA (44°O e as latitudes de 1°S a 1°N), foi gerado um diagrama da velocidade meridional (profundidade vs. tempo) para verificar a localização do núcleo da corrente nesta região. A Figura 9 mostra que os maiores valores de velocidade meridional se concentram acima dos 100 m de profundidade, com redução gradual da intensidade à medida que a profundidade aumenta. Essa concentração nas camadas superficiais está de acordo com os dados da literatura, que apontam o núcleo da CNB entre aproximadamente 50 e 150 metros, como mostrado na tabela 1.

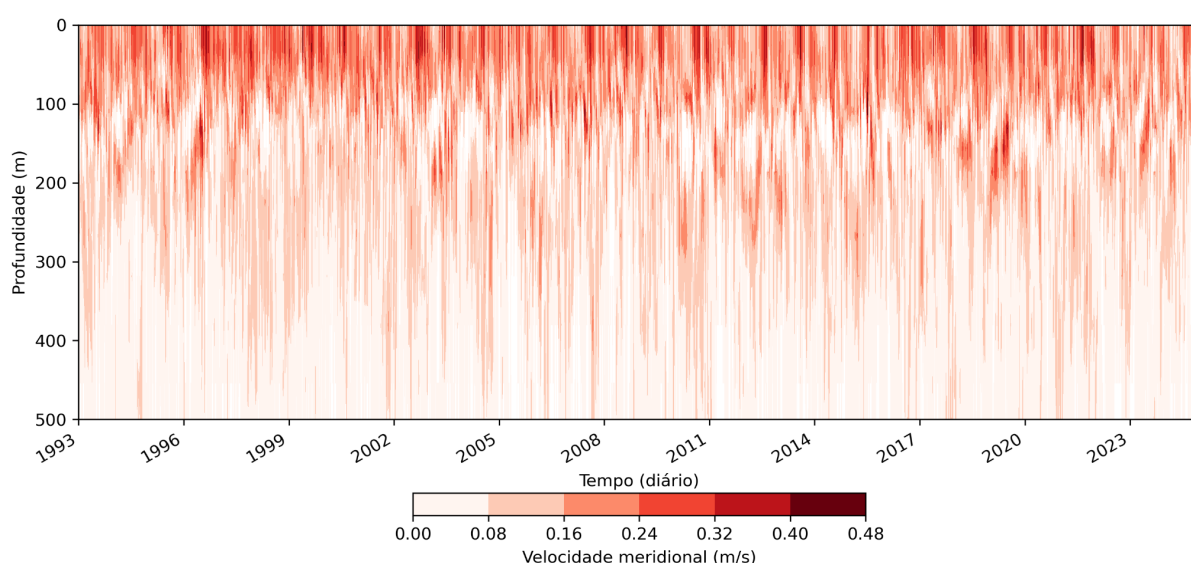


Figura 9: Diagrama de Hovmöller da velocidade meridional (tempo vs profundidade), considerando-se a longitude de 44°W e latitudes ($1^{\circ}\text{S} - 1^{\circ}\text{N}$).

O ciclo anual da componente meridional da velocidade, ao longo do tempo e das diferentes profundidades (Figura 10), evidencia um padrão sazonal bem definido em toda a coluna d'água. Os maiores valores, superiores a $0,20\text{ m/s}$, concentram-se nos primeiros 100 m, com intensificações notáveis entre junho e agosto e também de outubro a dezembro. Durante os demais meses, a velocidade tende a se manter em valores intermediários, variando entre $0,08$ e $0,16\text{ m/s}$, principalmente entre 100 e 200 m.

No primeiro semestre, a CNB apresenta um núcleo predominante em subsuperfície, com menor intensidade (entre $0,08$ e $0,16\text{ m/s}$). Já no segundo semestre, especialmente no período de julho a agosto, a corrente torna-se mais intensa, atingindo valores superiores a $0,24\text{ m/s}$, com seu núcleo situado próximo à superfície, acima de 50 m.

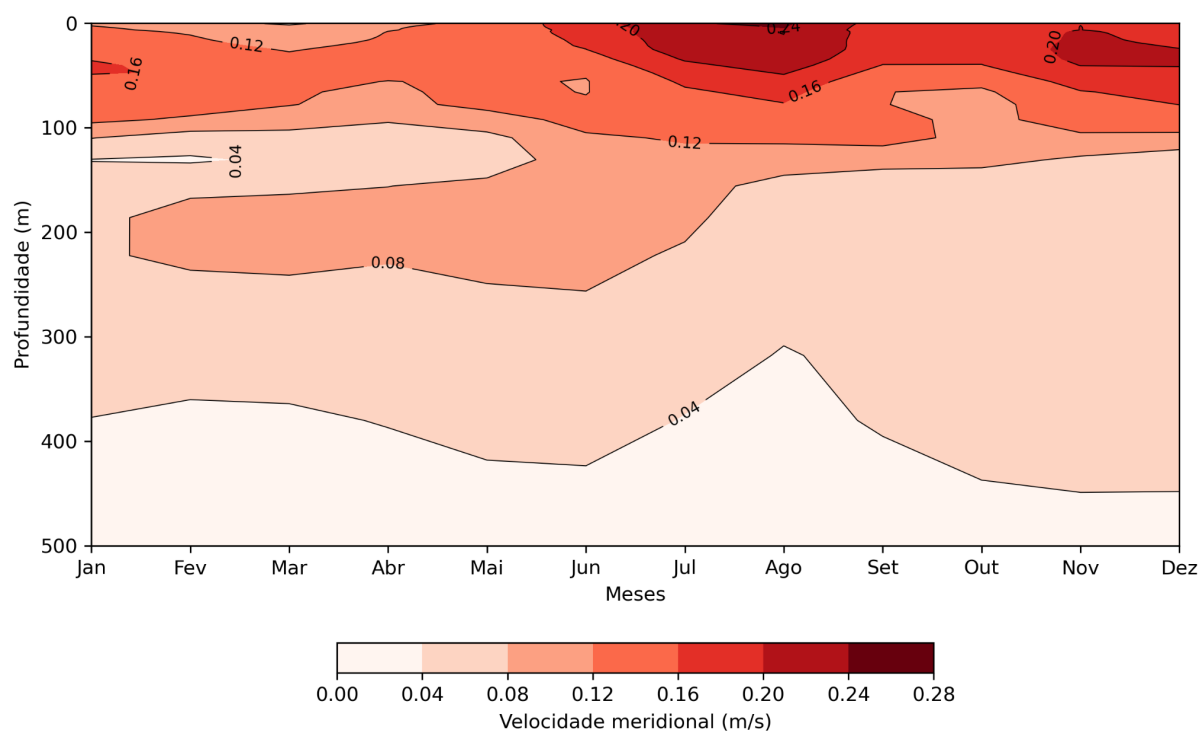


Figura 10: Diagrama de Hovmoller da velocidade meridional, a partir do ciclo anual e profundidades, considerando a longitude de 44°W e a média das latitudes ($1^{\circ}\text{S} - 1^{\circ}\text{N}$).

A Figura 11 apresenta a distribuição espacial das velocidades máximas da CNB ao longo da longitude de 44°W . Observa-se que os valores superiores a $1,35 \text{ m/s}$ concentram-se nos primeiros 100 m da coluna d'água, o que está de acordo com os dados apresentados por Neto e Silva (2014), que também identificaram velocidades de até $1,2 \text{ m/s}$ nessa camada superior.

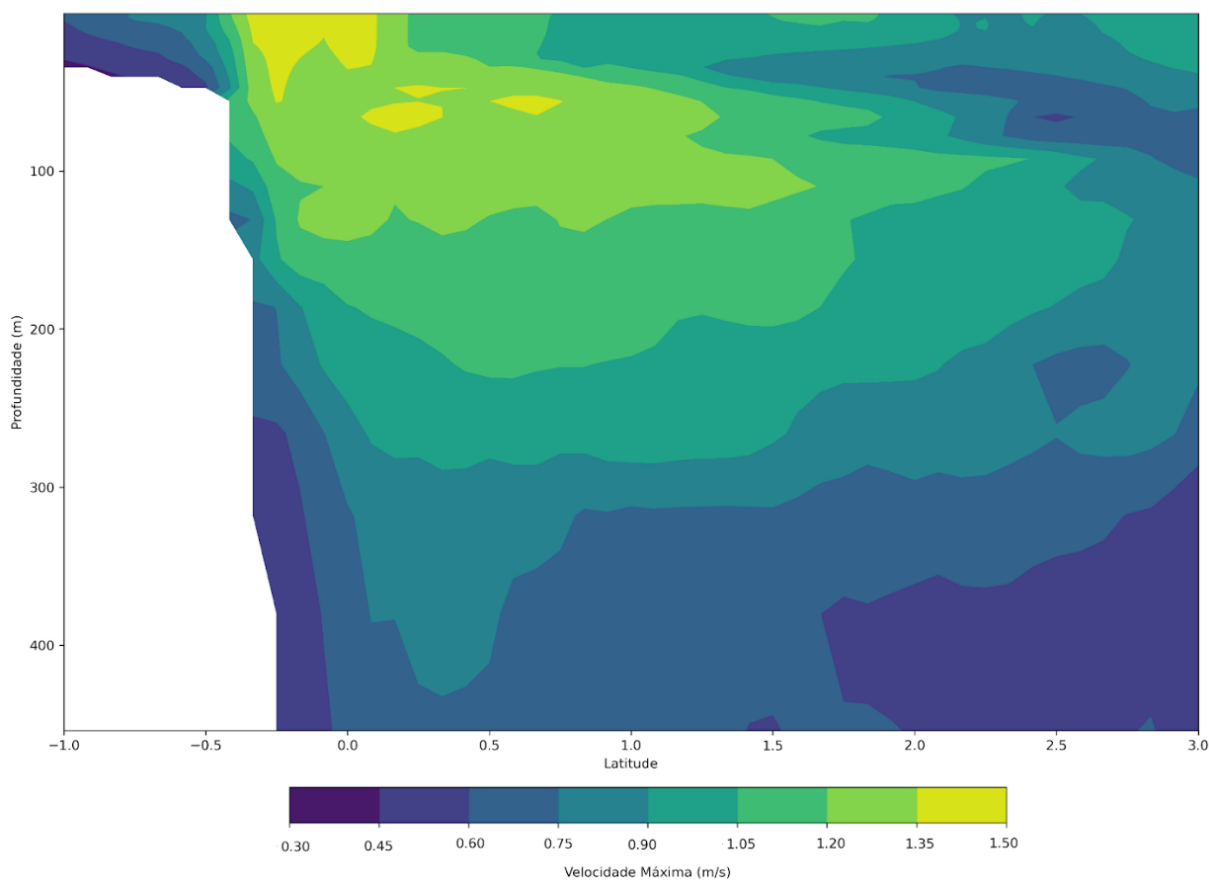


Figura 11: Distribuição espacial das velocidades máximas da CNB, a partir dos valores máximos de todos os anos (1993 - 2024) e longitude de 44°W.

5.2 Transporte meridional de calor pela CNB ao largo da PCMA

A Figura 12 mostra a evolução temporal do transporte meridional de calor pela CNB ao longo da linha de 44°W, entre 1°S e 1°N e até 110 m de profundidade. A linha tracejada vermelha representa a tendência de longo prazo, que é claramente negativa, com uma taxa de declínio de aproximadamente -8.4×10^{-3} PW/ano. Essa tendência está associada ao enfraquecimento progressivo da AMOC, conforme previsto em Smeed et al. (2014) e Ditlevsen e Ditlevsen (2023).

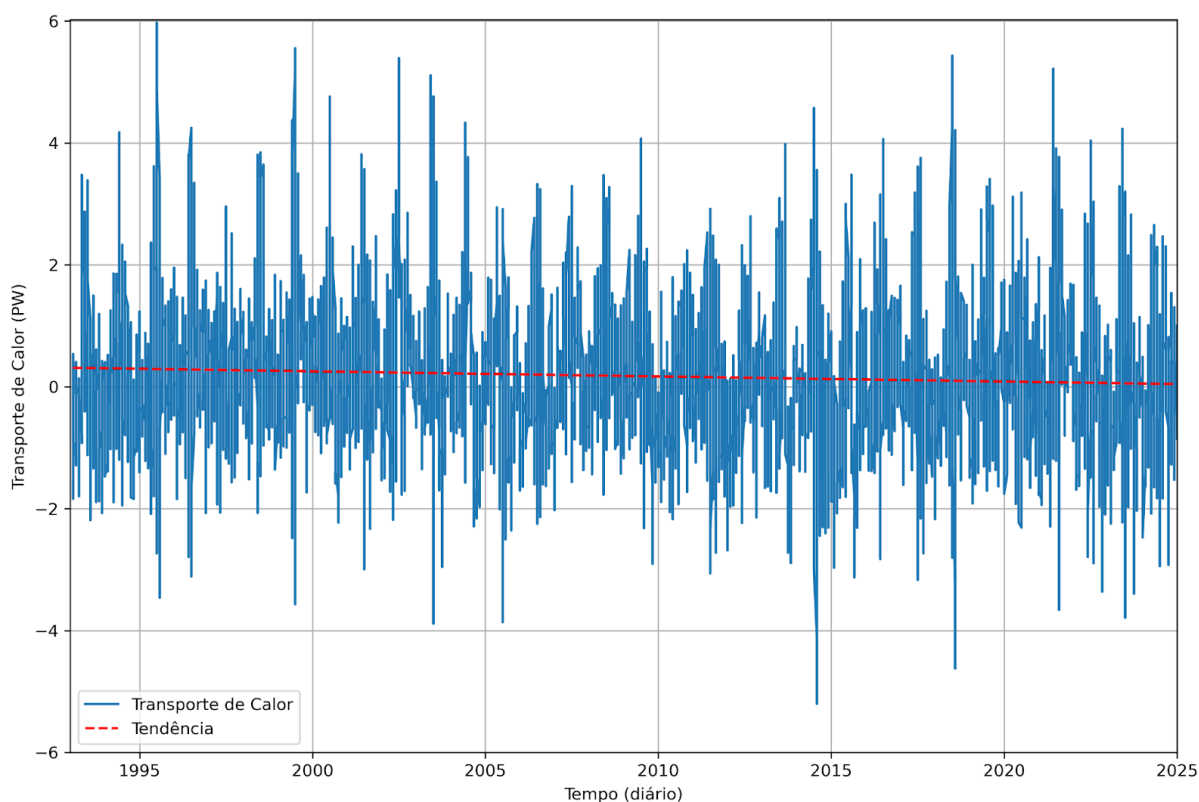


Figura 12. Série temporal do transporte calor meridional (em PW), a partir da longitude de 44°O e das médias das latitudes (1°N - 1°S) e profundidades (1m - 110m), com tendência tracejada em vermelho.

A Figura 13 apresenta a variação decadal do transporte meridional de calor pela CNB ao largo da PCMA, considerando-se o período de 1993 a 2024. Na primeira década (1993–2003, em azul), observa-se uma tendência positiva marcante ($5,66 \times 10^{-2}$ PW/ano), indicando um aumento expressivo no transporte de calor para norte ao largo do estado do Maranhão, abrangendo os dois anos com os maiores valores do transporte de calor (0,78 PW em 1999 e 0,59 PW em 2002.) de toda a série de dados.

Na segunda década (2004–2013, em laranja), observa-se uma tendência negativa no transporte meridional de calor ($-2,71 \times 10^{-2}$ PW/ano), indicando um enfraquecimento em relação à década anterior. Coincidindo com o período de enfraquecimento da AMOC (2004–2012), documentada por Smeed et al. (2014).

Para a década mais recente (2014–2024, em verde), a tendência do transporte meridional de calor é ligeiramente negativa ($-3,00 \times 10^{-3}$ PW/ano), indicando uma suavização no enfraquecimento da AMOC na região de estudo, em relação à década anterior. Essa atenuação da tendência está associada à ocorrência de valores positivos mais expressivos nos anos de 2018 e 2021, que transportaram cerca de 0,34 PW/ano e 0,45 PW/ano, respectivamente (Figura 8b). Esses eventos extremos possivelmente elevaram a média do período, influenciando a tendência linear e suavizando a inclinação negativa observada anteriormente.

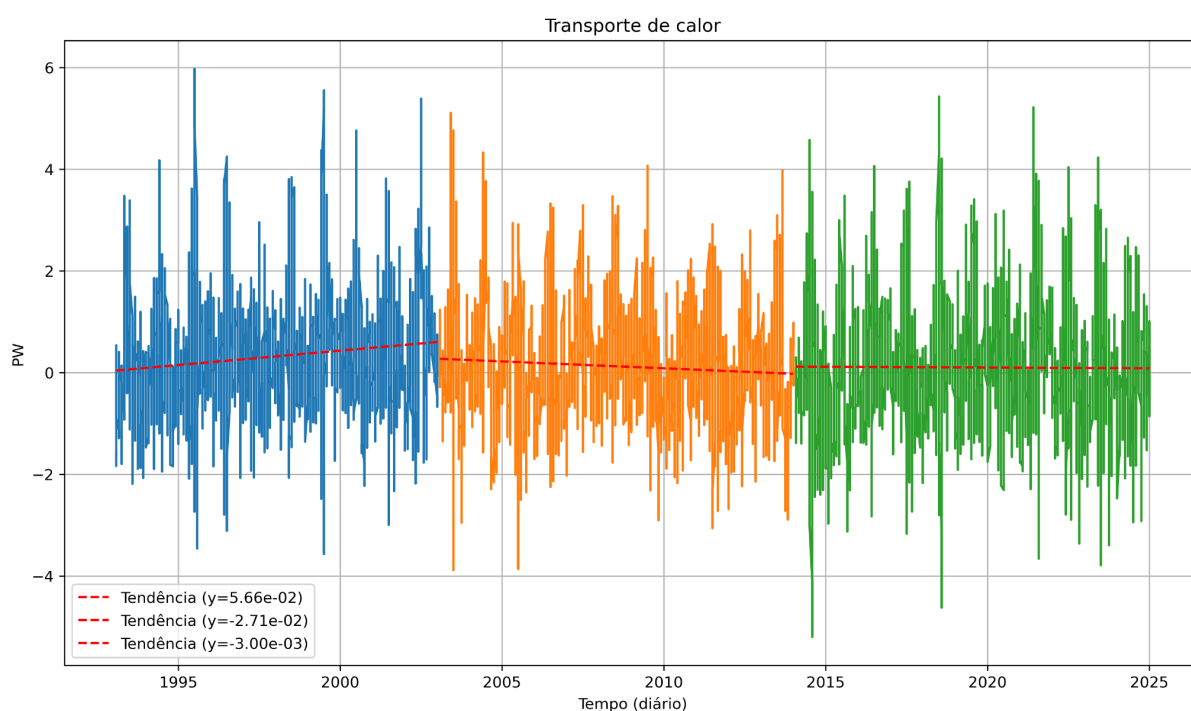


Figura 13. Série temporal do transporte meridional de calor (em PW) diário, cujas cores representam períodos de 10 anos da série de dados: azul (1993–2003), laranja (2004–2013) e verde (2014–2024), com suas respectivas tendências lineares decadais indicadas por linhas tracejadas.

Os resultados mostram que há uma redução progressiva na magnitude do fluxo da CNB e no transporte de calor para norte pela corrente nos últimos 31 anos (1993-2024) ao largo do Maranhão Isso pode ter relação com o gradiente térmico inter-hemisférico global, através dos impactos das mudanças climáticas globais sobre as regiões polares, onde as principais massas d'água do oceano profundo e de fundo são formadas.

A análise da wavelet (Figura 14) evidencia três períodos em que a intensidade da coloração vermelha é reduzida, indicando baixa variabilidade climática e, portanto, anos considerados como próximos à média. Em contrapartida, os anos anômalos, caracterizados por elevada variância no transporte meridional de calor pela CNB, estão destacados pelos contornos pretos sobre áreas de coloração vermelha intensa, revelando dois principais modos de variabilidade.

O primeiro é o sinal anual, de alta potência e presença contínua ao longo da série, refletindo a oscilação sazonal típica da CNB. O segundo corresponde à variabilidade climática de baixa frequência (8–10 anos) associada a um sinal decadal, embora essas fases não apresentem anomalias intensas, a ausência de contornos sobre áreas vermelhas indica anomalias de baixa variância, mas estatisticamente relevantes e persistentes ao longo da série temporal.

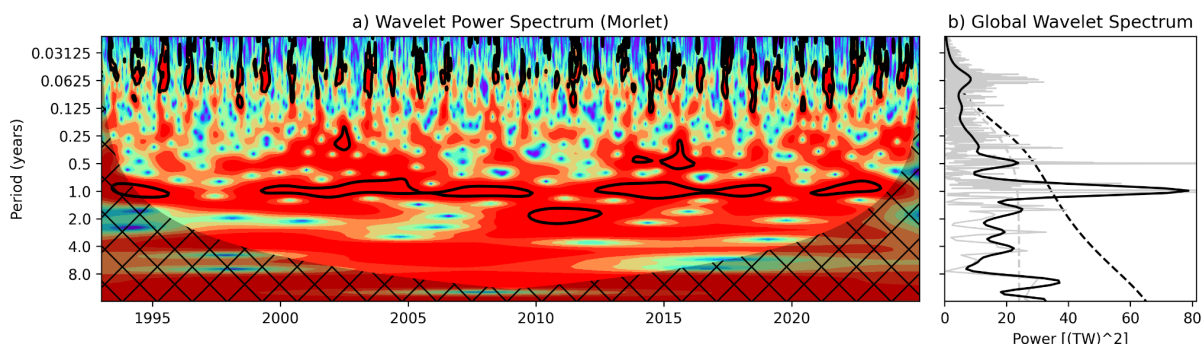


Figura 14. wavelet da série temporal do transporte meridional de calor.

6. CONCLUSÕES

Este estudo investigou a atuação da CNB ao largo da PCMA, com foco na identificação da região de maior intensidade da corrente e na quantificação do transporte meridional de calor associado, utilizando dados de uma reanálise oceânica de alta resolução (GLORYS12V1), considerando-se o período entre 1993 e 2024.

Os resultados demonstraram que a CNB atua de forma mais intensa entre as latitudes de 1°S e 1°N, com velocidades máximas concentradas na longitude de 44°O e profundidades predominantes de subsuperfície, até 100 m, com o núcleo em superfície nos período de junho-agosto. Essa faixa representa o principal eixo de transporte de calor ao largo da PCMA.

Observou-se ainda uma tendência de declínio no transporte meridional de calor nas últimas duas décadas (2004–2013 e 2014–2024), com taxa média de redução de aproximadamente -84×10^{-4} PW/ano, possivelmente associada à diminuição do transporte da AMOC.

Além disso, a análise espectral por wavelet revelou padrões distintos de variabilidade climática, com três intervalos de baixa variância relacionados a anos de comportamento próximo à média e picos bem definidos vinculados a eventos anômalos. Foram identificadas periodicidades anuais, associadas ao ciclo sazonal da CNB, e oscilações em escala decadal, compatíveis com mecanismos climáticos de maior escala.

REFERÊNCIAS

- ANGELOCCI, L. R. e SENTELHAS, P. C. Variabilidade, tendência, anomalia e mudança climática. **Material didático de uso na disciplina LCE**, v. 30, 2010.
- BELLOMO, K.; MEHLING, O. Impacts and state-dependence of AMOC weakening in a warming climate. **Geophysical Research Letters**, v. 51, n. 10, p. e2023GL107624, 2024.
- BOCCALETTI, G. et al. The vertical structure of ocean heat transport. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 10, 2005.
- BOU-HAYA, C. B.; SATO, Olga T. The heat storage variability in the Brazil Current. **Ocean and Coastal Research**, v. 70, n. Suppl 1, p. e22053, 2022.
- BOURLÈS, B.; GOURIOU, Y.; CHUCHLA, R.. On the circulation in the upper layer of the western equatorial Atlantic. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C9, p. 21151-21170, 1999.
- BRONSELAER, B; ZANNA, L. Heat and carbon coupling reveals ocean warming due to circulation changes. **Nature**, v. 584, n. 7820, p. 227-233, 2020.
- BUENO, L. F. et al. Volume and heat transports by North Brazil Current rings. **Frontiers in Marine Science**, v. 9, p. 831098, 2022.
- COCHRANE, J. D. et al. Subthermocline countercurrents in the western equatorial Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v. 9, n. 4, p. 724-738, 1979.
- COPERNICUS MARINE SERVICE.** *Quality Information Document – GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030 (CMEMS-GLO-QUID-001-030)*, v.1.6. Toulouse: Mercator Ocean International, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>.
disponível em:
<https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/description>.
- CUNNINGHAM, S. A. et al. Temporal variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5 N. **science**, v. 317, n. 5840, p. 935-938, 2007.
- CURTIS, P. E.; FEDOROV, A. V. Collapse and slow recovery of the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) under abrupt greenhouse gas forcing. **Climate Dynamics**, p. 1-22, 2024.

DA SILVEIRA, I. C. A.; DE MIRANDA, L. B.; BROWN, W. S. On the origins of the North Brazil Current. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 99, n. C11, p. 22501-22512, 1994.

DA SILVEIRA, I. C. A.; BROWN, W.; FLIERL, G. Dynamics of the North Brazil Current RetroFlection region from the WESTRAX Observations. **Journal of Geophysical Research: Oceans**. Res.(submitted), 2000.

DIMOUNE, D. M. **New Insight Of The West Tropical Atlantic Circulation Based On 25 Years Of Satellite Altimetry, Pirata Data And Glorys Ocean Reanalysis**. Orientador: Moacyr Cunha de Araújo Filho. 2022. 220 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

DIMOUNE, D. M. et al. Revisiting the tropical Atlantic western boundary circulation from a 25-year time series of satellite altimetry data. **Ocean Science**, v. 19, n. 2, p. 251-268, 2023.

DITLEVSEN, P.; DITLEVSEN, Susanne. Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, p. 1-12, 2023.

DONG, S. et al. Synergy of in situ and satellite ocean observations in determining meridional heat transport in the Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 126, n. 4, p. e2020JC017073, 2021.

FRAJKA-WILLIAMS, E.; FOUKAL, N.; DANABASOGLU, G. Should AMOC observations continue: how and why?. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 381, n. 2262, p. 20220195, 2023.

FRATANTONI, D. M.; JOHNS, W. E.; TOWNSEND, T. L. 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, p. 10633-10654, 1995.

GARZOLI, S. L.; FIELD, A.; YAO, Q. North Brazil Current rings and the variability in the latitude of retroflexion. In: Elsevier Oceanography Series. **Elsevier**, 2003. p. 357-373.

GÓES, M. P. A. **Circulação no Atlântico Tropical para Eventos Extremos**. 2001. 87 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.

GOODWIN, P.; WILLIAMS, R. G.; RIDGWELL, A. Sensitivity of climate to cumulative carbon emissions due to compensation of ocean heat and carbon uptake. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 1, p. 29-34, 2015.

HE, C.; LIU, Z.; HU, A. The transient response of atmospheric and oceanic heat transports to anthropogenic warming. **Nature Climate Change**, v. 9, n. 3, p. 222-226, 2019.

HOVMÖLLER, E. The trough-and-ridge diagram. **Tellus**, v. 1, n. 2, p. 62-66, 1949.

IPCC. Relatório Síntese do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC. [Equipe Principal de Redação: LEE, H.; ROMERO, J. (eds.)]. Brasília: MCTI, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc>

JOHNS, W. E. et al. The North Brazil Current retroflexion: Seasonal structure and eddy variability. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 95, n. C12, p. 22103-22120, 1990.

JOHNS, W. E. et al. Annual cycle and variability of the North Brazil Current. **Journal of Physical Oceanography**, v. 28, n. 1, p. 103-128, 1998.

JOHNS, W. E. et al. Continuous, array-based estimates of Atlantic Ocean heat transport at 26.5 N. **Journal of Climate**, v. 24, n. 10, p. 2429-2449, 2011.

JOHNS, W. E. et al. Towards two decades of Atlantic Ocean mass and heat transports at 26.5 N. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 381, n. 2262, p. 20220188, 2023.

KHATIWALA, S. et al. Global ocean storage of anthropogenic carbon. **Biogeosciences**, v. 10, n. 4, p. 2169-2191, 2013.

LENTINI, C. A. D. et al. **Oceanografia física do Atlântico Tropical: processos hidrotermodinâmicos**. In: VIANA, D. L. (Org.). CIÊNCIAS DO MAR: dos oceanos do mundo ao Nordeste do Brasil. 1. ed. Fortaleza: Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR/UFC), v. 1, p. 76–97, 2021.

METCALF, W. G.; STALCUP, M. C. Origin of the Atlantic equatorial undercurrent. **Journal of Geophysical Research**, v. 72, n. 20, p. 4959-4975, 1967.

MUNK, W.; WUNSCH, C. Abyssal recipes II: Energetics of tidal and wind mixing. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 45, n. 12, p. 1977-2010, 1998.

NETO, A. V. N.; DA SILVA, A. C.. Seawater temperature changes associated with the North Brazil current dynamics. **Ocean Dynamics**, v. 64, n. 1, p. 13-27, 2014.

PEREZ, F. F. et al. Meridional overturning circulation conveys fast acidification to the deep Atlantic Ocean. **Nature**, v. 554, n. 7693, p. 515-518, 2018.

PONTES, G. M.; MENVIEL, L. Weakening of the Atlantic Meridional Overturning Circulation driven by subarctic freshening since the mid-twentieth century. **Nature Geoscience**, p. 1-8, 2024.

RICHARDSON P. L. et al. North Brazil Current retroflection eddies. **Journal Geophysical Research**, n. 99, p. 5081–5093. 1994.

RISER, S. C. et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 2, p. 145-153, 2016.

RODGERS, K. B. et al. Ubiquity of human-induced changes in climate variability. **Earth System Dynamics**, v. 12, n. 4, p. 1393-1411, 2021.

SANCHO, L. M. B.; DE FREITAS ASSAD, L. P.; LANDAU, L. Volume and heat transports analysis in the South Atlantic Basin related to climate change scenarios. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 33, n. 2, p. 333-348, 2015.

SCHOTT, F. A. et al. The shallow and deep western boundary circulation of the South Atlantic at 5–11 S. **Journal of Physical Oceanography**, v. 35, n. 11, p. 2031-2053, 2005.

SCHOTT, F. A.; FISCHER, J.; STRAMMA, L. Transports and Pathways of the Upper-Layer Circulation in the Western Tropical Atlantic. **Journal of Physical Oceanography**, v. 28, n. 10, p. 1904–1928, 1998.

SMEED, D. A. et al. Observed decline of the Atlantic meridional overturning circulation 2004–2012. *Ocean Science*, v. 10, n. 1, p. 29-38, 2014.

STOMMEL, H. The westward intensification of wind-driven ocean currents: Transactions of the American Geophysical Union, v. 29. 1948.

STRAMMA, L. Geostrophic transport of the South Equatorial Current in the Atlantic. *Journal of Marine Research*, v49, n2, p. 281-294. 1991.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological society**, v. 79, n. 1, p. 61-78, 1998. disponível em: https://paos.colorado.edu/research/wavelets/bams_79_01_0061.pdf

TRENBERTH, K. E. et al. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: SOLOMON, S. D. et al. (Ed.) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental

Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 2007.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T. Atlantic meridional heat transports computed from balancing Earth's energy locally. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 4, p. 1919-1927, 2017.

VILELA, I. et al. Empirical orthogonal function analysis of satellite-derived currents in the tropical Atlantic. **Tropical oceanography**, v. 46, n. 2, p. 1-24, 2018.

ZANG, D. et al. Multidecadal variability of the North Brazil Current and its connection to the Atlantic meridional overturning circulation. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 116, n. C4, 2011.

ZHU, J. et al. AMOC response to global warming: dependence on the background climate and response timescale. **Climate Dynamics**, v. 44, p. 3449-3468, 2015.

WEAVER, A. J. et al. Stability of the Atlantic meridional overturning circulation: A model intercomparison. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 20, 2012.