

ANÁLISE DE ONDAS DE LESTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL UTILIZANDO O ALGORITMO *TROPICAL WAVE TRACKER* (WPC/NWS/NOAA)

Capitão de Corveta (T) Rodrigo de Souza Barreto Mathias¹

RESUMO

As Ondas de Leste são perturbações de escala sinótica no escoamento das latitudes tropicais, que podem iniciar o desenvolvimento de sistemas convectivos intensos e precipitação volumosa. Sobre o Brasil, as Ondas de Leste afetam a área marítima nas proximidades da região Nordeste e as suas cidades litorâneas. Porém, a sua identificação por imagens de satélite, muitas vezes, se torna difícil, sendo necessário recorrer a ferramentas computacionais. O presente trabalho avalia o algoritmo TROPW, desenvolvido pelos Escritórios Internacionais da NOAA, concluindo que a ferramenta foi útil na identificação e posicionamento das 21 ondas de leste que ocorreram sobre o Oceano Atlântico Sul, entre março e junho de 2024, e os seus parâmetros forneceram importantes informações que podem auxiliar no prognóstico da precipitação associada ao fenômeno.

Palavras-chave: Ondas de Leste. Atlântico Sul. Tropical Wave Tracker.

¹Oficial do Quadro Técnico. Professor do Magistério Militar Naval do Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino (CIAARA), Graduado em Meteorologia pela UFRJ, MSc em Meteorologia pela UFRJ. E-mail: rodrigo.barreto@marinha.mil.br



ABSTRACT

Easterly Waves are synoptic-scale disturbances in the tropical latitude flow, capable of initiating the development of intense convective systems and heavy precipitation. Over Brazil, Easterly Waves affect the maritime area near the Northeast region and its coastal cities. However, their identification using satellite imagery is often challenging, requiring computational tools for accurate detection. This study evaluates the TROPW algorithm, developed by NOAA's International Desks, concluding that the tool effectively identified and positioned the 21 Easterly Waves that occurred over the South Atlantic Ocean between March and June 2024. Additionally, its parameters provided important information that can assist in forecasting the precipitation associated with this phenomenon.

Keywords: Easterly Waves, South Atlantic, Tropical Wave Tracker

1. INTRODUÇÃO

A atmosfera nas latitudes tropicais é caracterizada por fracos gradientes de temperatura e por ventos com grande componente de leste, como consequência da circulação geral da atmosfera sob ação do efeito de Coriolis. Sobre os oceanos, em baixos níveis, esses ventos são conhecidos como “alísios”, que escoam dos cinturões de alta pressão subtropicais em direção às baixas pressões equatoriais nas proximidades da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). No entanto, a região é frequentemente perturbada por oscilações de pressão atmosférica e do vento. Essas perturbações atmosféricas foram inicialmente identificadas sobre o Oceano Atlântico Norte e Mar do Caribe como ondas que viajam de leste a oeste e foram chamadas de “ondas nos

ventos de leste” ou, simplesmente, “ondas de leste” (Riehl, 1945).

Fenômenos similares às ondas de leste no Oceano Atlântico Norte também foram detectados em outras regiões, como no Oceano Pacífico (Reed e Racker, 1971) e no Oceano Índico (Balachandran, 1998), onde foram considerados como precursores da formação de sistemas meteorológicos mais intensos, como as tempestades tropicais e os furacões. No Oceano Atlântico Sul, essas oscilações foram inicialmente identificadas por Yamazaki e Rao (1977) e, embora, não tenha sido observado que elas evoluam para sistemas tropicais mais intensos nessa bacia oceânica, elas afetam diretamente as condições do tempo sobre o mar e o volume de precipitação sobre a região costeira do Nordeste do Brasil (NEB), muitas vezes, causando inundações e transtornos diversos.

Para a análise e previsão das ondas de leste, a literatura sugere diversos campos meteorológicos, como pode ser visto em Silva e Fedorova (2023), sobretudo nos níveis baixos e médios da troposfera, onde podem ser observados os seus sinais mais fortes na vorticidade ciclônica, na divergência, na velocidade vertical etc. Nesse sentido, os escritórios internacionais do *Weather Prediction Center/National Weather Service* (WPC/NWS/NOAA) desenvolveram o algoritmo *Tropical Wave Tracker* (TROPW), que foi lançada em julho de 2024, para apoiar as suas análises diárias sobre o oceano Atlântico Norte, Mar do Caribe e Golfo do México.

O presente trabalho pretende identificar diferentes tipos de ondas de leste sobre o Oceano Atlântico Sul e verificar o desempenho do algoritmo TROPW e dos seus parâmetros no posicionamento e na análise dessas ondas, a fim de auxiliar na avaliação da confiança no seu uso como ferramenta operacional nos serviços meteorológicos do Brasil.

1.1 UMA QUESTÃO DE DEFINIÇÃO

Antes de iniciar as próximas seções do trabalho, é importante apresentar uma dificuldade de consenso com relação à nomenclatura das ondas nos ventos de leste. Nas últimas décadas, muitos estudos foram desenvolvidos sobre esse fenômeno, que passaram a receber diferentes nomes, como “ondas de leste” (Burpee, 1972), “distúrbios ondulatórios” (Reed e Recker, 1971; Reed *et al.*, 1977), “ondas tropicais” (*National Hurricane Center*), “ondas tropicais de leste” (Ladwig e Stensrud, 2009) etc. Isso causa certa confusão, principalmente quando se trata de comunicação de um serviço meteorológico operacional para o público, em sua maioria, leigo sobre as definições técnicas de Meteorologia. O trabalho de Silva e Fedorova (2023) faz um retrospecto dos estudos realizados acerca das ondas de leste e evidencia o problema na padronização da nomenclatura. Atualmente, o glossário METEOTERM¹ e o Guia Global de Previsão de Ciclones Tropicais², ambas publicações oficiais da Organização Meteorológica Mundial (OMM), apresentam as seguintes definições:

Onda de Leste: "Distúrbio de escala sinótica que se move de leste a oeste, superposto ao fluxo básico de leste das regiões tropicais (zona dos ventos alísios)."

Onda Tropical: "Um cavado ou máximo de curvatura ciclônica nos ventos alísios de leste. A onda pode atingir a amplitude máxima na troposfera média inferior, ou pode ser o reflexo de um vórtice frio na troposfera superior ou uma extensão equatorial de um cavado de latitudes médias."

Onda de Leste Africana: "Se forma a partir de instabilidades no Jato de

Leste Africano, na região da monção no oeste da África equatorial, e se desenvolverão se conseguirem formar convecção persistente sobre o Oceano Atlântico Tropical."

Nota-se que o termo “Onda de Leste” é o mais genérico de todos, não fornecendo detalhes sobre o nível vertical em que ocorre e, junto com a definição de “Onda Tropical”, não faz alusão a nenhum mecanismo de formação em específico, inclusive, podendo ser o reflexo de um cavado ou baixa pressão em níveis superiores da atmosfera. Já o termo Onda de Leste Africana especifica o tipo de onda de leste a que se refere, restringindo às ondas que se formam no Jato de Leste Africano. No entanto, além do Jato de Leste Africano, outros mecanismos podem dar origem a distúrbios nos ventos de leste da região tropical, o que nos leva a concluir que toda onda africana é uma onda de leste, mas, nem toda onda de leste é de origem africana.

O glossário do *National Hurricane Center* (NHC/NOAA)³, que é o Centro Meteorológico Regional da OMM para o monitoramento de ciclones tropicais no Atlântico Norte, possui apenas a definição de “Onda Tropical”, que é utilizada operacionalmente em suas cartas meteorológicas para identificar esses distúrbios ondulatórios. E, de acordo com o glossário de termos tropicais do Serviço Meteorológico Americano (*National Weather Service*)⁴, “as ondas tropicais também são conhecidas como ondas de leste”, o que mostra a equivalência entre as definições. Talvez como uma tentativa de não se utilizar uma definição muito abrangente, o termo “Onda Tropical” se popularizou e passou a ser utilizado pelo NHC, referindo-se às perturbações de origem africana.

¹<https://wmo.int/wmo-community/meteoterm>

²<https://cyclone.wmo.int/pdf/Global-Guide-to-Tropical-Cyclone-Forecasting.pdf>

³<https://www.nhc.noaa.gov/aboutgloss.shtm>

⁴https://www.weather.gov/mob/tropical_definitions



No presente estudo, utilizaremos “Onda de Leste”, pois se trata de um termo mais genérico e por haver divergências quanto à classificação do fenômeno no Brasil, como pode ser visto no trabalho de Silva e Fedorova (2023).

1.2 ESTUDOS SOBRE ONDAS DE LESTE NO OCEANO ATLÂNTICO SUL

O mecanismo de formação, a estrutura e a climatologia das ondas de leste e das ondas de leste de origem africana sobre o Oceano Atlântico Norte foram muito bem estudadas e até hoje são tema de pesquisa em Meteorologia Tropical [Riehl (1945), Frank (1969), Burpe (1972), Reed et al. (1977), Albignat e Reed (1980), Berry e Thorncroft (2005), entre outros].

Sobre o Oceano Atlântico Sul, as primeiras investigações sobre ondas de leste foram feitas por Yamazaki e Rao (1977). Eles identificaram que a propagação de nebulosidade de leste a oeste ao longo do Atlântico Sul (05°S a 10°S) parte aproximadamente de 010°E e com velocidade média de 10 m/s ou aproximadamente 10° de longitude por dia. Nesses casos, grande parte dos aglomerados de nuvens se dissiparam após adentrar o litoral do Brasil, por volta de 040°W, exceto alguns que conseguiram avançar pelo interior do continente.

Estudando as alternâncias das condições do tempo sobre a Ilha Ascensão, em aproximadamente em 8°S e 14°W, Hall (1989) concluiu que os distúrbios atmosféricos que se movem sobre a Ilha têm as características das ondas de leste do Atlântico Norte. Por meio do estudo de imagens de satélite, a origem dessas ondas foi indicada como sendo na região central equatorial da África, e os meses de máxima atividade em março e abril.

Alguns estudos mais aprofundados foram feitos para entender

as características estruturais e a periodicidade dessas ondulações. Nesse contexto, Diedhiou *et al.* (2010) utilizou dados de reanálise para investigar as características cinemáticas das ondas de leste no Oceano Atlântico em ambos os hemisférios, onde foram filtradas as perturbações no nível de 700 hPa dentro do período de 3 a 10 dias. Foram encontrados núcleos de vortacidade se propagando para oeste durante todo o ano em ambos os hemisférios, sendo que as maiores magnitudes foram encontradas no Atlântico Norte, no período de julho a setembro. No Atlântico Sul, a maioria dos distúrbios foram observados entre janeiro e abril e entre setembro e dezembro, com períodos de 3 a 9 dias. Os autores apontaram que a convecção profunda nesses distúrbios ocorre principalmente sobre ou próximo dos continentes (Brasil e África central e oeste).

Especificamente sobre o Brasil, Kouadio *et al.* (2012) encontraram que as ondas de leste foram responsáveis por cerca de 50% do número de episódios de chuvas intensas e 60% do total de precipitação na região do NEB. Durante esses eventos, que ocorreram em sua maioria durante anomalias positivas de Temperatura de Superfície do Mar (TSM) no Atlântico Sul equatorial, houve aceleração dos ventos alísios, o que levou a maior evaporação e ao transporte de grande quantidade de umidade em direção ao continente americano.

O trabalho observacional de Gomes *et al.* (2015), durante a estação chuvosa do NEB, mostraram uma estrutura bem organizada da onda nos campos de baixos níveis (1000 hPa a 700 hPa), com anomalias na vortacidade ciclônica, convergência horizontal entre os níveis de 1000 hPa e 850 hPa e de divergência em 700 hPa, além de ser acompanhada por uma pluma de umidade. E Gomes *et al.* (2019) aprofundou o conhecimento sobre as ondas de leste no Atlântico Sul por meio de uma climatologia.

Dentre os 518 casos de ondas de leste encontrados, cerca de 83% ocorreram entre os meses de abril a agosto. Das ondas contabilizadas, cerca de 97% atingiram o NEB, das quais 64% apresentaram atividade convectiva. A análise da precipitação evidenciou que as ondas contribuíram com cerca de 60% do total da precipitação sobre a costa leste do NEB durante a estação chuvosa, o que concorda com os resultados de Kouadio *et al.* (2012).

Diferente de estudos anteriores, a climatologia de Gomes *et al.* (2019) identificou e classificou as fontes das perturbações que geram as ondas de leste que se propagam até o NEB, sendo 1,54% dos casos gerados por Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN); 6,37% pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); 10,04% pelos sistemas convectivos emergentes da costa oeste da África; e 72,2% devido à intrusão de frentes frias em baixas latitudes. O restante das ondas (9,85%) foi gerado pela interação entre essas fontes. A grande quantidade de casos observados entre abril e agosto nesse trabalho, diferente dos resultados de Diedhiou *et al.* (2010), deve-se à inclusão dos remanescentes de frente frias como gatilhos para a formação de ondas de leste nas proximidades do litoral do NEB. Vale destacar que esses fenômenos (VCAN, ZCIT e frentes) servem apenas de gatilho para as ondas de leste, que, após formadas, se deslocam de forma independente de suas fontes.

Assim como no estudo de Gomes *et al.* (2015), o trabalho de Gomes *et al.* (2019) mostra convergência na onda de leste em torno de 1000 hPa e a divergência mais intensa em 700 hPa, evidenciando que as ondas de leste sobre o Atlântico são predominantemente rasas. Também foi detectada uma inclinação para oeste e anomalias de vorticidade ciclônica mais fortes em 700 hPa.

Na busca por uma metodologia unificada para a detecção de ondas de leste tropicais em todo o mundo, Hollis *et al.* (2024) aplicou o algoritmo TRACK (Hodges, 1995) para a detecção de perturbações no escoamento de leste nos campos de 700 hPa e 850 hPa, que são os níveis em que a maior parte dos trabalhos para as diversas bacias oceânicas detecta as maiores anomalias relacionadas à atividade da onda. Os autores encontraram ondas tropicais em todas as regiões tropicais de ambos os hemisférios, em sua maior parte entre 15°S e 15°N, com maior atividade nos Oceanos Atlântico Norte e Pacífico Norte. O nível de maior atividade das ondas depende de cada região, sendo que, sobre o Oceano Atlântico Sul, 700 hPa foi o nível mais notável.

1.3 AS ONDAS DE LESTE E OS SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA NAS PROXIMIDADES DO NEB

Analisando o ambiente pelo qual as ondas de leste passam, as áreas de TSM mais elevadas e com grande quantidade de umidade nos baixos níveis favorecem a formação de convecção profunda e organizada na forma de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), uma vez que a onda induz dinamicamente movimentos ascendentes. Entretanto, os resultados de Kouadio *et al.* (2012) mostram que todos os SCM associados a ondas de leste que iniciaram na África dissiparam em torno de 5°E e nunca atingiram o NEB, e que todos os SCM que atingiram o NEB iniciaram sua atividade em torno de 20°W. Isso indica que as condições ambientais na parte central do Oceano Atlântico Sul tropical, especialmente ao sul de 5°S, não são muito favoráveis à convecção profunda e que as ondas de leste, ao se deslocarem sobre a corrente Sul Equatorial e a corrente do Brasil nas proximidades do NEB, encontram condições



mais propícias. As TSM do Atlântico Sul, que normalmente são mais baixas que as do Atlântico Norte, e a presença da inversão dos ventos alísios, causada pela Alta Subtropical do Atlântico Sul, inibem os movimentos verticais ascendentes, fazendo com que a onda se propague com nuvens de pequeno desenvolvimento vertical (Molion e Bernardo, 2002), o que torna mais difícil sua detecção por imagens de satélite na maior parte do seu trajeto.

Também é importante destacar a importância da interação das ondas de leste com a circulação de brisas nas proximidades do NEB e com a topografia da região, que pode aumentar a convergência em níveis baixos e contribuir para a formação de nuvens de grande desenvolvimento vertical e grandes acumulados de precipitação.

Além dos fatores oceânicos relacionados à disponibilidade de energia e à instabilidade atmosférica, que podem afetar a formação de SCM durante a passagem de uma onda de leste no litoral do NEB, a fase da Oscilação de Madden-Julian (OMJ) deve ser levada em consideração no prognóstico dos acumulados de precipitação causados pelo fenômeno. A OMJ influencia não apenas a frequência da formação das ondas de leste africanas (Ventrice *et al.*, 2011), como pode também suprimir a convecção induzida por elas, mesmo em áreas termodinamicamente favoráveis. O trabalho de Giraldo-Cardenas *et al.* (2022) encontrou que a fase divergente da OMJ está relacionada à característica mais convectiva das ondas de leste africanas no Atlântico Norte, quando passam sobre o norte da América do Sul e Caribe. Se a fase da OMJ é convergente, há um predomínio de ondas de leste secas,

que passam praticamente invisíveis nas imagens satelitais sobre a região. Não foram encontrados trabalhos que avaliem a relação da Oscilação com as ondas de leste que ocorrem no Atlântico Sul, porém, como a OMJ é o principal modo de variabilidade climática sobre a região tropical da América do Sul na escala intrasazonal e tem impacto significativo na precipitação diária e nos eventos extremos sobre a América do Sul, principalmente na sua parte central e leste (Grimm, 2019), é provável que ela desempenhe um papel importante na modulação da precipitação causada por ondas de leste no NEB.

2. METODOLOGIA

Como o foco do presente trabalho é a identificação de ondas de leste no Oceano Atlântico Sul, que se deslocam da África até a região Nordeste do Brasil, o domínio empregado é a área compreendida entre as latitudes de 20°S e 5°N e as longitudes de 040°W e 010°E (Figura 1).

As ondas de leste que ocorreram entre março e junho de 2024 foram identificadas, inicialmente, por meio de dados de reanálise, cujos resultados serviram como controle. Posteriormente, os casos contabilizados na primeira etapa foram analisados utilizando o algoritmo TROPW da NOAA a fim de avaliar as suas potencialidades para sua utilização sobre as proximidades do NEB.

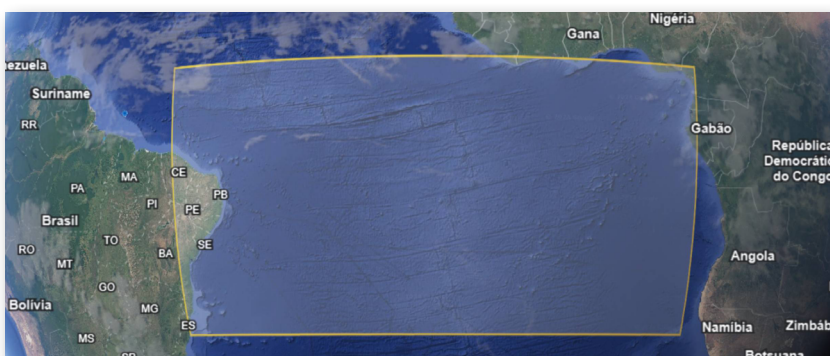


Figura 1- Domínio da área de análise.

2.1 IDENTIFICAÇÃO DOS CASOS DE ONDAS DE LESTE POR REANÁLISE

Para a identificação e contabilização das ondas de leste durante o período, foi realizada a inspeção visual nos campos meteorológicos horizontais e nos cortes verticais gerados por reanálise, vento, temperatura, umidade específica, água precipitável na coluna atmosférica e vorticidade. Durante essa etapa do trabalho, os dados utilizados foram da reanálise do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Atmospheric ReAnalysis - 5ª Geração (ERA5)* (Hersbach et al., 2018), e os gráficos elaborados utilizando o programa *Grid Analysis and Display System (GrADS)* (Doty e Kinter, 1995), na versão *Opengrads* para *Windows*.

Após a análise dos campos de vorticidade em 700 hPa, em 850 hPa e na camada média entre 850 e 700 hPa, conforme recomendado por Gomes *et al.* (2015), Gomes *et al.* (2019) e Hollis *et al.* (2024), combinados com as linhas de corrente nos respectivos níveis, foram identificados os casos de ondas de leste que chegaram à região leste do NEB, entre os estados da Bahia e Rio Grande do Norte, como o exemplo apresentado na Figura 2. Também foram analisados os cortes verticais para todos os casos, como no exemplo da Figura 3, a fim de excluir as perturbações em baixos níveis da atmosfera que eram apenas o reflexo da presença de vórtices ciclônicos ou cavados de altos níveis, e não ondas de leste com movimento independente.

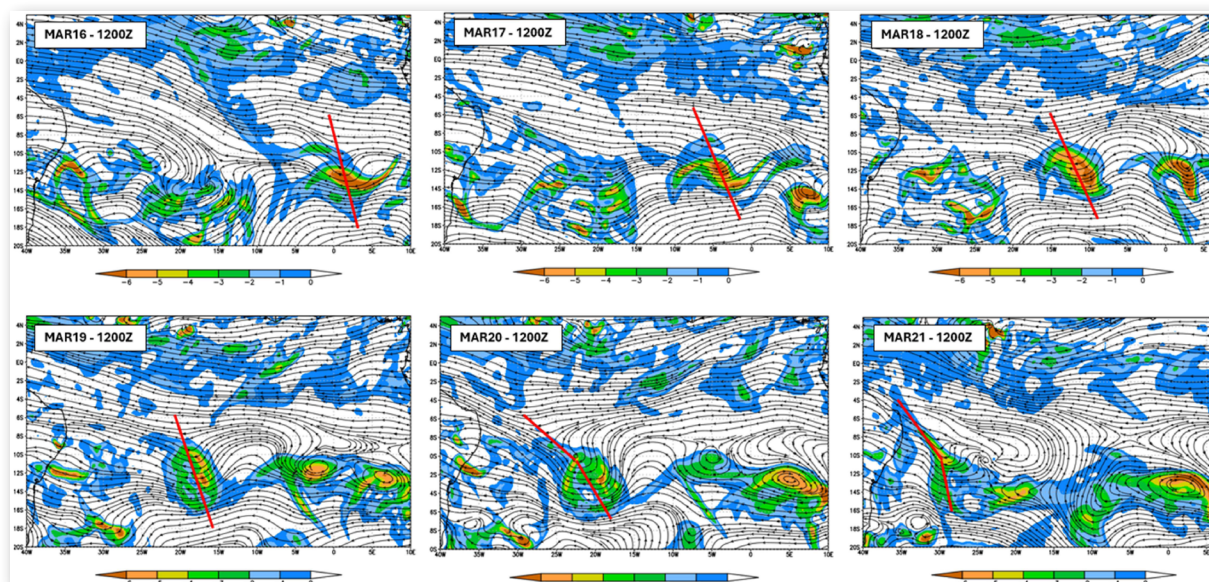


Figura 2- Vorticidade relativa média negativa ($10^{-5} s^{-1}$) e linhas de corrente média, entre os níveis de 850 hPa e 700 hPa, entre os dias 16 e 21 de março de 2024. A linha vermelha marca aproximadamente o eixo de uma onda de leste se propagando pelo Oceano Atlântico.

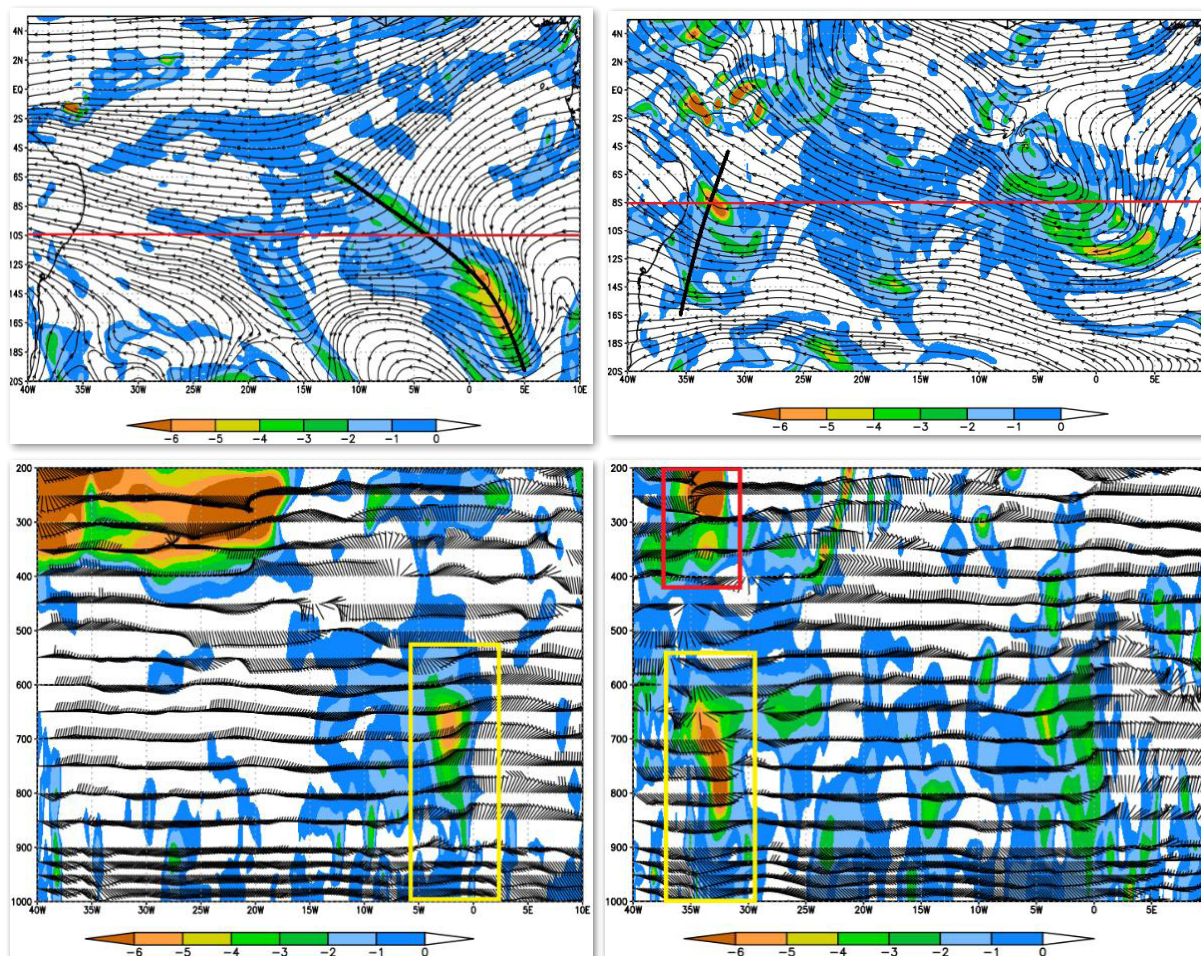


Figura 3- Campos de vorticidade relativa média negativa ($10^{-5}s^{-1}$) e linhas de corrente média, entre os níveis de 850 hPa e 700 hPa, e cortes verticais do vento e vorticidade relativa negativa para os dias 17 de março às 12Z (esquerda) e 24 de março às 12Z (direita). As linhas vermelhas nas figuras superiores correspondem às latitudes dos respectivos cortes verticais. Nas figuras inferiores, os retângulos amarelos destacam as posições da onda de leste, que, ao se aproximar do NEB, se posicionou sob um VCAN (retângulo vermelho).

Durante a análise das ondas de leste, os casos foram classificados conforme a proposta de Gomes et. al. (2019), como ondas de leste “africanas”, quando foi possível perceber a propagação contínua para oeste do conjunto núcleo de vorticidade negativa e o padrão ondulatório nas linhas de corrente em 850-700 hPa partindo do

continente africano, enquanto as ondas “não-africanas” foram aquelas que surgiram na parte central ou oeste do Oceano Atlântico Sul devido a outros fatores, como perturbações geradas pela ZCIT, por VCAN e por vorticidade ciclônica remanescente de frentes frias que adentraram as latitudes tropicais.

2.2 ANÁLISE DAS ONDAS DE LESTE PELO ALGORITMO TROPW (WPC/NWS/NOAA)

Após a identificação das ondas por reanálise, foi utilizada a metodologia experimental empregada pelos Escritórios Internacionais da NOAA para a detecção de ondas de leste no Oceano Atlântico Norte e Caribe (algoritmo TROPW). Dessa forma, foi possível verificar o desempenho do TROPW na detecção dos diferentes tipos de ondas no Atlântico Sul e na indicação do potencial de atividade convectiva nas proximidades do NEB.

Os resultados do algoritmo foram obtidos por meio do software *Windows based Gridded Interactive Display and Diagnostic System* (WINGRIDDS⁵), utilizando as análises do modelo Global Forecast System (GFS) do *National Centers for Environmental Prediction* com resolução de 0.25° de latitude e longitude (NCEP, 2015).

O algoritmo TROPW é uma ferramenta que foi desenvolvida pela NOAA em 2019, com melhorias incluídas nos anos de 2023 e 2024, e disponibilizada de forma experimental na página do WPC⁶, diariamente, desde julho de 2024. Segundo as informações do WPC⁶, trata-se de um produto que une em uma única imagem diversos parâmetros que são considerados os melhores para o acompanhamento das ondas de leste:

- **Vorticidade relativa de curvatura na camada entre 850 hPa e 600 hPa:** Ao longo da experiência dos últimos anos, os Escritórios Internacionais definiram essa camada como sendo a melhor para a

identificação das ondas tropicais que ocorrem no Oceano Atlântico Norte.

- **Linhas de corrente do escoamento e ventos médios entre 850 hPa e 700 hPa:** Cavados associados com a propagação de ondas de leste são encontrados com maior intensidade nesse nível.

- **Vorticidade potencial média na camada entre as isentrópicas de 315 K e 320 K:** Essa quantidade é conservada em superfícies isentrópicas e ajuda no rastreamento de ondas que se propagam nos ventos alísios.

- **Índice Galvez-Davison (GDI):** Fornece uma indicação das áreas com potencial para convecção profunda e destaca áreas com umidade e instabilidade aumentadas, que muitas vezes tendem a se alinhar perto dos eixos das ondas de leste. Maiores detalhes podem ser encontrados no trabalho de Gálvez e Davison (2016).

- **Convergência do Fluxo de Umidade entre 925 hPa e 700 hPa:** Destaca áreas favoráveis à iniciação convectiva, que geralmente ocorrem nas proximidades do eixo da onda.

A Figura 4 apresenta graficamente os parâmetros listados anteriormente, por meio de um exemplo do resultado do algoritmo TROPW para uma onda de leste africana que se desloca sobre o Oceano Atlântico Norte. A interseção dos picos de vorticidade potencial, vorticidade ciclônica de curvatura, da convergência de umidade e GDI, sobreposta às linhas de corrente nos níveis apresentados, permite a identificação do eixo mais provável da onda de leste.

⁵<https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/internal/WINGRIDDS/>

⁶<https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/wng/CAR/index.shtml>

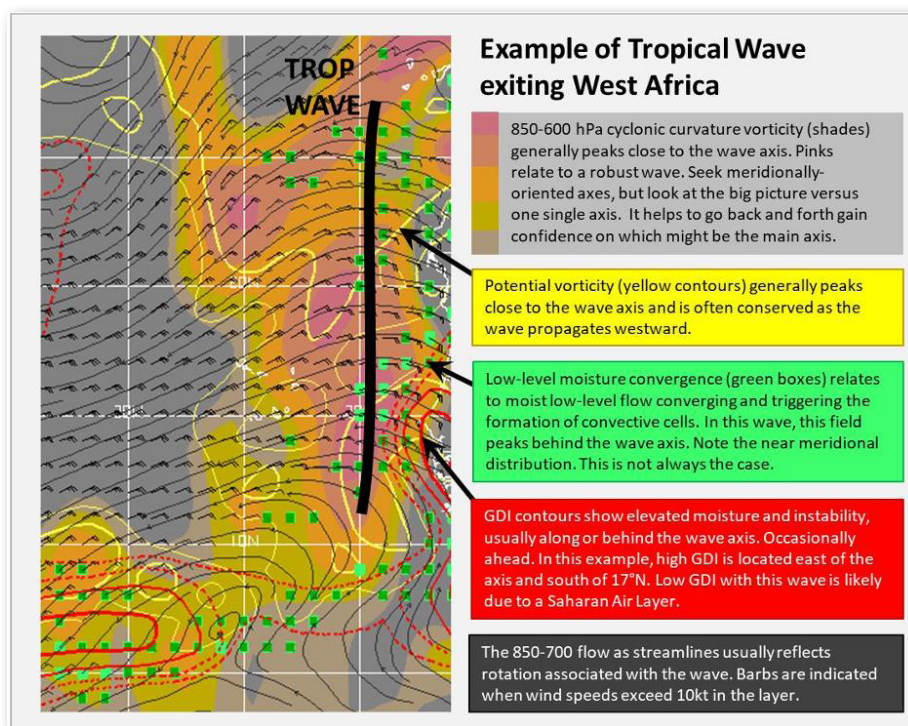


Figura 4- Aplicação do TROPW para uma onda de leste Africana sobre o Atlântico Norte e uma breve descrição do gráfico. Fonte: *International Desks/Weather Prediction Center*.

A avaliação da nebulosidade associada às ondas de leste foi feita por meio de imagens do satélite METEOSAT-9 (EUMETSAT), canal infravermelho realçado (10,8 microns) e canal visível (0,8 micron), disponibilizadas pela Divisão de Satélites Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE).

Também foram utilizados dados de precipitação das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e dados do *Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM* (Huffman *et al.* 2015), disponibilizados pelo INPE.

Fontes dos dados:

Imagens de satélite: <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/meteosat.formulario.logic?i=br>

Dados de estações meteorológicas do INMET: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes>

Dados de precipitação MERGE: <https://>

clima2.cptec.inpe.br/monitoramentobrasil/pt

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio da inspeção dos campos meteorológicos, cortes verticais e imagens de satélite, foi possível encontrar 21 ondas de leste que atingiram a costa leste do NEB no período do estudo. Foram contabilizadas 7 ondas de origem africana, 2 provenientes de perturbações na ZCIT e 12 formadas a partir de vorticidade remanescente de incursões frontais em baixas latitudes. Não foram encontradas ondas geradas por VCAN. Dentre os 21 casos, 11 geraram atividade convectiva nas proximidades ou sobre o NEB, sendo alguns desses com grandes acumulados de precipitação, como o registro de 176 mm de chuva em Natal, Rio Grande do Norte, entre os dias 7 e 8 de março de 2024. A distribuição mensal das ondas identificadas encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Ondas de leste que atingiram a costa do NEB entre março e junho de 2024, identificadas por meio da inspeção visual dos campos e cortes verticais dos dados de reanálise ERA-5.

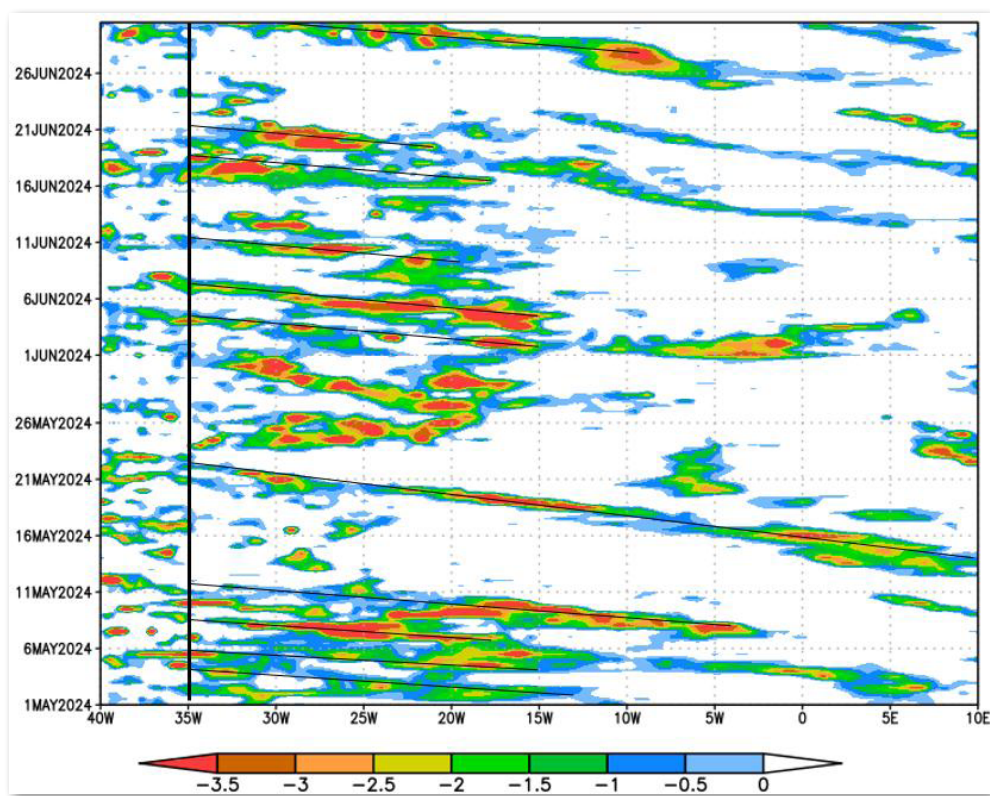
Tipo de Onda	Março	Abril	Maio	Junho
Africana	5	1	1	0
ZCIT	2	0	0	0
Frontal	0	2	4	6
Total	7	3	5	6

Fonte: Autor.

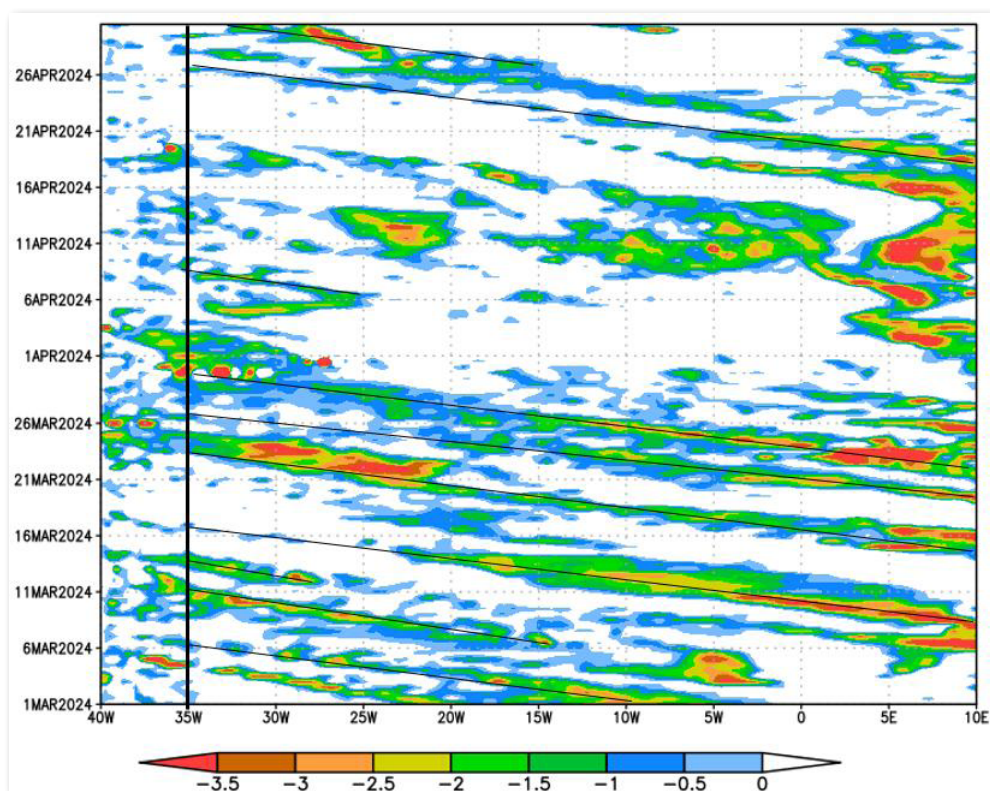
A distribuição mensal das ondas africanas apresentadas na Tabela 1 é coerente com os resultados apresentados por Diedhiou *et al.* (2010), nos quais a maior frequência ocorreu entre os meses de janeiro e abril. E o aumento progressivo da ocorrência de eventos de ondas de leste de origem frontal está de acordo com o aumento da frequência da passagem de frentes frias e sua atuação mais a norte, à medida que se aproxima o inverno austral. O deslocamento da ZCIT e da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) para norte entre os meses de março a junho é uma possível causa da redução da propagação de ondas africanas até o NEB, tendo em vista o aumento gradual da vorticidade anticiclônica, da intensidade dos movimentos subsidentes e da estabilidade atmosférica sobre o Atlântico Sul.

Os diagramas de *Hovmöller* (diagrama longitude x tempo), apresentados na Figura 5, mostram a vorticidade negativa média

entre 5°S e 10°S e entre 850 hPa e 700 hPa, evidenciando o deslocamento de diferentes sistemas ciclônicos, entre as costas da África (010°E) e do NEB (035°W). As 21 ondas que foram identificadas pela reanálise estão indicadas pelas linhas transversais no diagrama, enquanto as demais áreas de vorticidade negativa são o reflexo de fenômenos diversos, como cavados induzidos em baixos níveis e acoplados à circulação de altos níveis, à ZCIT ou à presença de sistemas frontais, mas que não apresentaram as características de propagação independente observadas nas ondas de leste. É possível perceber que, nos meses de maio e junho, a maior quantidade de núcleos de vorticidade negativa se localizava a oeste de 015°W, o que pode estar relacionado à maior quantidade de remanescentes frontais na região e à redução de perturbações que conseguem atravessar o Atlântico desde a África até o Brasil.



a)



b)

Figura 5- Diagrama de *Hovmöller* para vorticidade relativa negativa (10^{-5}s^{-1}) entre 5°S e 10°S e entre 850 hPa e 700 hPa para os meses de maio e junho (a) e março e abril de 2024 (b). As linhas pretas indicam a trajetória das ondas de leste identificadas. Fonte: Autor.

Por meio do algoritmo TROPW foi possível identificar todas as 21 ondas de leste encontradas por reanálise, desde o seu início (não mostrado) até o NEB. Na Figura 6, estão representadas as ondas nas proximidades do NEB, sendo chamadas de “convectivas”, quando produziram atividade convectiva de grande desenvolvimento vertical, e “não-convectivas”, quando geraram apenas nuvens

estratiformes ou nuvens convectivas de menor desenvolvimento vertical, identificadas por meio das imagens de satélite infravermelhas realçadas. Como critério para a identificação de nuvens convectivas profundas, foi considerada a temperatura de brilho inferior a -30°C nos topos das nuvens, que corresponde a aproximadamente 10 km de altura nas latitudes equatoriais.

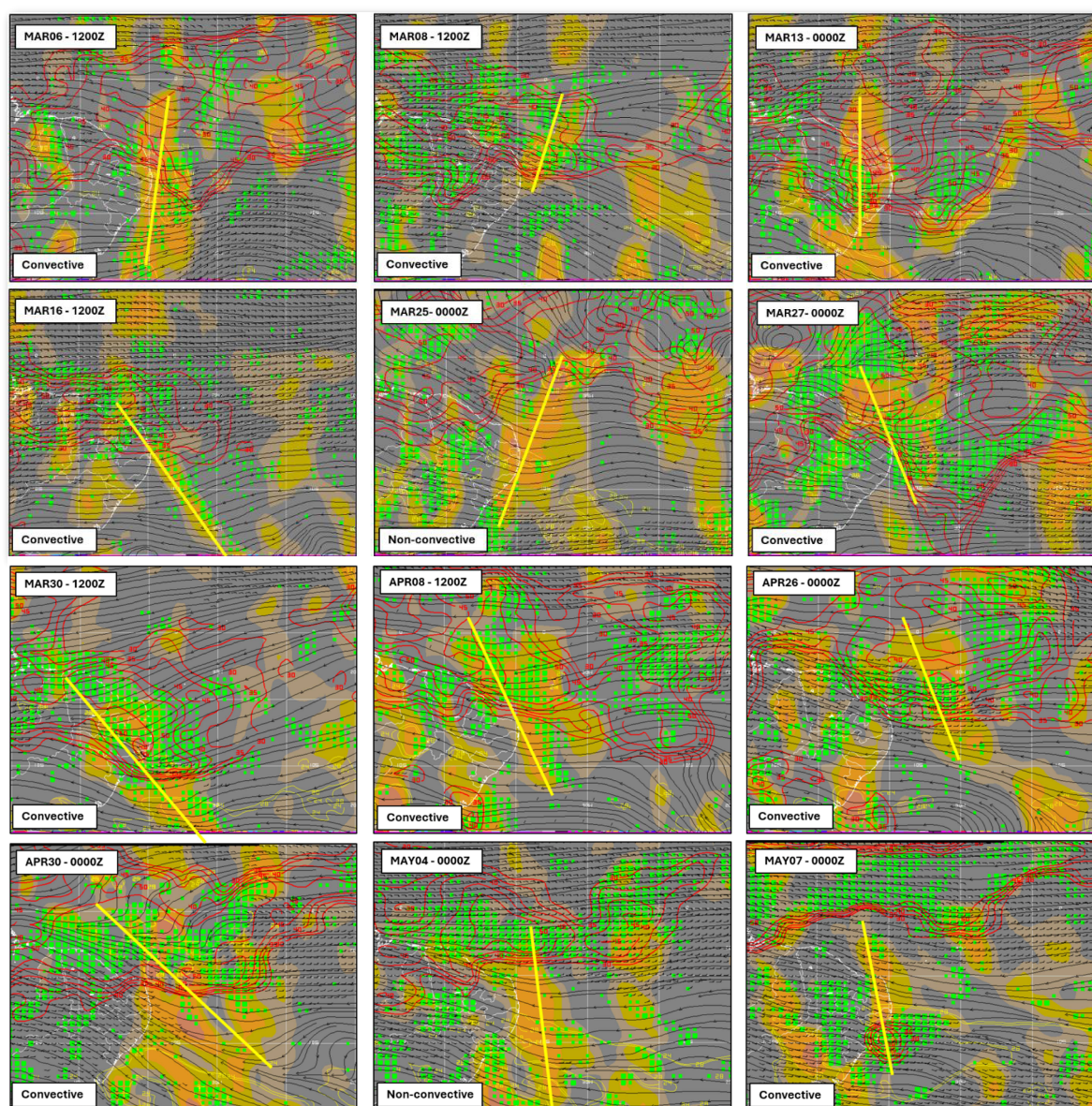
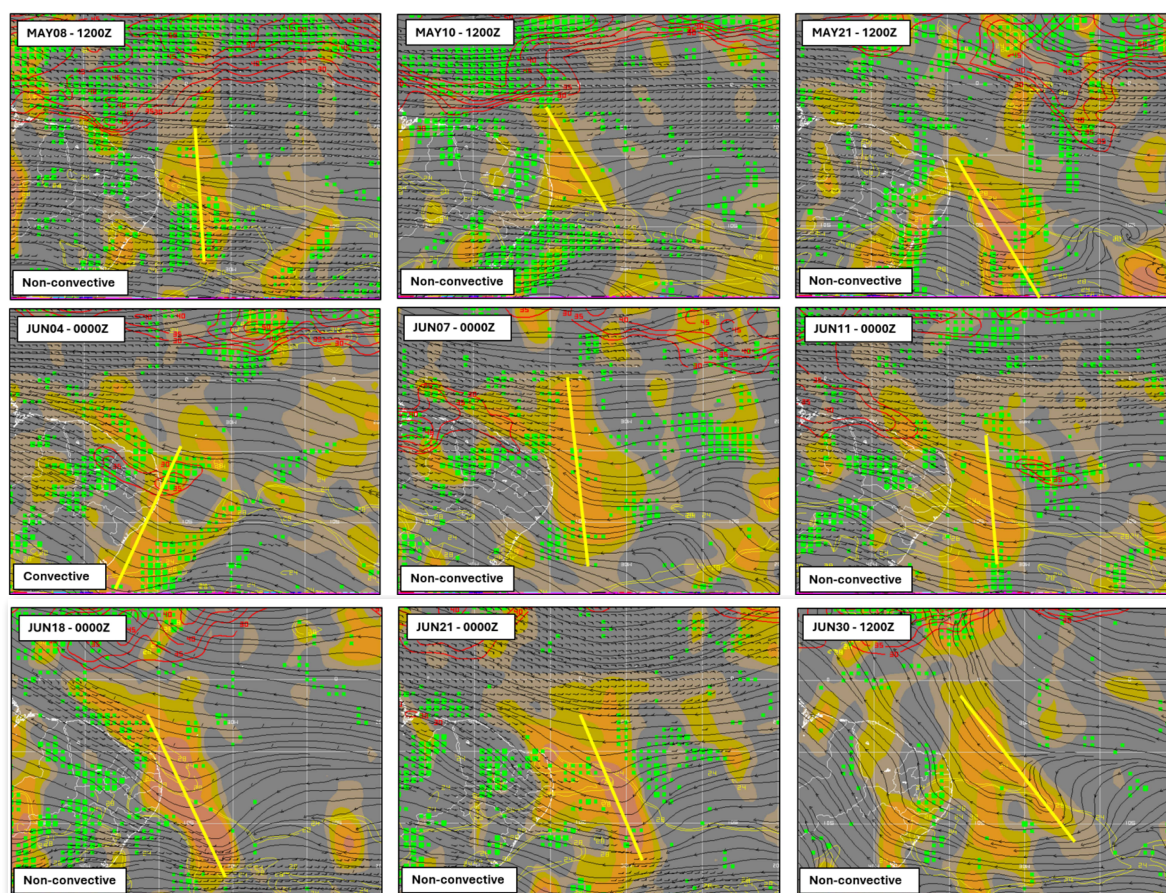


Figura 6- Resultados do algoritmo TROPW para os 21 casos de ondas de leste nas proximidades do NEB, conforme a descrição da Figura 4. A linha amarela representa aproximadamente a localização do eixo da onda. Os casos estão identificados na parte inferior esquerda como convectivos ou não-convectivos. Fonte: Autor.



Continuação da Figura 6. Fonte: Autor.

Analisando todos os casos, desde a sua formação até a chegada no NEB, destaca-se que o parâmetro de vorticidade relativa de curvatura foi o mais robusto para o posicionamento das ondas, apresentando maiores valores nas proximidades da costa do Brasil, onde as ondas, no geral, tendem a se amplificar, aumentando a sua vorticidade ciclônica.

A convergência de umidade auxiliou no posicionamento de quase todas as ondas convectivas, por se apresentarem concentradas nas proximidades do eixo da onda. Já nos casos de ondas não-convectivas, a convergência de umidade foi fraca e dispersa ao redor do eixo da onda. Em todos os casos de atividade convectiva profunda e chuvas intensas sobre o NEB, o

índice GDI esteve presente sobre a região com valores superiores a 30, reforçando a sua habilidade no prognóstico de convecção tropical, incluindo a região do NEB (Gálvez e Davison, 2016).

O parâmetro de Vorticidade Potencial (VP) se mostrou mais útil na detecção das ondas geradas por remanescentes frontais. Nesses casos, altos valores de VP são advectados para norte pela onda baroclínica, e permanecem em baixas latitudes perturbando o escoamento de leste em baixos níveis e gerando uma série de ondulações que atingem o NEB. Nos meses de março e abril, a VP nem sempre foi um parâmetro que auxiliou na determinação do eixo das ondas, pois surgiram com pequenos valores dispersos ao redor da onda.

Na Figura 6, é possível notar, nos meses de março e abril, os altos valores de GDI destacando a posição da ZCIT que oscila em sua posição climatológica nas proximidades do equador. A partir de maio, os maiores valores de GDI se deslocam para norte, mostrando a migração da ZCIT para o hemisfério norte. Portanto, os resultados mostram que, nos meses em que a ZCIT está posicionada mais ao sul, as ondas perturbaram o campo de vento, aumentando sua componente meridional e transportando umidade e ar instável (altos valores de GDI) da ZCIT diretamente para o NEB, convergindo principalmente na retaguarda e na parte mais ao norte da onda.

A respeito da atividade convectiva observada nas imagens de satélite, vale destacar que, no mês de março, das sete ondas registradas, seis foram convectivas e apenas uma, de origem africana, passou sobre o NEB sem atividade convectiva significativa (dia 25). Essa última se posicionou sob a subsidência de um VCAN que atuava sobre

a região, inibindo a formação de nuvens profundas. No mês de abril, as três ondas (uma africana e duas frontais) ocasionaram convecção significativa sobre o NEB. Em maio e junho, foi possível perceber uma redução da atividade convectiva associada às ondas de leste, pois apenas um evento em cada mês foi convectivo (dias 7 de maio e 4 de junho). Esse fato pode estar relacionado à redução da instabilidade atmosférica na área, conforme apontado anteriormente.

Apesar de os eventos dos meses de maio e junho terem sido predominantemente não-convectivos, observa-se uma tendência a maiores concentrações de áreas de convergência de umidade na parte sul da onda, sem preferência pela dianteira ou traseira do seu eixo, conforme pode ser observado nos casos dos dias 7, 8, 10 e 21 de maio. Como as ondas nesses meses são, em sua maioria, geradas por remanescentes frontais, a sua parte sul possui ventos mais intensos devido à combinação da circulação da periferia dos anticiclones migratórios

(ventos de Leste/Sudeste) com a circulação gerada pela onda de leste. Os ventos mais intensos sobre as águas aquecidas da Corrente do Brasil, que fluem de Norte a Sul nas proximidades da costa do Brasil (Figura 7), ocasionam o aumento da disponibilidade de umidade em baixos níveis por meio do efeito evaporativo, que é direcionado à costa leste do NEB (Figura 8).

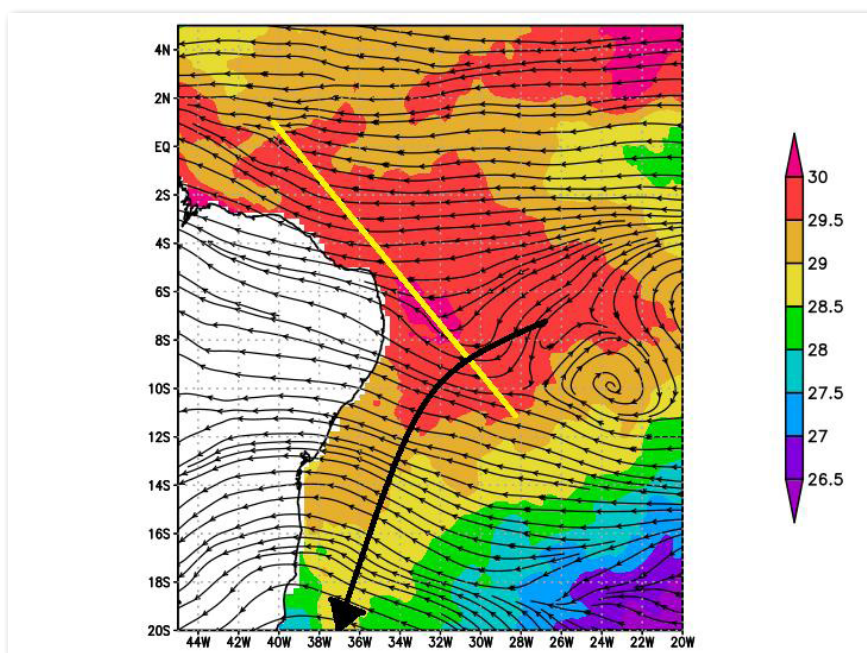


Figura 7- Temperatura da Superfície do Mar (°C) e linhas de corrente médias entre 850 hPa e 700 hPa em 00Z do dia 8 de maio de 2024. A linha amarela representa a posição aproximada do eixo da onda de leste e a seta preta indica o sentido do fluxo da Corrente do Brasil na região. Fonte: Autor.

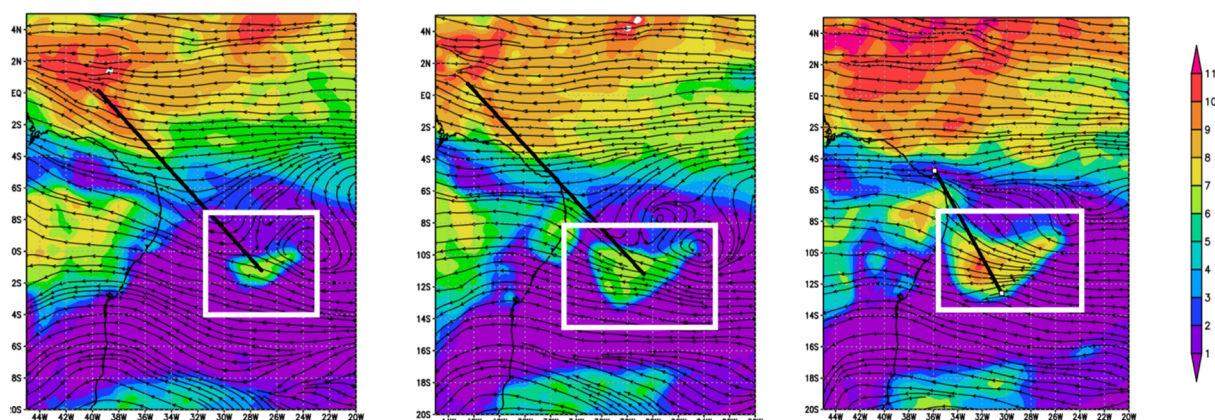


Figura 8- Umidade específica (g/kg) e linhas de corrente médias entre 850 hPa e 700 hPa de 00Z, 06Z e 12Z do dia 8 de maio de 2024 (esquerda para a direita). A linha preta representa a posição aproximada do eixo da onda de leste e as áreas em destaque mostram o aumento da umidade específica na parte sul da onda. Fonte: Autor.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O uso do algoritmo TROPW desenvolvido pelos Escritórios Internacionais da NOAA auxiliou no posicionamento de todas as 21 ondas de leste identificadas no período de estudo, desde o seu momento inicial na costa da África ou no meio do oceano Atlântico até atingir o NEB. A ferramenta se mostrou útil principalmente no posicionamento de ondas de leste associadas a nuvens estratiformes ou nuvens convectivas rasas, que são de difícil detecção, utilizando imagens de satélite nos serviços meteorológicos operacionais. Ondas de leste que se propagam praticamente “invisíveis” na região central do Atlântico por não produzirem nebulosidade significativa, podem iniciar a formação de intensos Sistemas Convectivos de Mesoescala e chuvas volumosas ao encontrarem ambientes favoráveis nas proximidades do NEB.

Todos os parâmetros do TROPW foram úteis no posicionamento das ondas, porém a vorticidade relativa de curvatura foi o mais robusto, estando bem destacado em todas as ondas. As ondas de leste com atividade convectiva mostraram o parâmetro de convergência de umidade predominantemente na retaguarda do eixo

da onda; já nos casos com nuvens convectivas rasas e nuvens estratiformes, a convergência de umidade ocorreu de forma mais fraca e dispersa no entorno do eixo da onda. No caso das ondas de origem frontal, a convergência de umidade se concentrou mais na parte sul da onda, auxiliando em seu posicionamento. Por sua vez, o parâmetro de vorticidade potencial apresentou fraco sinal nas ondas de origem africana ou ZCIT, enquanto foi bem destacado na detecção do deslocamento de ondas de leste de origem frontal.

Portanto, o uso combinado dos parâmetros que compõem a ferramenta permite a identificação e posicionamento de ondas de leste sobre o Atlântico Sul com mais confiança e a análise de eventos com diferentes características. O uso contínuo da ferramenta também permite a percepção dos efeitos potenciais das ondas de leste em termos de precipitação, de acordo com as diferentes configurações dos parâmetros GDI e de convergência de umidade. Diante dos resultados obtidos, sugere-se que essa ferramenta seja utilizada pelo Serviço Meteorológico Marinho como auxílio na elaboração das suas cartas sinóticas diárias e nas previsões meteorológicas para a METAREA V.

Para trabalhos futuros, sugere-se o aumento do período de análise, a fim de verificar o desempenho do algoritmo em mais casos de ondas de leste originados de remanescentes frontais no auge do inverno. Também sugere-se realizar o teste de inclusão do parâmetro de água precipitável no algoritmo para o rastreamento das ondas de

leste pelo Atlântico Sul, uma vez que Gomes *et al.* (2015) identificou plumas de umidade associadas a elas, e diagramas de *Hovmöller* de desvios zonais de água precipitável (não mostrados) sugerem que esse parâmetro é aproximadamente conservado ao longo do deslocamento das ondas de leste pelo Atlântico Sul.

5. AGRADECIMENTOS

O autor agradece aos Escritórios Internacionais do *Weather Prediction Center* (WPC/NWS/NOAA), especialmente ao Dr. José Gálvez, pelas instruções sobre o índice GDI, o

algoritmo TROPW e o software WINGRIDDS, que permitiram a elaboração do presente trabalho durante a realização do Treinamento em Análise de Sistemas Tropicais entre os meses de agosto e novembro de 2024.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albignat, J. P., e R. J. Reed, 1980: The origin of African wave disturbances during phase III of GATE. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1827–1839.

Balachandran, S., Pai, D. S. e Prasad, S. K., 1998: Some Features of an Inverted V-Type Easterly Wave over Indian Seas. *Mausam*, 49, 266-268.

Berry, G. J., e C. Thorncroft, 2005: Case study of an intense African easterly wave. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 752–766.

Burpee R. W., 1972: The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere of North African. *J Atmos Sci* 29:77–90.

Diedhiou, A., Machado, L. A. T., and Laurent, H., 2010: Mean kinematic characteristics of synoptic Easterly disturbances over the Atlantic. *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 27, pp. 483–499.

Doty, B. E. and Kinter, J. L., 1995: Visualization Techniques in Space and Atmospheric Sciences. *Geophysical Data Analysis and Visualization using GrADS*. eds. E.P. Szuszcwicz and J.H. Bredekamp, NASA, Washington, D.C., 209-219.

Frank, N. L., 1970: Atlantic Tropical Systems of 1969. *Mon. Wea. Rev.*, 98, 307-314.

Gálvez, J. M. and Davison, M., 2016: The Gálvez-Davison Index for Tropical Convection. Disponível em: <https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/gdi/>. Acessado em 10/03/2025.



Giraldo-Cardenas, S., Arias, P. A., Vieira, S. C., and Zuluaga, M. D., 2022: Easterly waves and precipitation over northern South America and the Caribbean. *International Journal of Climatology*, 42(3), 1483–1499.

Gomes, H. B.; Ambrizzi T., Herdies, D.L. et al., 2015: Easterly wave disturbances over northeast Brazil: An observational analysis. *Advances in Meteorology*, v. 2015, 176238.

Gomes, H. B.; Ambrizzi, T., Pontes da Silva, B. F. et al, 2019. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. *Climate Dynamics*, v. 53, p. 1393-1411.

GRIMM, A.M., 2019: Madden-Julian Oscillation impacts on South America summer monsoon season: precipitation anomalies, extreme events, and teleconnections. *Climate Dynamics*.

Hall, B. A., 1989: Westward-moving disturbances in the South Atlantic coinciding with heavy rainfall events at Ascension Island. *Meteor. Mag.*, 118, 175–181.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P. *et al.*, 2023: ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).

Hodges KI, 1995: Feature tracking on a unit sphere. *Monthly Weather Rev.* 123:3458–3465.

Hollis, M. A., McCrary, R.R., Stachnik, J. P. *et al.*, 2024: A global climatology of tropical Easterly waves. *Clim. Dyn.* 62, 2317–2332.

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D. *et al.*, 2015: NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi satellitE Retrievals for GPM (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Doc., version 4.5, 26 pp.

Kouadio, Y. K., Servain, J., Machado, L. A. T. *et al.*, 2012: Heavy Rainfall Episodes in the Eastern Northeast Brazil Linked Large-Scale Ocean-Atmosphere Conditions in the Tropical Atlantic. *Advances in Meteorology*. 2012, 1–16.

Ladwig, W. C., e Stensrud, D. J., 2009: Relationship between tropical easterly waves and precipitation during the North American monsoon. *Journal of Climate*, 22, 258-271.

Molion, L. C. B. e BERNARDO, S. O., 2002: Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, n. 1, p. 1-10.

National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce. (2015). NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.



Reed, R.J. and Recker, E.E, 1971: Structure and properties of synoptic-scale wave disturbances in the equatorial western pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 28, n. 7, p. 1117-1133.

Reed J. R., Norquist D. C. and Recker E. E., 1977: The structure and properties of African wave disturbances as observed during phase III of GATE. *Mon Weather Rev* 105:317–333.

Riehl H.,1945: *Tropical meteorology*. McGraw-Hill, New York.

Silva, B. F. P. da., & Fedorova, N., 2023: “Distúrbios Ondulatórios de Leste” Sobre o Atlântico Tropical Sul: Revisão e Discussão Sobre Terminologia. *Revista Brasileira De Meteorologia*, 38.

Ventrice, M. J., C. D. Thorncroft, and P. E. Roundy, 2011: The Madden–Julian Oscillation’s Influence on African Easterly Waves and Downstream Tropical Cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 2704–2722.

Yamazaki, Y. and Rao, V. B., 1977: Tropical Cloudiness over the South Atlantic Ocean. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* Vol.55 N°.3, pp.324-324.