



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Distúrbio Ondulatório de Leste sobre a costa da Amazônia Oriental

Reinaldo Matheus Reis Ribeiro¹, Maria Isabel Vitorino², Maurício do Nascimento Moura³, Giordani Rafael Conceição Sodré⁴

¹Graduando em Meteorologia - FAMET/UFPA, e-mail: mrribeiroreis2001@gmail.com; ²Profª. Drª da Faculdade de Meteorologia – FAMET/UFPA, e-mail: vitorino@ufpa.br; ³Dr em Ciências Ambientais – FAMET/UFPA, e-mail: mauriciomoura90@gmail.com; ⁴Dr em Ciências Ambientais, Faculdade de Meteorologia – FAMET/UFPA, e-mail: giordani@ufpa.br

Artigo recebido em 07/10/2023 e aceito em 02/01/2024

RESUMO

Caracterizado como um fenômeno sinótico precipitante, o Distúrbio Ondulatório de Leste (DOL) tem sua área de atuação na região tropical, formando-se sobre as águas quentes do Atlântico equatorial leste, próximo à costa oeste da África, propagando-se a partir de distúrbios no escoamento básico dos Alísios de leste. O DOL é considerado um importante sistema convectivo que contribui para os acumulados pluviométricos, excepcionalmente na região Norte e Nordeste do Brasil, durante o período do inverno e primavera austrais, quando é facilmente identificado. O objetivo desta pesquisa foi analisar um caso de DOL sobre a costa da Amazônia Oriental, entre o oeste do Maranhão e o Pará, entre os dias 29 e 31 de maio de 2022. Para isso, foram utilizados dados de reanálise de vorticidade relativa em 850 hPa, componente meridional e zonal do vento em 850 hPa e 700 hPa, radiação de onda longa, temperatura da superfície do mar e a precipitação. Observou-se a propagação de uma perturbação ondulatória no fluxo de leste a partir do dia 28 de maio, próximo à costa norte do Brasil, intensificando-se entre os dias 29 e 30 de maio. Os campos analisados apontaram a região de instabilidade atmosférica associada ao eixo do DOL. Durante os dias 30 e 31, houve a entrada de um segundo cavado invertido de baixa amplitude, interagindo com fenômenos de mesoescala na costa da Amazônia, que ocasionou transtornos na capital paraense ao final da tarde do dia 31 de maio.

Palavras-chave: distúrbios ondulatórios de leste, meteorologia sinótica, precipitação, clima

East Wave Disturbance over the coast of Eastern Amazonia

ABSTRACT

Characterized as a precipitating synoptic phenomenon, the Eastward Wave Disturbance (EWD) operates in the tropical region, forming over the warm waters of the eastern equatorial Atlantic, near the west coast of Africa, and propagating from disturbances in the basic flow of the east trades. EWD is considered an important convective system that contributes to rainfall accumulations, especially in the Northern and Northeastern regions of Brazil, during the austral winter and spring when it is easily identifiable. The objective of this research was to analyze a case of EWD over the eastern coast of the Amazon, between western Maranhão and Pará, between May 29 and May 31, 2022. For this, data from relative vorticity at 850 hPa, meridional and zonal components of wind at 850 hPa and 700 hPa, long-wave radiation, sea surface temperature, and precipitation were used. The propagation of a wave disturbance in the eastward flow was observed starting on May 28, near the northern coast of Brazil, intensifying between May 29 and 30. The analyzed fields pointed to the region of atmospheric instability associated with the axis of the EWD. During May 30 and 31, a second low-amplitude inverted trough entered, interacting with mesoscale phenomena on the coast of the Amazon, causing disruptions in the capital of Pará by late afternoon on May 31.

Keywords: easterly wave disturbances, synoptic meteorology, precipitation, climate.

Introdução

A região Norte do Brasil é caracterizada por um clima quente e úmido, em virtude, principalmente, da maior disponibilidade de vapor d'água liberado pela maior floresta tropical do mundo, a floresta amazônica. Além disso, pelo seu posicionamento na Região Tropical, há também

maior disponibilidade de radiação solar incidente (Sodré e Souza Filho, 2010).

A consequência disso é a interação da radiação de onda longa junto ao vapor d'água, corroborando para a formação de instabilidades atmosféricas, por meio da liberação de calor latente. Um estudo feito por Fu et al. (1999)

afirmam que o aquecimento da superfície terrestre é essencial para o estabelecimento da convecção e o desenvolvimento de tempestades intensas sobre a região.

De acordo com Reboita et al., (2010), os setores norte e nordeste da Amazônia apresentam um regime chuvoso regido por fenômenos meteorológicos como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), e estes sistemas apresentam uma variabilidade espaço-temporal distinta sobre a região.

Dentre os sistemas precipitantes que contribuem para o clima chuvoso da região amazônica, em especial, a região litorânea, destacam-se as Ondas de Leste. Este sistema se caracteriza como um distúrbio de escala sinótica nos ventos Alísios de leste, por isso, pode ser conhecido também por Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL). À medida que se propagam para Oeste, os DOLs têm como papel a modulação da convecção por onde passa, ganhando magnitude sobre a regiões cujas superfícies oceânicas encontram-se mais aquecida, gerando nebulosidade e precipitação (Coutinho e Fisch, 2007; Neves et al., 2016).

Além disso, há outros sistemas de diferentes escalas que atuam sobre a região, concomitantemente ou não. Como exemplo, destacam-se as Brisas Marítimas (BM), que se apresentam ao longo do ano e, são a fonte primária das Linhas de Instabilidade (LI) que adentram o continente formando nebulosidades profundas (Cohen et al., 1995; Germano e Oyama, 2020; Lima et al., 2022).

Os DOLs foram inicialmente estudados por Riehl (1945), que analisou e concluiu que as mudanças na direção do vento acompanhavam a formação e o deslocamento de centros isalobáricos e que tais mudanças sugeriam que esses centros eram manifestações da propagação de ondas atmosféricas direcionadas de leste a oeste. De forma que, este sistema foi denominado, inicialmente como Ondas de Leste e, posteriormente, definido como Distúrbios Ondulatórios de Leste.

O DOL se desloca sobre a região tropical do Atlântico ao longo de todo o ano e, muitos estudos buscaram analisar seus impactos sobre o leste do Nordeste brasileiro (NEB), principalmente durante o outono e o inverno austrais, quando sua propagação e amplitude são mais acentuadas (Chan, 1990; Coutinho e Fisch, 2007; Kouadion et al., 2012; Neves et al., 2016; Silva et al., 2021).

Com a formação dos distúrbios, nos Alísios, nas proximidades da costa oeste africana, o seu deslocamento para leste ganha amplitude até alcançar as regiões do Caribe. Deste modo, eles detêm as seguintes características: comprimento de onda de aproximadamente 3.000 km, atingindo sua máxima intensidade entre 850 e 700 hPa, com velocidade de deslocamento de 6 m/s e têm uma frequência de 3-5 dias, em sua maior ocorrência (Riehl, 1954; Riehl, 1965; Hall, 1989; Asnani, 1993; Asnani, 2005; Gomes et al., 2015; Silva e Fedorova, 2023).

Machado et al. (2022) afirmam que as ondas de leste são observadas de forma mais explícitas entre os níveis de 850 e 700 hPa e, associam-se aos jatos africanos de leste.

Com base nas principais características do DOL e seu potencial de causar eventos extremos de tempo, devido a sua característica associada a velocidade de propagação e mudança de fase, as modulações na formação de instabilidade e precipitação. Além de analisar as interações multiescalares do DOL e os outros sistemas como a ZCIT, LI, Sistemas de Brisas, VCAN e a modulação dos oceanos Atlântico e Pacífico.

Este estudo se propõe a investigar as características associadas a um episódio de DOL, que alcançou a costa da Amazônia Oriental e sua interação com outros sistemas meteorológicos geradores de precipitação, bem como mecanismos climáticos de diferentes escalas, durante o dia 28 e 31 de maio de 2022.

Os trabalhos existentes investigaram principalmente as características dinâmicas e termodinâmicas do DOL nas regiões mais a leste da Amazônia Oriental, como parte do Maranhão e a costa do NEB, no entanto nesta pesquisa se pretende abordar, por meio de um estudo de caso, as características associadas a propagação do DOL sobre a costa da Amazônia Oriental, com ênfase na região metropolitana de Belém (RMB).

Material e métodos

Localização e Caracterização da Área de Estudo

A região costeira do Norte do Brasil, conhecida como litoral amazônico ou equatorial, estende-se por mais de 1.500 quilômetros, abrangendo os estados do Pará, Amapá e parte do Maranhão (Suguio e Tessler, 1984; Amaral et al., 2008).

O estudo foi realizado sobre parte do nordeste do Pará e noroeste do Maranhão, entre a latitude 0° N e 3° S e as longitudes 44,8° W e

48,61° W, onde se localiza a cidade de Belém, a qual está na rota das ondas de leste que contribuem para o acumulado anual das chuvas, nos centros urbanos e arredores (Souza, 2022). Desta forma, a área de abrangência concentrou-se principalmente no litoral e parte do Oceano Atlântico equatorial (Figura 1).

O clima da região é definido como tropical quente e úmido, com o acumulado de precipitação anual em torno de 1.800 mm a 3.300 mm, com o regime pluviométrico apresentando um máximo (período mais chuvoso) e um mínimo (período menos chuvoso). Durante a estação do outono a região fica sob atuação da ZCIT que responde pelos acumulados de chuva que ocorrem entre os meses de março e maio, quando ela se encontra em seu máximo deslocamento para o HS.

Nas cidades de Belém e São Luís, o volume de precipitação nestes meses varia entre 350 mm e 500 mm.

O segundo período, menos chuvoso, se inicia em julho com a mínima alcançada por volta de setembro entre o inverno e a primavera austrais. Os sistemas meteorológicos causadores de precipitação têm como fonte os efeitos locais (aquecimento diferencial da superfície e os sistemas de brisa) e a mesoescala. Com a formação de nuvens de chuva e tempestade ocorrendo durante o final da tarde nas regiões próximo a litoral e se propagando para dentro do continente por algumas centenas de quilômetros, durando apenas algumas horas (Barros e Oyama, 2010; Souza et al., 2017; Germano e Oyama, 2020).

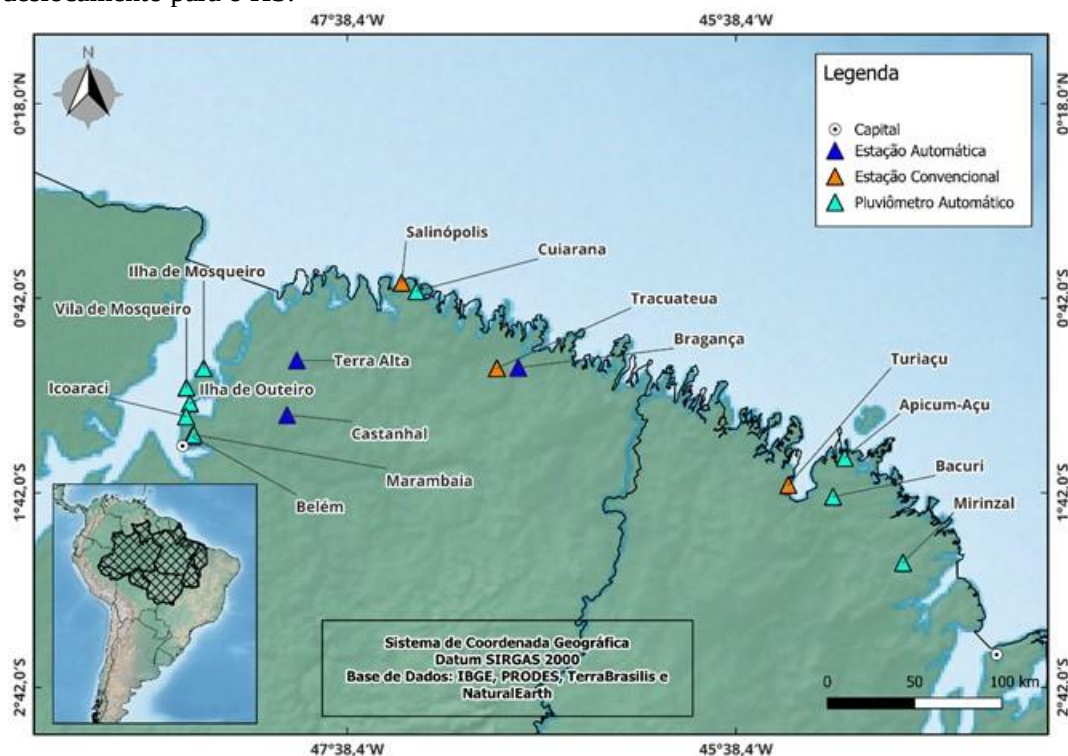


Figura 1 - Localização da área de estudo, correspondente ao nordeste paraense e parte do Maranhão, com destaque para as capitais (Belém e São Luís) que são destacadas ao longo do trabalho.

Dados

O evento analisado ocorreu entre os dias 28 e 31 de maio de 2022, e para auxiliar no diagnóstico das características do sistema foi utilizado dados de reanálise, dados observacionais (estação meteorológica convencional) e sensoriamento remoto (CMORPH).

Os dados de reanálise são provenientes do *European Centre of Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* e da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, cuja funcionalidade dos conjuntos consiste em uma

combinação de dados de modelos com observações feitas em todo o globo, por meio de assimilação de dados (Hersbach et al., 2020).

Com uma resolução de 0.25° eles possuem 37 níveis de pressão, disponível na escala diária.

O produto de precipitação do *Climate Prediction Center Morphing Method (CMORPH)* são provenientes da NOAA, que faz uso do sensoriamento remoto (satélites) para estimar a precipitação em escala horária no canal de micro-ondas. Os resultados deste produto são gerados através da combinação de informações dos

sensores infravermelho, micro-onda e interpolação de pluviômetros em superfície (Joyce et al., 2004).

Além do CMORPH, foram analisadas séries de precipitação observadas, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a fim de verificar possíveis impactos ocasionados nas regiões onde o DOL atuou.

Metodologia

Para a obtenção dos resultados desta pesquisa, fez-se necessária uma análise das componentes horizontais do vento (u , v /m. s⁻¹), vorticidade relativa (s^{-1}), radiação de onda longa (ROL/w.m-2), anomalia da temperatura da superfície do mar (aTSM/°C) e a precipitação pluviométrica (PRP/mm).

As características termodinâmicas dos oceanos durante o período de ocorrência de DOL servem como indicadores, que mostram o quão favorável podem estar as condições atmosféricas associada à disponibilidade de calor latente dos oceanos adjacentes (Huang et al. 2021). Diante disso, o campo da aTSM foi analisado em duas escalas temporais distintas, e em virtude das interações oceano-atmosfera, foram averiguadas as condições do Pacífico e do Atlântico tropical. A principal consequência do aquecimento (resfriamento) anômalo das águas oceânicas é a modificação dos padrões de circulação atmosférica no escoamento básico, que afetam o regime de precipitação em grande escala sobre a região amazônica (Ambrizzi, 2003; Schöngart; Junk, 2020).

Foram plotados os campos horizontais das variáveis e parâmetros destacados anteriormente para os dias em que o DOL atingiu a costa da Amazônia Oriental. Além de utilizar o diagrama de Hovmoller, onde foi observado relação longitude x tempo, fazendo uma média entre as latitudes 3° S e 0°. Assim, foi possível constatar a propagação da perturbação ondulatória, desde o Atlântico até a região continental.

A vorticidade relativa utilizada neste estudo é um parâmetro relacionado à medida de rotação do vento horizontal em torno de um eixo vertical, em relação a um ponto fixo da superfície terrestre. Sendo possível associar as condições de tempo a partir do seu sinal, que no HS distingue-se entre o sinal positivo associado ao movimento anti-ciclônico (alta pressão) e o sinal negativo relacionado ao movimento ciclônico (baixa pressão). A vorticidade relativa é calculada usando

a componente horizontal do vento, meridional (u) e zonal (v), a partir da seguinte equação:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

A fim de destacar melhor o sinal da vorticidade relativa na região ciclônica, em alguns campos foram delimitados apenas os valores negativos no nível de 850 hPa, associados ao fluxo do vento em 700 hPa.

Com os dados de precipitação foram plotados campos e gráficos com os acumulados diários, tanto espacial quanto pontual, como meio de se observar as implicações associadas à passagem do sistema sinótico na região. Portanto, esta variável auxilia na averiguação de todos os processos dinâmicos e termodinâmicos que interagiram e deram suporte ao DOL. Como forma de averiguar variabilidade da precipitação em relação à média mensal, foi feita a anomalia a partir dos acumulados no ano de 2022 e a climatologia (1991-2020) disponibilizada pelo INMET.

Com a finalidade de descartar a influência direta da ZCIT na geração da instabilidade atmosférica e do acumulado de precipitação durante o período, fez-se o uso dos diagnósticos do posicionamento semanal do seu eixo, por meio da média de cinco dias (pêntadas), que são fornecidas pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

Resultados e discussão

A Figura 2 destaca os padrões de TSM dos dois oceanos, que banham a América do Sul, e o fluxo dos ventos em 700 hPa onde foram enfatizadas as anomalias mensal e semanal em maio de 2022. Durante este período (Figura 2A), as condições do Pacífico configuraram-se com valores negativos de aTSM, indicando a presença da fase fria do El Niño Oscilação Sul (ENOS) – conhecida como La Niña – no decorrer da propagação do DOL e que persiste desde a primavera de 2020 (Hasan et al., 2022).

A configuração de La Niña causou um resfriamento mais intenso na costa oeste da América do Sul, região de ressurgência de águas frias e profundas, e menos fria na porção central da bacia. Essa condição dinâmica é favorável ao aumento da precipitação na Amazônia devido ao

aumento da intensidade do ramo convectivo da circulação zonal de Walker (Andreoli et al., 2016).

A Figura 2B apontou as águas do Atlântico e Pacífico com fases opostas, em relação ao sinal de aTSM, com o Atlântico mostrando-se mais favorável à liberação de calor latente e desenvolvimento de convecção profunda. De acordo com Nobre et al (2009), o Oceano Atlântico tropical exerce um papel de fonte de umidade persistente sobre a Bacia Amazônica ao longo de todo o ano.

Ficando evidente uma faixa zonal de aquecimento, que se estendeu desde a costa da África até a costa norte do NEB, observou-se na semana do evento. Esse cenário termodinâmico, somado ao escoamento básico de leste, que se estabeleceu entre os dias 24-31 de maio propicia não só o desenvolvimento, como a manutenção de sistemas produtores de precipitação, como o DOL.

As linhas de corrente (700 hPa), indicaram a presença marcante de um cavado invertido próxima ao NEB, sobre a região de águas aquecidas.

Limberger e Silva (2016) afirmam que o Pacífico, por cobrir uma extensa área do planeta, detém um papel extremamente importante como regulador climático global e, as anomalias de temperatura que nele ocorrem geram impactos em diversas áreas do planeta. Entretanto, independente da fase do ENOS no pacífico, a aTSM do Atlântico tropical é identificada como um modulador do regime de precipitação sobre as porções norte e nordeste da Amazônia. Ainda assim, Ambrizzi (2003) reitera que deve haver prudência ao analisar os acumulados anômalos de precipitação durante a estação chuvosa sobre as regiões, citadas no parágrafo anterior, visando somente a TSM do Pacífico tropical.

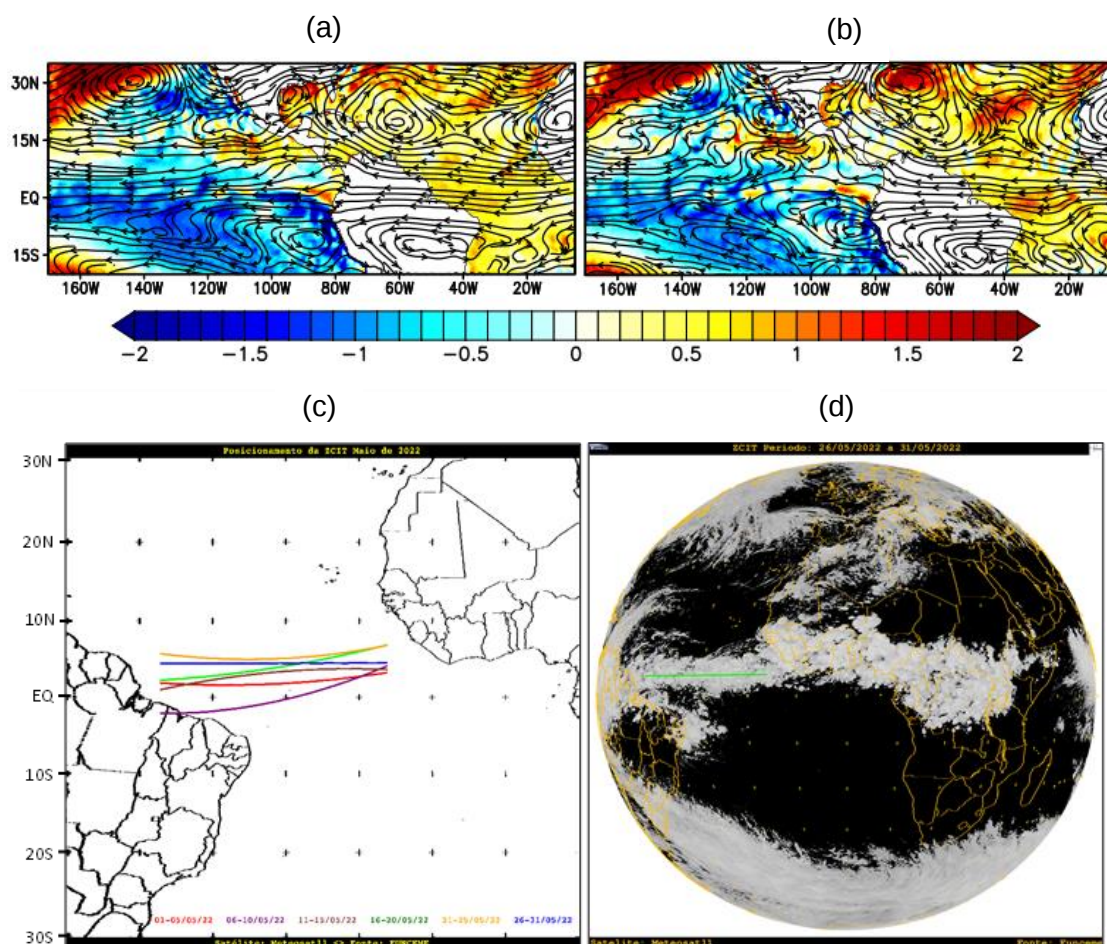


Figura 2 - Anomalia mensal (a) e semanal (b) da Temperatura da Superfície do Mar (°C) nos oceanos adjacentes, Pacífico e Atlântico. Além do monitoramento mensal (c) e semanal (d) da posição da Zona de Convergência Intertropical para o mês de maio de 2022. Vermelho: 1-5/05/2022; Roxo: 6-10/05/2022; Marrom: 11-15/05/2022; Verde: 16-20/05/2022; Amarelo: 21-25/05/2022; Azul: 26-31/05/2022. Fonte de dados: NCEP/NOAA e FUNCEME.

Ribeiro, R. M. R., Vitorino, M. I., Moura, M. N., Sodré, G. R. C.

Coutinho e Fisch (2007) sugerem que esses distúrbios podem estar associados aos episódios do ENOS, propondo que durante os anos de La Niña, ocorram DOLs mais intensos, enquanto nos anos de El Niño, esses DOLs tendem a ser menos severos. Suas pesquisas apontam que, durante os anos de La Niña, a frequência de DOLs é maior, coincidindo com anomalias positivas na precipitação anual na região de Alcântara, MA. Em contraste, durante os anos de El Niño, a frequência de DOLs é menor e se relaciona com anomalias negativas na precipitação anual na mesma área.

Tendo em vista que, as condições termodinâmicas Atlântico dão suporte ao posicionamento do eixo da ZCIT, as pêntadas

(média de 5 dias) indicaram a atuação do eixo (Figura 2C e D), com sua máxima atividade, posicionada sobre a região oceânica com águas mais aquecidas. O período de máximo deslocamento para o sul do equador ocorreu na pêntada 2, entre os dias 06 e 10 de maio, quando o sistema convectivo esteve atuando de forma mais direta nas condições de nebulosidade e precipitação da região norte e nordeste do Brasil. A segunda quinzena do mês já apresentou seu eixo posicionado mais ao norte da linha equatorial, justamente seguindo a declinação solar e o maior aquecimento das águas superficiais do Atlântico equatorial.

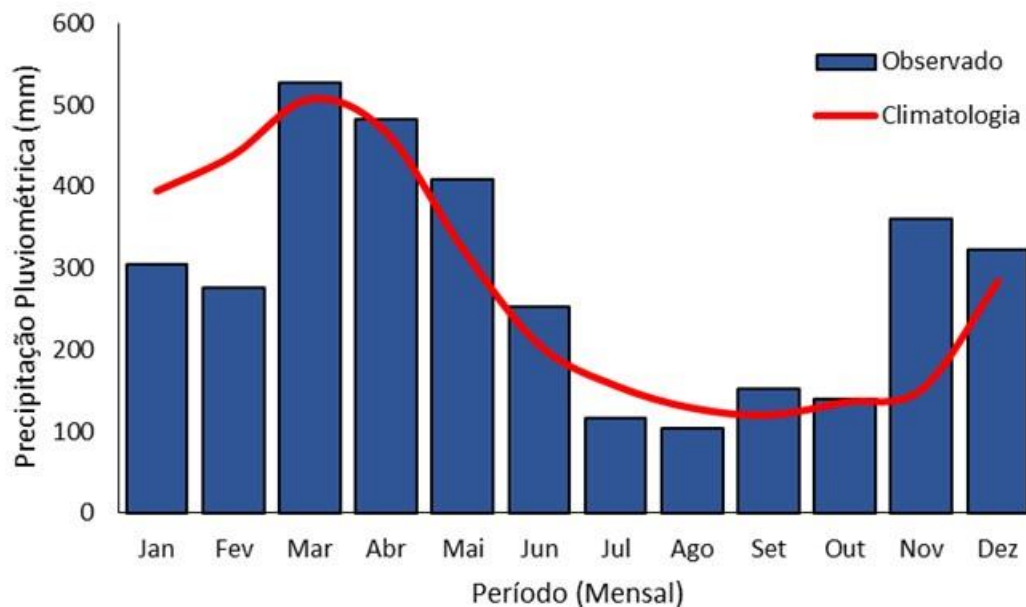


Figura 3 - Acumulado médio mensal de precipitação e o acumulado mensal registrado em 2022. O mês maio apresentou um volume pluviométrico de 408 mm, acima do esperado para o período, com a climatologia em torno de 324 mm.

Desta forma, foi possível descartar a atuação direta da ZCIT sobre a costa da Amazônia durante a semana em que ocorreu a passagem do distúrbio. A pêntada que corresponde ao período de 26-31/05 (Figura 2D) mostrou o eixo acima da linha do equador, entre as latitudes 3°N e 6°N. A região esteve sob influência direta da ZCIT na segunda semana de maio, quando partes seu eixo encontrara-se posicionado sobre o nordeste e norte

do Brasil. Em concordância com a climatologia da região (INMET), os condicionantes meteorológicos ligados a precipitação pluviométrica na costa amazônica apresentam deixam de ter uma ligação direta com os sistemas sinóticos de escala global (ZCIT), e passam a ter uma predominância e até interação de escala entre os fenômenos de mesoescala (LI e SCMC) e o DOL (sinótico).

Os resultados observados pelos acumulados de precipitação, em Belém, para maio de 2022 sugerem que, além da atuação direta da ZICT durante um período do mês, houve a modulação por meio do próprio DOL, associado às condicionantes climáticas que se configuravam no Pacífico e Atlântico equatorial. O acumulado esperado para maio, na região, de acordo com a normal climatológica do INMET é de aproximadamente 324 mm (Figura 3). Entretanto, o observado neste intervalo mostra um volume superior ao climatológico, com 408 mm.

Os valores acima do normal podem ser explicados pelas mudanças na intensidade do ramo subsidente da célula zonal de Walker, que tem suas características alteradas pelas configurações termodinâmicas nas águas do Pacífico.

Este resultado corrobora com as conclusões de Limberger e Silva (2016), no qual destacaram as variabilidades no regime de chuva da região amazônica associada aos padrões de TSM do Pacífico e do Atlântico.

Segundo o INMET, Belém registrou no dia 31/05 um acumulado de 62 mm de precipitação e consequências ambientais devido ao grande volume de chuvas recebido, como alagamento de vias, transbordamento de canais e queda de árvores, principalmente durante a noite e início da madrugada, de acordo com os dados da estação convencional (Figura 4). Os dados de sensoriamento remoto confirmam a magnitude do evento através dos acumulados diários de precipitação.

Analisando a sequência de imagens de satélite durante os dias 28, 29, 30 e 31 (Figura 5), em que houve a entrada do sistema convectivo sobre a região, foi possível observar a evolução da nebulosidade que se propagou desde o Atlântico, na costa do norte do NEB, até chegar à costa da Amazônia.

As imagens do GOES-16, no canal do infravermelho ($13\ \mu\text{m}$), mostram que durante o dia 28/05 a nebulosidade apresentou configuração horizontal, com nuvens do tipo estratiforme que fazem com que o tempo fique instável, com céu nublado, mas sem provocar chuvas intensas. Este padrão permaneceu assim desde a noite do dia

27/05 até às 03 UTC do dia 28. A partir das 09 UTC do dia 28, um pequeno centro de convecção começa a se formar ao norte do equador, com topo de nuvem cada vez mais frio, variando de -30 a $-60\ ^\circ\text{C}$, caracterizando-se como nuvens de grande desenvolvimento vertical.

De modo paralelo, os campos de linha de corrente (Figura 6) mostraram coerência do comportamento do vento em relação às imagens de satélite, com escoamento em 700 hPa. Notou-se a presença de um cavado invertido deslocando-se para próximo da região costeira do NEB, acompanhado de vorticidade negativa em sua região de atuação deixando a perturbação no fluxo mais evidente. Em relação ao cavado invertido, foi possível observar a onda de baixa amplitude alcançando a costa leste do NEB, próximo aos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Logo ao alcançar a área continental ocorre uma fragmentação, e o eixo do DOL mais a norte segue o fluxo dos ventos de leste, aproximando-se ao norte do Piauí, às 21 UTC.

A acentuada instabilidade associada à propagação do cavado é notável nas imagens do dia 29/05, com o sistema convectivo expandindo-se e seu topo ficando cada vez mais frio. Ao longo deste mesmo dia o sistema aproximou-se mais do continente, com a nebulosidade associada alcançando o norte do Maranhão. As condições dinâmicas observadas nos demais campos indicam o favorecimento da instabilidade e convecção ao longo do litoral norte do NEB, com o deslocamento para oeste persistindo e alcançando a costa da Amazônia oriental. Sobre a capital paraense, observou-se que às 18 UTC as condições termodinâmicas indicavam início de tempo instável, com a confluência do vento e a vorticidade negativa dando o suporte para esta afirmação. Um condicionante para esta instabilidade se deve principalmente à brisa marítima, que ocorre durante este período do dia, com magnitude acentuada pelo escoamento dos alísios, impactando na circulação local, conforme mostrou Germano et al. (2017).

O sistema embebido no fluxo dos alísios apresentou um aumento na magnitude da convecção ao se aproximar da costa amazônica,

mesmo sobre a superfície marítima, como observado durante o dia 30/05. A disponibilidade de calor, transferido da superfície oceânica para a atmosfera, corroborou para o aumento da amplitude da onda tornando-a mais visível

Chan (1990), por meio de estudo de alguns casos de ondas de lestes equatoriais destacou que os ventos de leste, associados a grandes concentrações de umidade e a intensa atividade convectiva apresentam um importante papel para o suporte de energia da atmosfera tropical.

Observou-se que este distúrbio no escoamento dos alísios sobre a Amazônia apresentou uma característica dissonante à ocorrência na costa leste do NEB. A primeira característica notável é no padrão de nebulosidade associada ao sistema convectivo quando alcançou a costa, no qual a imagem de satélite quando comparada a ocorrência paralela de DOL na costa do Pernambuco, as nuvens mostraram-se mais densas e desenvolvidas verticalmente, acarretando num volume expressivo de precipitação e levando a ocorrência de desastres nas áreas urbanas (Neves et al., 2015; Gomes et al., 2015, 2019).

Sodré e Souza Filho (2010) afirmam que, a convecção tropical é essencialmente controlada – intensificada ou inibida – pela circulação geral da atmosfera, em razão do aquecimento diferencial da superfície planetária, da topografia e da cobertura vegetal.

As condições topográficas das duas regiões são bem diferentes, enquanto o NEB possui

disposições de chapadas e picos rochosos, que contribuem para inibir o deslocamento da nebulosidade para dentro do continente, atuando como uma barreira que retém toda umidade na região. Por outro lado, a região da Amazônia oriental apresenta uma superfície mais plana (Gomes, 2019). Desta forma, a propagação do sistema para o interior do continente é mais fácil, ainda com o suporte dos alísios.

As Figuras 5 e 6 mostram que nos dias 30 e 31 de maio de 2022, o sistema precipitante chega à capital paraense, com intenso aglomerado convectivo, acompanhado de acentuada vortacidade negativa e nítido distúrbio no escoamento básico de leste. A maior atividade convectiva aconteceu às 00UTC, com intensa nebulosidade sobre o nordeste paraense e região metropolitana de Belém, com desenvolvimento de nuvens profundas com grande potencial de tempestade, como mostra a imagem de satélite do canal infravermelho realçado.

Foi possível observar, que no campo das linhas de corrente no dia 31/05, às 18 UTC, houve a passagem de um cavado invertido de baixa amplitude sobre o nordeste e leste do Pará (Figura 6), em paralelo, o primeiro centro de associado ao DOL já se encontrava deslocado mais para leste – sobre o Baixo Amazonas. As imagens de satélite, para o mesmo dia, mostraram a forte presença de aglomerados convectivos com topos frios. Indicando assim uma extensa área de instabilidade, que se formou ao longo da tarde e perdurou a noite.

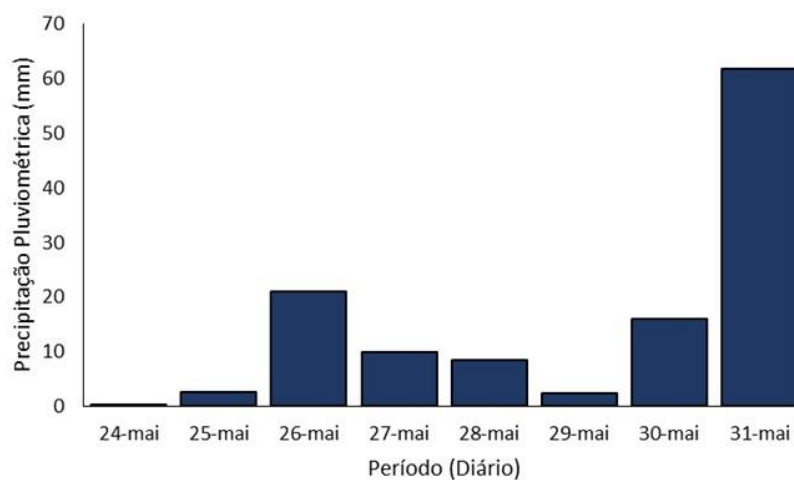


Figura 4 – Acumulado diário de precipitação observado durante a semana do evento na capital paraense, com destaque para o dia 31/05 com o maior acumulado. Fonte: adaptado INMET (2023)

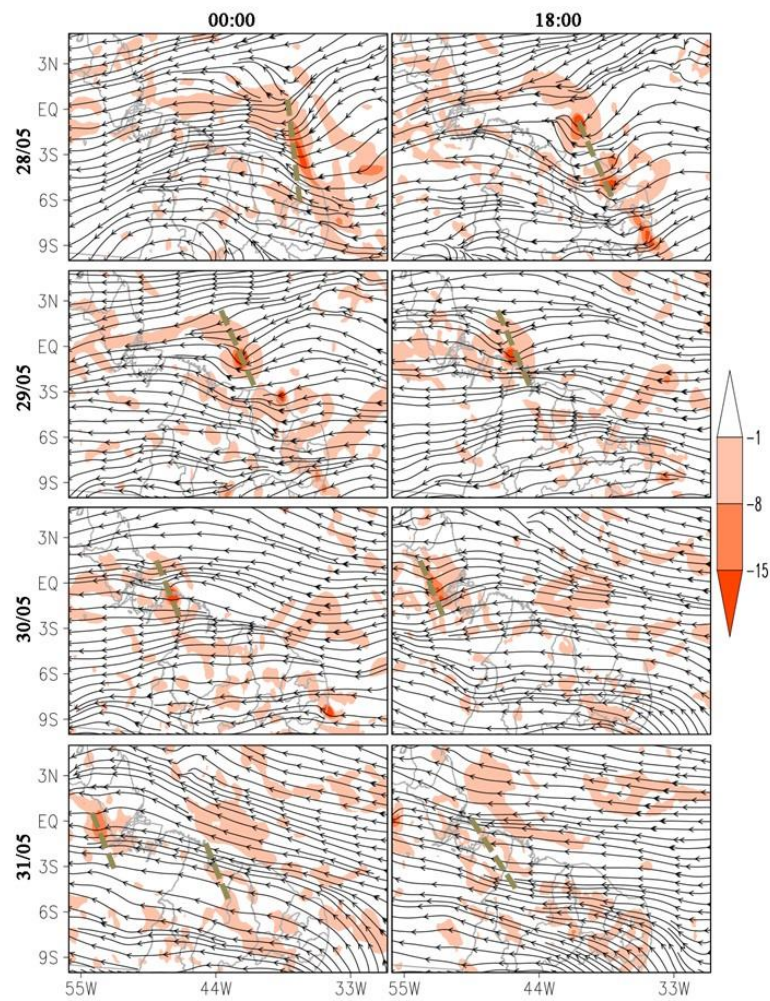


Figura 5 - Conjunto de imagens de satélite (GOES-16) no canal infravermelho com a representação da temperatura do topo de nuvem (°C) para o período de 28 a 30 de maio de 2022, com os círculos vermelhos indicando a nebulosidade associada ao sistema convectivo e seu deslocamento para o continente. Fonte: adaptado de CPTEC (2023).

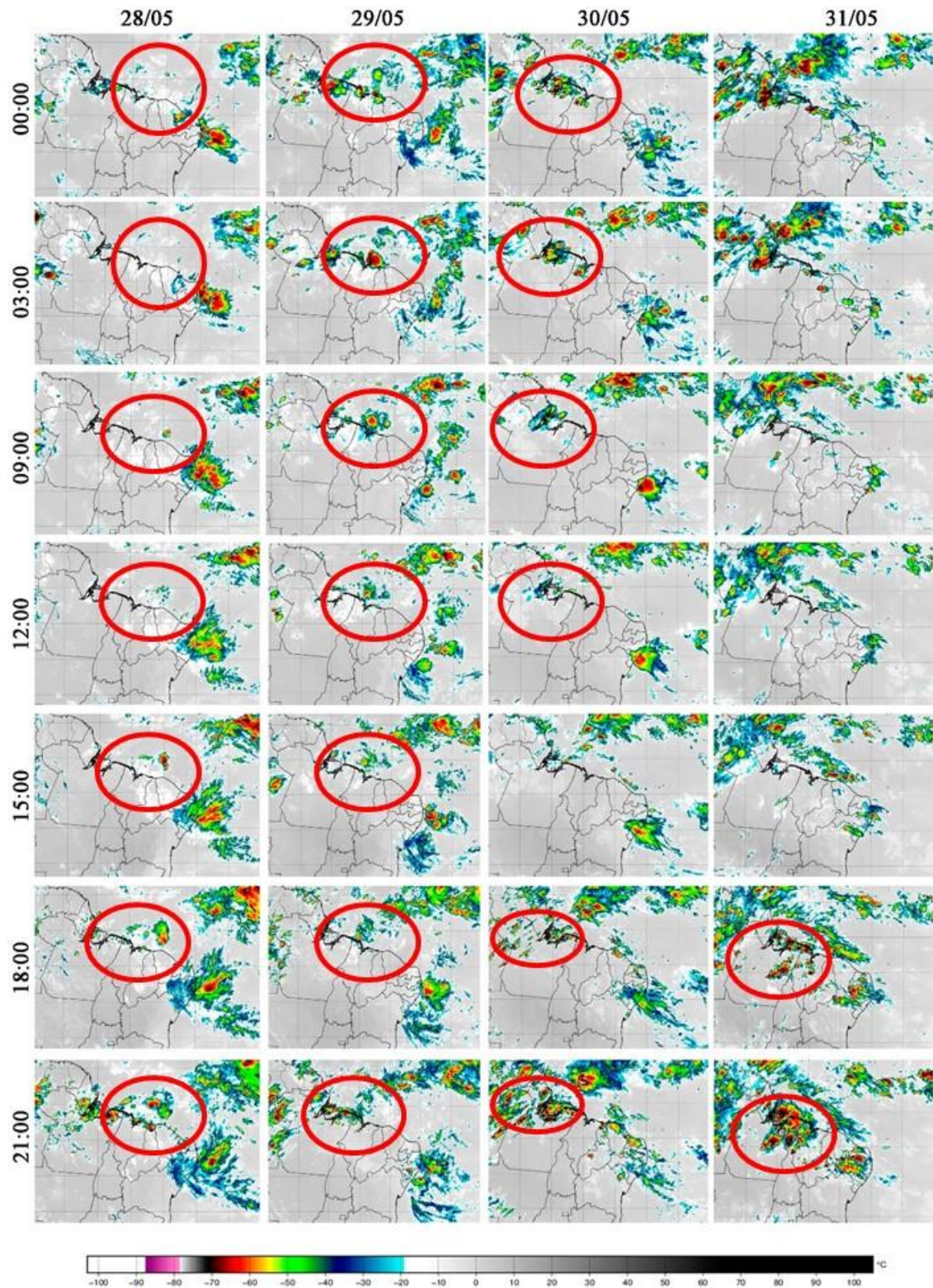


Figura 6 - Componentes horizontal do vento (linhas de corrente) em 700 hPa e vorticidade negativa (preenchimento) em 850 hPa, do dia 27/05/2022 ao dia 30/05/2022, às 00 UTC e 18 UTC. A linhas cinzas tracejadas indicam a posição do eixo do DOL, a fim de caracterizar o seu deslocamento ao longo destes dias.

O campo de vorticidade relativa (Figuras 7A e 7B) foi analisado nos níveis de 850 e 700 hPa, a fim de associados ao movimento ciclônico (baixa pressão). Ao longo dos dias em que antecederam a passagem do DOL verificou-se identificarmos a direção do movimento do vento. Os valores negativos de vorticidade, no Hemisfério Sul, estão que entre na faixa de longitude entre 44 e 48W, onde fica localizada a cidade de Belém, os padrões de vorticidade, em ambos os níveis apresentam um valor negativo, variando de -5 e -15, o que mostra a presença do sistema sinótico.

As condições dinâmicas da atmosfera durante os dias apresentaram um favorecimento para a condição de instabilidade associada ao DOL. Foi possível notar no *Hovmöller* para vorticidade durante esse período, principalmente entre os dias 28 e 30, fortes valores negativos de vorticidade. Indiciando assim, que a presença de movimento ciclônico na região onde encontrava-se posicionado o eixo do sistema convectivo.

Desta forma, a variabilidade apresentada segue o mesmo padrão já abordado em literatura anteriores, como foi descrito por Coutinho e Fisch (2007), no qual eles dissociaram quatro regiões distintas no DOL, como: (1) Um setor a oeste, de crista, associada ao bom tempo, fluxo divergente em superfície, subsidência e nebulosidade do tipo Cumulus de bom tempo; (2) próximo ao cavado, a região apresenta nebulosidades cumuliformes em desenvolvimento com presença de precipitação esparsa; (3) no eixo do cavado, há presença de Cumulus congestus, Cirrus e Altocumulus, além de chuvas frequentes; (4) a leste do cavado o tempo torna-se mais instável, com fluxo convergente, forte ascensão do ar, nuvens do tipo Cumulonimbus e precipitação com intensidade variando de moderada a forte.

A componente meridional do vento auxiliou na observação da variação do fluxo nos momentos que antecederam a passagem do DOL. Adotando os critérios de Riehl (1954) e Hall (1989), no qual observa-se que antes da passagem do eixo do

sistema, a componente é positiva (sul) e após a passagem, torna-se negativa (norte), e sob o mesmo ponto de vista, constatou-se a mesma mudança de sinal da componente horizontal. Na Figura 7C, durante o dia 28/05, quando o sistema se encontrava mais a leste, a predominância era da fase negativa da componente, indicando o domínio do escoamento dos alísios de nordeste. Durante estes dias, próximo as longitudes 48° W e 44° W, observou-se um enfraquecimento da componente, tornando-a positiva na metade do dia 29, seguindo assim até o final de maio.

A radiação de onda longa (Figura 7D), que tem como papel indicar a presença e/ou ausência de nuvens convectiva, nos permite acompanhar a propagação da convecção para oeste (Liebmann et al., 1998; Machado et al., 2022). Desta forma, foi observado o deslocamento da convecção para oeste, durante este período, corroborando com a entrada do distúrbio sobre a costa da Amazônia. Esse padrão é perceptível pela presença de valores de ROL inferiores a 240 w/m², entre a longitude que abrange desde o Atlântico Sul, mais próximo da costa africana, até chegar ao NEB. No final do dia 28 os valores de ROL apresentaram uma tendência de diminuição da sua magnitude, levando a afirmar que a condições de nebulosidade estavam se acentuando à medida que o eixo do DOL se aproximava.

A Figura 8 mostra o campo de precipitação e de ROL durante os dias 28, 29 e 30/05 compreendendo o período da entrada e passagem do DOL sobre a região. Assim, seu deslocamento é observado de modo mais perceptível através de ambas os parâmetros ao longo dos desses dias.

Durante o dia 28/05, identificou-se uma área de instabilidade e centros de convecção associados ao acumulado de precipitação e ao ROL. Com seu centro sendo caracterizado por acumulados acima de 50 mm, e de maneira menos caracterizada, o centro de convecção é mostrado sobre a região, acima do oceano.

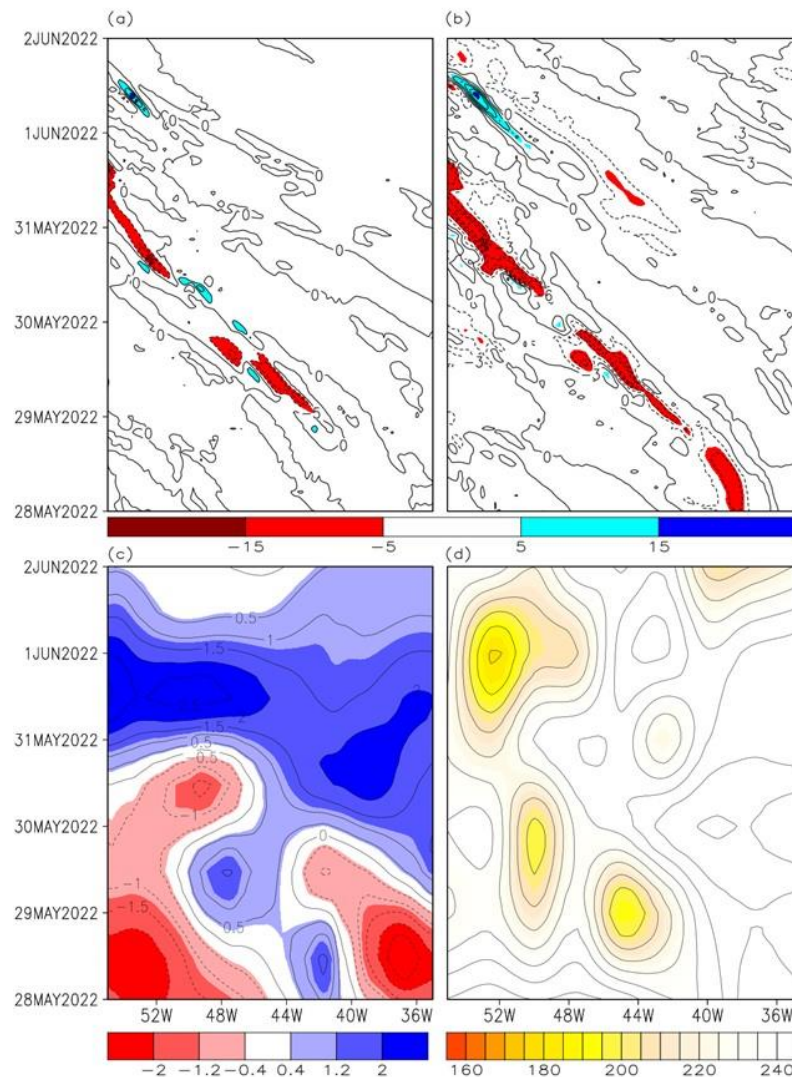


Figura 7 - Diagramas de Hovmöller nas latitudes 3° S e 0°, da vorticidade relativa (m.s^{-1}) em 700 hPa (a), 850 hPa (b), da componente meridional (m/s) em 700 hPa (c) e da radiação de onda longa (w/m^2) (d).

No dia 29/05, o centro de instabilidade associado ao eixo da perturbação deslocou-se para próximo da área continental, mais precisamente na costa norte do Maranhão, levando a um acumulado expressivo de precipitação, variando de 50 a 100 mm. A propagação da instabilidade mais a oeste foi observada, com o ROL caracterizando o posicionamento deste centro, com magnitude abaixo de 180 w/m^2 , com sua variação abrangendo boa parte do litoral da Amazônia Oriental. A região metropolitana de Belém (RMB) ficou sob efeito da instabilidade do DOL entre a noite do dia 29 e perdurou ao longo do dia 30/05.

Durante o dia 30/05 os acumulados de precipitação e a convecção mostrada no campo de ROL, encontravam-se mais deslocado para dentro

do continente, sobre a região do Marajó. Assim, em associação as linhas de corrente (Figura 5) durante o dia 30/05, nota-se que o eixo do cavado, relacionado a primeira onda do DOL, afetou regiões próximas a Belém, contribuindo para instabilidade e formação de chuva, variando de 30 a 60 mm.

Com a presença de um segundo cavado invertido, durante o dia 31/05, as áreas de instabilidades ficaram ainda maiores, em relação ao dia anteriores, sendo observado que, mesmo não havendo um cavado invertido de forte amplitude, as consequências decorrente da instabilidade gerada durante este dia, podem ser atreladas a fenômenos da mesoescala com suportes sinóticos de um segundo cavado invertido de baixa amplitude,

observado na Figura 5. Portanto, a fomentação da instabilidade ao final do dia 31/05, como mostram as imagens de satélite e as linhas de corrente, podem ser associadas às interações de sistema da escala sinótica e da mesoescala, que contribuíram para alto volume de precipitação que foi registrado pela estação do INMET, em Belém.

No dia 31 de maio, durante o final da tarde, os impactos na grande Belém foram sentidos. O resultado das interações dos fenômenos refletiu em grande volume pluviométrico na região. Como exemplo dos impactos em Belém, destacam-se alagamento de vias e transbordamento de canais, principalmente durante o final da tarde e início da noite.

O volume de precipitação que caiu durante o dia 31 de maio, na cidade de Belém, representou aproximadamente 20% do total para o mês de maio de 2022. Mostrando assim, que o DOL, além de alcançar a região do litoral da Amazônia Oriental, exercer uma contribuição significativa nos acumulados de precipitação.

Diante disso, mostrando a necessidade de aprimoramento de mais estudos para a região, a fim de aprimorar o monitoramento por parte dos centros operacionais de meteorologia na identificação do DOL, visando a mitigação dos impactos.

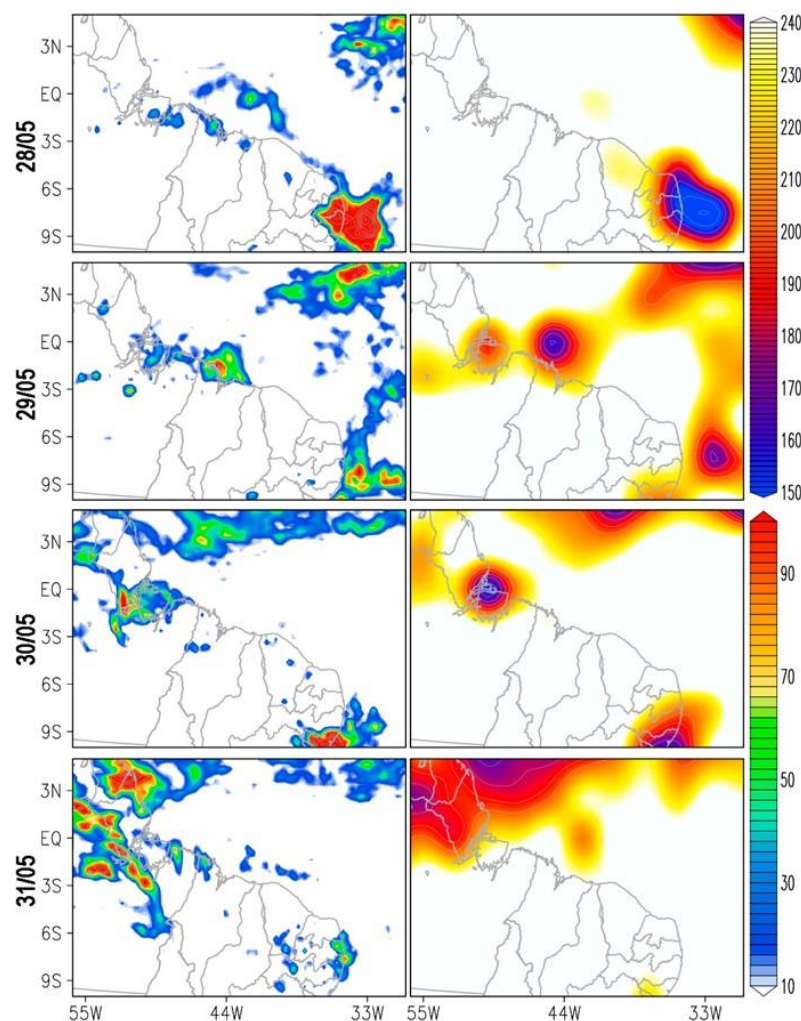


Figura 8 - Campos médios diários de precipitação (mm/dia) e radiação de onda longa (w/m^2) para os dias 28, 29 e 30 de maio de 2022. Em complemento as outras figuras, estes dois campos servem como importantes indicadores para se observar o deslocamento do centro de instabilidade associado ao DOL, com o ROL mostrando indicando a presença de nebulosidade com desenvolvimento vertical expressivo ($< 180 w/m^2$) e seu deslocamento para próximo de Belén, enquanto a precipitação nos mostra o resultado de todo o processo dinâmico e termodinâmico ocorrido neste período.

Conclusões

Com o objetivo investigar as características associadas a um episódio de DOL, que alcançou a costa da Amazônia Oriental e sua interação com outros sistemas meteorológicos geradores de precipitação, bem como mecanismos climáticos de diferentes escalas, durante o dia 28 e 31 de maio de 2022.

Na costa amazônica, o DOL possui características diferentes dos que chegam à costa do NEB, com os acumulados de precipitação, espacialmente, evidenciando esta peculiaridade. Esse aspecto é atribuído principalmente às disposições topográficas, que são distintas em ambas as regiões.

Embora pouco evidenciado na literatura, os resultados desta pesquisa mostram que o DOL tem potencial de alcançar a Amazônia e desencadear um evento extremo de tempo com sérias consequências ambientais e sociais, muito comum nas grandes cidades brasileiras.

As condições oceânicas do Atlântico contribuíram para a propagação do DOL, desde a costa oeste da África, com a bacia do equatorial apresentando na semana do evento um aquecimento anômalo superior a 1 °C. Assim, as condições favoráveis a convecção foi observada ao longo do período, com as linhas de corrente exibindo um padrão de cavado invertido, que está associado ao eixo do DOL, cuja caracterização fica fortemente evidenciada quando há aproximação das perturbações no escoamento de leste junto a costa.

Interações com outros sistemas precipitantes de diferentes escalas são fundamentais para o desenvolvimento e manutenção do sistema, o que pode promover, em alguns casos, a penetração do sistema para o continente, atingindo outras partes do estado do Pará, como Ilha do Marajó e uma porção da região do Baixo Amazonas.

A magnitude de eventos extremos de tempo associada à falta de infraestrutura do espaço urbano e má gestão pública, constitui-se um importante ingrediente para catástrofes urbanas

que acontecem todos os anos e em todas as regiões do Brasil. Pesquisas inéditas como esta têm o papel de alertar para a necessidade de expansão da rede de monitoramento, prevenção e alerta de desastres naturais, seja pelo poder público ou pela iniciativa privada.

Referências

- Amaral, D. D. D., Prost, M. T., Bastos, M. D. N. D. C., Neto, S. V. C., & Santos, J. U. M. D. 2008. Restingas do litoral amazônico, estados do Pará e Amapá, Brasil. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciências Naturais.
- Ambrizzi, T. 2003. El niño/oscilações sul e teleconexões atmosféricas no hemisfério austral (Tese de Livre Docência). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Andreoli, R. V., de Oliveira, S. S., Kayano, M. T., Viegas, J., de Souza, R. A. F., & Candido, L. A. 2017. The influence of different El Niño types on South American rainfall. *International Journal of Climatology*, 37(3), 1374-1390. <https://doi.org/10.1002/joc.4783>
- Asnani, G. C. 1993. Tropical Meteorology, vols. 1 and 2, 1012 pp. Indian Inst. of Trop. Meteorol., Pashan.
- Asnani, G. C. 2005. Tropical meteorology (revised edition). Indian Institute of Tropical Meteorology, Pune.
- Cohen, J. C., Silva Dias, M. A., & Nobre, C. A. 1995. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. *Monthly Weather Review*, 123(11), 3163-3174. [https://doi.org/10.1175/1520493\(1995\)123<3163:ECAWAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520493(1995)123<3163:ECAWAS>2.0.CO;2)
- Coutinho, E. D. C., & Fisch, G. 2007. Distúrbios ondulatórios de leste (DOLs) na região do Centro de Lançamento de Alcântara-MA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 22, 193-203. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862007000200005>
- Chan, Chou Sin. 1990. Análise de distúrbios ondulatórios de leste sobre o oceano atlântico equatorial sul (Tese de Doutorado). INPE-5222-TDL/437.
- De Lima, Antônia Fabiana Barros, et al. 2022. Aportes Teóricos sobre a Influência dos Fenômenos Atmosféricos na Precipitação do Estado do Acre e o Uso de Índice para Avaliação da Chuva. UÁQUIRI-Revista do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Acre, 4(1).

- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme.br). (Data de publicação não fornecida). Funceme. Disponível em: http://www.funceme.br/?page_id=2721.
- Germano, Michell Fontenelle, et al. 2017. Analysis of the breeze circulations in Eastern Amazon: an observational study. *Atmospheric Science Letters*, 18(2), 67-75.
- Germano, Michell Fontenelle, & Oyama, Marcos Daisuke. 2020. Local circulation features in the eastern Amazon: high-resolution simulation. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 12.
- Gomes, Helber Barros, et al. 2015. Easterly wave disturbances over Northeast Brazil: an observational analysis. *Advances in Meteorology*, 2015, 1-20.
- Gomes, Helber B., et al. 2019. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. *Climate Dynamics*, 53, 1393-1411.
- Hall, B. A. 1989. Westward-moving disturbances in the South Atlantic coinciding with heavy rainfall events at Ascension Island. *Meteorological Magazine*, 118(1405), 175-181.
- Hasan, Nahid A., Chikamoto, Yoshimitsu, & McPhaden, Michael J. 2022. The influence of tropical basin interactions on the 2020–2022 double-dip La Niña. *Frontiers in Climate*, 4, 1001174.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Huang, Boyin, et al. 202). Improvements of the daily optimum interpolation sea surface temperature (DOISST) version 2.1. *Journal of Climate*, 34(8), 2923-2939.
- Kouadio, Yves K., et al. 2012. Heavy rainfall episodes in the eastern northeast Brazil linked to large-scale ocean-atmosphere conditions in the tropical Atlantic. *Advances in Meteorology*, 2012.
- Liebmann, Brant, et al. 1998. A comparison of rainfall, outgoing longwave radiation, and divergence over the Amazon Basin. *Journal of Climate*, 11(11), 2898-2909.
- Limberger, Leila, & Silva, Maria Elisa Siqueira. 2016. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, 20(3), 657-675.
- Machado, Luiz Augusto Toledo, Ferreira, Nelson de Jesus, Laurent, H., & Diedhiou, Arona. 2022. Distúrbios Ondulatórios de Leste. In: Nelson Ferreira, Iracema Cavalcanti. (Org.). *Sistemas Meteorológicos atuantes no Brasil*. Oficina de textos.
- Neves, Danielson Jorge Delgado, Alcântara, Clênia Rodrigues, & Souza, Enio Pereira de. 2016. Estudo de caso de um distúrbio ondulatório de leste sobre o Estado do Rio Grande do Norte-Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31, 490-505.
- Nobre, Carlos A., et al. 2009. Características do clima amazônico: Aspectos principais. *Amaz. Glob. Chang*, 149-162.
- Reboita, Michelle Simões, et al. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25, 185-204.
- Riehl, Herbert. 1954. *Tropical meteorology*. McGraw-Hill.
- Riehl, Herbert. 1965. *Varying structure of waves in the easterlies* (Tese de Doutorado). Colorado State University. Libraries.
- Schöngart, J., & Junk, W. J. 2020. Clima e hidrologia nas várzeas da Amazônia Central. Em *Várzeas Amazônicas: Desafios para um Manejo Sustentável* (pp. 44-65).
- Silva, A. S. D., Silva, E. M. D., Leal Junior, J. B. V., Sales, D. C., Moura, I. J. M., & Alves, J. M. B. 2021. Distúrbios Ondulatórios de Leste no Nordeste Brasileiro: Um Estudo de Caso Utilizando Modelagem Numérica de Mesoescala. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36, 637-649.
- Silva, B. F. P. D., & Fedorova, N. 2023. “Distúrbios Ondulatórios de Leste” Sobre o Atlântico Tropical Sul: Revisão e Discussão Sobre Terminologia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 38, e38230025.
- Suguio, K., & Tessler, M. G. 1984. Planícies de cordões litorâneos quaternários do Brasil: Origem e nomenclatura. Em L. D. Lacerda, D. S. D. Araujo, R. Cerqueira, & B. Turcq (Eds.), *Restingas: Origem, Estrutura e Processos* (pp. 15-26). CEUFF, Niterói.