

IX Encontro Sul Brasileiro de Meteorologia

Tornados em Ananindeua, Pará: Características visuais e ambientes atmosféricos

Tornadoes in Ananindeua, Pará: Visual characteristics and atmospheric environments

Maurício Iha Oliveira^I, Murilo Machado Lopes^{II}, Daiane Vargas Brondani^{III}
Cléo Quaresma Dias-Júnior^{III}, Lucas Ilha Gandolfi Oliveira^I

^IUniversidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

^{II}National Research Council, Lecce, Italy

^{III}Instituto Federal do Pará, Belém, PA, Brasil

RESUMO

Tornados são intensos vórtices atmosféricos produzidos por tempestades convectivas, capazes de produzir significativos danos sócio-econômicos. No Brasil, tais fenômenos ocorrem mais comumente ao sul de 20°S, em especial, nos estados do sul do país, porém ocasionalmente ocorrem ao norte desta latitude. Nas últimas duas décadas, o número de estudos abordando estes fenômenos no Brasil, em especial nas regiões sul e sudeste do país, têm aumentado gradualmente, parcialmente devido à maior percepção pública e científica do risco de eventos de tornados em vista de um aumento no número de registros de tornados no país, uma provável consequência da maior facilidade em se registrar tais com câmeras em telefones celulares e as redes sociais. Apesar disto, o número de estudos abordando eventos de tornados ao norte de 20°S ainda é pequeno e diversos aspectos destes eventos ainda são poucos documentados. Este estudo documenta a ocorrência de tornados no município de Ananindeua, localizado na região metropolitana de Belém, no estado do Pará, no norte do Brasil. Diversos tornados têm sido registrados no município nos últimos anos e existem indícios de ocorrência de tornados na mesma região nas últimas décadas. Alguns destes tornados apresentam características visuais que diferem da aparência típica de tornados do tipo “landspout”, que são mais comumente registrados em latitudes baixas, e lembram tornados associados a tempestades do tipo supercélula. Ananindeua está localizada próximo a diversos corpos d’água, o que pode, hipoteticamente, influenciar a formação de tornados na região através da produção de vorticidade próximas a regiões de baroclínica ou a zonas de convergência, ambos processos devido a sistemas de brisa. O objetivo principal deste trabalho é documentar e analisar as características visuais e do ambiente atmosférico de diversos eventos de tornados em Ananindeua. Com isto, busca-se, de maneira preliminar, identificar mecanismos que afetam a formação de tornados no município e aprimorar a previsão destes fenômenos na região.

Palavras-chave: Tornados; Ananindeua; Supercélulas; Perfis termodinâmicos; Perfis cinemáticos

ABSTRACT

Tornadoes are intense atmospheric vortices produced by convective storms, capable of producing significant socio-economic damage. In Brazil, such phenomena occur more commonly south of 20°S, especially in the southern states; however, tornadoes occasionally occur north of this latitude. In the last two decades, the number of studies addressing these phenomena in Brazil, especially in the south and southeast regions of the country, has gradually increased, partially due to the greater public and scientific perception of the risk posed by tornado events in view of an increase in the number of tornadoes reports in Brazil, a likely consequence of the greater ease in reporting tornadoes with cell phone cameras and social media. Despite this, the number of studies addressing tornado events north of 20°S is still small and several aspects of these events are still unknown. This study documents the occurrence of tornadoes in the city of Ananindeua, located in metropolitan region of Belém, in the state of Pará, in northern Brazil. Several tornadoes have been reported in the city in recent years and there are indications of occurrence of tornadoes in the same region in recent decades. Some of these tornadoes have visual characteristics that differ from the typical appearance of landspout tornadoes, which are more commonly recorded at low latitudes, and resemble tornadoes associated with supercell thunderstorms. Ananindeua is located near several bodies of water, which can hypothetically influence the formation of tornadoes in the region through the production of vorticity close to baroclinic regions or convergence zones, both processes due to breeze systems. The main objective of this work is to document and analyze the visual characteristics and the atmospheric environment of several tornado events in Ananindeua. Based on this analysis, we seek to preliminarily identify mechanisms that affect the formation of tornadoes in the Ananindeua region and to improve the prediction of these phenomena.

Keywords: Tornadoes; Ananindeua; Supercells; Thermodynamic profiles; Kinematic profiles

1 INTRODUÇÃO

Tornados são intensos vórtices atmosféricos produzidos por tempestades convectivas capazes de produzir danos significativos em superfície. No Brasil a ocorrência de tornados é tipicamente documentada ao sul de 20°S nos estados das regiões sul, sudeste e na porção sul dos estados do centro oeste (Nechet, 2002; Nascimento, 2005; Held *et al.*, 2006; Silva Dias, 2011; Nascimento *et al.*, 2014; Lopes e Nascimento, 2020; Oliveira *et al.*, 2022; Ferreira *et al.*, 2022; Lopes e Nascimento, 2024). A ocorrência de tornados neste setor do país tipicamente é resultado de uma combinação de acentuada instabilidade condicional e intenso cisalhamento vertical do vento em camadas profundas e rasas da atmosfera (dos Santos *et al.*, 2023). Na presença de tais condições, as correntes ascendentes de tempestades convectivas são

capazes de adquirir rotação em médios e baixos níveis na forma de mesociclones, os quais podem produzir tornados ocasionalmente (Klemp, 1987).

Tempestades convectivas locais são fenômenos muito comuns no ambiente quente e úmido do norte do Brasil (Machado *et al.*, 2014). Tipicamente tais tempestades são fracas e de curta duração, ocasionalmente causando danos por intensos volumes de chuva ou vendavais isolados (Tavares e Mota, 2012). Em raras ocasiões, estas tempestades produzem tornados (Nechet, 2002; Antônio, 1997). Nas raras ocasiões em que tais tempestades produzem tornados, estes geralmente são de baixa intensidade e curta duração. Tornados de latitudes baixas acontecem, tipicamente, como resultado de estiramento de vorticidade vertical pré-existente no ambiente por uma corrente ascendente de uma tempestade em desenvolvimento. A fonte desta vorticidade vertical tende a ser alguma zona de convergência em superfície, como frentes de rajadas de tempestades anteriores, frentes de brisa ou convergência induzida por estruturas do terreno (Brady e Szoke, 1989; Wakimoto e Lew, 1993; Bluestein, 2013). Quando estes tornados se formam sobre a água, são chamados de trombas d'água (waterspouts) e, quando se formam sobre a terra, são chamados de trombas terrestres (landspouts) (Brady e Szoke, 1989; Wakimoto e Lew, 1993).

Em anos recentes, tem-se notado a ocorrência de tornados na cidade de Ananindeua, na região metropolitana de Belém do Pará, através de vídeos e relatos de danos. Em alguns vídeos, nota-se que a morfologia visual dos tornados é distinta de tornados do tipo *landpout* que tem comumente a aparência de um estreito e alto tubo de rotação concentrado na base de uma nuvem cumulonimbus ou cumulus congestus; alguns dos tornados observados em Ananindeua se desenvolvem dentro de áreas de rotação na base da tempestade de escala maior que a do tornado as quais se assemelham a circulações de baixos níveis presentes em supercélulas, que são tempestades caracterizadas pela presença de mesociclones (que são circulações da ordem de 1 a 10 km de diâmetro). Tal observação demanda mais atenção, uma vez que tornados supercelulares tipicamente ocorrem em ambientes de latitudes médias

e subtropicais (Bluestein, 2013; Lopes e Nascimento, 2024) ou em mini-supercélulas causadas por ciclones tropicais (McCaul, 1991; Knupp *et al.*, 1998; Zhao *et al.*, 2017), sendo assim tipicamente associados a um mesociclone. A possibilidade de tornados com características supercelulares em latitudes tão baixas como Ananindeua e não associadas a ciclones tropicais, assim, pode indicar algum regime atmosférico especial, possivelmente regido por efeitos locais ou mesmo regimes de escoamento atmosféricos acentuados localmente que permitem a ocorrência de tal fenômeno e ainda não documentados na literatura. Em outras palavras, é necessário averiguar se os ambientes atmosféricos conducentes a estes tornados contêm condições para desenvolvimento de mesociclones nas correntes ascendentes das tempestades ou se a rotação nas tempestades se desenvolveu devido a efeitos locais como, por exemplo, efeitos de brisa, visto que a região de Ananindeua está localizada a diversos corpos d'água (Fig. 1). Este estudo se restringe a investigar o ambiente atmosférico onde alguns tornados se desenvolveram na região de Ananindeua através de sondagens observadas e perfis termodinâmicos e cinemáticos obtidos através de dados de reanálise. Tal análise busca estabelecer hipóteses a fim de estabelecer preliminarmente uma noção básica dos processos físicos que favorecem a ocorrência destes tornados e, assim, pavimentar estudos futuros baseados em modelagem numérica destes eventos.

Este artigo está organizado da seguinte maneira: os dados utilizados e a metodologia empregada são descritos na seção 2. A seção 3 apresenta e discute os resultados, incluindo as principais características visuais dos tornados e os ambientes atmosféricos onde tais tempestades tornádicas se desenvolveram. Conclusões são apresentadas na seção 4.

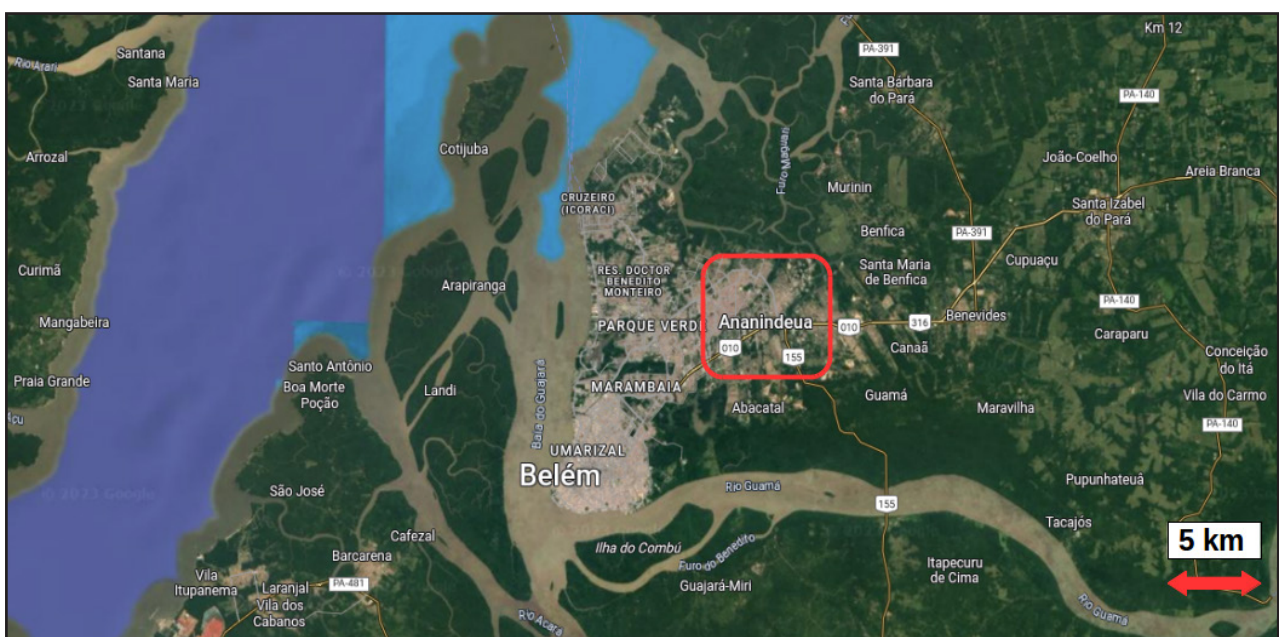
2 DADOS E METODOLOGIA

Foram compilados registros de tornados em Ananindeua nos últimos 25 anos. A maior parte dos eventos se deu em anos recentes (2014-2022) e reportada em vídeos em redes sociais, sendo que o único evento sem vídeo e baseado em danos registrados

em Ananindeua apenas ocorreu em 09/08/1997. Tal observação é condizente com o maior número de registros de tornados no Brasil em anos mais recentes devido ao aumento da disseminação de informação (especialmente na forma de fotografias e vídeos) por meios digitais (Silva Dias, 2011). Os eventos analisados neste estudo são apresentados na Tabela 1.

Para determinar as características observadas dos eventos de tornados, dados de radiossondagens obtidos no aeroporto de Belém, Pará, das 1200 UTC foram utilizados com o intuito de investigar se parâmetros tipicamente associados a tornados supercelulares apresentaram com alguma semelhança e coerência com a ocorrência de tornados deste tipo nos eventos analisados. Os dados de radiossondagens são visualizados utilizando o software *MetPy* (May *et al.*, 2022), o qual também calcula diversos parâmetros convectivos relevantes para previsão de tempestades severas e tornados. Infelizmente, dados de radar meteorológicos estavam ausentes para os eventos estudados de forma que uma análise da morfologia em escala de tempestade das células convectivas que causaram os tornados não foi possível.

Figura 1 – Mapa do nordeste do Pará, identificando a localização de Ananindeua, na região metropolitana de Belém. Mapa obtido a partir do *Google Earth*



Fonte: *Google Earth* (2023)

Por fim, dados horários da reanálise da quinta geração do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ERA5) (Hersbach *et al.*, 2020) foram também analisados com intuito de investigar o ambiente em escala subsinótica ao redor da região de Ananindeua. Dados do ERA5 tem espaçamento horizontal de grade de 0.25° e 37 níveis isobáricos, com níveis a cada 25 hPa entre 1000 e 750 hPa. A partir destes dados, foram plotadas pseudo-sondagens para o ponto de grade mais próximo a Ananindeua. Tais perfis verticais bem como os parâmetros convectivos derivados deles foram também analisados utilizando o *software MetPy*.

Tabela 1 – Lista de eventos de tornados em Ananindeua analisados neste estudo

Data	Fonte
09/08/1997	Nechet, (2002)
24/03/2014	Globo (https://globoplay.globo.com/v/3238472/)
07/03/2018	Youtube (https://www.youtube.com/watch?v=McKLLURPYJYpp=ygUWdG9ybmFkbyBibSBhb mFuaW5kZXVhIA)
02/12/2018	Youtube (https://www.youtube.com/shorts/rjKebzSkC8Y)
18/03/2021	Youtube (https://youtu.be/aHq4QoT-HDw)
25/08/2022	Youtube (https://www.youtube.com/shorts/Gvb3m4UU3rl)

Fonte: Autores (2023)

3 RESULTADOS

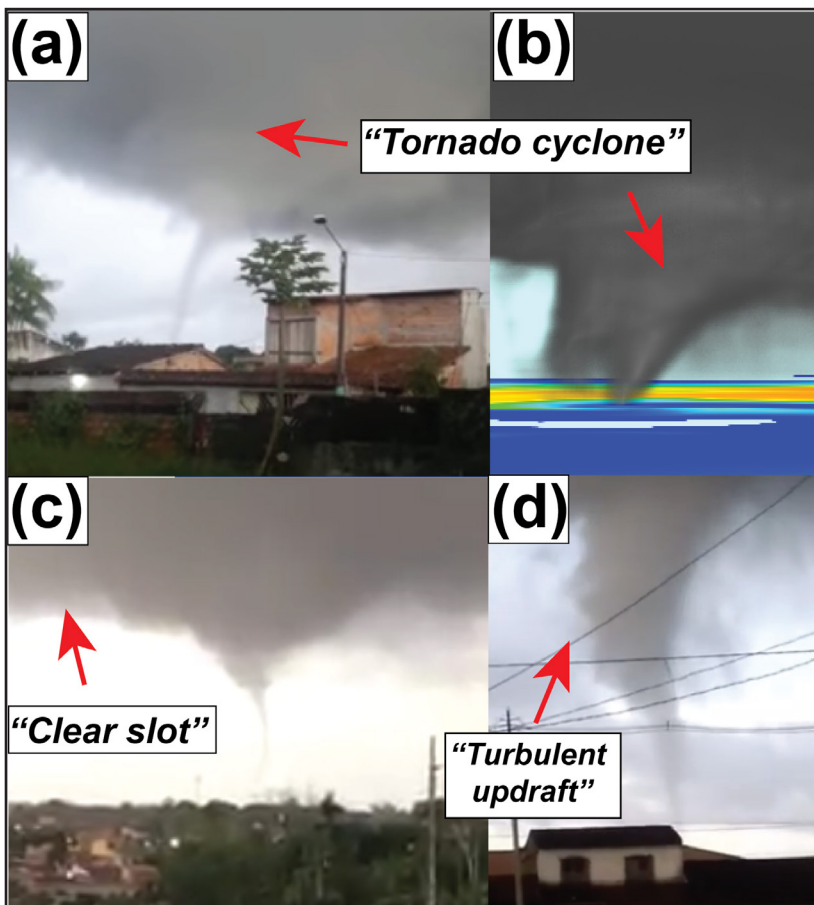
3.1 Observações visuais

Tornados de baixas latitudes, à exceção daqueles que se formam em mini-supercélulas em ciclones tropicais, tendem a se desenvolver a partir do estiramento

de vorticidade vertical pré-existente no ambiente sob uma nuvem convectiva profunda (seja uma torre de convecção cumulus ou uma nuvem cumulonimbus madura). Tais tornados tipicamente apresentam a aparência de um tubo alongado, tipicamente sob uma nuvem convectiva de base alta (Brady e Szoke, 1989; Wakimoto e Lew, 1993; Bluestein, 2013). Por sua vez, tornados provenientes de supercélulas se formam sob um mesociclone de baixos níveis, onde a vorticidade horizontal próxima à superfície é inclinada em torno de um eixo vertical pela corrente ascendente da tempestade; a vorticidade vertical resultante é posteriormente estirada de maneira abrupta (Klemp e Rotunno, 1983; Klemp, 1987; Davies-Jones *et al.*, 2001; Davies-Jones, 2015). Tal processo é geralmente caracterizado por intensas acelerações verticais em direção à base da nuvem (Coffer e Parker, 2017).

Com base na discussão acima e utilizando o tornado de 02/12/2018 como exemplo, algumas estruturas na base da nuvem potencialmente supercelulares são mostradas na Fig. 2. Algumas características semelhantes às aquelas mostradas na Fig. 2 são observadas nos demais tornados com vídeos disponíveis na Tabela 1. Nota-se estruturas de rotação em escalas maiores que a do tornado na base da nuvem (diâmetro > 0.5-2 km). Uma destas estruturas se assemelha a uma *"wall cloud"* possivelmente associada a uma estrutura de rotação intermediária entre o tornado e o mesociclone de baixos níveis, tipicamente denominada *"tornado cyclone"* (Fig. 2a). Para fins de comparação, a Fig. 2b mostra estruturas de base de nuvem de uma simulação numérica de alta resolução de uma supercélula de latitudes médias no Hemisfério Norte (simulada usando 50 m de espaçamento horizontal de grade) do estudo de Oliveira (2021). Nota-se que tanto na tempestade de 02/12/2018 quanto na tempestade simulada, uma circulação de maior escala abrange o topo do tornado, demarcando o *"tornado cyclone"* (Lemon e Doswell III, 1979; Klemp e Rotunno, 1983; Klemp, 1987; Bluestein, 2013). Estruturas como estas comumente denotam a presença de um mesociclone de baixos níveis nas tempestades, o qual se forma a partir da inclinação de vorticidade horizontal em ambientes com acentuado cisalhamento vertical do vento (CVV).

Figura 2 – Tornado de Ananindeua de 02/12/2018. A observação visual do tornado em (a) é comparada com uma simulação de alta resolução (50 m de espaçamento horizontal de grade) da estrutura de nuvem de um tornado supercelular do estudo de Oliveira (2021), mostrada em (b), onde estruturas de base de nuvem possivelmente análogas são mostradas [o vídeo mostrado em (a) encontra-se em <https://www.youtube.com/shorts/rjKebzSkC8Y>]. Em (b) além do campo tridimensional de nuvem mostrado, o campo de refletividade simulada em superfície é exibido. Em (c), a presença de um “clear slot” ao redor do tornado é mostrado. Em (d), resalta-se a estrutura turbulenta do tornado caracterizada por movimento ascendentes intensos (“turbulent updraft”). Os vídeos mostrados em (c) e (d) encontram-se em <https://www.youtube.com/watch?v=nkGfpEO5o-Y>



Fonte: Imagem (a) <https://www.youtube.com/shorts/rjKebzSkC8Y>, imagem (b) a partir de Oliveira *et al.* (2021), (c) e (d) <https://www.youtube.com/watch?v=nkGfpEO5o-Y>

O tornado também apresentou por um breve período um “*clear slot*” ou região de erosão da nuvem, devido a correntes descendentes dinamicamente forçadas pela rotação da tempestade (Fig. 2c). Tal característica tipicamente indica rotação mais intensa na base da tempestade do que em níveis superiores, o que, por sua vez, tende a induzir gradientes verticais de perturbação de pressão que geram as correntes dinamicamente forçadas (Lemon e Doswell III, 1979; Klemp e Rotunno, 1983; Klemp, 1987; Bluestein, 2013). Ademais, outra característica relevante deste tornado de 02/12/2018 diz respeito aos rápidos movimentos ascendentes durante o ciclo de vida do tornado (Fig. 2d), o que é tipicamente notado em correntes ascendentes dinamicamente forçadas de supercélulas. Este tipo de característica foi também nitidamente observada nos eventos tornados de 24/03/2014, 07/03/2018 e 18/03/2021. A ausência de um tubo de condensação e vídeos da base da nuvem no evento de 25/08/2022 não permite a confirmação deste tipo de característica.

3.2 Perfis atmosféricos observados às 1200 UTC

Antes de analisar parâmetros convectivos relevantes para formação de tornados, deve-se ressaltar que os horários de radiossondagens disponíveis, 1200 e 0000 UTC, em geral não são diretamente representativos das condições atmosféricas prevalente durante a ocorrência dos tornados em Ananindeua, os quais ocorreram predominantemente durante a tarde. Em outras palavras, tais perfis não representam o perfil bem misturado da camada limite planetária (CLP) do período da tarde, onde são esperados os maiores valores diários de Energia Potencial Disponível para Convecção para parcela de superfície (*surface-based Convective Available Potential Energy*; SBCAPE) e valores reduzidos de CVV na CLP. Dessa forma, os perfis são investigados aqui de maneira a obter-se uma ideia geral do ambiente atmosférico observado várias antes dos eventos tornádicos.

Em geral, os perfis termodinâmicos analisados às 1200 UTC dos eventos (Fig. 3) (disponíveis para todos eventos, com exceção do evento de 1997) exibem valores de

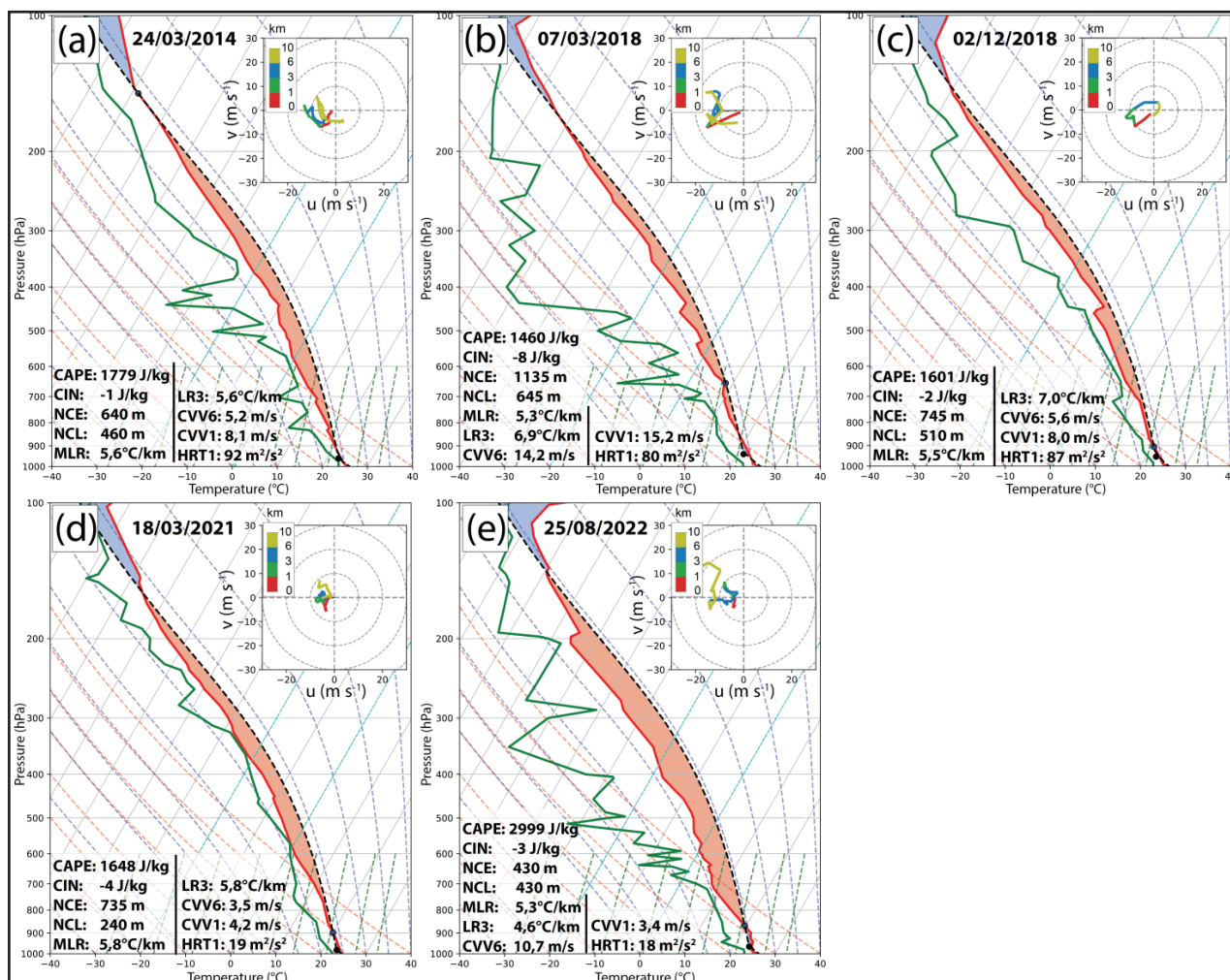
SBCAPE entre 1460 (07/03/2018) e 2999 J kg⁻¹ (25/08/2022), com magnitude de inibição convectiva desprezível (<8 J kg⁻¹) em todos eventos. Associado a tais parâmetros, níveis de convecção espontânea (NCEs) e níveis de condensação por levantamento (NCL) apresentam valores entre 430 e 1135 m e 240 e 510 m, respectivamente. Não surpreendente, valores de *lapse rate* entre 500 e 700 hPa são baixos (<5.8°C km⁻¹). Nota-se, contudo, valores de *lapse rate* entre a superfície e 3 km foram mais expressivos (<5-6°C km⁻¹), sendo mais elevados para os eventos de 02/12/2018 (7°C km⁻¹), 07/03/2018 (<6.9°C km⁻¹) e 24/03/2014 (<6.8°C km⁻¹). Em geral, tais parâmetros convectivos são consistentes com uma atmosfera tropical, caracterizada por altos valores de temperatura e umidade com elevada umidade relativa (UR) na troposfera (>60-85% na camada 0-5 km). Relevante para formação de tornados nesse contexto são os baixos NCLs, NCEs e CAPEs entre 0-3 km; este último parâmetro apresenta valores entre 72 (18/03/2021) e 179 J kg⁻¹ (25/08/2022) devido aos moderados *lapse rates* e alta umidade em baixos níveis.

Com base nos parâmetros termodinâmicos discutidos acima, fica evidente que o ambiente próximo a Ananindeua apresentavam condições para convecção úmida profunda, com moderado potencial para inclinação e estiramento de vórtices na CLP via liberação de instabilidade condicional em baixos níveis (via baixos NCEs, moderados CAPEs e *lapse rates* entre 0-3 km). Baixos NCLs favorecem a ocorrência de correntes descendentes com pequenos déficits de temperatura, os quais, juntamente com a fraca inibição convectiva, facilitam ainda mais o estiramento de vórtices verticais em superfície.

Por sua vez, os perfis cinemáticos analisados às 1200 UTC apresentaram maior dispersão. Em geral, CVV profundo, entre 0-6 km, mostrou valores fracos e moderados, variando entre 3.5 (18/03/2021) e 14.2 m s⁻¹ (07/03/2018), como esperado em ambientes tropicais (barotrópicos). Na presença de baixo CVV profundo, tempestades tendem a assumir um caráter tipo “pulso” ou multicelular, com curtos tempos de vida (<1 h), uma vez que a precipitação produzida pela tempestade em desenvolvimento tende a

cair sobre a corrente ascendente da própria célula convectiva em dezenas de minutos (Bluestein, 2013). Mais notável, por outro lado, é a presença e grande dispersão de CVV 0-1 km, variando entre 3.4 (25/08/2022) e 15.2 m s⁻¹ (07/03/2018). Associados a este CVV raso, helicidade relativa à tempestade 0-0.5 km (HRT 0-0.5 km) para células convectivas que se deslocam à direita (esquerda) do escoamento médio troposférico entre -25 e 59 m² s⁻² (-1 e 66 m² s⁻²). Os valores mais expressivos de HRT ocorrem para os eventos de 02/12/2018 (HRT 0-1 km = 87 m² s⁻² para células que se deslocam à direita do escoamento médio), 07/03/2018 (HRT 0-1 km = 80 e 70 m² s⁻² para células que se deslocam à direita e à esquerda do escoamento médio, respectivamente) e 24/03/2014 (HRT 0-1 km = 92 m² s⁻² e HRT 0-3 km = 145 m² s⁻², ambos valores para células que se deslocam à direita do escoamento médio). Valores acentuados de HRT em baixos níveis indicam uma componente considerável da vorticidade horizontal paralela ao escoamento horizontal a qual, se inclinada por uma corrente ascendente convectiva, produz rotação na corrente ascendente em baixos níveis (Coffer e Parker, 2017; Coffer *et al.*, 2019). Os valores de HRT raso foram substanciais nos casos de 2018 e 2014 e desprezíveis no caso de 2022. Tal observação potencialmente sugere que os casos (aqueles que mostraram estruturas possivelmente supercelulares mais nítidas) continham vorticidade horizontal substancial em baixos níveis e algum potencial de inclinação e estiramento desta vorticidade, caso parte desta vorticidade significativa fosse mantida durante a tarde e em uma CLP bem misturada. Por sua vez, tal resultado sugere que o evento de 2022, com alta instabilidade condicional e vorticidade horizontal desprezível (e que apresentou estruturas possivelmente supercelulares em vídeos), tenha resultado de estiramento de vorticidade vertical pré-existente no ambiente (ou seja, possivelmente um tornado do tipo *landspout*).

Figura 3 – (a)-(e) Perfis termodinâmicos e cinemáticos obtidos a observados às 1200 UTC para os eventos de tornados em Ananindeua. Os parâmetros convectivos mostrados na figura incluem CAPE, CIN, NCL, NCE, lapse rate em médios (MLR) e baixos níveis (LR3), CVV entre 0-6 km (CVV6), CVV entre 0-1 km (CVV1) e HRT entre 0-1 km (HRT1)



Fonte: Autores (2024)

3.3 Perfis atmosféricos do ERA5 às 1800 UTC

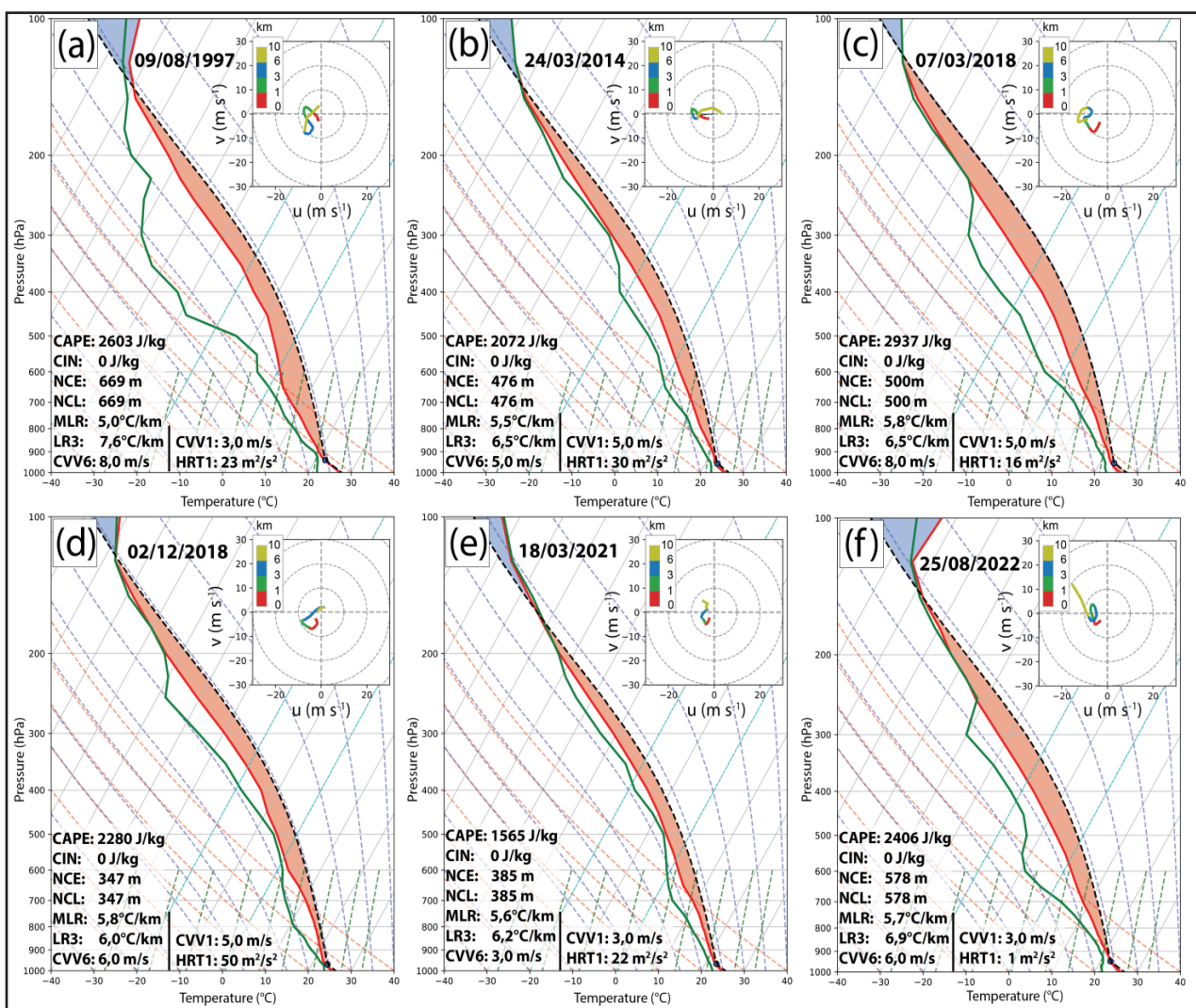
Com o objetivo de obter uma estimativa do estado da atmosfera mais próximo ao horário dos eventos de tornados, a Fig. 4 mostra perfis verticais obtidos do ERA5 às 1800 UTC para o ponto de grade mais próximo a Ananindeua. Os perfis termodinâmicos do ERA5 indicam, como esperado para condições atmosféricas à tarde, amplo SBCAPE consideravelmente mais elevado do que os valores observados pela manhã. Tais valores

variam entre 1565 (18/03/2021) e 2937 J kg⁻¹ (07/03/2018) e magnitude de inibição convectiva nula para parcelas de superfície (0 J kg⁻¹) em todos eventos, o que condiz com um ambiente tropical quente e úmido onde convecção profunda é comum durante o período da tarde. Nota-se que para estes perfis, os NCEs e NCLs são coincidentes e muito baixos, variando entre 347 (02/12/2018) e 669 m (09/08/1997). Devido à maior mistura convectiva na CLP durante a tarde, valores *lapse rate* entre a superfície e 3 km foram mais altos durante a tarde, com todos os eventos apresentando valores acima de 6°C km⁻¹, sendo que o evento de 1997 apresentou *lapse rate* 0-3 km de 7.5°C km⁻¹ e alto CAPE entre 0-3 km de 145 J kg⁻¹. Tais parâmetros associados aos baixos NCEs e NCLs indicam perfis termodinâmicos favoráveis a estiramento de vórtices em baixos níveis durante a tarde, dada à formação de tempestades convectivas ancoradas em superfície e a disponibilidade de vorticidade vertical em superfície ou em baixos níveis.

Os perfis cinemáticos das 1800 UTC do ERA5 apresentaram menor dispersão do que os perfis observados as 1200 UTC. De maneira geral, CVV entre 0-6 km, mostrou-se fraco (< 8 m s⁻¹), o que tende a favorecer convecção desorganizada. Muito menos dispersão foi notada nos valores de CVV 0-1 km, variando entre 3 e 5 m s⁻¹. Esta menor dispersão pode estar associada a maior mistura da CLP e consequente redução de CVV 0-1 km ou possível subestimação da intensidade do escoamento em baixos níveis pelo ERA5. Apesar disso, nota-se que valores não desprezíveis de HRT em baixos níveis estiveram presentes para tempestades convectivas que desviassem da hodógrafa tanto para a esquerda ou à direita do escoamento (fora da hodógrafa). Sendo assim, apesar de o ERA5 apresentar CVV em camadas rasas menos intenso durante a tarde, a presença de alguma vorticidade horizontal no escoamento associada ao potencial considerável de estiramento de vorticidade em baixos níveis notado nos perfis termodinâmicos permite a possibilidade de que algumas células convectivas ocasionalmente produzam vorticidade vertical via inclinação de vorticidade horizontal em baixos níveis especialmente durante os estágios iniciais de seus ciclos de vida, quando as células ainda são dominadas por correntes ascendentes e suas piscinas frias

ainda são fracas. Neste cenário, tornados com algumas características supercelulares (mesmo que de curta duração) seriam plausíveis.

Figura 4 – (a)-(f) Perfis termodinâmicos e cinemáticos obtidos a partir do ERA5 para o ponto de grade mais próximo a Ananindeua às 1800 UTC para os eventos de tornados em Ananindeua. Os parâmetros convectivos mostrados na figura incluem CAPE, CIN, NCL, NCE, *lapse* rate em médios (MLR) e baixos níveis (LR3), CVV entre 0-6 km (CVV6), CVV entre 0-1 km (CVV1) e HRT entre 0-1 km (HRT1)



Fonte: Autores (2024)

4 CONCLUSÃO E HIPÓTESE ATUAL

No presente estudo, foi levantada a hipótese de que alguns tornados que ocorrem na região de Ananindeua, na região metropolitana do estado do Pará, se formam a partir de circulações supercelulares, apesar da baixíssima latitude nas quais tais fenômenos ocorrem. Tal hipótese se baseia em observações visuais por vídeos, os quais indicam que os tornados se desenvolveram dentro de circulações maiores que os tornados em si (rotação em escala da base da nuvem). Foram analisados perfis termodinâmicos e cinemáticos observados várias horas antes dos eventos e perfis de reanálise mais próximos à hora dos eventos com o intuito de avaliar se condições favoráveis à circulação supercelulares existiram em torno da hora do evento ou se os eventos foram mais provavelmente associados a simples estiramento de vórtices verticais pré-existentes, sendo estes últimos casos não supercelulares. Como esperado, a análise dos perfis indicou a presença de valores moderados e altos de instabilidade condicional e baixo CVV profundo na maioria dos casos, como esperado para atmosferas tropicais. Contudo, os parâmetros termodinâmicos mostraram potencial considerável de estiramento de vórtices próximos à superfície com moderada a intensa flutuabilidade em baixos níveis (com baixos NCLS e NCEs) para parcelas de superfície, especialmente para sondagens de reanálise a tarde, quando a CLP encontrava-se bem misturada. Por outro lado, os perfis observados durante a manhã mostraram a presença de considerável CVV raso e HRT (assumindo que a tempestade tenha assumido algum deslocamento que desvie lateralmente do escoamento médio) em diversos casos, indicando a presença de quantidades razoáveis de vorticidade horizontal no ambiente. Tal vorticidade horizontal poderia, em tese, ser inclinada e estirada em baixos níveis, por intensas (e persistentes) correntes ascendentes próximas à superfície. Contudo, como este estudo não aborda a presença de gradientes horizontais de vento presentes no ambiente (e, portanto vorticidade vertical ambiental), não foi analisada a presença de vorticidade vertical no ambiente pré-tempestades (associadas a frentes de brisa,

circulações de terreno, frentes de rajada, etc), a qual poderia ser diretamente estirada pelas tempestades para produzir tornados. Tal avaliação necessitaria de uma densa rede de estações de superfície ou, mais comumente avaliado em estudos deste tipo, dados de simulações numéricas de alta resolução com base em dados reais para a região.

Com base nos resultados encontrados, mesmo que ainda preliminares, duas hipóteses são elaboradas para a ocorrência de tornados na região de Ananindeua. A primeira hipótese, mais simples, sugere que parte dos tornados observados em Ananindeua são semelhantes a tornados do tipo ("*landpout*") e se formam devido ao estiramento de vorticidade vertical pré-existente no ambiente onde as tempestades se formam. A origem de tal vorticidade vertical é incerta, porém especula-se que a presença de diversos corpos d'água, gradientes de vegetação e orografia na região de Ananindeua possam desempenhar um papel em sua produção. O estiramento destes vórtices é facilitado por baixos NCEs e intensa instabilidade condicional nos primeiros 3 km nestes eventos (vide o evento de 25/08/2022 e, possivelmente, o evento de 09/08/1997). A segunda hipótese, a qual ênfase foi dada neste estudo, sugere que tempestades em fase de desenvolvimento com piscinas frias incipientes ou não tão intensas inclinam e estiram vorticidade horizontal presente no ambiente em baixos níveis, possivelmente acentuada por circulações locais, formando breves e pequenos mesociclones de baixos níveis e tornados. Tal cenário seria condizente com as observações visuais de estruturas semelhantes a mesociclones em alguns tornados.

Os passos futuros deste estudo devem incluir a obtenção de mais casos em Ananindeua a regiões próximas, especialmente aqueles com dados de radares Doppler. Com tais dados, seria possível detectar a presença de mesociclones de baixos níveis, caso presentes, nas tempestades tornádicas. Ademais, simulações numéricas de alta resolução (utilizando-se espaçamento horizontal de grade < 100 m) e inicializadas com dados reais devem ser conduzidas para os casos mais relevantes e, assim, auxiliar na verificação desta hipótese.

AGRADECIMENTOS

Estudo é parte de uma iniciativa que busca aprimorar o conhecimento sobre processos convectivos e de camada limite planetária na Bacia Amazônica. Agradecemos ao apoio fornecido pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), pela Fundação Amazônica de Defesa da Biosfera e ao Instituto Max Planck.

REFERÊNCIAS

- ANTONIO, M. d. A. **Ocorrência de tornado na região tropical do Brasil**. Boletim Climatológico, 3, 136–141, 1997.
- BLUESTEIN, H. B. **Severe convective storms and tornadoes**. Springer, 10, 978–3, 2013.
- BRADY, R. H.; SZOKE, E. J. **A case study of nonmesocyclone tornado development in northeast colorado: Similarities to waterspout formation**. Monthly Weather Review, 117(4), 843–856, 1989.
- COFFER, B. E.; PARKER, M. D. **Simulated supercells in nontornadic and tornadic VORTEX2 environments**. Monthly Weather Review, 145(1), 149–180, 2017.
- COFFER, B. E.; PARKER, M. D.; THOMPSON, R. L.; SMITH, B. T.; JEWELL, R. E. **Using near-ground storm relative helicity in supercell tornado forecasting**. Weather and Forecasting, 34(5), 1417–1435, 2019.
- DAVIES-JONES, R. **A review of supercell and tornado dynamics**. Atmospheric Research, 158, 274–291, 2015.
- DAVIES-JONES, R.; TRAPP, R. J.; BLUESTEIN, H. B. **Tornadoes and tornadic storms. Severe convective storms**, pp. 167–221, 2001.
- DOS SANTOS, L. O.; NASCIMENTO, E. L.; ALLEN, J. T. **Discriminant analysis for severe storm environments in south-central Brazil**. Monthly Weather Review. 151(10), 2659–2681, 2023.
- FERREIRA, V.; GOEDE, V.; NASCIMENTO, E. L. **An environmental and polarimetric study of the 19 November 2015 supercell and multiple-vortex tornado in Marechal Cândido Rondon, southern Brazil**. Meteorology and Atmospheric Physics, 134(5), 82, 2022.
- HELD, G.; GOMES, A. M.; NACCARATO, K. P.; PINTO JR, O.; NASCIMENTO, E. L. **The structure of three tornado-generating storms based on Doppler radar and lightning observations in the state of São Paulo, Brazil**. Em: Proceedings, 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, pp. 1787–1797, 2006.
- HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORANYL, A.; MUNOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D. *et al.* **The ERA5 global reanalysis**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999–2049, 2020.

KLEMP, J. B. **Dynamics of tornadic thunderstorms**. Annual review of fluid mechanics, 19(1), 369–402, 1987.

KLEMP, J. B.; ROTUNNO, R. A **study of the tornadic region within a supercell thunderstorm**. Journal of Atmospheric Sciences, 40(2), 359–377, 1983.

KNUPP, K. R.; STALKER, J. R.; MCCAUL JR; E.W. **An observational and numerical study of a mini-supercell storm**. Atmospheric research, 49(1), 35–63, 1998.

LEMON, L. R.; DOSWELL III, C. A. **Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis**. Monthly Weather Review, 107(9), 1184–1197, 1979.

NASCIMENTO, E. L.; Held, G., Gomes, A. M. **A multiple-vortex tornado in southeastern Brazil**. Monthly Weather Review, 142(9), 3017–3037, 2014.

LOPES, M. M.; NASCIMENTO, E. L. **Uso de sensoriamento remoto via satélite na identificação de rastros de destruição por tornados em um evento de tempo severo no Rio Grande do Sul**. Ciência e Natura, 42, e8–e8, 2020.

LOPES, M. M.; NASCIMENTO, E. L. **Atmospheric environments associated with tornadoes in southern brazil and neighboring areas as compared to other modes of convective hazards**. Climate Dynamics, pp. 1–27, 2024.

MACHADO, L. A.; DIAS, M. A. S.; MORALES, C.; FISCH, G.; VILA, D.; ALBRECHT, R.; GOODMAN, S. J.; CALHEIROS, A. J.; BISCARO, T.; KUMMEROW, C. *et al.* **The CHUVA project: How does convection vary across Brazil?** Bulletin of the American Meteorological Society, 95(9), 1365–1380, 2014.

MAY, R. M.; GOEBBERT, K. H.; THIELEN, J. E.; LEEMAN, J. R.; CAMRON, M. D.; BRUICK, Z.; BRUNING, E. C.; MANSER, R. P.; ARMS, S. C.; MARSH, P. T. (2022). **Metpy: A meteorological python library for data analysis and visualization**. Bulletin of the American Meteorological Society, 103(10), E2273 – E2284, URL <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/103/10/BAMS-D-21-0125.1.xml>, 2022.

MCCAUL, E. W. **Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments**. Monthly Weather Review, 119(8), 1954–1978, 1991.

NASCIMENTO, E. L. **Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil?** Revista Brasileira de Meteorologia, 20(1), 121–140, 2005.

NECHET, D. **Ocorrência de tornados no Brasil**. Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia, v. 26, n. 2, p. 29–39, 2002.

OLIVEIRA, M. I. **Cyclic tornadogenesis and horizontal vortex tubes in high-resolution idealized simulations of supercells**. Tese (Doutorado em Meteorologia) – University of Oklahoma, 2021.

OLIVEIRA, M. I.; PUHALES, F. S.; NASCIMENTO, E. L.; ANABOR, V. **Integrated damage, visual, remote sensing, and environmental analysis of a strong tornado in southern Brazil.** Atmospheric Research, 274, 106,188, 2022.

Silva Dias, M. A. **An increase in the number of tornado reports in Brazil.** Weather, Climate, and Society, 3(3), 209–217, 2011.

TAVARES, J. P. N.; MOTA, M. A. S. d. **Condições termodinâmicas de eventos de precipitação extrema em Belém-PA durante a estação chuvosa.** Revista Brasileira de Meteorologia, 27, 207–218, 2012.

WAKIMOTO, R. M.; LEW, J. K. **Observations of a Florida waterspout during CAPE.** Weather and forecasting, 8(4), 412–423, 1993.

ZHAO, K.; WANG, M.; XUE, M.; FU, P.; YANG, Z.; CHEN, X.; ZHANG, Y.; LEE, W. C.; ZHANG, F.; Lin, Q. *et al.* **Doppler radar analysis of a tornadic miniature supercell during the landfall of typhoon Mujigae (2015) in south China.** Bulletin of the American Meteorological Society, 98(9), 1821–1831, 2017.

Contribuição de autoria

1 – Maurício Iha de Oliveira

Doutor em Meteorologia, Pós-Doutorando no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia e Universidade Federal de Santa Maria

<https://orcid.org/0000-0002-9388-2334> - mauricio.meteorologia@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Metodologia, Análise Formal, Validação, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

2 – Murilo Machado Lopes

Doutor em Meteorologia, Meteorologista no Departamento de Física das Universidade Federal de Santa Maria

<https://orcid.org/0000-0002-8862-156X> - lopesmurilo.rs@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Metodologia, Análise Formal, Escrita – revisão e edição

3 – Daiane de Vargas Brondani

Doutora em Meteorologia, Pesquisadora no Conselho Nacional de Pesquisa do Instituto de Ciências Atmosféricas e Clima (Itália)

<https://orcid.org/0000-0002-7197-8618> - meteorologia.daia@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Metodologia, Análise Formal, Escrita – revisão e edição

4 – Cléo Quaresma Dias-Júnior

Doutor em Clima e Ambiente, Instituto Federal do Pará
<https://orcid.org/0000-0003-4783-4689> - cleoquaresma@hotmail.com
Contribuição: Conceituação, Análise Formal, Escrita – revisão e edição

5 – Lucas Ilha Gandolfi de Oliveira

Discente do doutorado em Meteorologia no Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Maria
<https://orcid.org/0009-0004-7781-7198> - lucasilhars.ilha@gmail.com
Contribuição: Análise Formal, Escrita – revisão e edição

Como citar este artigo

Oliveira, M. I.; Lopes, M. M.; Brondani, D. V.; Dias-JÚNior, C. Q.; Oliveira, L. I. G. Tornados em Ananindeua, Pará: Características visuais e ambientes atmosféricos. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 47, n. esp. 3., e84050, 2025. DOI 10.5902/2179460X84050. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X84050>.