



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Análise sinótica e termodinâmica dos complexos convectivos de mesoescala no nordeste Brasileiro em 2017

Matheus José Arruda Lyra¹, Dimas de Barros Santiago², João Pedro Gonçalves Nobre³

¹Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas, Maceió, AL, Brasil. E-mail: matheuslyraa@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-0890-762X>).

²Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: dimas.barros91@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-7118-8467>).

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil. E-mail: pedronobrejp@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-6885-6030>)

Artigo recebido em 20/11/2023 e aceito em 30/05/2024

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar as características sinóticas e termodinâmicas dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) que se desenvolveram sobre o Nordeste Brasileiro em 2017. As análises foram feitas utilizando dados de reanálise global ERA-Interim e imagens do satélite GOES-13 no canal infravermelho. Os CCM desenvolveram-se durante o verão em decorrência de sistemas sinóticos atuantes na região como a Zona de Convergência Intertropical e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Além disso, os eventos que se formaram em regiões próximas à costa apresentaram maior fluxo de umidade, o que possibilitou se intensificarem ainda mais. Para os casos onde os CCM se desenvolveram através dos VCAN, os valores de vorticidade mostraram-se majoritariamente positivos em baixos, médios e altos níveis. A advecção de temperatura para maioria dos casos foi negativa. Este fator demonstrou considerável importância, pois o contraste térmico gerado pela advecção de ar frio em uma região relativamente mais quente contribuiu para geração de gradientes térmicos mais intensos que proporcionaram a formação dos CCM na região de estudo.

Palavras-chave: Termodinâmica da Atmosfera, Fenômenos Adversos, Complexo Convectivo de Mesoescala

Synoptic and thermodynamic analysis of mesoscale convective complexes in northeastern Brazil In 2017

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the synoptic and thermodynamic characteristics of Mesoscale Convective Complexes (MCCs) that developed over Northeast Brazil in 2017. The analyses were conducted using global reanalysis data from ERA-Interim and infrared channel images from the GOES-13 satellite. The MCCs developed during the summer due to synoptic systems active in the region, such as the Intertropical Convergence Zone and Upper-Level Cyclonic Vortices (UTCV). Additionally, events that formed in regions close to the coast showed higher moisture flux, which allowed them to intensify even more. For cases where the MCCs developed through the ULCVs, the vorticity values were predominantly positive at low, medium, and high levels. The temperature advection for most cases was negative. This factor demonstrated considerable importance, as the thermal contrast generated by the advection of cold air into a relatively warmer region contributed to the generation of more intense thermal gradients that facilitated the formation of MCCs in the study area.

Keywords: Atmospheric thermodynamics, Adverse phenomena, Mesoscale Convective Complex

Introdução

Os eventos de precipitações e sua variabilidade espaço-temporal de forma regionais/locais estão diretamente ligadas as mudanças climáticas, onde estas estão sendo objeto de muitos estudos (Rodrigues et al., 2020; De Oliveira Júnior et al., 2021; Da Rocha Júnior et al., 2021; Shimizu et al., 2022), devido aos impactos causados na sociedade humana e nos ecossistemas (O’Gorman, 2015), as mudanças nas precipitações influenciam diretamente no ciclo hidrológico e nos recursos hídricos, o que pode ocasionar eventos extremos de chuvas ou secas.

De acordo Santos et al. (2023), as chuvas irregulares no NEB podem ter impactos sociais, econômicos e ambientais significativos, e é importante desenvolver estratégias para mitigar os seus efeitos e adaptar-se às mudanças climáticas, onde os principais problemas causados pelas chuvas irregulares são secas, inundações, erosão do solo, redução da disponibilidade de água, impactos na biodiversidade e impactos na saúde. Sistemas como os CCMs são grandes causadores de precipitações no NEB. Cotton et al. (1989) afirmam que os CCMs são bastante eficazes em produzir precipitação, com uma eficiência de precipitação capaz de exceder os 100% no seu estágio maduro, devido à acumulação de água nas nuvens estratiformes iniciais, durante o período de estágio convectivo do sistema.

Os CCMs são sistemas caracterizados como um conjunto de nuvens Cumulonimbus (Cb) espessas e frias, apresentadas na forma aproximadamente circular e com crescimento vertical explosivo em um intervalo de tempo entre 6 a 12 horas (Maddox, 1980; Rinaldy et al., 2017; Leiras et al., 2023). Velasco e Fritsch (1987) utilizaram os critérios de Maddox (1980) para identificar os CCM na América do Sul mantendo os valores da área, porém com limites de temperatura diferentes. Os CCM subtropicais na América do Sul apresentaram maior período de vida e com área de cerca de 60% maior em relação aos da América do Norte, enquanto os CCM tropicais são semelhantes em tamanho e possuem duração de aproximadamente 1 a 3 horas ou menos (Velasco & Fritsch, 1987; Lyra et al., 2020).

O formato singular dos CCM facilita a sua identificação. Ainda assim, alguns aglomerados

intensos e isolados de cumulonimbus também apresentam um formato bastante circular nas imagens de satélite, podendo ser confundidos com CCM, que derivam de um conjunto destas células (Fedorova et al., 2019). No entanto, essas células isoladas não duram tanto (2- 4h) quanto os CCM (6h ou mais) e costumam ser menores, apesar de provocarem fenômenos adversos similares ou até mais intensos. Os CCM nem sempre se formam de maneira isolada, mas podem aparecer embebidos na região de atuação de sistemas sinóticos (Fedorova et al., 2019).

A distribuição espacial dos CCM na América do Sul ocorre majoritariamente sobre a região continental (Velasco & Fritsch, 1987), assim como no setor sul do continente africano (Laing & Fritsch, 1997). Contudo, Velasco & Fritsch (1987) não identificaram CCM se deslocando sobre o NEB durante o seu período de estudo (1981-1983). Além do período curto de estudo, os autores adotaram temperaturas de topo das nuvens mais baixas (cerca de 10 °C) em relação aos limiares definidos por Maddox (1980), devido a limitações no conjunto de dados utilizado. A maioria dos CCM identificados sobre o Brasil se concentrou sobre a Região Sul e oeste da Região Norte.

As primeiras análises na região Nordeste foram feitas por Gomes Filho (1996), posteriormente por Fedorova et al. (2008) por intermédio do estudo do desenvolvimento destes sistemas a partir da trajetória das parcelas de ar geradas pelo modelo HYSPLIT. Fedorova et al. (2009) realizaram os primeiros estudos termodinâmicos dos CCM no NEB, por meio da avaliação dos índices de instabilidade. Lyra et al. (2018) realizaram a análise termodinâmica de CCM por meio de uma adaptação do método de diagrama SKEW-T empregado por Brito et al. (2011). Em relação a anos anteriores, houve registros de CCM abaixo da média na região, segundo Lyra et al. (2020) aproximadamente 7 casos por ano. A maior frequência ocorreu no ano de 2008 (12 eventos) e a menor em 2011 (4 eventos).

No NEB, cerca de 83% dos CCM que atingem a região se desenvolvem sobre o continente, com maior frequência no setor Norte, entre os estados do Maranhão e Piauí (Lyra et al.,

2022). Quanto ao NEB, possui uma grande variabilidade de sistemas de escala sinótica que atuam na região em diferentes épocas do ano. De acordo com Lyra et al. (2022), esses sistemas estão relacionados ao desenvolvimento dos CCM na região. Já destacado por Lyra et al. (2022), os principais sistemas de escala sinótica que determinam as mudanças de tempo na região e que possuem conexão direta com o desenvolvimento dos sistemas convectivos são os seguintes: Frentes frias (Kousky, 1979; Fedorova et al., 2016; Veber et al., 2020), Vórtices Ciclônicos de Altos níveis (VCAN; Kousky e Gan, 1981; Lyra & Arraut (2023), a Zona de Convergência Intertropical (Utida et al., 2019; Lyra et al., 2019) e Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs; Gomes et al., 2019).

A trajetória dos CCM subtropicais tem geralmente início na região a leste dos Andes em uma latitude média de 25°S. Em 25 casos estudados por Figueiredo e Sclar (1996), 70% deslocaram-se para leste e sudeste (atingindo o Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná) e 30% deslocaram-se para nordeste e norte, atingindo a região Sudeste do Brasil. Já os CCM tropicais, analisados por Blamey e Reason (2012) na região sul do continente africano apresentam um padrão de deslocamento para Leste, principalmente nos casos identificados sobre a África do Sul devido à fortes fluxos de Oeste presentes em médios níveis sobre estas latitudes. No NEB, as trajetórias desses sistemas de mesoescala estão relacionados aos sistemas sinóticos atuantes na região, com padrões de deslocamento que variam de acordo com o escoamento de grande escala (Lyra et al., 2022).

De acordo com Blamey e Reason (2012) elevadas temperaturas de superfície do mar junto com a presença de montanhas próximas a costa favorecem a formação dos CCM tropicais. Conforme descrito por Fedorova et al., (2019), uma parcela aérea movendo-se ao longo de uma montanha pode sofrer alterações na sua instabilidade, afetando positivamente o potencial convectivo, que pode ser observado através do índice *Convective Available Potential Energy* (CAPE). Os índices termodinâmicos indicam aumento da instabilidade durante as trajetórias ascendentes do CCM, independentemente do estágio de desenvolvimento. Porém, nas fases de gênese e desenvolvimento, a instabilidade aumenta ainda mais, e também diminui ainda mais nas fases de maturidade e dissipação.

O monitoramento destes sistemas desperta bastante interesse, pois os mesmos estão associados à diversos fenômenos adversos, como precipitações intensas e trovoadas (Cordeiro et al.,

2018; Lyra et al., 2023). Estudos relacionados a precipitações extremas no NEB têm documentado os impactos dos sistemas de mesoescala, como observado na análise de Palharini et al. (2020), onde os autores mostraram a influência destes sistemas nos eventos extremos observados no NEB, indicando que 60% a 70% das chuvas extremas na região foram influenciadas pelos sistemas convectivos de mesoescala. De acordo com Moraes & Aquino (2018) e Lima et al. (2018), estes fenômenos acarretam alagamentos, enchentes, deslizamentos de terra e, consequentemente, causam grandes perdas econômicas e sociais. A identificação dos CCM pode contribuir para a melhoria do sistema de alerta do NEB, visto que a maioria das cidades da região sofre com a falta de planejamento, ocupação desordenada de domicílios em encostas e outras áreas de risco. O acompanhamento desses sistemas pode ser útil também em outros setores da sociedade, como agricultura, que é fundamental para a economia da região que geralmente pode ser feita através de satélites geoestacionários.

De acordo com Khan et al. (2021), as imagens de satélites auxiliam nas pesquisas sobre processos convectivos, um exemplo é o Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES), um comumente usado satélite meteorológico – representa uma oportunidade subexplorada para a ciência ambiental em situações onde a resolução espacial pode ser comprometida em favor de imagens mais frequentes. Os Satélites Ambientais Operacionais Geoestacionários (GOES) são uma série de satélites meteorológicos operados pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA) (Goodman et al., 2019). Esses satélites desempenham um papel crucial no monitoramento e previsão do clima, fornecendo dados essenciais para a meteorologia e a climatologia. O GOES-13, especificamente, faz parte dessa importante série de satélites, lançado em 24 de maio de 2006, o GOES-13 foi um dos satélites que compôs a série GOES-N. Ele foi projetado para substituir o GOES-12 e serviu principalmente como GOES-Leste, posicionado a 75° de longitude oeste, fornecendo cobertura sobre a América do Norte, o Atlântico e partes da América do Sul. A missão principal do GOES-13 era fornecer dados contínuos de imagem e sondagem do clima, auxiliando nas interferências, monitoramento de tempestades severas e estudos climáticos (Haines, Suggs & Jedlovec, 2004; Goodman et al., 2019).

A Capacidade e Instrumentos O GOES-13 foi equipado com uma série de instrumentos

avançados que melhoraram significativamente a qualidade e a quantidade de dados meteorológicos. Os estudos utilizando o GOES-13 trazem informações significativas para as pesquisas meteorológicas, abordando uma variedade de tópicos, desde a previsão de tempestades severas até o monitoramento de ciclones tropicais e outras características atmosféricas (Folmer et al., 2012; Ferreira & Anabor, 2015; Lyra et al., 2018; Pavolonis, Sieglaff & Cintineo, 2020). Baseado no exposto, até o presente momento poucos são os estudos voltados ao entendimento sobre os CCMs e suas influências na variação de precipitação no NEB, com isso, o objetivo do presente estudo consiste em analisar as condições sinóticas e termodinâmicas durante a formação dos CCM na região Nordeste do Brasil no ano de 2017, com o intuito de compreender os padrões espaciais e

termodinâmicos dos sistemas analisados, como resultado, para auxiliar na previsão desses sistemas à curto prazo.

Material e Métodos

Área de estudo

A área de estudo localiza-se entre os paralelos de 5° N e 35° S de latitude e os meridianos 10° a 55° W de longitude, com foco na região Nordeste do Brasil (Figura 1). O recorte nessas coordenadas foi escolhido devido à melhor visualização da formação e desenvolvimento de sistemas sinóticos da região. O estudo foi realizado no período de janeiro a dezembro de 2017, em que se verificou chuvas frequentes e intensas na faixa leste do NEB.

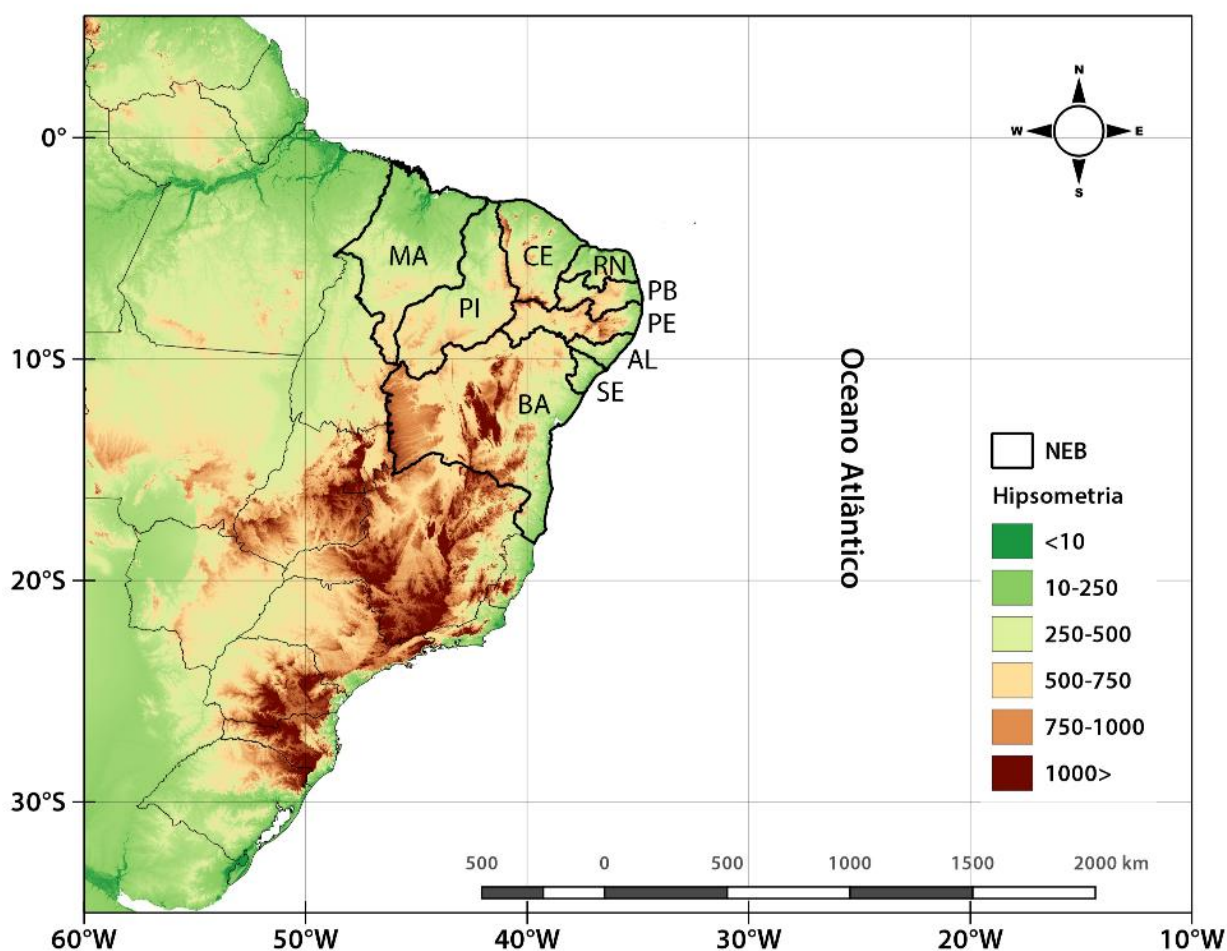


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo

Identificação dos CCM

A análise e identificação dos CCM foram efetuadas com auxílio das imagens do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES 13), no canal Infravermelho (IR) realçado durante suas respectivas fases de desenvolvimento máximo, consultadas no banco de dados imagens no portal da Divisão de

Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). A metodologia utilizada para a identificação dos CCM através das imagens de satélite foi descrita por Carvalho & Jones (2001) baseada nas normas propostas por Maddox (1980) destacadas na Tabela 1.

Tabela 1. Definição de um CCM baseada em imagens de satélite.

Características físicas	
Tamanho:	A – Cobertura de nuvens com temperaturas $\leq -32^{\circ}\text{C}$ observadas no canal IR, com área $\geq 100000 \text{ km}^2$. B – Região interna da cobertura de nuvens com temperaturas $\leq -52^{\circ}\text{C}$ observadas no canal IR, com área $\geq 50000 \text{ km}^2$.
Início:	Quando as definições de tamanho A e B sejam satisfeitas.
Duração:	As definições de tamanho A e B deverão persistir por um período $\geq 6\text{h}$
Extensão Máxima:	Quando a definição do tamanho A (-32°C) alcançar seu tamanho máximo.
Forma:	Excentricidade $\geq 0,7$ no momento de máxima extensão.
Término:	Quando as definições de tamanho A e B já não são satisfeitas.

Para realização da análise sinótica e termodinâmica foram empregados dados de reanálise global ERA-Interim fornecidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), com resolução de $0,75^{\circ}$ de latitude por $0,75^{\circ}$ de longitude e distribuídos verticalmente em 7 diferentes níveis de pressão (1000, 900, 800, 700, 600, 500 e 300 hPa). Estes dados foram disponibilizados em um intervalo de 6 horas e foram manipulados com o auxílio do software *Open Grid and Analysis Display System* (OpenGrADS) para confecção dos campos de linhas de corrente (1), divergência horizontal (2), componente vertical da vorticidade em coordenadas cartesianas (3) e os termos da equação

da energia termodinâmica (4), conforme as equações descritas abaixo.

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot V_H = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) - S_p \omega = \frac{J}{c_p} \quad (4)$$

Através da equação 4, foram calculados a contribuição individual da taxa de variação local da temperatura (5), a contribuição dos termos

advectivos na horizontal (6) e do parâmetro de estabilidade estática (7).

$$\frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \quad (6)$$

$$S_p = \frac{RT}{c_p p} - \frac{\partial T}{\partial p} \quad (7)$$

Resultados e discussão

De acordo com a análise das imagens do satélite GOES-13 (Figura 2), com o canal infravermelho realçado para visualizar as células convectivas mais profundas, e aplicando a filtragem das normas proposta por Maddox (1980), foram identificados 6 eventos de CCM sobre a região NEB. O primeiro e segundo casos identificados (Figura 2a e 2b) ocorreram nos dias

14 e 24 de janeiro de 2017 respectivamente, e apresentaram características semelhantes de tamanho (cerca de 90 km²) e área de atuação (sobre os estados do Piauí e Maranhão), ambos os núcleos apresentaram temperatura de aproximadamente -70°C. O terceiro caso identificado no dia 16 de fevereiro de 2017 (Figura 2c), englobou uma área maior do que 120 km² e seu ciclo de vida durou cerca de 10 horas, atuando principalmente sobre o estado do Maranhão.

Em relação a anos anteriores, houve registro abaixo da média da região, esta que segundo Lyra et al. (2020) é de aproximadamente 7 casos por ano. A maior frequência ocorreu no ano de 2008 (12 eventos) e a menor em 2011 (4 eventos), conforme descrito por Lyra et al. (2020). Os CCM se formaram majoritariamente no setor Norte da região, principalmente entre os estados do Maranhão e Piauí, sendo a região mais propícia para a formação desses sistemas.

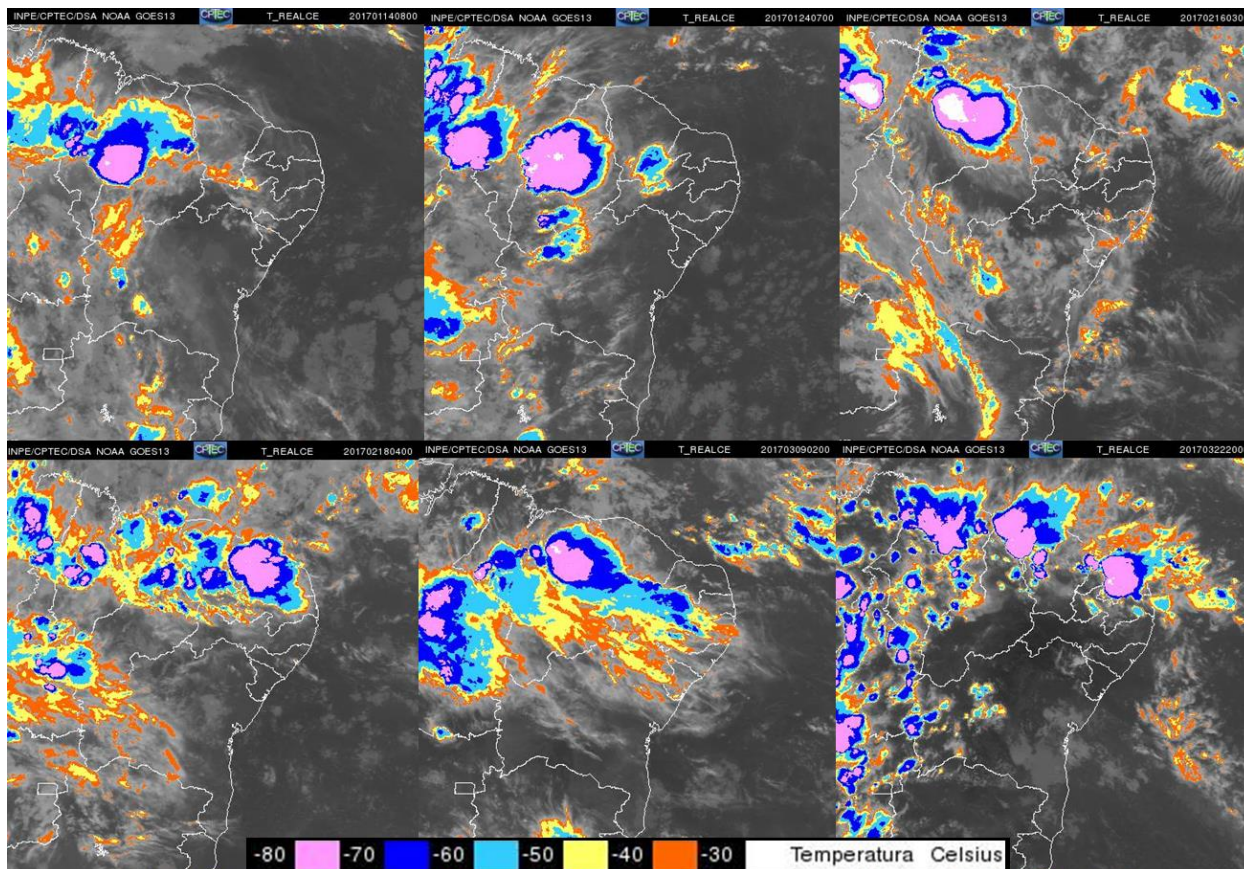


Figura 2. CCMs identificados no período de análise através das imagens do satélite GOES-13 no canal infravermelho realçado.

A Tabela 2 exibe em detalhes as características físicas dos CCM como excentricidade e área no momento do tamanho máximo, bem como os horários dos ciclos durante todo o processo de formação. Ao contrário dos sistemas subtropicais, estes CCM formados sobre o NEB não se desenvolvem exclusivamente durante a noite, de modo que foram registros casos no final do período da tarde. Em média apresentaram 7 horas de duração, com um intervalo

de 3 horas para atingirem seu tamanho máximo a partir das primeiras explosões. Os eventos encontrados foram todos exclusivamente continentais, com área máxima entre 90 e 125 mil km², conforme Lyra et al. (2020) destacou a baixa ocorrência oceânica na região. Esses valores aproximaram-se aos obtidos por Velasco & Fritsch (1987), Laing & Fritsch (1993), Blamey & Reason (2012) e Moraes et al. (2020) em regiões de latitudes médias.

Tabela 2. Características físicas dos CCM identificados durante o período de estudo.

Casos	Horário (Início)	Horário (Fim)	Duração (Horas)	Hora do tamanho máximo	Excentricidade	Tamanho máximo (Km ²)
14/01/2017	05 UTC	12 UTC	07	08 UTC	0,71	90.201
24/01/2017	04 UTC	12 UTC	08	07 UTC	0,87	93.400
16/02/2017	21 UTC	07 UTC	10	03 UTC	0,70	123.914
18/02/2017	01 UTC	07 UTC	06	04 UTC	0,92	106.981
09/03/2017	23 UTC	05 UTC	06	02 UTC	0,75	112.919
22/03/2017	19 UTC	01 UTC	06	20 UTC	0,78	124.738

Através da análise detalhada para três níveis distintos da atmosfera, compreendendo baixos, médios e altos níveis, foi possível observar a influência de sistemas de escala sinótica bastante comuns na região (Figura 3). Do total, a formação de dois CCM esteve ligada à nebulosidade da ZCIT, que durante os meses de verão posiciona-se mais ao sul, moldando o regime de precipitação do setor norte do NEB, como descrito pelos estudos de Molion & Bernardo (2002) e Muanza et al. (2022). E também que é responsável pela formação de aproximadamente 68% dos casos de CCM no

Nordeste (Lyra, 2018). A presença do VCAN foi confirmada em dois casos, um em janeiro e outro em março, quando costuma haver a maior atuação desses vórtices sobre a região. O CCM formado no dia 24 de janeiro foi ocasionado pela presença de um centro de circulação ciclônica em superfície (Figura 3d), sistema que atua durante todas as épocas do ano e está relacionado ao efeito térmico (instabilidade barotrópica), segundo Rodrigues et al. (2010). A posição dos núcleos dos CCM no início de suas formações é indicada pelo círculo vermelho.

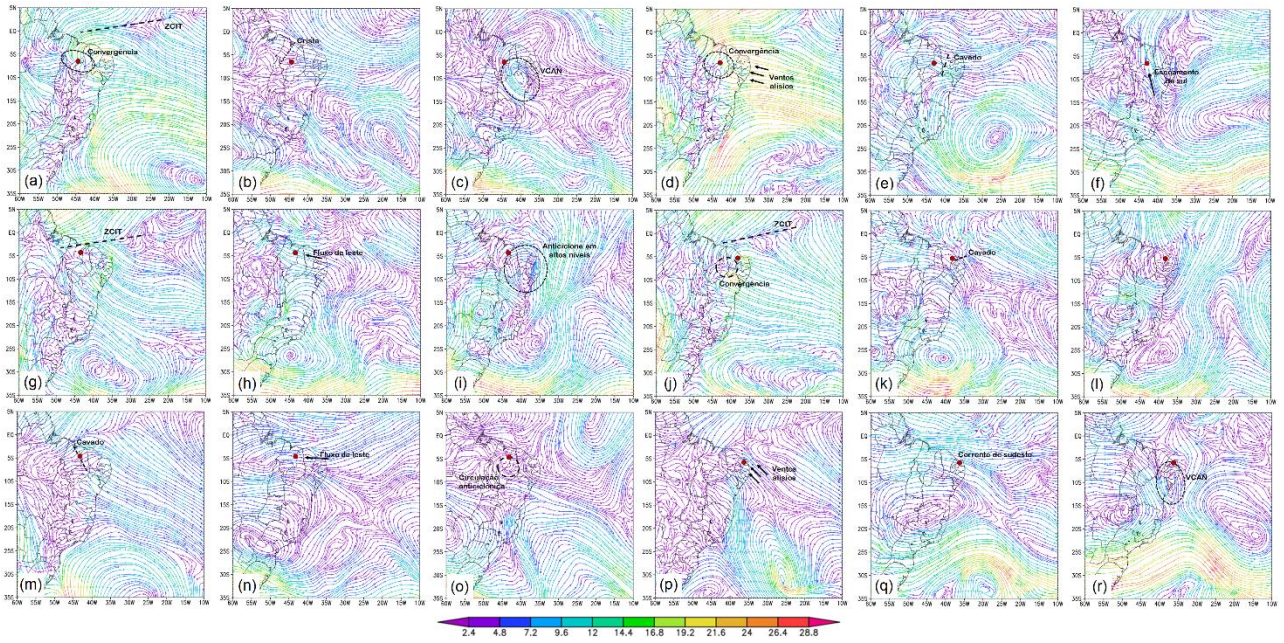


Figura 3. Campos de linhas de corrente em 925, 500 e 300 hPa, respectivamente, para os dias 14/01/2017 às 06UTC (a,b,c); 24/01/2017 às 00UTC (d,e,f) 16/02/2017 às 18UTC (g,h,i); 18/02/2017 às 00UTC (j,k,l); 09/03/2017 às 18UTC (m,n,o); 22/03/2017 às 18UTC (p,q,r).

Os campos de divergência (Figura 4) ilustram uma atmosfera em baixos níveis, 1000hPa, normalmente convergente na região do CCM para a maioria dos casos avaliados, com valores em torno de $-2.10^{-5} s^{-1}$, com exceção do dia 14 de janeiro, onde foi observado uma região divergente próxima a localidade de formação do sistema, com valores em torno de $2.10^{-5} s^{-1}$, apesar das linhas de corrente indicarem convergência sobre a localidade. Em 500 hPa, ocorreu a predominância

de valores positivos para este campo, ou seja, divergência com valores em torno de $2.10^{-5}.s^{-1}$, com exceção do dia 18 de janeiro, onde uma área com valores de convergência em torno de -2 a $-4.10^{-5}.s^{-1}$ foi-se observada. Em 300 hPa, houve uma predominância de campos divergentes com valores em torno de 2 a $4.10^{-5}.s^{-1}$, com exceção do dia 16 de fevereiro, onde uma área de convergência com valores próximos de $-1.10^{-5}.s^{-1}$ foi detectada.

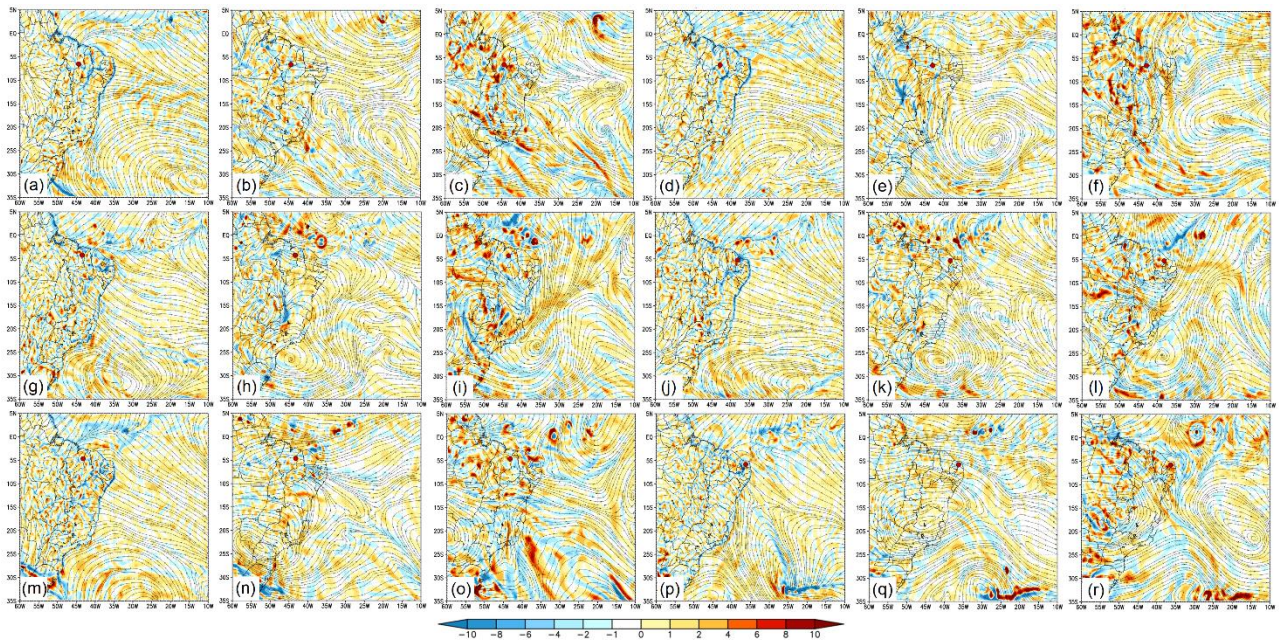


Figura 4. Campos de divergência em 1000, 500 e 300 hPa, respectivamente, para os dias 14/01/2017 às 06UTC (a,b,c); 24/01/2017 às 00UTC (d,e,f) 16/02/2017 às 18UTC (g,h,i); 18/02/2017 às 00UTC (j,k,l); 09/03/2017 às 18UTC (m,n,o); 22/03/2017 às 18UTC (p,q,r).

Para o campo de vorticidade, em baixos níveis, 1000 hPa, normalmente verificou-se campos de vorticidade neutra (0 s^{-2}) sobre a região de formação do CCM. Em médios níveis, 500 hPa, o campo vertical de vorticidade apresentou valores neutros, próximos a 0, ou positivos sobre a região do CCM, com valores entre $2-4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-2}$. Em 300hPa, regiões com vorticidade negativa foram

encontrados sobre a região do CCM apenas nos dias quando o VCAN foi observado no referido nível, conforme ilustrado em 14/01/2017 e 22/03/2017 com valores em torno de $-3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-2}$. Para os demais dias a vorticidade foi neutra ou positiva, em torno de $1-2 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, como pode ser observado através da Figura 5.

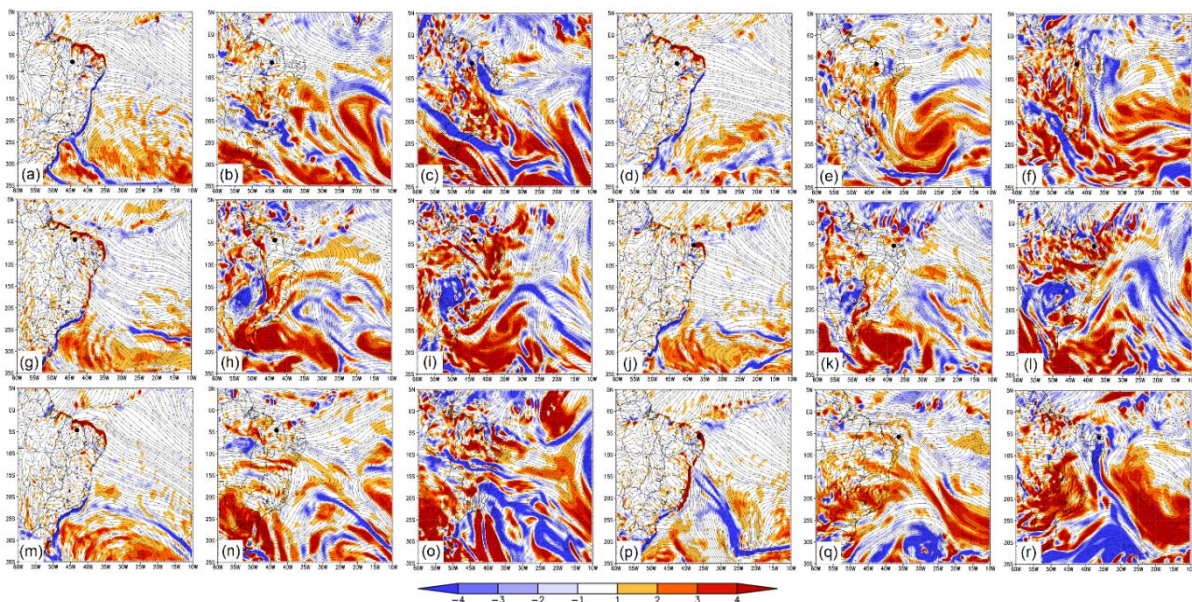


Figura 5. Campos de vorticidade relativa em 1000, 500 e 300 hPa, respectivamente, para os dias 14/01/2017 às 06UTC (a,b,c); 24/01/2017 às 00UTC (d,e,f) 16/02/2017 às 18UTC (g,h,i); 18/02/2017 às 00UTC (j,k,l); 09/03/2017 às 18UTC (m,n,o); 22/03/2017 às 18UTC (p,q,r).

A derivada local da equação da energia termodinâmica foi obtida no intuito de se observar a evolução da temperatura entre o estágio inicial e final do desenvolvimento dos CCM. Através dos campos plotados na Figura 6, observa-se em 1000 hPa, uma tendência de resfriamento próximo a superfície com valores entre -1 a -3K/6h, com exceção do dia 16 de fevereiro de 2017, cujo para a região do CCM verifica-se uma tendência de

aumento da temperatura com valores de 1K/6h. Em 500 hPa, nota-se uma tendência de diminuição da temperatura para todos os episódios de CCM avaliados com valores máximo próximos de -1K/6h. Em altos níveis, 300hPa, nota-se uma tendência de resfriamento da temperatura na região de localização dos CCM com valores em torno de -1K/6h.

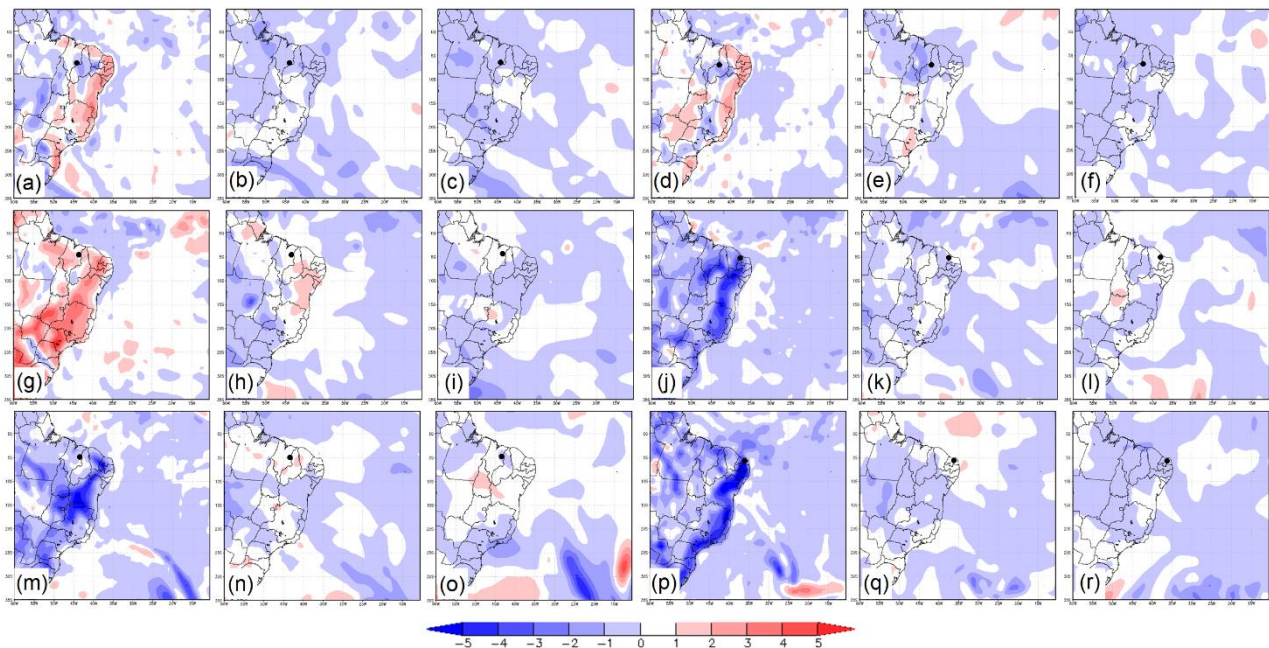


Figura 6. Derivada local da equação da energia termodinâmica em 1000, 500 e 300 hPa, respectivamente, para os dias 14/01/2017 às 06UTC (a,b,c); 24/01/2017 às 00UTC (d,e,f) 16/02/2017 às 18UTC (g,h,i); 18/02/2017 às 00UTC (j,k,l); 09/03/2017 às 18UTC (m,n,o); 22/03/2017 às 18UTC (p,q,r).

Na maior parte dos casos analisados nota-se a existência de advecção fria (negativa) para a região de desenvolvimento do CCM durante o seu estágio inicial em 1000 hPa, conforme ilustrado na Figura 7. Os valores típicos para cada uma das camadas analisadas não variaram

consideravelmente ao se comparar os valores entre distintos níveis troposféricos, apresentando valores normalmente em torno de $-4.10^{-5}.K.s^{-1}$. Esse padrão pode ser observado durante a passagem de todos os CCM analisados, contribuindo para a elevação dos gradientes térmicos no NEB.

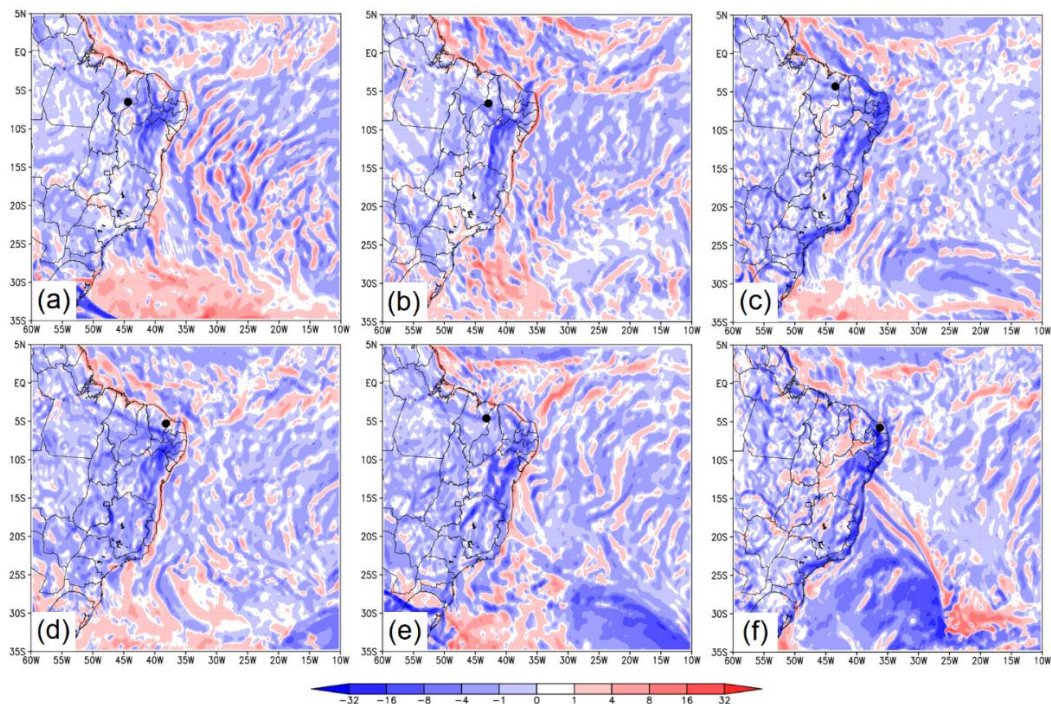


Figura 7. Advecção de temperatura em 1000hPa para os dias 14/01/2017 às 06UTC (a); 24/01/2017 às 00UTC (b) 16/02/2017 às 18UTC (c); 18/02/2017 às 00UTC (d); 09/03/2017 às 18UTC (e); 22/03/2017 às 18UTC (f)

Conclusões

Foram identificados 06 CCMs sobre o território do NEB durante o ano de 2017. Os CCMs analisados apresentaram ocorrência exclusiva durante o solstício de verão. Devido à formação no setor Norte na região do NEB, os eventos podem estar associados à convecção provocada pela ZCIT, este sistema manteve seu posicionamento mais ao sul durante a estação predominante dos CCM. De forma geral, constatou-se que o seu pico de formação variou entre 19 e 05 UTC. Os CCMs atingiram sua área de extensão máxima majoritariamente durante a madrugada, com um intervalo de aproximadamente 3 horas entre o início da gênese ao desenvolvimento máximo.

Durante o horário inicial de formação do CCM, notou-se convergência em 1000 hPa com valores em torno de $-2.10^{-5}.s^{-1}$, enquanto que para 500 hPa e 200 hPa a divergência foi mais significativa com valores em torno de $2.10^{-5}.s^{-1}$. Exceto para os casos onde o CCM se desenvolveu com VCAN em 300 hPa, os valores de vorticidade normalmente foram positivos em baixos, médios e altos níveis (1000, 500 e 300 hPa), com valores em torno de $1-4.10^{-5}.s^{-2}$. A tendência da temperatura segundo a taxa de variação local da temperatura nos três diferentes níveis foi de se resfriar, apresentando valores em torno de -1 a -3K/6h. A advecção de temperatura para maioria dos casos foi

negativa em superfície (1000 hPa), como valores típicos de no máximo $-4.10^{-5}.K.s^{-1}$, esse fato é interessante pois para esta região o contraste térmico gerado pela advecção de ar frio em uma região relativamente mais quente contribuiu para geração de gradientes térmicos mais intensos que proporcionaram a formação do CCM.

Vale ressaltar que, embora esta pesquisa tenha sido tratada como um estudo de caso, levando em consideração o ano de 2017, o tema se mostra de tamanha importância se fazendo extremamente necessários estudos de forma climatológica visando a compreensão dos CCMs e seus comportamentos na região nordeste do Brasil, o que torna viável estudos futuros.

Contribuições dos autores

M.J.A.L.: Conceituação; análise formal; investigação; metodologia; escrita - rascunho original. D.B.S.: Redação—revisão e edição. J.P.G.N.: Redação—revisão e edição. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Declaração de conflito de interesses

Não existem conflitos de interesse existentes entre os autores e instituições parceiras ou financiadores da pesquisa.

Referências

- Blamey, R. C. & Reason, C. J. C. 2012. Mesoscale Convective Complex Over Southern Africa. *Journal of Climate*, 25: 753-766. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-10-05013.1>
- Brito, B. M.; Levit, V.; Fedorova, N.; Molion, L.C.B.; Tenório, R. S.; Rodrigues, R. N. & Silva, B. F. P. 2011. Análise do comportamento das trovoadas no Estado de Alagoas, previsão a curto prazo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(2): 243-256. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000200009>
- Carvalho, L. M. V & Jones, C. 2001. A satellite method to identify structural properties of Mesoscale Convective systems based on the Maximum Spatial Correlation Tracking Technique (MASCOTTE). *Journal of Applied Meteorology*, 40: 1683-1701. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040%3C1683:ASMTIS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040%3C1683:ASMTIS%3E2.0.CO;2)
- Cordeiro, E. S.; Fedorova, N. & Levit, V. 2018. Análise sinótica e Termodinâmica dos Eventos com Trovoadas para o Estado de Alagoas no Período de 15 Anos 1998-2012. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33(4): 685-694. <https://doi.org/10.1590/0102-77863340010>
- Cotton, W.R.; Lin, M.S.; Mcanelly, R.L. E Tremback, C.J. A composite model of Mesoscale Convective Complexes. American Meteorological Society. v. 117, 1989, p. 765-782. Disponível em: <http://rams.atmos.colostate.edu/cotton/vita/50.pdf>. Acesso em: 22 janeiro 2014.
- Da Rocha Júnior, R. L., Cavalcante Pinto, D. D., dos Santos Silva, F. D., Gomes, H. B., Barros Gomes, H., Costa, R. L., ... & Herdies, D. L. (2021). An empirical seasonal rainfall forecasting model for the northeast region of Brazil. *Water*, 13(12), 1613.
- De Oliveira-Junior, J. F., Correia Filho, W. L. F., de Barros Santiago, D., de Gois, G., da Silva Costa, M., da Silva Junior, C. A., ... & Freire, F. M. (2021). Rainfall in Brazilian Northeast via in situ data and CHELSA product: mapping, trends, and socio-environmental implications. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1-19.
- Dos Santos, D. C., Santos, C. A. G., Brasil Neto, R. M., da Silva, R. M., & dos Santos, C. A. C. (2023). Precipitation variability using GPCC data and its relationship with atmospheric teleconnections in Northeast Brazil. *Climate Dynamics*, 61(11), 5035-5048.
- Fedorova, N., Levit, V., Cruz, C.D. 2016. On frontal zone analysis in the tropical region of the Northeast Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 73: 1403-1421. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1166-y>
- Fedorova, N.; Levit, V.; Rodrigues, L. R. L. & Costa, S.B. 2008. Mesoscale Convective Complex Genesis and forecast in Alagoas State of Brazil. *Journal of the Georgian Geophysical Society*, 12: 36-44.
- Fedorova, N.; Levit, V.; Silveira, M. H. S.; Silva, B. F. P. & Amiranashvili, A. G. 2009. Mesoscale Convective Complexes on the Northeastern Coast of Brazil. *Journal of the Georgian Geophysical Society*, 13B: 36-49.
- Ferreira, V., & Anabor, V. (2015). Climatologia de Sistemas Convectivos de Mesoescala ocorridos sobre a América do Sul no período de 2005 a 2006. *Ciência e Natura*, 37(1), 17-21.
- FIGUEIREDO, J. C. e SCOLAR, J. Estudo da trajetória dos Sistemas Convectivos de Mesoescala na América do Sul. In: Congreso Argentino de Meteorologia e Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorologia, 7., 1996, Buenos Aires. Anais...CONGREMET, 1996.
- Folmer, M. J., DeMaria, M., Ferraro, R., Beven, J., Brennan, M., Daniels, J., ... & Zavadsky, B. (2015). Satellite tools to monitor and predict Hurricane Sandy (2012): Current and emerging products. *Atmospheric Research*, 166, 165-181.
- Gomes, H. B., Ambrizzi, T., Pontes Da Silva, B. F., Hodges, K., Silva Dias, P. L., Herdies, D. L., Silva, M. C. L., Gomes, H. B. 2019. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. *Climate Dynamics*, 53(1): 1393-1411. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04667-7>
- Goodman, S. J., Schmit, T. J., Daniels, J., & Redmon, R. J. (Eds.). (2019). *The GOES-R series: a new generation of geostationary environmental satellites*. Elsevier.
- Haines, S. L., Suggs, R. J., & Jedlovec, G. J. (2004). *The Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) product generation system* (No. NASA/TM-2004-213286).

- Khan, A. M., Stoy, P. C., Douglas, J. T., Anderson, M., Diak, G., Otkin, J. A., ... & McCorkel, J. (2021). Reviews and syntheses: Ongoing and emerging opportunities to improve environmental science using observations from the Advanced Baseline Imager on the Geostationary Operational Environmental Satellites. *Biogeosciences*, 18(13), 4117-4141.
- Kousky, V. E. & Gan, M. A. 1981. Upper tropospheric cyclonic vortex in the subtropical South Atlantic. *Tellus*, 3: 538-551.
- Kousky, V. E. 1979. Frontal influences on northeast Brazil. *Monthly Weather Review*. 107: 1140-1153. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107%3C1140:FIONB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107%3C1140:FIONB%3E2.0.CO;2)
- Laing, A. G. & Fritsch, J. M. 1993. Mesoscale convective complexes in Africa. *Monthly Weather Review*, 121: 2254-2263.
- Leiras, R. B. V.; Fedorova, N.; Levit, V. 2023. Airplane Emergency Landing Due to Quick Development of Mesoscale Convective Complexes. *Meteorology*, 2: 1-14. <https://doi.org/10.3390/meteorology2010001>
- Lima, K. B., Aquino, F. E., Moraes, F.D.S., 2018. Impactos gerados por dois Complexos Convectivos de Mesoescala de diferentes extensões no sul do Brasil. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*. 7, 186-205.
- Lyra, M. J. A., Fedorova, N., Levit, V. 2022. Mesoscale Convective Complexes over Northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 118, p. 1-7, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103911>
- Lyra, M. J. A. & Arraut, J. M. 2023. Estudo Sinótico e da Estrutura Vertical de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis Ocorrido em janeiro de 2016. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 38: 1-18. <https://doi.org/10.1590/0102-77863810092>
- Lyra, M. J. A., Bonfim, O. E. T., Fedorova, N. & Levit, V. 2018. Diagnóstico de um Complexo Convectivo de Mesoescala Observado no Semiárido do Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*. 11(6): 1998-2009. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.6.p1998-2009>
- Lyra, M. J. A., Cavalcante, L. C. V., Levit, V., & Fedorova, N. (2018). Complexos Convectivos de Mesoescala sobre o Nordeste do Brasil e fenômenos adversos associados. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 9(3), 95-103.
- Lyra, M. J. A.; Cavalcante, L. C. V.; Levit, V.; Fedorova, N. 2019. Ligação entre extremidade frontal e zona de convergência intertropical sobre a região Nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 42(1): 413-424. https://doi.org/10.11137/2019_1_413_424
- Lyra, M. J. A.; Fedorova, N.; Levit, V. Freitas, I. G. F. 2020. Características dos Complexos Convectivos e Mesoescala no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, p. 727-734, 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-7786355000001>
- Lyra, M.J.A., Fedorova, N. Levit, V., Silveira, M.H.S. Mesoscale Convective Complexes in the BNE. In: Fedorova N., Levit, V. 2023. Adverse Meteorological Phenomena in Northeast Brazil. ed. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne.
- Maddox, R.A. 1980. Mesoscale Convective Complexes. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 61(11): 1374-1387.
- Molion, L.C.B. & Bernardo, S.O. 2002. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 17(1): 1-10.
- Moraes, F.D.S & Aquino, F.E. 2018. Desastres no Rio Grande do Sul Associados a Complexos Convectivos de Mesoescala: Estudo de Caso do Evento que ocorreu entre 22 e 23 de abril de 2011. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*. 7: 111-134. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e02018111-134>
- Moraes, F.D.S.; Aquino, F.E.; Mote, T.L.; Durkee, S.D.; Mattingly, K.S. 2020. Atmospheric characteristics favorable for the development of mesoscale convective complexes in southern Brazil. *Inter-Research Science Publisher*. 80(1): 43-58. <https://doi.org/10.3354/cr01595>
- Muanza, . G. A. .; Fedorova, N.; Levit, V. 2022. Ligação da extremidade frontal com zona de convergência intertropical (zci) e análise de fenômenos associados. *Revista de Geociências do Nordeste*. 8(1): 231-243. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n1ID24618>
- O’Gorman, P. A. (2015). Precipitation extremes under climate change. *Current climate change reports*, 1, 49-59
- Pavolonis, M. J., Sieglaff, J. M., & Cintineo, J. L. (2020). Remote sensing of volcanic ash with the GOES-R series. In *The GOES-R Series* (pp. 103-124). Elsevier.
- Rinaldy, N.; Saragih, I. J. A.; Putra, A. W.; Nugraheni, I. R. & Yonas, B. W. 2017. Identification of Mesoscale Convective Complex (MCC) phenomenon with image of

- Himawari 8 Satellite and WRF ARW Model on Bangka Island (case Study: 7-8 February 2016). *IOP Conference series: Earth and Environmental Science*, 98. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/98/1/012002>
- Rodrigues, D. T., Gonçalves, W. A., Spyrides, M. H., Santos e Silva, C. M., & de Souza, D. O. (2020). Spatial distribution of the level of return of extreme precipitation events in Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, 40(12), 5098-5113.
- Rodrigues, L. R. L.; Fedorova, N. & Levit, V. 2010. Adverse meteorological phenomena associated with low-level baric troughs in the Alagoas State, Brazil, in 2003. *Atmospheric Science Letters*, 11: 204-209. <https://doi.org/10.1002/asl.273>
- Shimizu, M. H., Anochi, J. A., & Kayano, M. T. (2022). Precipitation patterns over northern Brazil basins: climatology, trends, and associated mechanisms. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-17.
- Silva Dias M.A.F. 1987. Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2: 133-15.
- Silva, B. F. P.; Fedorova, N.; Levit, V.; Brito, B. M. & Peresetsky, A. 2011. Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(3): 295-310. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000300001>
- Utida, G., Cruz, F. W., Etourneau, J., Bouloubassi, I., Schefuß, E., Vuille, M., Novello, V., Prad, L. F., Sifeddine, A., Klein, V., Zular, A., Viana, J. C.C., Turcq, B. 2019. Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years, *Scientific Reports* 9: 1698. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38003-6>
- Veber, M.A.; Fedorova N.; Levit, V. 2020. Desenvolvimento de Atividades Convectivas Sobre a Região Nordeste do Brasil, Organizada Pela Extremidade Frontal. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35: 995-1003. <https://doi.org/10.1590/0102-77863550071>
- Velasco I.J.; Fritsch, M. 1987. Mesoscale Convective Complexes in the Americas. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92(20): 9591-9613. <http://dx.doi.org/10.1029/JD092iD08p09591>