



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



Ciclones subtropicais Guará e Lexi Parte II: processos físicos responsáveis pelas características subtropicais

Bruna Andreлина Silva¹, Michelle Simões Reboita², Lívia Márcia Mosso Dutra³, Natália Machado Crespo⁴, Rosmeri Porfírio da Rocha⁵

¹ Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais, (35) 3629-1703, brunaandrelina@gmail.com ² Dr. Pesquisadora, Professora do Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, reboita@unifei.edu.br ³ Mestre em Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, R. do Matão 1226, bairro Butantã, CEP 05508-0090, São Paulo, São Paulo, livia.dutra@iag.usp.br, ⁴ Doutora em Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, natalia.crespo@iag.usp.br ⁵ Dr. Pesquisadora, Professora do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, rosmerir.rocha@iag.usp.br

Artigo recebido em 07/07/2021 e aceito em 22/11/2021

RESUMO

Nesse estudo, os processos físicos responsáveis pela ciclogênese subtropical pura do ciclone Guará e da transição subtropical do Lexi são investigados. O ciclone Guará teve gênese no oceano Atlântico Sul em dezembro de 2017 e o ciclone Lexi teve gênese no oceano Pacífico Sudeste em maio de 2018. Como no estudo da Parte I, aqui também se utiliza a reanálise ERA5. Para cada ciclone é realizada a análise sinótica e dos balanços de calor e vorticidade. Entre os principais resultados desse estudo têm-se que a transição subtropical do ciclone Lexi foi influenciada pela interação com uma *cutoff low*, que favoreceu um ambiente com fraco cisalhamento vertical do vento horizontal, à medida que estava se acoplando com o ciclone extratropical em superfície. O ciclone subtropical Guará se formou associado tanto a processos dinâmicos (presença de um cavado de onda curta de pequena amplitude em 500 hPa), cisalhamento horizontal do vento induzindo vorticidade ciclônica em baixos níveis da atmosfera e o fraco cisalhamento vertical do vento horizontal, quanto a processos termodinâmicos, como a influência da transferência turbulenta de calor e umidade na interface mar-ar. Os balanços de calor e vorticidade nas imediações de cada um dos ciclones contribuíram para confirmar a ocorrência dos processos descritos, assim como evidenciam o papel relevante da liberação de calor latente associada à convecção na fase de formação do Guará e de transição subtropical do Lexi.

Palavras-chave: Ciclones Subtropicais, Oceano Atlântico Sul, Oceano Pacífico Sudeste, balanços de calor e vorticidade

Subtropical cyclones Guará and Lexi Part II: physical processes responsible for the subtropical characteristics

ABSTRACT

In this study, the physical processes responsible for the pure subtropical cyclogenesis of Guará and the subtropical transition of Lexi are investigated. Cyclone Guará had its genesis in the South Atlantic Ocean in December 2017 and cyclone Lexi had its genesis in the Southeast Pacific Ocean in May 2018. As in the study Part I, ERA5 reanalysis is also used here. Synoptic analysis and heat and vorticity balances are performed for each cyclone. Among the main results of this study we obtained that the Lexi's subtropical transition was influenced by the interaction with a cutoff low, which favored an environment with weak vertical shear of horizontal wind, as it was coupling with the extratropical cyclone at surface. The subtropical cyclone Guará was formed associated with dynamic processes (presence of a short wave trough with small amplitude at 500 hPa), horizontal wind shear inducing cyclonic vorticity at low-levels of the atmosphere and weak vertical shear of horizontal wind, and thermodynamic processes, as the influence of turbulent transfer of heat and moisture at the sea-air interface. The heat and vorticity budgets equations of each cyclone contributed to confirm the occurrence of the described processes, as well highlight the relevant role of the release of the latent heat associated with the convection in the Guará formation and Lexi subtropical transition.

Keywords: Subtropical Cyclones, South Atlantic Ocean, South Pacific Ocean, Cutoff Low, heat and vorticity budgets

Introdução

Os ciclones subtropicais (CS), embora menos frequentes do que os ciclones extratropicais, também têm potencial para causar danos nas regiões costeiras (Yanase et al., 2014; Dutra et al., 2017; Gozzo et al., 2017; McTaggart-Cowan et al., 2017; Selmo, 2020). O número de estudos de CS tem aumentado no oceano Atlântico Sul (OAS) nos últimos anos, enquanto no oceano Pacífico Sudeste (OPS) são mais raros. Um dos motivos para o menor número de estudos é que o OPS tem menos condições climatológicas para ocorrência de ciclones com núcleo quente (Gray, 1968; Beerli, 2013; Emanuel e Nolan, 2004).

O estudo de da Rocha et al. (2019) compila as principais características dos ciclones subtropicais nos oceanos do globo. Além disso, apresenta uma figura esquemática com os mecanismos associados à ciclogênese subtropical. Com relação ao OAS, tem sido mostrado que a gênese dos ciclones subtropicais está associada com a presença de um cavado de pequena amplitude em níveis médios e altos da atmosfera ou com a presença de uma *cutoff low* (Guishard, 2006; Reboita et al., 2010; Reboita et al., 2017a-b), neste último caso, elas propiciam fraco cisalhamento vertical do vento (Guishard, 2006; Gozzo et al., 2014). Com relação às condições na superfície oceânica, esses sistemas se formam em condições variadas de temperatura da superfície do mar (Evans e Braun, 2012; Gozzo et al. 2014). Ainda são poucos os estudos que envolvam equações da dinâmica da atmosfera para avaliar os processos físicos associados aos CS. Por exemplo, no OAS, Dutra et al. (2017) analisaram os balanços de calor e de vorticidade do CS Anita ocorrido em março de 2010. Entre os resultados, os autores mostraram que o aquecimento diabático e a advecção horizontal da temperatura foram essenciais para o desenvolvimento deste ciclone subtropical.

No estudo “Ciclones subtropicais Guará e Lexi - Parte I: Estrutura Térmica e Características Gerais”, foi apresentada a evolução temporal da estrutura térmica dos ciclones Guará e Lexi. O ciclone Guará teve ciclogênese subtropical pura no oceano Atlântico Sul em dezembro de 2017 e o ciclone Lexi teve gênese no oceano Pacífico Sudeste em maio de 2018 e depois transicionou para a categoria subtropical 0006 Z de maio de 2018. A fim de complementar o estudo Parte I, esse tem como objetivo descrever os processos físicos responsáveis pelas características subtropicais de ambos os ciclones.

Material e métodos

Área de Estudo e Dados

A descrição detalhada da área de estudo e dos dados utilizados é apresentada no estudo Parte I. Aqui é feita uma breve contextualização desses. A região de estudo compreende as latitudes 50°S e 15°N e as longitudes 110°W e 10°E, o que inclui o OPS e o sudoeste do oceano Atlântico Sul (OAS). Os dados usados são provenientes da reanálise ERA5 (Hersbach et al., 2020), desenvolvida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* - ECMWF. Os dados possuem resolução horizontal de 0,25°, frequência de uma hora. Como o estudo trata-se de sistemas de escala sinótica, a frequência dos dados aqui utilizada é de 6 horas, seguindo os horários sinóticos padrões (0000, 0600, 1200 e 1800 Z) e a resolução horizontal utilizada para a análise dos termos dos balanços de calor e vorticidade é de 2,5°, a fim dos resultados não serem afetados por distúrbios de mesoescala.

A precipitação utilizada é proveniente do *Global Precipitation Measurement* - GPM (Huffman et al., 2015), que é baseado em dados de satélites, com resolução de 0,25° de latitude por longitude e frequência de 3 horas (disponível em <https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads>). Junto à precipitação, comparou-se a nebulosidade ocasionada pelos ciclones a cada 6 horas por meio dos dados de temperatura de brilho do canal infravermelho (GrinoadSAT-B1 - próximo a 11 microns) cedida pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA (Knapp e NOAA CDR Program, 2014) e de livre acesso em www.ncdc.noaa.gov/gridsat.

Caracterização do Ambiente Sinótico

Com o intuito de analisar os mecanismos que propiciaram a transição subtropical do ciclone Lexi e a gênese subtropical pura do ciclone Guará, são apresentados mapas sinóticos de diferentes variáveis atmosféricas e oceânicas. Como nem sempre os sistemas de escala sinótica, como os do presente estudo, seguem um modelo conceitual de formação, desenvolvimento e dissipação, a contribuição do cisalhamento horizontal do vento para gerar vorticidade relativa ciclônica também é analisada. Assim, é utilizada a Equação 1, representada em coordenadas naturais, seguindo Schenkel (2009) e Reboita et al. (2020):

$$\frac{\partial v}{\partial n} = \underbrace{\frac{-1}{v^2} \left(u^2 \frac{\partial u}{\partial y} - v^2 \frac{\partial v}{\partial x} \right)}_{(i)} - \underbrace{uv \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)}_{(iii)} \quad (1)$$

onde u e v são os componentes zonal e meridional do vento, V é a magnitude do vento horizontal em 925 hPa e n representa a direção normal do vento.

Balanco de Calor

O balanço de calor na região dos ciclones é calculado através da equação (2) da termodinâmica em coordenadas esféricas. De modo geral, a equação indica que a variação local da temperatura de uma parcela de ar é induzida pela advecção horizontal da temperatura, pelos processos adiabáticos e diabáticos.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \left(\frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial T}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) - \omega \left(\frac{\partial T}{\partial p} + \frac{a}{c_p} \right) + F_T \quad (2)$$

(i) (ii) (iii) (iv)

em que T é a temperatura do ar (K); u e v são os componentes zonal e meridional do vento ($m s^{-1}$); t é o tempo (s); a é o raio da Terra (m); ω é a pseudo velocidade vertical em coordenada vertical de pressão ($Pa s^{-1}$); c_p é o calor específico à pressão constante ($1004 J K^{-1} kg^{-1}$); φ é a latitude (radianos); λ é a longitudes (radianos). O significado físico de cada termo é: (i) a variação local da temperatura; (ii) advecção horizontal de temperatura; (iii) a soma dos processos adiabáticos e da advecção vertical de temperatura; (iv) é o resíduo da equação de balanço de calor. O termo residual da equação da termodinâmica representa toda a contribuição subgrade (Virji, 1982) e corresponde principalmente às fontes diabáticas de calor na atmosfera bem como as incertezas (Sinclair, 1993).

Balanco de Vorticidade

A vorticidade é uma medida da rotação das parcelas de um fluido (Carlson, 1991). A equação da vorticidade (Equação 3) em coordenadas esféricas e em coordenadas isobáricas é:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left(\frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - \frac{v}{a} \frac{\partial f}{\partial \varphi} - \left(\zeta + f \right) \vec{\nabla}_p \cdot \vec{V}_H - \left(\frac{1}{a} \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \frac{\partial v}{\partial p} \right) + F_\zeta \quad (3)$$

(i) (ii) (iii) (iv) (v) (vi) (vii)

em que ζ é a vorticidade relativa (s^{-1}); t é o tempo (s); p é a pressão (Pa); ω é a pseudo velocidade vertical em coordenada vertical de pressão ($Pa s^{-1}$); f é a vorticidade planetária (s^{-1}); $\vec{\nabla}_p$ é o operador nabla horizontal calculado sobre uma superfície de pressão constante; $\vec{V}_H$ é o vento horizontal; u e v são os componentes zonal e meridional do vento ($m s^{-1}$); a é o raio da Terra (m); φ é a latitude (radianos); λ é a longitudes (radianos). O significado físico de cada termo é: (i) variação local

de vorticidade; (ii) advecção horizontal de vorticidade relativa; (iii) advecção vertical de vorticidade relativa; (iv) advecção meridional de vorticidade planetária; (v) termo da divergência; (vi) termo de inclinação; (vii) resíduo da equação da vorticidade.

Nem todos os termos da equação da vorticidade são relevantes em sistemas de escala sinótica. Como o termo da advecção vertical de vorticidade relativa (iii), o termo de advecção meridional de vorticidade planetária (iv) e o termo de inclinação (vii) são pelo menos uma ordem de grandeza menor que os demais, não foram considerados neste estudo. Dias Pinto (2007) menciona que as situações em que o resíduo da equação de vorticidade é diferente de zero, são indicativas de que há outros processos dinâmicos atuando nas tendências de vorticidade, entretanto, tais processos não estão explícitos na equação.

Os termos das equações 2 e 3 são calculados com o método de diferenças finitas centradas no tempo, para os termos que envolvem derivada no tempo, e no espaço, para os termos que envolvem derivadas no espaço. Os do balanço de calor e vorticidade são mostrados através de perfis verticais médios seguindo a trajetória do centro ciclone. As médias foram calculadas numa área de $10^\circ \times 10^\circ$ de latitude por longitude.

Resultados e discussão

Ao longo do texto, quando as siglas GN, TS, FI, TE, DS, FS e FT forem mencionadas, significam, respectivamente: gênese, transição subtropical, fase intensa, transição extratropical, dissipação, fase subtropical e fase extratropical.

Análise Sinótica e Balanços de Calor e Vorticidade

Esta seção apresenta a análise sinótica no horário da gênese do ciclone Guará e da transição subtropical do ciclone Lexi a fim de mostrar as características do ambiente que contribuíram para os sistemas serem subtropicais. Além disso, são analisados os mecanismos físicos que contribuíram para as características subtropicais desses sistemas através dos balanços de calor e vorticidade.

Guará

Campos Sinóticos

Os campos sinóticos na gênese do Guará (0000 Z de 09 de dezembro de 2017) são mostrados na Figura 1. O período pré-ciclogênese não é apresentado, pois mostra muitas similaridades com o da gênese. O Guará se forma praticamente sob o eixo de um cavado de onda curta com pouca amplificação em 500 hPa, mas que mostra sinal de

divergência de massa em 500 hPa (Figura 1A). Esse fraco suporte dinâmico ao se associar com a vorticidade relativa ciclônica produzida por cisalhamento horizontal do vento em 925 hPa (Figura 1C) e até mesmo com o fraco cisalhamento vertical do vento (200-850 hPa) no setor noroeste da região de gênese são processos dinâmicos importantes para a gênese do Guará. Em altos níveis, a Figura 1B deixa claro que não houve contribuição de forçante em 200 hPa, pois não há presença de divergência na região da baixa em superfície. Não obstante, ainda se tem a contribuição de alguns processos termodinâmicos (descritos a seguir).

O cisalhamento horizontal do vento em 925 hPa mostra a interação do escoamento de norte/nordeste do anticiclone subtropical do Atlântico Sul com os ventos de leste na região costeira do ES e RJ (Figura 1C). A gênese do Guará também ocorre numa área próxima a de fraco cisalhamento vertical do vento horizontal (menor do que $12,5 \text{ m s}^{-1}$; Figura 1C), o que pode favorecer a organização vertical da convecção e, conseqüentemente, o abaixamento da pressão atmosférica em superfície. De fato, a imagem de satélite no infravermelho (Figura 1F) mostra temperatura de brilho inferior a 220 K ($< -53,15^\circ\text{C}$), área mais esbranquiçada na figura) próxima ao local de gênese, o que indica a presença de nuvens profundas na atmosfera que são uma indicação de forte atividade convectiva. A nebulosidade presente a nordeste do centro de baixa pressão em superfície (Figura 1F) está associada com acumulados de chuva, que resultaram em alagamentos no litoral norte do Espírito Santo e litoral sul da Bahia (LEIAMAISba, 2017) e destelhamento de casas, devido aos ventos intensos.

Os processos termodinâmicos também contribuem para a gênese do Guará. Na região de formação do ciclone tem-se advecção horizontal de ar quente (Figura 1F) e úmido (Figura 1G) em 850 hPa. O Guará também ocorre sobre águas quentes, onde a TSM alcança $25,9^\circ\text{C}$ e supera o valor climatológico nas cercanias da região costeira (Figura 1D). Mesmo que na maior parte da área ocupada pela ciclogênese a TSM não exceda à climatologia, essa é mais quente que a temperatura do ar a 2 m, contribuindo então para a transferência de calor sensível do oceano para a atmosfera (há um gradiente vertical de temperatura como mostra a Figura 1D). A soma dos fluxos de calor latente e sensível na área da gênese atinge cerca de 120 W m^{-2} (Figura 1D), o que é similar ao valor climatológico em dezembro, conforme apresentam Andrelina e Reboita (2021).

Em síntese, a análise sinótica sugere que a gênese do Guará tem contribuição de processos dinâmicos e termodinâmicos. A contribuição dinâmica ocorre através da presença de cisalhamento horizontal do vento em 925 hPa, que atua gerando vorticidade ciclônica em superfície, e do fraco cisalhamento vertical do vento horizontal, que é importante para permitir a organização vertical da convecção. A contribuição termodinâmica está associada com a advecção horizontal quente e úmida, que torna a camada atmosférica mais leve (ar úmido é menos denso) favorecendo movimento vertical ascendente. Essa também é facilitada pelo gradiente de temperatura na interface ar-mar (TSM mais quente que a temperatura a 2 m). Uma maneira de avaliar mecanismos físicos no processo de formação do ciclone é através das equações dos balanços de calor e vorticidade. Esses balanços são calculados para todo o ciclo de vida do Guará e mostrados na próxima seção, através de perfis verticais.

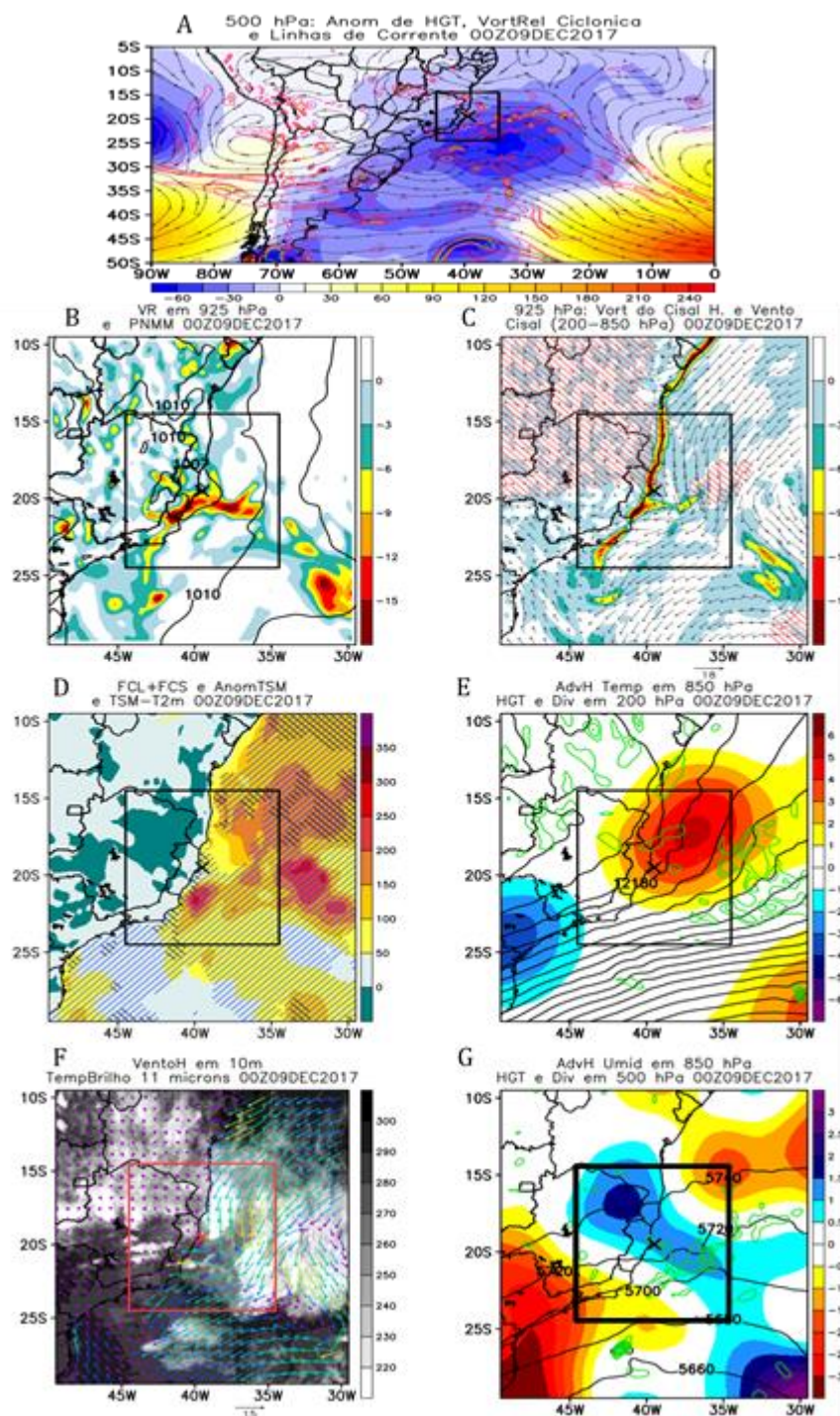


Figura 1. Campos espaciais para o Guarará: A: anomalia de altura geopotencial em 500 hPa (colorido; gpm), vorticidade relativa ciclônica (linhas coloridas; $10^{-5}s^{-1}$) e linhas de corrente em 500 hPa; B: vorticidade relativa em 925 hPa (colorido; $10^{-5}s^{-1}$), PNMM (linha contínua preta; hPa); C: vorticidade relativa em 925 hPa em função do cisalhamento horizontal do vento em 925 hPa (colorido; $10^{-5}s^{-1}$), vetores do vento em 925 hPa (setas pretas; $m s^{-1}$) e cisalhamento do vento abaixo de $10 m s^{-1}$ (hachurado vermelho; $m s^{-1}$) calculado entre 200 e 850 hPa; D: somatório dos fluxos de calor latente e sensível (colorido; $W m^{-2}$), anomalia positiva de TSM (hachurado preto na direção 45° ; $^\circ C$) e TSM-T2m acima de $0^\circ C$ (hachurado azul na direção 135° ; $^\circ C$); E: advecção horizontal de temperatura em 850 hPa (colorido; $K dia^{-1}$), altura geopotencial em 200 hPa (linha contínua preta; gpm) e divergência em 200 hPa (linha contínua verde; $10^{-5}s^{-1}$); F: temperatura de brilho em 11 microns (tons de cinza; K) e vetores do vento em 10 metros (setas coloridas; $m s^{-1}$); G: advecção horizontal de umidade específica em 850 hPa (colorido; $g kg^{-1} dia^{-1}$), altura geopotencial em 500 hPa (linha contínua preta; gpm) e divergência em 500 hPa (linha contínua verde; $10^{-5}s^{-1}$).

Balanço de Calor

Na análise sinótica destaca-se a presença de advecção horizontal quente em baixos níveis da atmosfera na região de gênese do Guará, essa é confirmada através do perfil vertical da advecção horizontal de temperatura do ar na Figura 2B em que há um núcleo quente ligeiramente mais intenso entre 900 e 800 hPa. A advecção quente predomina durante todo o ciclo de vida do ciclone na camada entre 1000 e 350 hPa. No horário da gênese, o perfil vertical da soma de advecção vertical da temperatura do ar e processos adiabáticos indica movimentos ascendentes na coluna atmosférica, onde o sinal negativo mostra o resfriamento por expansão adiabática superando a advecção vertical de ar quente (Figura 2C). Esse termo acaba contribuindo para a tendência negativa de temperatura próximo de 0000 Z do dia 9 (Figura 2A). A presença de movimentos ascendentes está

associada com a ocorrência de convecção, que à medida que se intensifica (após 1200 Z do dia 9) aumenta a liberação de calor latente na atmosfera. Esse processo é confirmado através dos valores elevados do termo diabático em níveis médios no dia da gênese após 1200 Z do dia 9 (Figura 2D). Nota-se, portanto, que ambos os termos (movimentos verticais e processos diabáticos) se contrapõem, isso é uma característica que ocorre nos ciclones (Dutra et al. 2017; Marrafon e Reboita, 2018).

A Figura 3A (Parte I) mostra que os ventos mais intensos próximo à superfície ocorrem entre às 1200 Z do dia 09 e às 0000 Z do dia 10. Nesse mesmo período, os termos referentes aos processos diabáticos e de movimento vertical ascendente estão mais intensos (se contrapondo) na camada entre a superfície e 400 hPa.

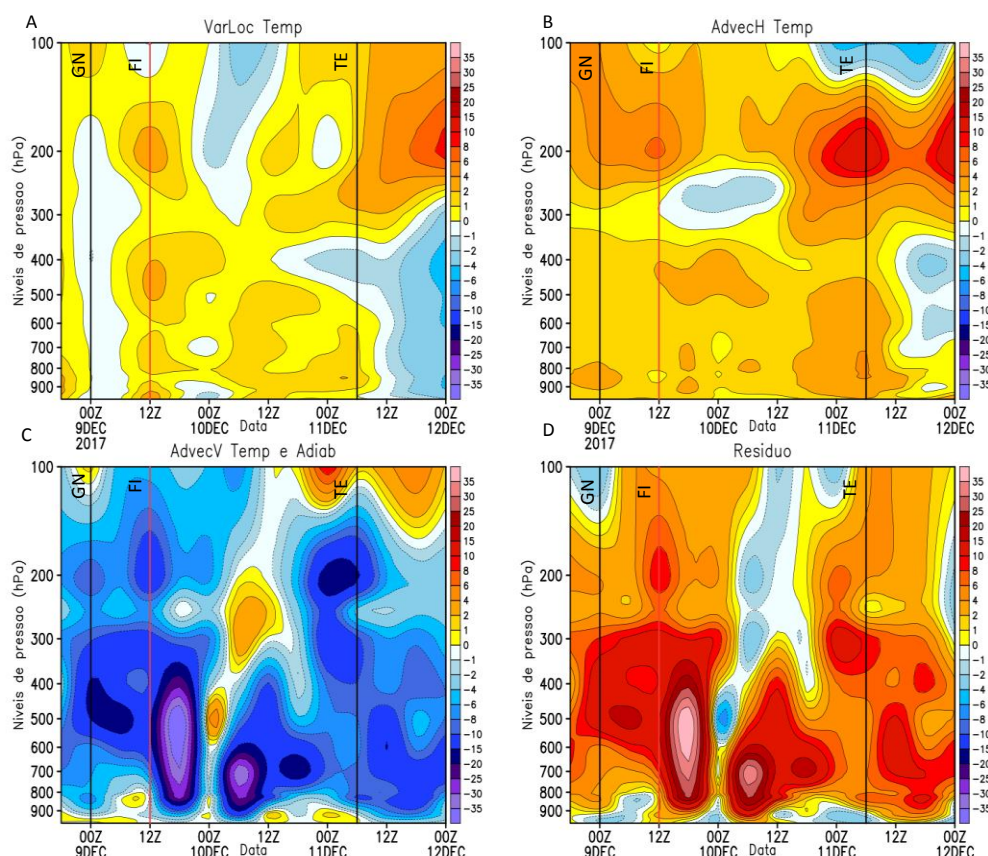


Figura 2. Perfil vertical dos termos da equação do balanço de calor para o ciclone Guará ($K \text{ dia}^{-1}$): A. variação local de temperatura, B. advecção horizontal de temperatura, C. soma da advecção vertical de temperatura e do termo adiabático e D. termo residual. Da esquerda para a direita, as linhas na vertical indicam no Guará a gênese, fase mais intensa em termos de vorticidade relativa ciclônica em baixos níveis (linha vermelha) e transição extratropical. As iniciais GN, FI e TE correspondem à fase de gênese, intensa e de transição extratropical, respectivamente.

Balanço de Vorticidade

A Figura 3A mostra um predomínio de vorticidade relativa ciclônica na região de gênese do Guará no termo da variação local da vorticidade.

Da pré-ciclogênese até a dissipação do Guará, há advecção horizontal de vorticidade anticiclônica nas camadas mais próximas à superfície (Figura 3B). A advecção de vorticidade anticiclônica está

relacionada com a presença do anticiclone subtropical a leste da região de gênese, como mostrado na Figura 6B-E em que predominam ventos de norte/nordeste próximo da região de gênese. Em contrapartida, em baixos níveis, predomina sinal negativo no termo da divergência, indicando convergência de massa em superfície e favorecimento à vorticidade relativa ciclônica (Figura 3C). Por outro lado, entre 500 e 400 hPa o termo da divergência torna-se positivo contribuindo para vorticidade anticiclônica. Logo,

isso é um indicativo de que o Guará possui um núcleo não muito profundo na coluna atmosférica. Essa característica também é documentada em outros casos de CS no Atlântico Sul (Gozzo et al., 2014; Reboita et al., 2017a-b; Reboita et al., 2019). Já o termo residual mostra vorticidade ciclônica intensa entre 800 e 400 hPa ao longo de todo o dia 09 de dezembro, indicando a atuação da atividade convectiva em transportar vorticidade ciclônica (resultante do termo de divergência) da baixa para a média/alta troposfera.

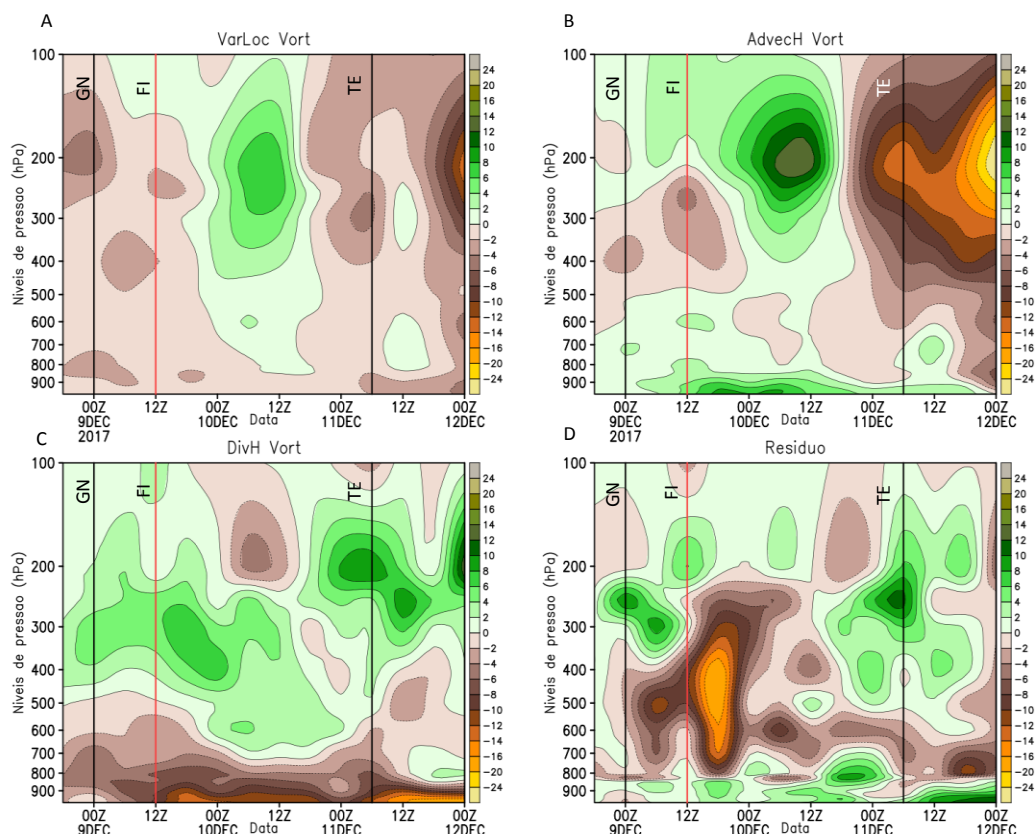


Figura 3. Perfil vertical dos termos da equação de vorticidade para o ciclone Guará (10^{-10} s^{-2}): A. variação local de vorticidade relativa, B. advecção horizontal de vorticidade relativa, C. termo divergente e D. termo residual. Da esquerda para a direita, as linhas na vertical indicam no Guará a gênese, fase mais intensa em termos de vorticidade relativa ciclônica em baixos níveis (linha vermelha) e transição extratropical. As iniciais GN, FI e TE correspondem à fase de gênese, intensa e de transição extratropical, respectivamente.

Lexi

Campos Sinóticos

O Lexi apresenta um ciclo de vida com fase extratropical e transição para subtropical. Os campos de PNMM e linhas de corrente em 300 hPa (Figura 4) mostram que, no oceano Pacífico ($27,5^{\circ}\text{S}$; $163,25^{\circ}\text{W}$), se forma um CE que se intensifica ao longo do tempo (Figura 4B) e, às 0600 Z de 01 de maio, apresenta uma deformação, ao se expandir para leste. Com isso, origina-se um novo ciclone extratropical em superfície (identificado com as caixas em preto na Figura 4)

às 1200 Z do dia 01 de maio de 2018 (Figura 4D), que pode ser até o resultado de uma ciclogênese secundária (a verificação desse processo não é foco do presente estudo). Esse novo ciclone, é o Lexi, alvo deste estudo. O Lexi se desloca para leste e interage com uma *cutoff low* em médios/altos níveis (Figura 4). Quando esses sistemas estão quase acoplados, às 0600 Z do dia 05 de maio, o CPS (Figura 2C-D - Parte I) mostra que o ciclone adquire características subtropicais. O processo físico associado a isso está grandemente relacionado à redução do cisalhamento vertical do

vento horizontal devido à configuração da *cutoff low* (McTaggart-Cowan et al., 2006; Evans e Braun, 2012; Dias Pinto et al. 2013; Gozzo et al., 2014). Com cisalhamento vertical fraco, a atmosfera pode organizar a convecção. Além disso, alguns estudos mostram que devido à *cutoff low* ser

uma baixa fria, isso pode promover instabilidade da atmosfera (Fuenzalida et al., 2005; Garreaud e Fuenzalida, 2007; Reboita et al., 2010).

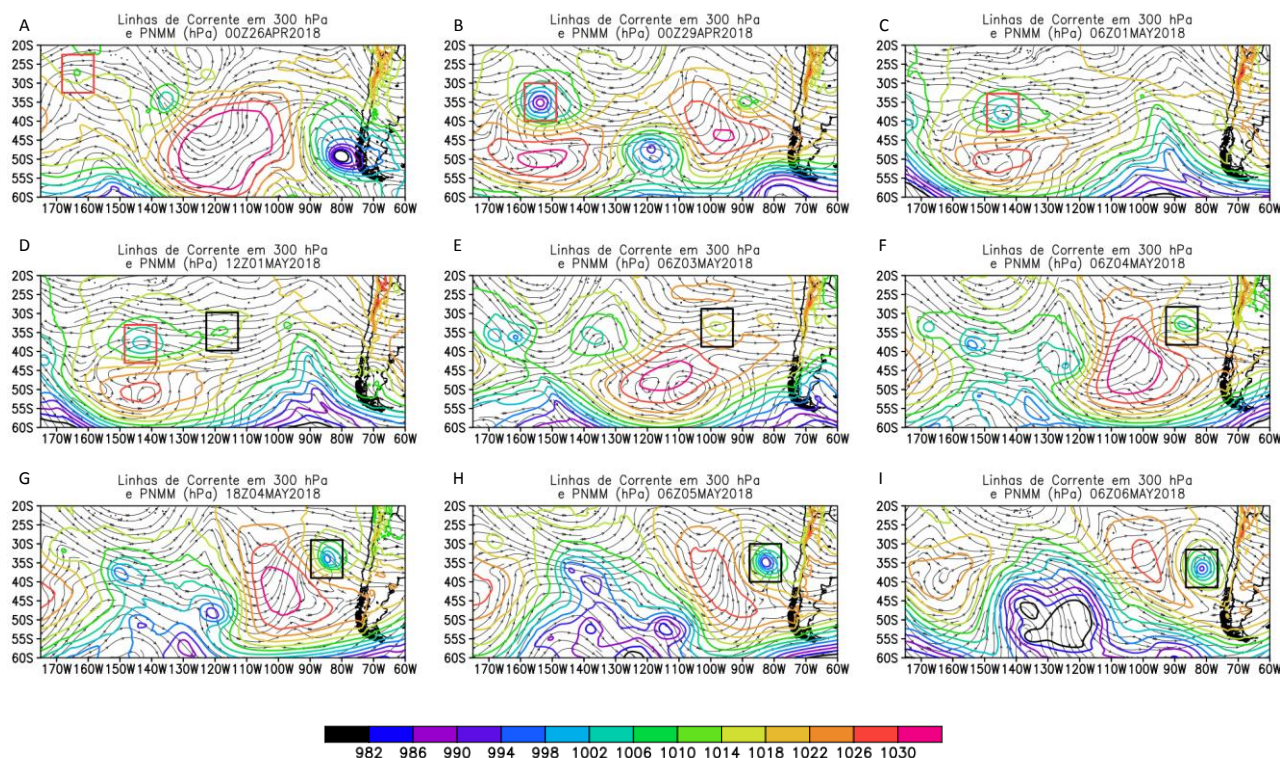


Figura 4. Evolução do ciclone Lexi: linhas de corrente em 300 hPa (linhas contínuas pretas) e PNMM (linhas contínuas coloridas; hPa) para A. 0000 Z de 26 de abril, B. 0000 Z de 29 de abril, C. 0600 Z de 01 de maio, D. 1200 Z de 01 de maio, E. 0600 Z de 03 de maio, F. 0600 Z de 04 de maio, G. 1800 Z de 04 de maio, H. 0600 Z de 05 de maio e I. 0600 Z de 05 de maio.

De fato, a imagem de satélite no IR mostra menores valores de temperatura de brilho entre os setores centro-leste e centro-sul da *cutoff low* (Figura 5E). Entretanto, essa área de nebulosidade também tem contribuição da advecção horizontal de ar quente (Figura 5D) atrelada à advecção horizontal de ar úmido em 850 hPa (Figura 5F), no setor leste do ciclone em superfície. Isso induz movimentos ascendentes, pois o ar da camada se torna menos denso e, aliado aos fluxos de calor latente e sensível na direção mar-ar (Figura 5C), há favorecimento para a convecção.

A Figura 5, que representa o primeiro horário da fase subtropical do Lexi, mostra que o cisalhamento horizontal do vento em 925 hPa parece ter pouca contribuição para a vorticidade ciclônica do sistema em superfície (Figura 5B),

enquanto o fraco cisalhamento vertical tem maior destaque para a transição do sistema (Figura 5B). Além disso, os fluxos turbulentos de calor total superam a climatologia, do mês de maio (Silva e Reboita, 2021), em mais de 250 W m^{-2} , na mesma região do entorno onde atua o ciclone subtropical Lexi. A TSM (Figura 5C) mais elevada que a temperatura do ar a 2 metros também sugere a contribuição termodinâmica para a transição do Lexi.

Na Figura 5F é mostrado que a *cutoff low* tem centro fechado em 500 hPa e estágio de *tear off* (Reboita et al., 2010) em 300 hPa e que a advecção de temperatura do ar em 850 hPa já não configura a de um ciclone extratropical, em que aparece advecção horizontal fria no setora oeste do centro do ciclone.

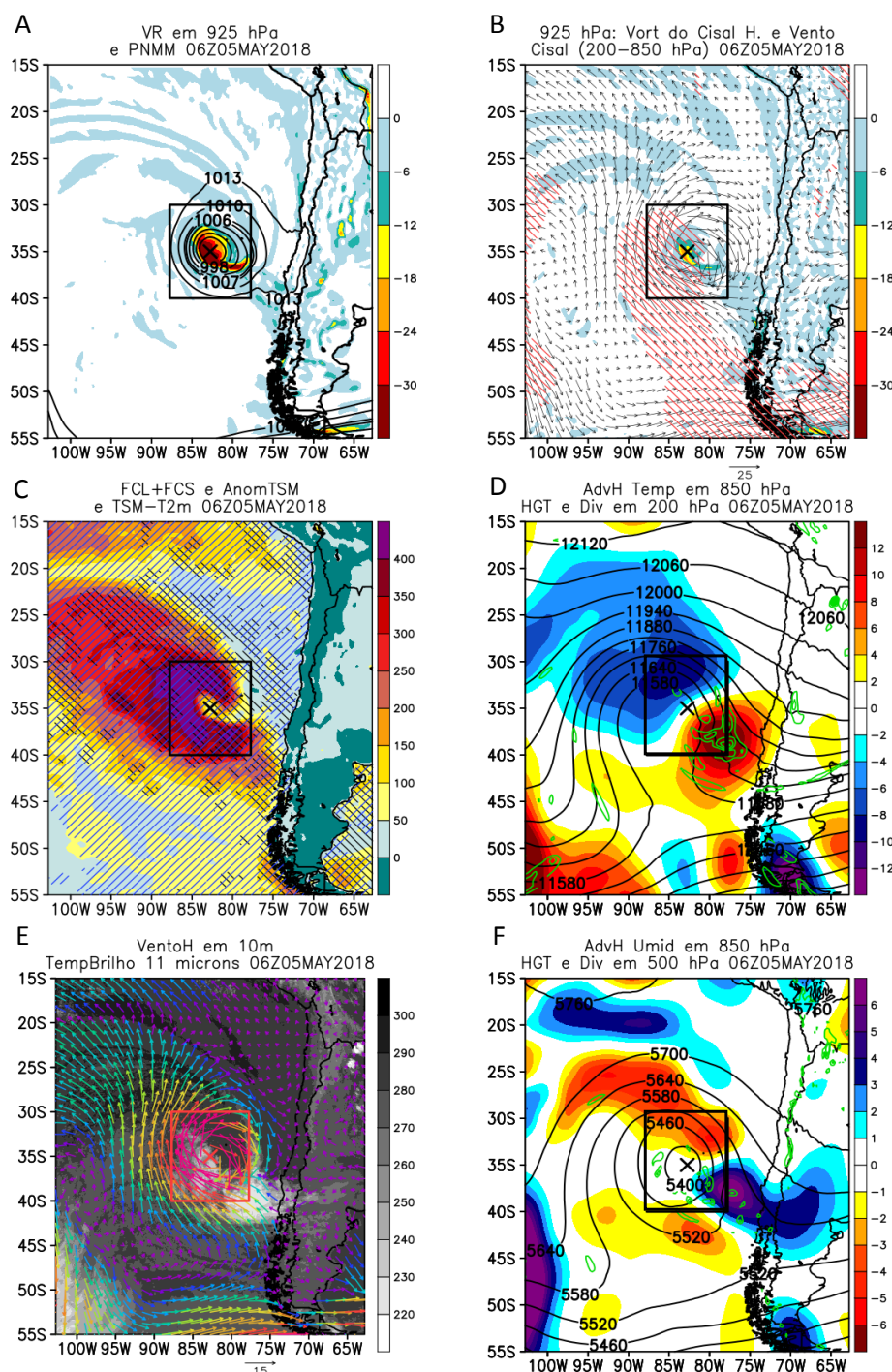


Figura 5. Campos espaciais para o Lexi: A. vorticidade relativa em 925 hPa (colorido; 10^{-5}s^{-1}), PNMM (linha contínua preta; hPa) e divergência em 200 hPa (linha contínua roxa; 10^{-5}s^{-1}); B. vorticidade relativa em 925 em função do cisalhamento horizontal do vento em 925 hPa (colorido; 10^{-5}s^{-1}), vetores do vento em 925 hPa (setas pretas; m s^{-1}) e cisalhamento do vento abaixo de 10 m s^{-1} (hachurado vermelho; m s^{-1}), calculado entre 200 e 850 hPa; C. somatório dos fluxos de calor latente e sensível (colorido; W m^{-2}), anomalia positiva de TSM (hachurado preto na direção 45° ; $^\circ\text{C}$) e TSM-T2m acima de 0°C (hachurado azul na direção 135° ; $^\circ\text{C}$); D. advecção horizontal de temperatura em 850 hPa (colorido; K dia^{-1}), altura geopotencial em 200 hPa (linha contínua preta; gpm) e divergência em 200 hPa (linha contínua verde; 10^{-5}s^{-1}); E. temperatura de brilho em 11 microns (tons de cinza; K) e vetores do vento em 10 metros (setas coloridas; m s^{-1}); F. advecção horizontal de umidade específica em 850 hPa (colorido; $\text{g kg}^{-1} \text{dia}^{-1}$), altura geopotencial em 500 hPa (linha contínua preta; gpm) e divergência em 500 hPa (linha contínua verde; 10^{-5}s^{-1}).

Balço de Calor

Nos dias 04 e 05 de maio, entre a superfície e 300 hPa, a tendência local da temperatura é negativa (Figura 6A) e isso tem a contribuição do termo de advecção vertical e processos adiabáticos (Figura 6C) e do termo da advecção horizontal de temperatura do ar (Figura 6B), que mostra advecção fria até cerca de 500 hPa. Por outro lado, o termo diabático mostra sinal positivo (Figura 6D) da superfície a cerca de 500-400 hPa, fato relacionado à intensa convecção que também pode ser inferida através do termo adiabático (Figura 6C).

De 300 a 100 hPa, a tendência local de aquecimento (com valor aproximado de 12 K dia⁻¹) é devido à advecção horizontal quente. Esse resultado parece contraditório ao fato da *cutoff low* ser um sistema de centro frio. Entretanto, em geral,

as *cutoff lows* se formam associadas à advecção quente no seu setor sudoeste que ajuda a amplificar uma crista a sul do *cutoff low*. Portanto, há advecção quente na região desse sistema. Além disso, o resultado obtido aqui é similar aos estudos de caso de Dias Pinto (2007), Godoy (2011), Siqueira et al. (2013) e Ferreira et al. (2019).

Os termos da equação do balanço de calor ajudam a confirmar que a fase subtropical do Lexi teve forte contribuição dos processos diabáticos nos baixos níveis da atmosfera (Figura 6C), o que esteve associado com os fluxos turbulentos de calor na direção mar-ar. Já o perfil vertical de temperatura do ar ajuda a confirmar a contribuição da *cutoff low*. Se em médios/altos níveis ocorresse somente a presença de um cavado, muito provavelmente que tal advecção seria fria.

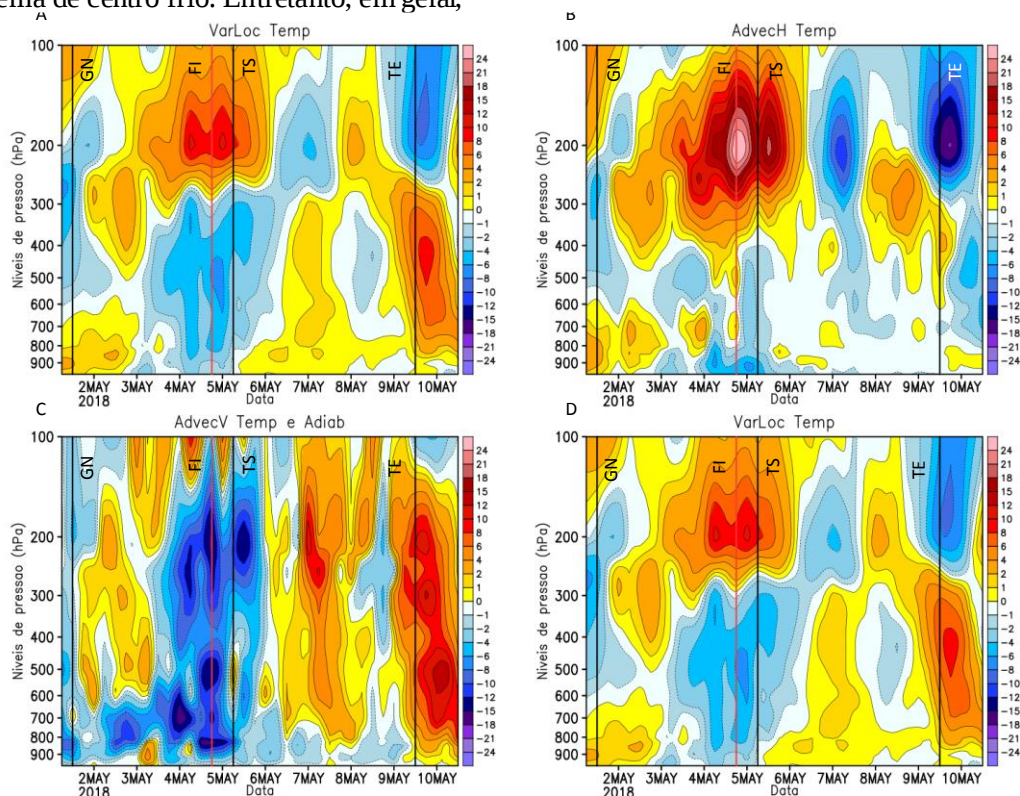


Figura 6. Perfil vertical dos termos da equação de calor para o ciclone Lexi (K dia⁻¹): A. variação local de temperatura, B. advecção horizontal de temperatura, C. soma da advecção vertical de temperatura e do termo adiabático e D. termo residual. Da esquerda para a direita, as linhas indicam a gênese, a fase mais intensa (linha vermelha), transição subtropical e transição extratropical. As fases mais intensas foram definidas em termos de vorticidade relativa ciclônica em baixos níveis. As iniciais GN, FI, TS e TE correspondem à fase de gênese, intensa, de transição subtropical e de transição extratropical, respectivamente.

Balço de Vorticidade

Do dia 04 ao final do dia 05 de maio, a tendência local de vorticidade relativa ciclônica mostra sinal negativo em toda a coluna atmosférica e sendo mais intenso entre 300 e 200 hPa (Figura 7A). Essa tendência é favorecida pelo termo da

advecção horizontal de vorticidade ciclônica (Figura 7B) associada tanto ao cavado referente ao ciclone extratropical quanto à *cutoff low* (Figura 4). Além disso, esse sinal é similar ao do estudo de caso de Dias Pinto (2007) que observou a presença de advecção de vorticidade ciclônica em altos

níveis, associada a uma *cutoff low* no OAS. Em superfície, a vorticidade ciclônica do Lexi está relacionada com a convergência (Figura 7C). Já em altitude, a partir de cerca de 400 hPa, predomina divergência. Por fim, o resíduo mostra sinal negativo (Figura 7D). Ainda com relação ao termo da divergência, ele mostra claramente a situação de compensação na coluna atmosférica: se há convergência em superfície, ocorrerá divergência em níveis mais afastados dessa.

Na Figura 3D (Parte I) foi mencionado que o Lexi tinha maior intensidade nos baixos níveis da atmosfera às 1800 UTC do dia 04, antes da transição subtropical. Pelos termos do balanço de vorticidade, sugere-se a contribuição da convergência e do termo de resíduo. Esses mesmos

termos tornam-se mais intensos no período da transição subtropical (0600 Z do dia 05), o que pode ser uma resposta ao acoplamento em superfície com a *cutoff low* em níveis médios e altos.

A tendência positiva de vorticidade relativa após a transição extratropical (1200 Z de 09 de maio de 2018) indica enfraquecimento em decorrência da desintensificação da circulação ciclônica. O termo residual atuou na geração de vorticidade anticiclônica entre 1000 e 900 hPa e propiciou tendência ciclônica na primeira fase extratropical do ciclone Lexi, com maior magnitude nas camadas entre 900 e 600 hPa. Em síntese, o sistema esteve mais próximo de um balanço na segunda metade da fase subtropical.

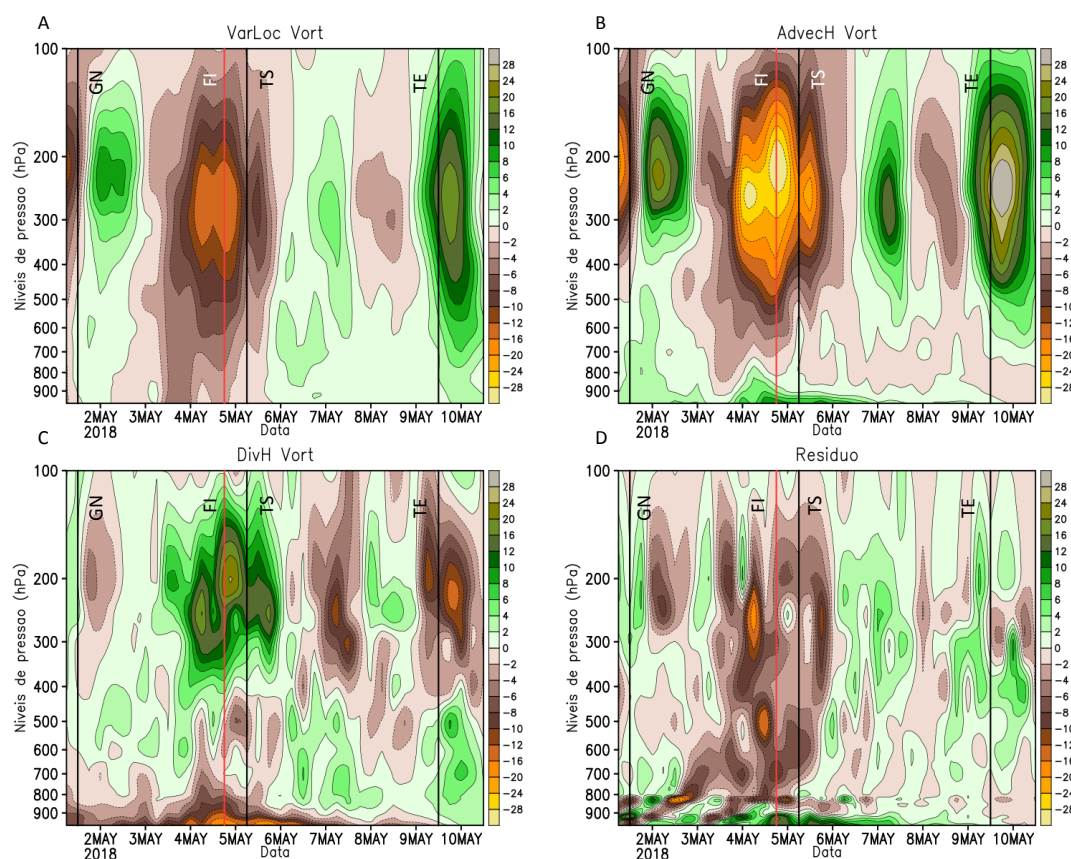


Figura 7. Perfil vertical dos termos da equação de vorticidade para o ciclone Lexi (10^{-10} s^{-2}): A. Variação local de vorticidade relativa, B. Advecção horizontal de vorticidade relativa, C. termo divergente e D. Termo residual. Da esquerda para a direita, as linhas indicam a gênese, a fase mais intensa (linha vermelha), transição subtropical e transição extratropical. As fases mais intensas foram definidas em termos de vorticidade relativa ciclônica em baixos níveis. As iniciais GN, FI, TS e TE correspondem à fase de gênese, intensa, de transição subtropical e de transição extratropical, respectivamente.

Conclusões

O presente trabalho analisa a gênese de um ciclone subtropical, no setor sudoeste do OAS e a transição subtropical de um ciclone com gênese no OPS, próximo à costa do Chile. Os ciclones se formaram em 09 de dezembro de 2017 e 01 de maio

de 2018 e foram denominados de Guará (pela Marinha do Brasil) e Lexi (não oficialmente), respectivamente. Os principais resultados obtidos foram:

- campos sinóticos: os campos sinóticos revelam contribuições de processos dinâmicos e termodinâmicos para as características subtropicais dos dois ciclones estudados. No Guará, o processo dinâmico esteve relacionado a um cavado de onda curta e com pequena amplitude em 500 hPa e ao sinal ciclônico no cisalhamento horizontal do vento, enquanto que no Lexi, a interação do ciclone extratropical em superfície com uma *cutoff low* propiciou um ambiente com fraco cisalhamento vertical do vento, de forma a favorecer a manutenção/organização da convecção. Quanto aos processos termodinâmicos, no Guará a advecção quente e úmida em 850 hPa juntamente com a transferência de fluxos turbulentos na interface mar-ar foram fundamentais para sua formação; no Lexi os fluxos turbulentos também contribuíram para a sua transição subtropical. Ressalta-se que, a quantificação da contribuição de cada processo (dinâmico e termodinâmico) só é possível através da realização de experimentos numéricos de sensibilidade, o que pode ser uma sugestão de estudo futuro. Por outro lado, a análise dos termos dos balanços de calor e vorticidade contribuem para confirmar os resultados da análise sinótica;

- balanços de calor e vorticidade: na gênese do Guará tem-se uma coluna extensa com tendência de resfriamento induzida pela expansão adiabática superando a advecção vertical de temperatura; a variação local de vorticidade relativa reflete a tendência ciclônica em baixos níveis devido à convergência e, em médios níveis, a tendência ciclônica resulta da advecção horizontal de vorticidade relativa. Na transição subtropical do Lexi, até 300 hPa, tem-se tendência de resfriamento em virtude do termo associado aos movimentos verticais; em níveis superiores, o predomínio é da advecção horizontal de ar quente. No balanço de vorticidade, o padrão presente no momento da transição é similar ao apresentado no perfil vertical dos termos da equação de vorticidade do Guará: em baixos níveis a tendência ciclônica retrata a convergência e, em altos níveis, a advecção horizontal de vorticidade relativa predominou e representa o deslocamento da *cutoff low* para a região do ciclone em superfícies. Os termos de resíduos dos balanços de calor e vorticidade evidenciam ainda o papel relevante da liberação de calor latente associada à convecção na fase de formação do Guará e de transição subtropical do Lexi.

Uma ressalva que deve ser feita com relação aos perfis verticais: as médias calculadas em caixas centradas nos ciclones suavizam a

contribuição dos termos das equações de balanço como no caso do Guará, que apresentou uma coluna ligeiramente fria, na tendência local de temperatura no horário da gênese mas que no campo espacial (em 850 hPa) há advecção de ar quente na ordem de 12 K dia⁻¹, no setor sudeste. Uma possibilidade que pode sanar este problema é deslocar a caixa, na qual é feita a média, para leste do centro, região que recebe a maior parcela da advecção horizontal, em razão da circulação ciclônica.

Por fim, destaca-se que os ciclones subtropicais podem ser causadores de danos nas regiões costeiras e, por esse motivo, ainda são necessários mais estudos para o entendimento da dinâmica e termodinâmica desses sistemas a fim de auxiliar as técnicas de previsão de tempo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao ECMWF, pela disponibilização dos dados utilizados neste estudo, e às agências de fomento: CAPES (código financeiro 001), CNPq e FAPEMIG.

Referências

- Andrelina, B., Reboita, M. S., 2021. Climatologia do Índice do Potencial de Gênese de Ciclone Tropicais nos Oceanos Adjacentes à América do Sul. Anuário do Instituto de Geociências, 44, 39515.
- Beerli, R., 2013. Climatological Study of Prerequisites for Tropical Cyclone Formation in the South Atlantic. Master Thesis at ETH Zurich, supervised by C. Grams.
- Carlson, T.N., 1991. Mid-latitude weather systems. Pennsylvania State University Press. Bethlehem, Pensilvânia.
- da Rocha, R.P., Reboita, M.S., Gozzo, L.F., Dutra, L.M.M., de Jesus, E.M., 2019. Subtropical cyclones over the oceanic basins: a review. Annals of the New York Academy of Sciences 1436 (1), 138-156.
- Dias Pinto, J.R., 2007. Análise da dinâmica de um ciclone no leste do Sudeste do Brasil através do balanço de vorticidade. Relatório final de atividades FAPESP.
- Dias Pinto, J.R., Reboita, M.S., da Rocha, R.P., 2013. Synoptic and dynamical analysis of subtropical cyclone Anita (2010) and its potential for tropical transition over the South Atlantic Ocean. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 118 (1), 10-870.
- Dutra, L.M.M., da Rocha, R.P., Lee, R.W., Peres, J.R.R., de Camargo, R., 2017. Structure and evolution of subtropical cyclone Anita as evaluated by heat and vorticity budgets. Quarterly Journal of the Royal Meteorological

- Society 143 (704), 1539-1553. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3024>
- Emanuel, K.A., E Nolan, D.S., 2004. Tropical cyclone activity and global climate system. Conference On Hurricanes And Tropical Meteorology, 240-241.
- Evans, J.L., Braun, A., 2012. A Climatology of subtropical cyclones in the South Atlantic. *Journal of Climate* 25 (21), 7328-7340. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00212.1>
- Ferreira, G.W.S., Reboita, M.S., da Rocha, R.P., 2019. Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis nas Cercanias do Nordeste do Brasil: Climatologia e Análise da Vorticidade Potencial Isentrópica. *Anuário do Instituto de Geociências* 42(3), 568-585. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_3_568_585
- Fuenzalida, H. A., Sánchez, R., Garreaud, R. D., 2005. A climatology of cutoff lows in the Southern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 110, no. (D18).
- Garreaud, R., Fuenzalida, H. A., 2007. The influence of the Andes on cutoff lows: A modeling study. *Monthly Weather Review* 135 (4), 1596-1613.
- Godoy, A. A., Possia, N. E., Campetella, C. M., García Skabar, Y., 2011. A cut-off low in southern South America: dynamic and thermodynamic processes. *Revista Brasileira de Meteorologia* 26(4), 503-514.
- Gozzo, L.F., da Rocha, R.P., Reboita, M.S., Sugahara, S., 2014. Subtropical cyclones over the southwestern South Atlantic: Climatological aspects and case study. *Journal of Climate* 27 (22), 8543-8562. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00149.1>
- Gozzo, L.F., Da Rocha, R.P., Gimeno, L., Drumond, A., 2017. Climatology and numerical case study of moisture sources associated with subtropical cyclogenesis over the southwestern Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122 (11), 5636-5653. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JD025764>
- Gray, W.M., 1968. Global View of the origin of Tropical Disturbances and Storms. *Monthly Weather Review* 96 (10), 669-700. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1968\)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2)
- Guishard, M.P., 2006. Atlantic subtropical storms: Climatology and characteristics. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Pennsylvania State University.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., de Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Vilaume, S., Thépaut, J.N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146 (730), 1999-2049. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P., Yoo, S. H., 2015. NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) 4, no. 26.
- Knapp, K. R., 2014. NOAA Climate Data Record (CDR) of Gridded Satellite Data from ISCCP B1 (GridSat-B1) Infrared Channel Brightness Temperature. NOAA's CDR Program, vol 2.
- LEIAMAISba, 2017. Temporal provocado por ciclone causa alagamentos em Salvador. Disponível em: <https://leiamaisba.com.br/2017/12/09/temporal-provocado-por-ciclone-causa-alagamentos-em-salvador>. Acesso: 20 nov. 2020.
- Marrafon, V.H.D.A., Reboita, M.S., 2018. Revisitando a Equação do Desenvolvimento de Sutcliffe. *Anuário do Instituto de Geociências* 41 (3), 614-629. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_614_629
- McTaggart-Cowan, R., Bosart, L.F., Davis, C.A., Atallah, E.H., Gyakum, J.R., Emanuel, K.A., 2006. Analysis of hurricane Catarina (2004). *Monthly Weather Review* 134 (11), 3029-3053.
- McTaggart-Cowan, R., Davies, E.L., Fairman Jr, J.G., Galarneau Jr, T.J., Schultz, D.M., 2015. Revisiting the 26.5° C sea surface temperature threshold for tropical cyclone development. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96 (11), 1929-1943.
- Reboita, M.S., Nieto, R., Gimeno, L., da Rocha, R.P., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Krüger, L.F., 2010. Climatological features of cutoff low systems in the Southern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 115, no. D17.
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; da Rocha, R.P.D. E Custódio, I.S., 2017a. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I-Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia* 32 (2), 171-186. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863220010>
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; da Rocha, R.P., Custódio, I.S., 2017b. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos.

- Revista Brasileira de Meteorologia 32 (4), 509-542. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786324002>
- Reboita, M.S.; da Rocha, R.P., Oliveira, D.M.D., 2019. Key Features and adverse weather of the named subtropical cyclones over the Southwestern South Atlantic Ocean. Atmosphere 10 (1), 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos10010006>
- Reboita M.S.; Crespo N.M.; Dutra L.M.M.; Silva B.A.; Capucin, B.C, da Rocha, R.P., 2020. Iba: the First Pure Tropical Cyclogenesis over the Western South Atlantic Ocean. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 126 (1), 1-20. DOI: <https://10.1029/2020JD033431>
- Schenkel, B.A., 2009. Examination of Tropical Cyclone Evolution Using Curvature Vorticity and Shear Vorticity. Tese (Doutorado). Florida State University.
- Selmo, L., 2020. Os impactos socioambientais provocados pelo ciclone subtropical Eçaí, em Florianópolis. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina.
- Sinclair, M.R., 1993. Synoptic-scale diagnosis of the extratropical transition of a southwest Pacific tropical cyclone. Monthly weather review 121 (4), 941-960.
- Siqueira, V., Reboita, M., Dutra, L., 2013. Processos Físicos Associados à Gênese de um VCAN entre o Oceano Pacífico e a América do Sul em abril de 2013. Ciência e Natura, 391-395.
- Virji, H., 1982. An estimate of the summertime tropospheric vorticity budget over South America. Monthly Weather Review 110(3), 217-224.
- Yanase, W., Niino, H., Hodges, K., Kitabatake, N., 2014. Parameter spaces of environmental fields responsible for cyclone development from tropics to extratropics. Journal of Climate 27 (2), 652-671.