



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Análise do Índice do Potencial de Gênese em Ciclones Subtropicais na Costa do Brasil

João Gabriel Martins Ribeiro¹, Gabriel Teodoro da Paz², Michelle Simões Reboita³, Luiz Felipe Gozzo⁴

¹ Doutorando em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. gabrielmr472@unifei.edu.br. ² Graduando em Meio Ambiente e Recursos Hídricos -UNIFEI, gabrieltdapaz@unifei.edu.br. ³ Dra. em Meteorologia, Professora e Pesquisadora no Instituto de Recursos Naturais - UNIFEI, reboita@unifei.edu.br. ⁴ Dr. em Ciências Atmosféricas, Professor Assistente Doutor na Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Departamento de Física Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01 Bauru, SP, BR 17033-360, luiz.gozzo@unesp.br.

Artigo recebido em 15/03/2023 e aceito em 20/09/2023

RESUMO

A região costeira do sul e sudeste do Brasil, que é parte da bacia do oceano Atlântico Sul, é uma região de gênese de ciclones subtropicais e, por isso, está suscetível às mudanças no tempo e impactos causados por esses sistemas. O primeiro ciclone subtropical que recebeu nome na bacia do oceano Atlântico Sul foi o Anita em 2010. Desde então, alguns estudos sobre ciclones subtropicais foram realizados, mas ainda há várias questões para serem investigadas. Assim, esse estudo tem como objetivos: (a) descrever os principais mecanismos físicos que propiciam a gênese dos ciclones subtropicais que receberam nome no oceano Atlântico Sul entre 2010 e 2021 e (b) identificar o valor do Índice do Potencial de Gênese (IPG) entre a pré-ciclogênese e a fase em que esses sistemas adquirem características subtropicais. A justificativa para a análise do IPG é que se deseja identificar um possível padrão que ajude na previsão operacional do tempo. A principal base de dados usada no estudo é a reanálise ERA5. Dos 14 ciclones estudados, apenas dois sistemas não tiveram gênese com característica subtropical, mas a adquiriram 24 horas após a ciclogênese. Há 5 ciclones que tiveram gênese associada com cavados em níveis médios da atmosfera e 9 com padrões de bloqueio (tipo *cutoff low*). Como a maioria dos ciclones estudados ocorreram num ambiente com estrutura de bloqueio, isso indica que a condição de fraco cisalhamento vertical do vento é um fator importante para os ciclones subtropicais. Como o IPG não mostrou um valor padrão nos 14 ciclones estudados entre a pré-ciclogênese e o momento em que esses sistemas se tornam subtropicais, pois variou de 0,35 na gênese do Deni a 22,71 na gênese do Anita, talvez não seja possível utilizá-lo com um limiar nas práticas operacionais. Palavras-chave: impactos costeiros, ciclones subtropicais, análise sinótica, índice do potencial de gênese.

Analysis of the Genesis Potential Index associated with Subtropical Cyclones near the Brazilian Coast

ABSTRACT

The coastal region of southern and southeastern Brazil, which is part of the South Atlantic Ocean basin, is a genesis region for subtropical cyclones and is, therefore, susceptible to weather change and impacts caused by these systems. The first named subtropical cyclone in the South Atlantic Ocean basin was Anita in 2010. Since then, several studies on subtropical cyclones have been carried out, but there are still several questions to investigate. Thus, this study aims to (a) describe the main physical mechanisms that caused the genesis of subtropical cyclones named in the South Atlantic Ocean between 2010 and 2021 and (b) identify the value of the Genesis Potential Index (GPI) between the pre-cyclogenesis and the phase in which these systems acquire subtropical characteristics. The reason for analyzing the GPI is to identify a possible pattern that helps in operational weather forecasting. The main database used in the study is the ERA5 reanalysis. Of the 14 cyclones studied, only two systems did not have genesis with subtropical characteristics, but acquired it 24 hours after cyclogenesis. There are 5 cyclones that showed genesis associated with mid-level troughs in the atmosphere, and 9 with blocking patterns (*cutoff low* type). As most of the studied cyclones occurred in an environment with a blocking structure, this indicates that the condition of weak vertical wind shear is an important factor for subtropical cyclones. Since the GPI does not show a standard value in the 14 cyclones studied, between pre-cyclogenesis and the moment when these systems become subtropical, as it varies from 0.35 in the Deni genesis to 22.71 in the Anita genesis, it may not be possible to use it with a threshold in operational practices.

Keywords: coastal impacts, subtropical cyclones, synoptic analysis, genesis potential index.

Introdução

Até a metade do século XX, acreditava-se que os ciclones de escala sinótica possuíam apenas duas categorias: tropical e extratropical. Como a atmosfera é um continuum, autores como Hart (2003) e Reboita et al. (2017a) destacam que os ciclones podem evoluir ao longo do seu ciclo de vida, isto é, podem ter gênese como extratropical e decair nessa mesma categoria, ou evoluir para subtropical ou tropical; o inverso ocorre no caso dos ciclones tropicais. No caso dos sistemas subtropicais, estes podem ter gênese nessa categoria e decaírem como subtropicais ou ainda evoluírem para extratropical ou tropical.

Os ciclones tropicais (CT), cuja principal característica é o núcleo quente e simétrico por toda a troposfera, são dependentes da transferência de calor latente na interface mar-ar na região tropical. Já os ciclones extratropicais (CE), caracterizados pelo núcleo frio e não-simétrico, se formam em latitudes médias associados com gradientes horizontais de temperatura do ar em superfície e/ou com ondas viajando de oeste para leste em níveis médios e altos da atmosfera (Dutra et al., 2017; Reboita et al., 2017a,b; Reboita e Marrafon, 2021; Gan et al., 2022). Por fim, os ciclones subtropicais (CS) se formam entre as latitudes tropicais e extratropicais, preferencialmente sobre o mar, apresentam núcleo quente em baixos níveis da atmosfera, assim como os ciclones tropicais, e núcleo frio em níveis superiores, característica dos ciclones extratropicais (Hart, 2003; da Rocha et al., 2018).

Os CS no oceano Atlântico Sul (OAS) se desenvolvem principalmente na costa das regiões sul e sudeste do Brasil durante o verão e outono (Gozzo et al., 2014; de Jesus et al., 2022). Esses sistemas passaram a receber nome a partir do advento do ciclone Anita em 2010 (Dias Pinto et al., 2013; Dutra et al., 2017). Com relação ao processo de gênese, os CS podem ter com suporte dinâmico a presença de um cavado em níveis médios e altos da atmosfera ou a presença de uma *cutoff low* (da Rocha et al., 2018). As *cutoff lows* constituem um dos quatro tipos de bloqueios atmosféricos descritos, por exemplo, em COMET (2019). As *cutoff lows*, como causam um enfraquecimento do escoamento de oeste, tendem a reduzir o cisalhamento vertical do vento (250 - 850 hPa) permitindo com que a convecção se

organize e auxilie na gênese/manutenção dos CS (Reboita et al., 2022).

Uma metodologia que permite definir as diferentes fases que um ciclone pode ter é o *Cyclone Phase Space* (CPS; Hart, 2003). Inicialmente a trajetória dos ciclones é identificada e registrada em intervalos de 6 horas. Com base na informação da posição do ciclone, dados de altura geopotencial em diferentes níveis atmosféricos são utilizados para estimar três parâmetros que indicarão a estrutura térmica do sistema em baixos e altos níveis da atmosfera. Os parâmetros são simetria térmica (B), vento térmico em baixos níveis da atmosfera, entre 900 e 600 hPa (V_T^L), e vento térmico em altos níveis da atmosfera, entre 600 e 300 hPa (V_T^U). Um detalhamento da metodologia do CPS pode ser encontrado, por exemplo, em Hart (2003), Gozzo et al. (2014), Reboita et al. (2017b) e da Rocha et al. (2018).

O uso do CPS em diferentes bacias oceânicas requer um estudo prévio das características locais dos ciclones subtropicais para a definição dos limiares a serem usados nos resultados do CPS. No início de dezembro de 2022, a Organização Meteorológica Mundial, durante o X *Workshop* Internacional de Ciclones Tropicais (X IWCT, 2022), ressaltou e recomendou esse tipo de estudo por bacia oceânica. No caso do OAS, o estudo para a definição dos limiares do CPS para classificação dos CS já foi realizado por Gozzo et al. (2014). Segundo os autores, para os ciclones serem classificados como subtropicais devem apresentar $B < 25$ m, $-|V_T^L| > -50$ e $-|V_T^U| < -10$. Essas características não precisam aparecer exatamente na ciclogênese, mas até 24 horas após essa para os sistemas receberem a denominação de ciclone com gênese subtropical.

O primeiro ciclone com gênese subtropical que recebeu nome no OAS ocorreu em março de 2010, denominado Anita pelos centros de meteorologia regionais do país. Dias Pinto et al. (2013) mostraram que o Anita podia ter sofrido transição para ciclone tropical se os fluxos de calor total do oceano para a atmosfera não tivessem reduzido quando esse sistema se tornou semi-estacionário próximo à costa. Já Reboita et al. (2019) confirmaram através de simulações numéricas a hipótese de Dias Pinto et al. (2013). Após a ocorrência do ciclone subtropical Anita, a Marinha do Brasil passou a nomear os CS

ocorridos no OAS, principalmente aqueles próximos à costa do Brasil, que podem causar impactos às atividades humanas (NORMAN-19, 2018). Os sistemas nomeados entre 2010 e 2021 são Anita (2010), Arani (2011), Bapo (2015), Cari (2015), Deni (2016), Eçaí (2016), Guará (2017), Jaguar (2019), Kurumí (2020), Mani (2020), Oquirá (2020), Potira (2021), Raoni (2021) e Ubá (2021).

Embora sendo raros os casos, o OAS também já teve a atuação de ciclones tropicais. O primeiro ciclone tropical registrado foi o ciclone Catarina, em março de 2004 (Pezza e Simmonds, 2005). Entretanto, esse sistema se desenvolveu a partir de uma transição tropical, isto é, o ciclone iniciou como extratropical e sofreu transição para tropical (Mctaggart-Cowan et al., 2006). Já a primeira ciclogênese tropical pura foi a do ciclone Iba em março de 2018 (Reboita et al., 2021).

Locais propícios à gênese de ciclones tropicais e mesmo subtropicais podem ser identificados através do Índice do Potencial de Gênese (IPG) (Camargo et al., 2007; Andrelina e Reboita, 2021; Wang et al., 2022). O IPG é baseado nas condições necessárias, mas não suficientes, para a gênese de ciclones tropicais descritas por Gray (1968) e adaptadas por Emanuel e Nolan (2004). De acordo com Gray (1968), as condições são: temperatura na superfície do mar (TSM) maior do que 26 °C, presença de umidade relativa em 700 hPa, instabilidade convectiva, perturbação ciclônica em baixos níveis, fraco cisalhamento vertical do vento horizontal e gênese afastada da linha do equador em pelo menos 5°. Já a formulação do IPG de Emanuel e Nolan (2004) considera a vortacidade absoluta em 850 hPa, umidade relativa em 700 hPa, intensidade potencial do vento e o cisalhamento vertical do vento horizontal entre 200 e 850 hPa. O cisalhamento vertical do vento horizontal, quando muito intenso, dificulta a formação dos ciclones tropicais (Goldenberg et al., 2003; Latif et al., 2007) por não permitir a organização da atividade convectiva. Diversos estudos apontam que o cisalhamento vertical do vento, em escala entre a mesoescala e a sinótica, para a ocorrência de ciclones tropicais deve ser inferior a 10 m s⁻¹ (Gray, 1968; Zehr, 1992; Frank e Ritchie, 2001; Pezza e Simmonds, 2005).

Andrelina e Reboita (2021) verificaram que o OAS possui potencial para a gênese de ciclones com núcleo quente entre a costa da Bahia e sudeste do Brasil. Nessa região, o IPG atinge os maiores valores em março (3,5; o IPG é uma grandeza adimensional e não há um limiar ótimo definido na literatura). Seguindo as ideias propostas por Gray (1968), por mais que o OAS

apresente IPG favorável aos sistemas tropicais, isso não garante que ocorrerá ciclogênese tropical.

Independentemente do tipo de ciclone, esses sistemas afetam as atividades humanas, através dos ventos fortes, grandes volumes de chuva, agitação do mar, entre outros (Emanuel, 2002; Reboita et al., 2018; Wu et al., 2020). Além disso, pouco se conhece sobre os valores do IPG em casos de CS no OAS. Assim, os objetivos do presente estudo são: (a) descrever os mecanismos físicos que propiciaram a gênese dos CS que receberam nome no OAS, do ponto de vista da escala sinótica, entre 2010 e 2021 e (b) identificar o valor do Índice do Potencial de Gênese (IPG) entre a pré-ciclogênese e o momento em que os ciclones adquiriram características subtropicais, a fim de identificar possível valor padrão que auxilie a previsão operacional desses sistemas.

Metodologia

Área de Estudo

A região de estudo é limitada às latitudes 5°S e 60°S e às longitudes entre 70°W e 15°W, com foco na costa sudeste da América do Sul e no OAS (Figura 1).

Dados

Os dados utilizados compreendem o período de 2010 a 2021 e foram obtidos da reanálise ERA5, desenvolvida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF (Copernicus Climate Change Service - C3S, 2017)*, com resolução horizontal de 0,25°. Foram utilizados os horários sinóticos-padrão (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC) e as seguintes variáveis considerando 16 níveis verticais (200, 300, 400, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 925, 950, 975 e 1000 hPa): geopotencial (m² s⁻²), temperatura (K), velocidade vertical (Pa s⁻¹) e componentes zonal e meridional do vento (m s⁻¹). Para as variáveis de superfície foram utilizadas: temperatura da superfície do mar – TSM (K), temperatura do ar a 2 metros de altura (K), pressão ao nível médio do mar – PNMM (hPa) e componentes zonal e meridional do vento (m s⁻¹) a 10 metros de altura.

Para a identificação da nebulosidade associada aos ciclones foi utilizado dados de temperatura de brilho (Tb) do canal correspondente ao comprimento de onda do infravermelho (próximo a 11 µm) do Gridded Satellite (GridSat-B1). Esses dados são fornecidos pela *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA; Knapp, 2014)* a cada três horas e com 0,07° de resolução horizontal.

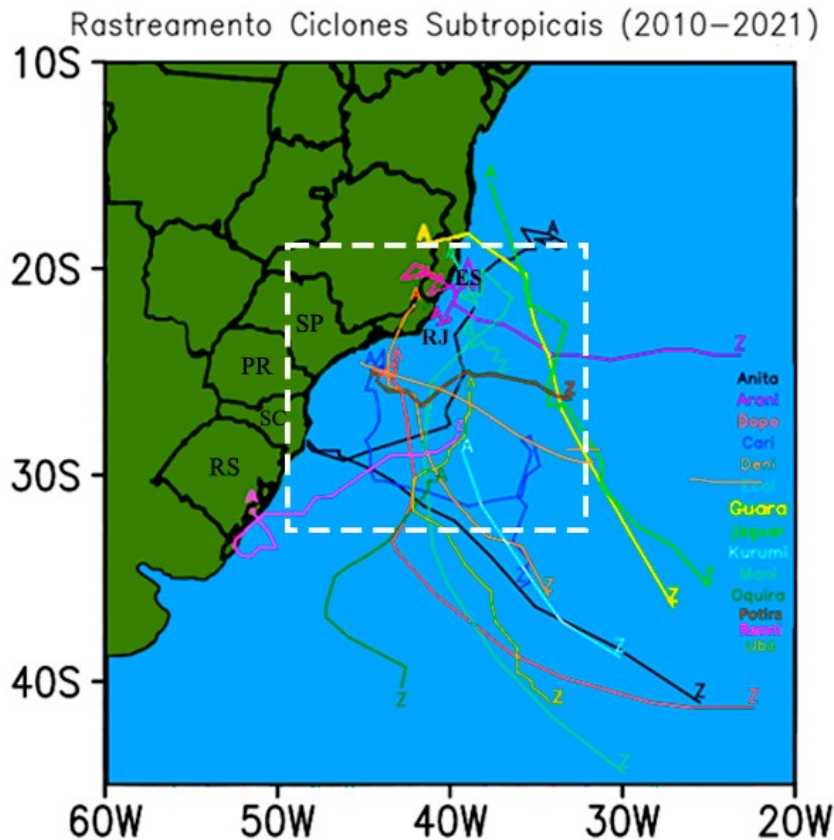


Figura 1. Área de estudo e trajetória dos CS, entre 2010 e 2021, que ganharam nome no OAS. A letra A indica a ciclogênese e a letra Z a ciclólise de cada sistema. A área delimitada com linhas tracejadas brancas indica a região usada para cálculo da média do IPG. As siglas ES, RJ, SP, PR, SC e RS indicam, respectivamente, o nome dos estados Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Ciclo de Vida dos Ciclones

São analisados 14 ciclones subtropicais que ganharam nome no OAS entre 2010 e 2021. Vale salientar que o ciclone subtropical Anita (Dias Pinto et al., 2013) embora não esteja na lista da Marinha Brasileira, também está incluso neste estudo.

A pré-ciclogênese é definida como o horário sinótico de 6 horas antes da ciclogênese que, por sua vez, é definida quando aparece a primeira isóbara fechada no campo da PNMM, com intervalos de 4 hPa, sendo que essa isóbara deve permanecer fechada por pelo menos 24 horas (Gan e Rao, 1991; Reboita et al., 2019). Já a ciclólise (decaimento do sistema) ocorre quando a isóbara fechada se desconfigura ou o sistema se conecta com outro. A justificativa para a identificação dos ciclones com base na PNMM é que essa variável mostra campos atmosféricos mais configurados do que a vorticidade relativa, facilitando a identificação dos sistemas (Reboita et al., 2019).

A trajetória de cada ciclone bem como o tempo de vida e velocidade média são obtidos partir do registro da localização geográfica (longitude e latitude) da isóbara central do ciclone (menor valor de PNMM).

Só o conhecimento da trajetória de um ciclone não é suficiente para classificá-lo em extratropical, subtropical ou tropical. Para identificar se a gênese de cada ciclone foi na categoria subtropical ou não e, se não, quando o sistema passou a adquirir características de CS, foi aplicada a metodologia do CPS usando os critérios de Gozzo et al. (2014) para a definição da fase subtropical: $B < 25$ m, $-|V_T^L| > -50$ e $-|V_T^U| < -10$. A Figura 2 exemplifica a metodologia usando o ciclone Deni; painel (a) é mostrado os parâmetros B e $-|V_T^L|$ e no painel (b) os parâmetros $-|V_T^L|$ e $-|V_T^U|$. Usando os critérios de Gozzo et al. (2014) é possível delimitar a área (caixa laranja) onde o ciclone é classificado como subtropical. Nota-se que o ciclone Deni tem gênese como subtropical, mas ao longo de seu ciclo de vida decai como

sistema extratropical. A metodologia do CPS foi aplicada aos 14 ciclones em estudo e os resultados são sumarizados em uma tabela na seção resultados. Os CPS utilizados no estudo são apresentados no anexo e foram obtidos de diferentes fontes: *website* do pesquisador Bob Hart (<https://moe.met.fsu.edu/cyclonephase/>), que desenvolveu a metodologia do CPS, e dos estudos de Reboita et al. (2018 e 2022).

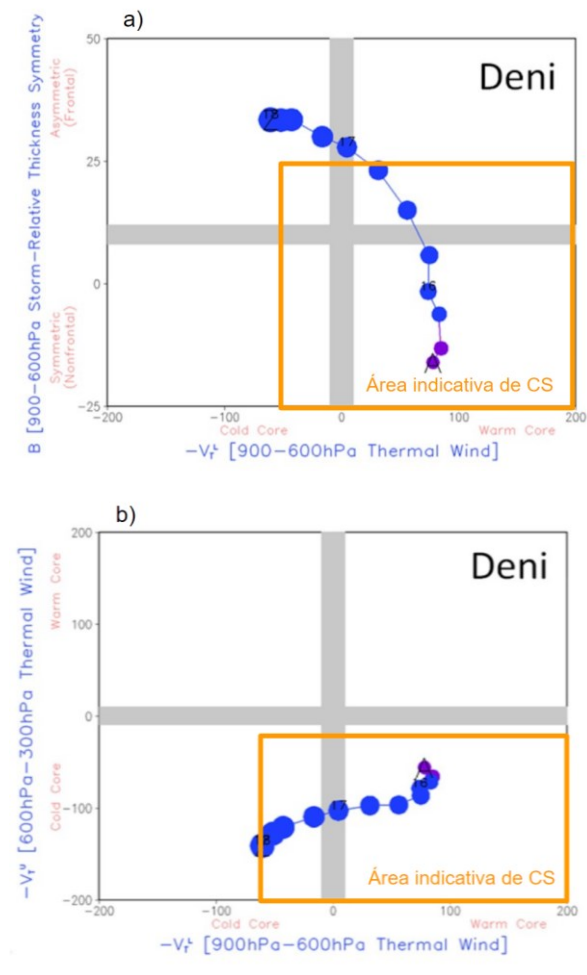


Figura 2. Exemplo da aplicação da metodologia do CPS para o caso do ciclone Deni ocorrido em novembro de 2016: a) parâmetros B e $-|V_T^L|$ e (b) parâmetros $-|V_T^L|$ e $-|V_T^U|$. A caixa laranja indica a região que define os ciclones como subtropicais. Os parâmetros são mostrados desde a gênese do ciclone (mesmo que ainda não seja subtropical), indicada pela letra A. Adaptado de Reboita et al. (2018).

Trajatória e Distância Percorrida

Com base nas informações registradas da posição do ciclone em cada passo de tempo (ver seção anterior), pode-se calcular a distância percorrida pelo sistema utilizando a expressão de Van Brummelen (2012) (Eq. 1):

$$D = \text{acos}(\sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \cos \Delta\lambda) R \quad (1)$$

onde D é a distância entre duas coordenadas geográficas (km), φ_1 é a latitude do ponto 1 (radianos), φ_2 é a latitude do ponto 2 (radianos), $\Delta\lambda$ é diferença entre as longitudes (radianos) e R é o raio da Terra (km). Uma vez conhecida a distância percorrida e o tempo de vida do sistema, também se pode obter a velocidade média do sistema (distância/tempo). A distância percorrida e a velocidade média são calculadas desde a gênese dos ciclones (independente se o sistema já era ou não subtropical) até a ciclólise.

Índice do Potencial de Gênese

O IPG é calculado a cada 6 horas usando os horários sinóticos padrão (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC). Não são usados dados diários ou mensais para o cálculo do IPG, para não ocorrer suavização dessa variável (Andrelina e Reboita, 2020). Segundo Emanuel e Nolan (2004), o IPG é calculado como:

$$IPG = |10^5 \eta|^{\frac{3}{2}} \left(\frac{H}{50}\right)^3 \left(\frac{V_{pot}}{70}\right)^3 (1 + 0,1 V_{shear})^{-2} \quad (2)$$

onde IPG é o índice de potencial de gênese (adimensional), η é a vorticidade absoluta em 850 hPa (s^{-1}), H é a umidade relativa em 700 hPa (%), V_{pot} é o vento potencial ($m s^{-1}$) e V_{shear} é a magnitude do cisalhamento vertical do vento horizontal calculado entre 200 e 850 hPa ($m s^{-1}$).

A vorticidade absoluta é obtida por:

$$\eta = \zeta + f \quad (3)$$

em que η é a vorticidade absoluta em (s^{-1}), ζ é a vorticidade relativa (s^{-1}) e f é a vorticidade planetária definida como $f = 2\Omega \sin \Phi$, sendo Ω a velocidade angular da Terra ($^\circ s^{-1}$) e Φ a latitude ($^\circ$).

O vento potencial (V_{pot}) é a máxima velocidade do vento em superfície que ocorreria em um ciclone tropical dadas certas condições da TSM e perfis verticais de umidade e temperatura do ar (Bister e Emanuel, 1998). O V_{pot} é calculado como:

$$V_{pot} = \sqrt{\frac{C_k TS}{C_d T_o} (CAPE * -CAPE)} \quad (4)$$

onde V_{pot} é a intensidade potencial do vento ($m s^{-1}$), C_k é o coeficiente de transferência de entalpia (adimensional), TS é a temperatura da superfície do mar (K), T_o a temperatura média no topo da coluna atmosférica (K), C_d é o coeficiente de transferência de momentum (adimensional), $CAPE^*$ é a energia potencial disponível para convecção e considera o

ar que é levantado a partir do nível médio do mar ($J\ kg^{-1}$) e CAPE é a energia potencial disponível para convecção na camada limite ($J\ kg^{-1}$).

Para o cálculo do V_{pot} , as variáveis necessárias são: PNMM, TSM, temperatura do ar e razão de mistura, essas duas últimas em níveis verticais (Emanuel e Nolan, 2004). Como a reanálise ERA5 não fornece razão de mistura, esta foi obtida aproximando-se o valor da umidade específica ao da razão de mistura (Vianello e Alves, 2012 – Equação 2.52). O V_{pot} foi calculado com um algoritmo em MATLAB disponível em <https://texmex.mit.edu/pub/emanuel/TCMAX/>.

O cisalhamento vertical do vento horizontal (V_{shear} em $m\ s^{-1}$) é representado pela diferença das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento entre 200 e 850 hPa:

$$V_{shear} = \sqrt{(u_{200} - u_{850})^2 + (v_{200} - v_{850})^2} \quad (5)$$

O IPG será apresentado para os tempos pré- e ciclogênese dos CS e também será mostrada a sua série temporal calculada a partir da média na área delimitada entre $30,5^\circ$ e $49,5^\circ W$ e $19,5^\circ$ e $30,5^\circ S$ (Figura 1). Se um ciclone tem gênese como extratropical, o IPG é mostrado para a pré-ciclogênese e para o momento em que adquiriu características de subtropical. Por fim, será calculada a tendência da série do IPG no período de 1989 a 2021 e a significância estatística do coeficiente angular da reta de regressão com o teste *t-Sudent* considerando 95% de confiança.

Análise Sinótica

Serão apresentados os campos sinóticos dos estágios pré-ciclogênese e do momento em que cada ciclone apresenta pela primeira vez características de CS. Muitos dos ciclones irão mostrar as características subtropicais já na gênese. Os campos sinóticos permitem a descrição do ambiente onde o ciclone se desenvolve. O leitor pode encontrar detalhes da análise de campos sinóticos em: Andrelina e Reboita (2021), Capucin et al. (2019), Reboita et al., (2017b) entre outros. As variáveis apresentadas na análise sinótica são: (a) PNMM e altura geopotencial em 500 hPa; (b) cisalhamento vertical do vento horizontal (200-850 hPa) e TSM; (c) temperatura de brilho e intensidade e direção do vento a 10 m e (d) desvio zonal da temperatura do ar e ômega. No caso do cisalhamento vertical apresentado junto com o campo de TSM, esse tem o cálculo ligeiramente do mostrado na equação (5), pois aqui primeiro computa-se a intensidade do vento horizontal nos níveis desejados e depois a diferença. Em (d) são

apresentadas seções zonais de longitude-pressão com base na latitude central dos ciclones nos tempos pré-ciclogênese e ciclogênese (se o ciclone é inicialmente extratropical, o perfil vertical considerado como ciclogênese será para o momento em que adquiriu características de subtropical).

Resultados e discussão

Características Gerais dos Ciclones Subtropicais

Na Figura 1 é mostrada a trajetória dos CS. Todos os sistemas, exceto o Raoni, tiveram sua gênese a norte da latitude $30^\circ S$, próximo à costa sudeste do Brasil, região chamada de RG1 em Reboita et al. (2010). Essa é a região de maior frequência dos CS no OAS (Gozzo et al., 2014; Reboita et al., 2019; de Jesus et al., 2022). Os CS, em geral, se deslocam para sul e sudeste. Entretanto, há casos como o Arani, Mani, Oquirá e Potira que se deslocaram sutilmente para norte durante sua fase inicial; já o Raoni teve um deslocamento bem evidente para norte entre a fase de maturação até sua dissipação (Reboita et al., 2022). No OAS, quando um ciclone extratropical ou subtropical adquire trajetória para norte/nordeste é devido ao acoplamento com um padrão de bloqueio atmosférico em níveis médios e altos da atmosfera (McTaggart-Cowan et al., 2006; Reboita et al., 2022).

A Tabela 1 mostra as principais informações (data de gênese e ciclolise, tempo de vida, distância percorrida e velocidade média) de cada CS estudado. O Anita foi o ciclone com maior tempo de vida (6 dias), enquanto Mani, com o menor tempo de vida (1 dia). O Anita também foi o ciclone que percorreu a maior distância (4245 km) ao longo do seu ciclo de vida e o Mani, a menor distância (686 km). O CS Guará alcançou a maior velocidade média ($40\ km\ h^{-1}$), em contrapartida, Cari foi o sistema mais lento ($12\ km\ h^{-1}$).

O passo seguinte do estudo foi identificar em que momento do ciclo de vida os ciclones estudados apresentavam características de sistemas subtropicais. Para isso, o CPS de cada ciclone (anexo 1) foi analisado e os resultados foram compilados na Tabela 2. Apenas dois ciclones (Eçaí e Raoni) tiveram as características subtropicais adquiridas após à ciclogênese. A Tabela 2 também indica os mecanismos físicos descritos na literatura que contribuíram para a gênese dos ciclones em estudo e já adianta o resultado da análise daqueles sistemas que estão sendo estudados pela primeira vez.

Tabela 1. Características de cada CS no OAS entre 2010 e 2021. Data da gênese e ciclólise, coordenadas da posição inicial (baseada na primeira isóbara fechada), posição final (com base na desconfiguração das isóbaras), tempo de vida, distância percorrida e velocidade média.

Ciclones	Data Inicial	Posição Inicial		Data Final	Posição Final		Tempo de Vida (dias)	Distância Percorrida (km)	Velocidade Média em km h ⁻¹ (m s ⁻¹)
		Latitude Inicial	Longitude Inicial		Latitude Final	Longitude Final			
Anita	00Z 8 Mar 2010	21,7° S	38,7° W	00Z 13 Mar 2010	42,7° S	26,5° W	5	4245	33 (9,17)
Arani	00Z 15 Mar 2011	22,5° S	40,2° W	18Z 17 Mar 2011	25,5° S	24,2° W	2	1628	20 (5,56)
Bapo	06Z 06 Fev 2015	27,5° S	43,2° W	06Z 10 Fev 2015	43° S	23,5° W	4	3390	28 (7,78)
Cari	18Z 10 Mar 2015	27,2° S	45° W	12Z 13 Mar 2015	37,7° S	38,2° W	3	1075	12 (3,34)
Deni	12Z 15 Nov 2016	23° S	42,5° W	00Z 18 Nov 2016	37,5° S	35° W	3	2028	37 (10,28)
Eçaí	00Z 04 Dez 2016	26,5° S	47,5° W	18Z 06 Dez 2016	28,5° S	36° W	2	1265	23 (6,39)
Guará	12Z 09 Dez 2017	20° S	42° W	00Z 12 Dez 2017	38° S	28° W	3	2683	40 (11,11)
Jaguar	06Z 19 Mai 2019	17° S	38,2° W	18Z 24 Mai 2019	37° S	26° W	5	2707	37 (10,28)
Kurumi	18Z 23 Jan 2020	28,5° S	39,5° W	12Z 26 Jan 2020	39,5° S	30° W	3	2178	33 (9,17)
Mani	00Z 26 Out 2020	23° S	39,5° W	12Z 27 Out 2020	24° S	38° W	1	686	19 (5,28)
Oquira	12Z 27 Dez 2020	31,7° S	40,7° W	12Z 30 Dez 2020	42° S	43,2° W	3	1555	21 (5,83)
Potira	18Z 19 Abr 2021	27° S	42° W	18Z 24 Abr 2021	28° S	33° W	5	2046	17 (4,72)
Raoni	06Z 27 Jun 2021	33° S	53° W	12Z 01 Jul 2021	27° S	40° W	4	3040	31 (8,61)
Ubá	06Z 09 Dez 2021	27° S	39° W	12Z 13 Dez 2021	42° S	34° W	4	2311	22 (6,11)

Tabela 2. Indicação do momento em que cada ciclone adquiriu características de subtropical. Também são indicados os mecanismos físicos associados à ciclogênese e ao desenvolvimento dos sistemas subtropicais.

Ciclones	Indicação de quando o ciclone se torna subtropical	Mecanismo de Gênese Em itálico os definidos no presente estudo	Referência dos casos já estudados
Anita	primeira posição	padrão de bloqueio (tipo cutoff low)	Dias Pinto et al., 2013; Dutra et al., 2017; Reboita et al., 2019
Arani	primeira posição	cavado	Reboita et al., 2017b; Reboita et al., 2019
Bapo	primeira posição	padrão de bloqueio (tipo cutoff low)	Reboita et al., 2019
Cari	primeira posição	padrão de bloqueio (tipo cutoff low)	Reboita et al., 2019; Costa e Nunes, 2021
Deni	primeira posição	cavado	Reboita et al., 2019
Eçaí	24 horas após à gênese	padrão de bloqueio (tipo cutoff low)	Reboita et al., 2019; Costa e Nunes, 2021
Guará	primeira posição	cavado	Silva et al. 2022; Gan et al., 2022
Jaguar	primeira posição	<i>padrão de bloqueio (tipo cutoff low)</i>	
Kurumí	primeira posição	<i>padrão de bloqueio (tipo cutoff low)</i>	
Mani	primeira posição	<i>cavado</i>	
Oquira	primeira posição	<i>padrão de bloqueio (tipo cutoff low)</i>	
Potira	primeira posição	<i>padrão de bloqueio (tipo cutoff low)</i>	
Raoni	24 horas após à gênese	seclusão quente e <i>padrão de bloqueio (tipo cutoff low)</i>	Reboita et al., 2022
Ubá	primeira posição	<i>padrão de bloqueio (tipo cutoff low)</i>	

seção apresenta os campos sinóticos da pré-ciclogênese e ciclogênese. Os ciclones que possuem gênese com maior pressão central são Oquirá e Jaguar com 1014 hPa, enquanto o Bapo foi o CS que se iniciou com menor pressão (1002 hPa) (Figuras 3 e 4). A leste e sudeste dos CS predomina um anticiclone, que embora a área das figuras não permita mostrar, é o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. Os ventos de quadrante norte desse anticiclone contribuem para o transporte de ar quente e úmido para a região dos ciclones (Figuras 7 e 8), o que concorda com o estudo de Gozzo et al. (2017). O ar quente e úmido é um fator importante para a redução da pressão na superfície, o que pode auxiliar a gênese dos CS (da Rocha et al., 2018). Mais adiante será apresentado um efeito do anticiclone na evolução dos CS (transporte de calor e umidade).

As Figuras 3 e 4 mostram que os CS Arani, Deni, Guará, Mani e Raoni têm gênese a leste de um cavado no campo da altura geopotencial em 500 hPa enquanto os CS Anita, Bapo, Cari, Eçaí, Jaguar, Kurumí, Oquirá, Potira e Ubá ocorrem embebidos numa estrutura barotrópica propiciada por um padrão de bloqueio atmosférico do tipo cutoff low. Como 9 dos 14 ciclones estudados ocorrem associados com uma estrutura de bloqueio, isso indica que o ambiente de menor cisalhamento vertical do vento horizontal propiciado pelos bloqueios é um fator importante para a gênese dos CS. Nas Figuras 5 e 6 são mostrados os campos de cisalhamento vertical do vento horizontal e a TSM. Quando o cisalhamento vertical do vento é positivo (negativo) sugere que os ventos em altos níveis são mais intensos (fracos) do que os em baixos níveis da atmosfera e, se a intensidade do cisalhamento for muito maior que 10 m s^{-1} pode dificultar a organização da convecção na coluna atmosférica (Pezza e Simmonds, 2005; Moon et al., 2018; Reboita et al., 2019) e dificultar o desenvolvimento dos CS. No caso dos ciclones Anita, Arani, Cari e Eçaí, o ambiente barotrópico é bem configurado e caracterizado pelo fraco cisalhamento vertical do vento. Durante a gênese dos CS (Figura 6), o cisalhamento vertical do vento foi menor (5 m s^{-1}) no Arani e maior (40 m s^{-1}) no Raoni. Cerca de 42,8% dos ciclones estudados apresentam cisalhamento vertical do vento menor do que o valor climatológico de $25 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$; Andrelina e Reboita, 2021) na região delimitada na Figura 1. Os CS Deni, Guará, Jaguar, Kurumí, Raoni e Ubá são os que apresentam valores de cisalhamento superiores à climatologia da região.

Segundo Gray (1968), a TSM maior do que 26°C é uma das condições necessárias, mas não suficientes para gênese dos CT. Embora a TSM possa ajudar a gênese, através da transferência dos fluxos turbulentos de calor na interface mar-ar, os CS podem se formar sobre TSM menor do que esse valor. Conforme as Figuras 5 e 6, o valor de TSM mais baixo durante a gênese dos CS foi de 17°C no caso do Raoni e o maior valor foi de $26,8^\circ \text{C}$ no Anita.

As Figuras 7 e 8 destacam a ocorrência de uma banda de nebulosidade acompanhando o escoamento do vento que converge na região dos ciclones em estudo. A temperatura de brilho mostra valores menores que 220 K ou -53°C (tons brancos), sendo um indicativo de nuvens convectivas na região ao redor do centro do ciclone e, conseqüentemente, da grande liberação de calor latente por condensação na atmosfera. Isso, por sua vez, atua na intensificação dos movimentos ascendentes na atmosfera contribuindo para a redução da pressão em superfície (Reboita et al., 2019). Com relação aos ventos, esses são mais intensos no setor a sul do centro dos ciclones e com direção predominantemente de leste.

Para analisar a estrutura vertical dos ciclones são apresentados perfis verticais na direção oeste-leste com base na latitude e longitude central dos CS. Para os estágios de pré- e ciclogênese foram identificados os pontos centrais e utilizados 10° de incremento de longitude na coordenada horizontal. Com relação ao estágio de pré-ciclogênese, na região em que os sistemas vão se originar são mostradas temperaturas mais quentes que a média zonal e, essa característica, em geral, é confinada nos baixos níveis da atmosfera, enquanto em níveis médios e altos há desvios negativos de temperatura do ar. Esse padrão é a principal característica dos ciclones subtropicais. No caso dos ciclones Eçaí e Raoni, o padrão mostrado é diferente dos demais na pré-ciclogênese. De fato, como mencionado anteriormente, esses dois sistemas só adquirem características de CS ao longo do ciclo de vida.

Em todos os perfis verticais no período de pré-ciclogênese e ciclogênese há movimentos ascendentes na atmosfera (ω negativo entre $-0,4$ e $-0,8 \text{ Pa s}^{-1}$) na região dos ciclones. De maneira geral, nos dois estágios apresentados, os movimentos ascendentes são influenciados pela TSM, que ajuda a aquecer o ar adjacente tornando-o mais leve, e pela convergência de massa em baixos níveis da atmosfera na região dos ciclones, como mostrado nas Figuras 7 e 8.

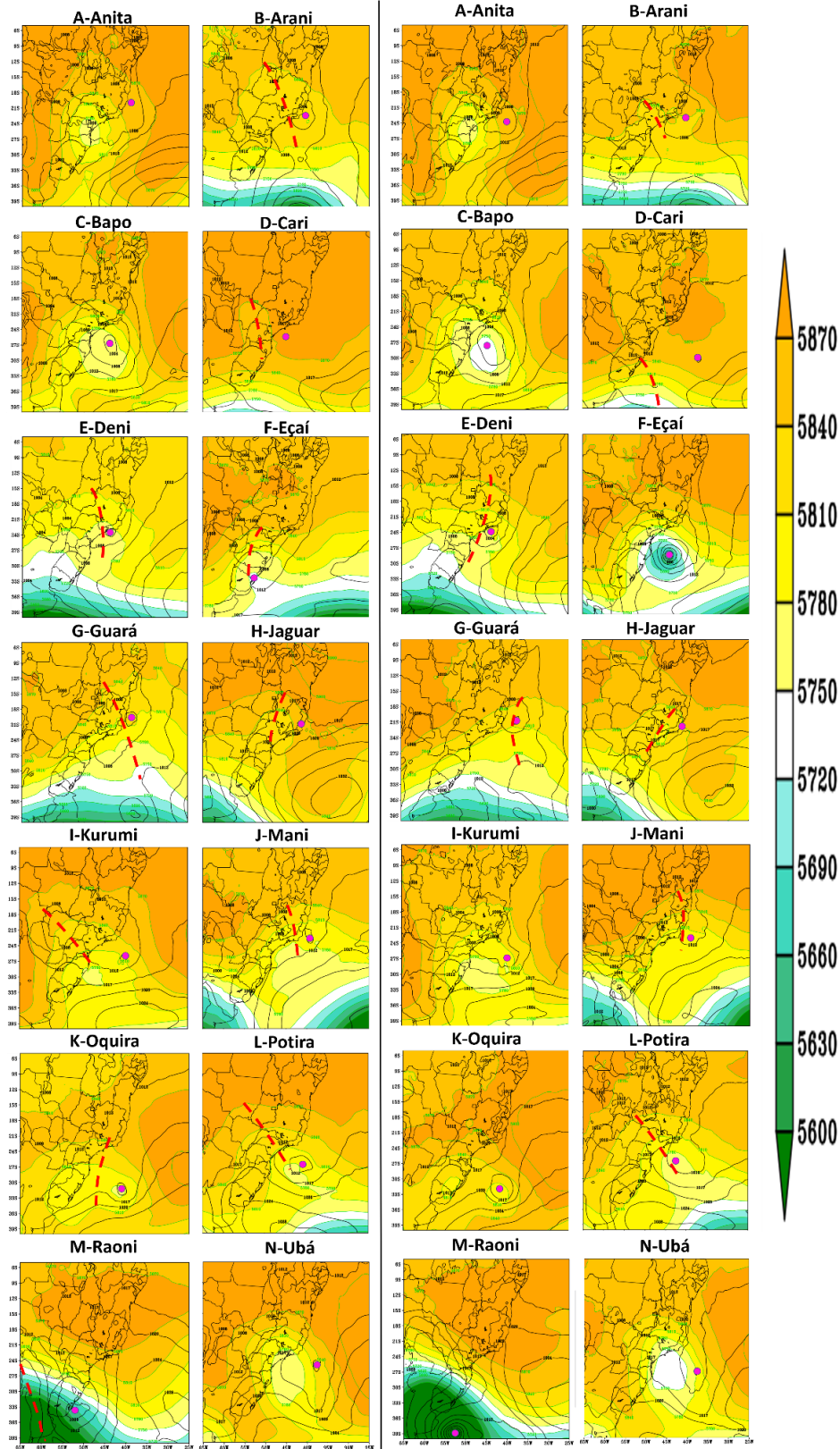


Figura 3. Pré-Ciclogênese: altura geopotencial em 500 hPa (m; preenchido) e PNMM (hPa; contorno). A posição central dos ciclones na gênese é indicada com círculo rosa.

Figura 4. Ciclogênese: altura geopotencial em 500 hPa (m; preenchido) e PNMM (hPa; contorno). A posição central dos ciclones na gênese é indicada com círculo amarelo. A linha vermelha tracejada indica a posição dos cavados.

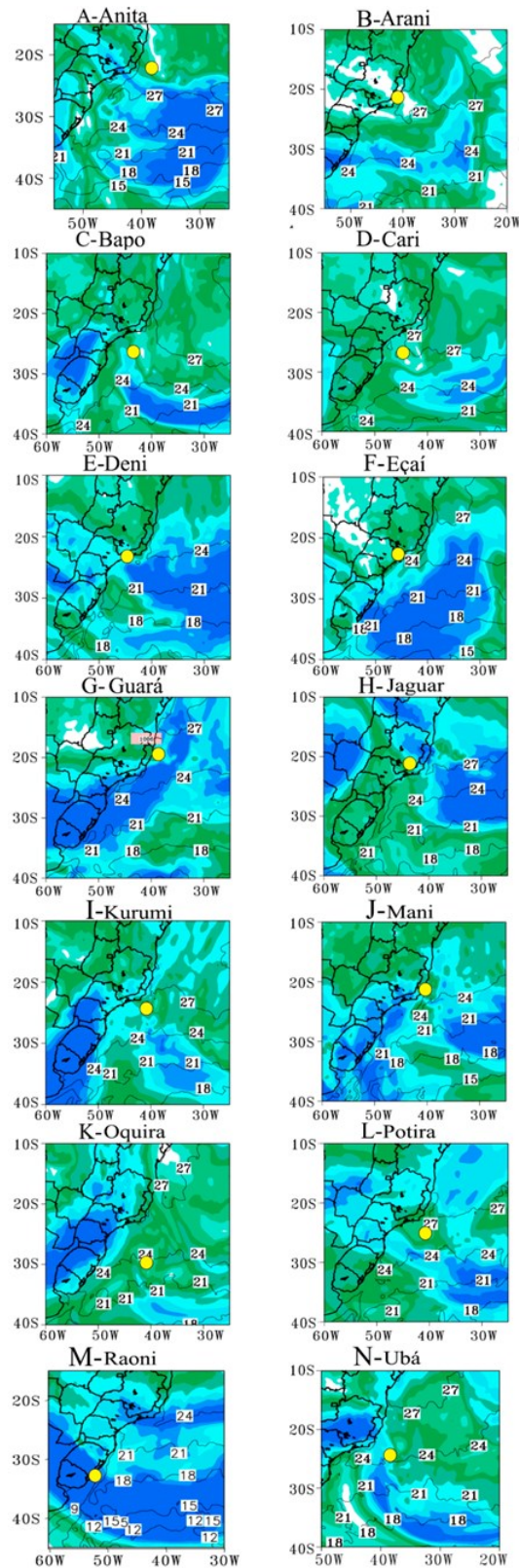


Figura 5. Pré-Ciclogênese: Cisalhamento vertical do vento (intensidade do vento em 200 – intensidade do vento em 850 hPa) (m s^{-1} ; preenchido) e temperatura na superfície do mar ($^{\circ}\text{C}$; contorno) e centro indicado pelo círculo amarelo.

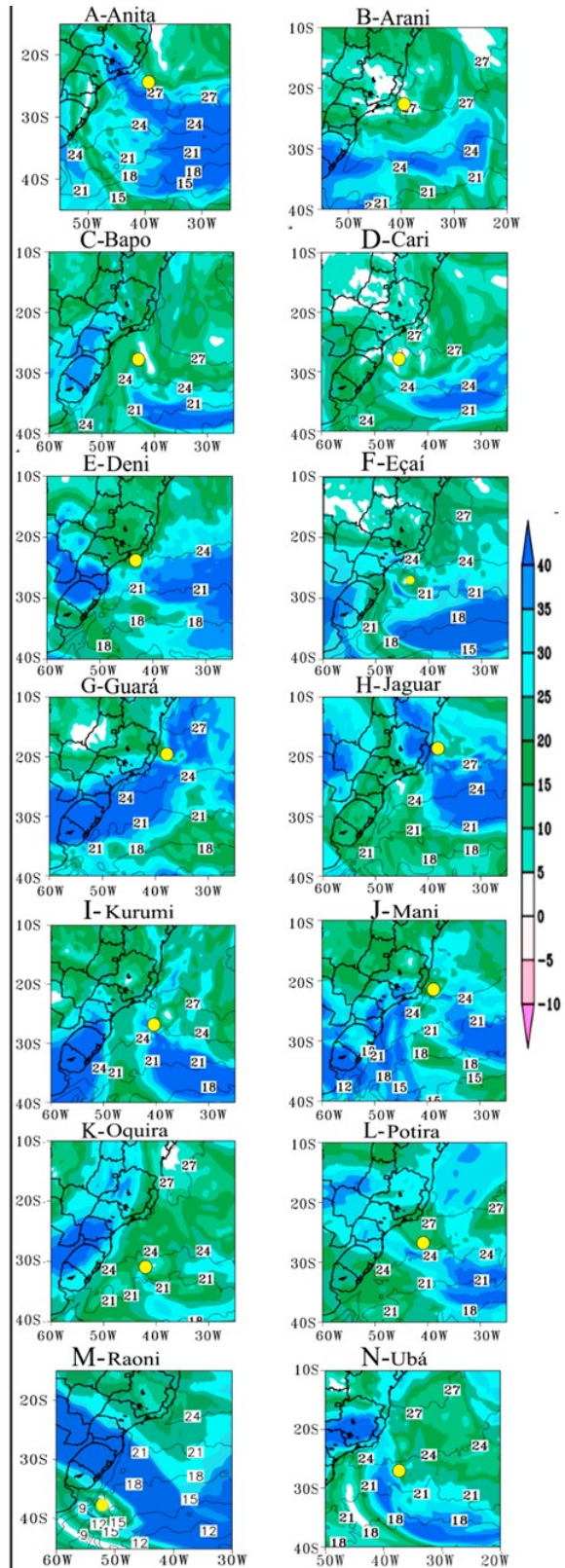


Figura 6. Ciclogênese: Cisalhamento vertical do vento (200 – 850 hPa) (m s^{-1} ; preenchido) e temperatura na superfície do mar ($^{\circ}\text{C}$; contorno) e centro indicado pelo círculo amarelo.

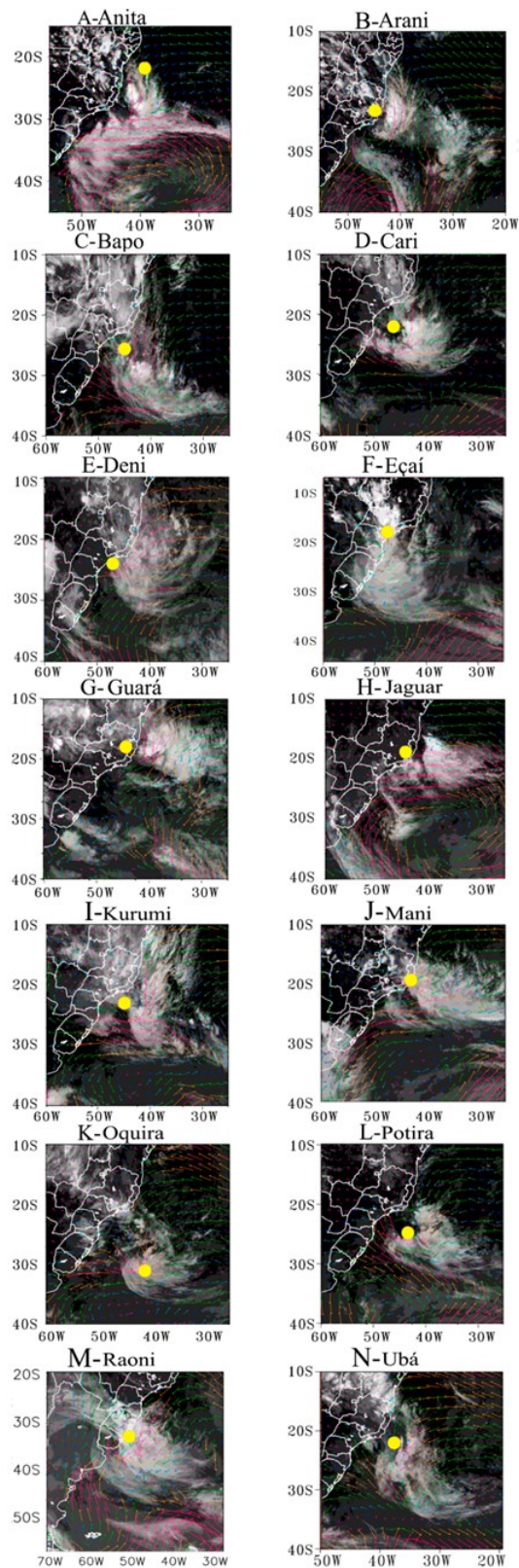


Figura 7. Pré-Ciclogênese: Temperatura de brilho próxima a 11 μm (K), direção dos ventos (10 m s^{-1} ; vetores) e centro dos CS indicado pelo círculo amarelo.

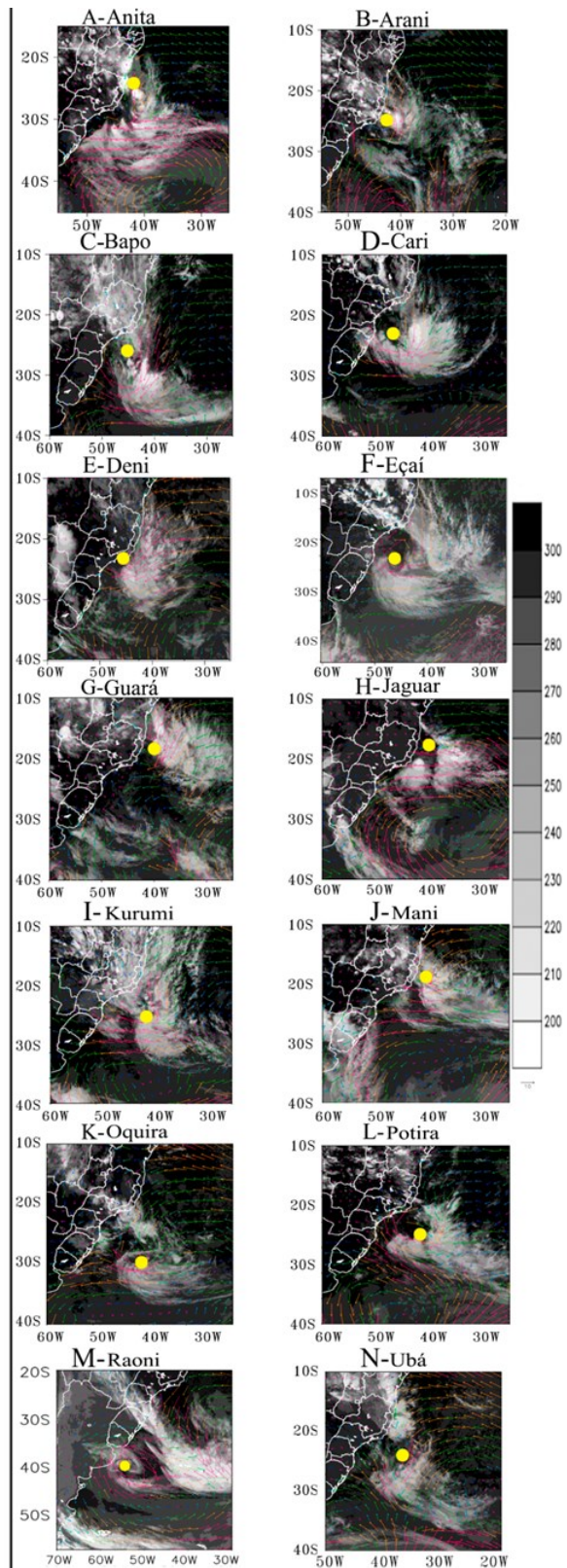


Figura 8. Ciclogênese: Temperatura de brilho próxima a 11 μm (K), direção dos ventos (10 m s^{-1} ; vetores) e centro dos CS indicado pelo círculo amarelo.

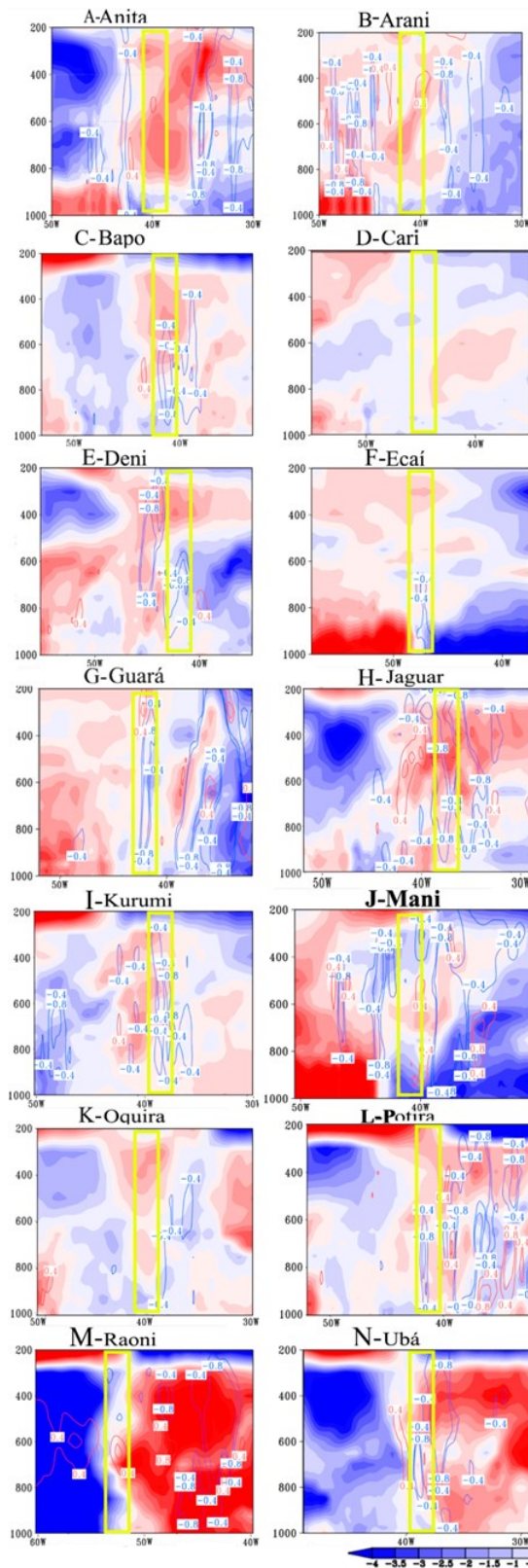


Figura 9. Pré-Ciclogênese: Corte vertical do desvio zonal de temperatura (em °C, preenchido) e velocidade vertical (Pa s^{-1} , contorno). O retângulo amarelo refere-se ao centro do ciclone.

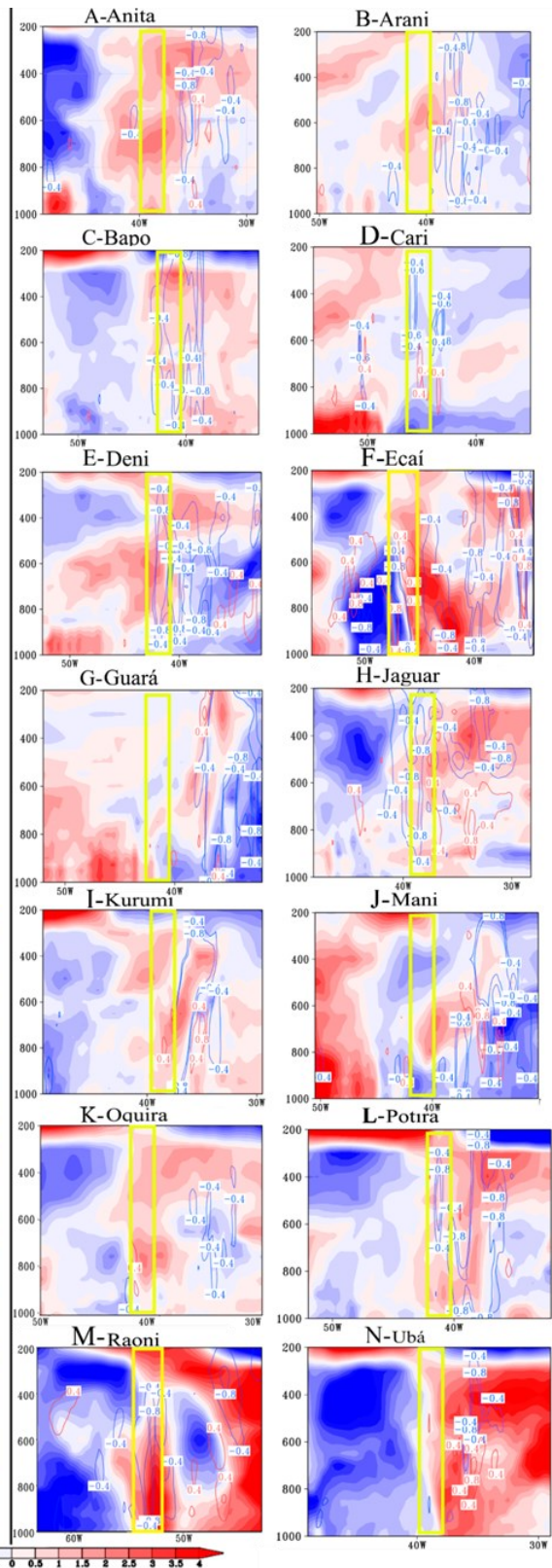


Figura 10. Ciclogênese: Corte vertical do desvio zonal de temperatura (em °C, preenchido) e velocidade vertical (Pa s^{-1} , contorno). O retângulo amarelo refere-se ao centro do ciclone.

Índice do Potencial de Gênese (IPG)

Ribeiro, J. G. M.; Da Paz, G. T.; Reboita, M. S.; Gozzo, L. F.

Apesar do IPG ter sido formulado para identificar regiões com potencial para gênese de CT (Camargo et al., 2007; Andrelina e Reboita, 2844

2021; Wang et al., 2022), ele também pode ser usado como indicador para os CS (Andrelina e Reboita, 2021). Inicialmente, é apresentada uma análise exploratória do IPG na Figura 11, em que o *boxplot* mostra o ciclo anual do IPG obtido com dados a cada 6 horas na região delimitada na Figura 1. A partir de dezembro, a média do IPG aumenta atingindo um máximo entre fevereiro e março, o que concorda com os resultados de Andrelina e Reboita (2021). Em termos de desvio-padrão, o

mês de dezembro é o que apresenta os maiores valores.

A Figura 12 mostra a série temporal da média mensal do IPG de 1989 a 2021 na região delimitada na Figura 1. Da mesma forma que na Figura 11, nota-se um ciclo anual bem definido e uma ligeira tendência positiva do IPG. Porém, essa não é estatisticamente significativa ao nível de 95% de confiança com base no teste de hipótese *t-Sudent*. Um aumento no IPG sugere condições mais propícias para sistemas com núcleo quente.

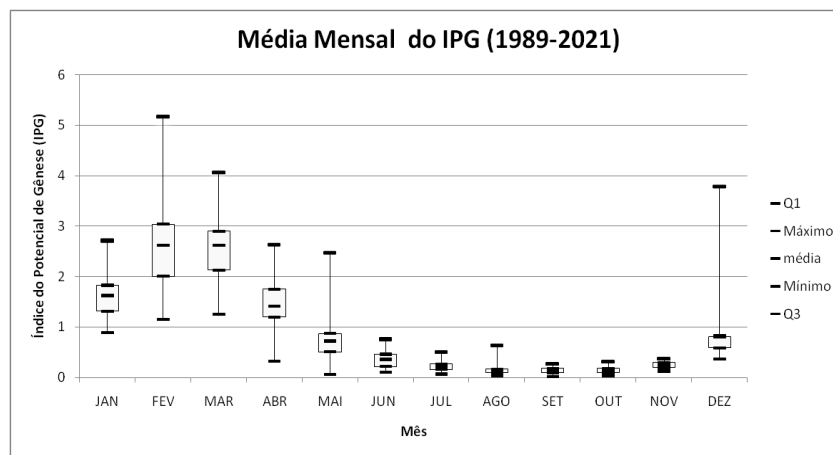


Figura 11. Boxplot do Índice do Potencial de Gênese a cada 6 horas, entre 1989 e 2021, computado na região delimitada na Figura 1.

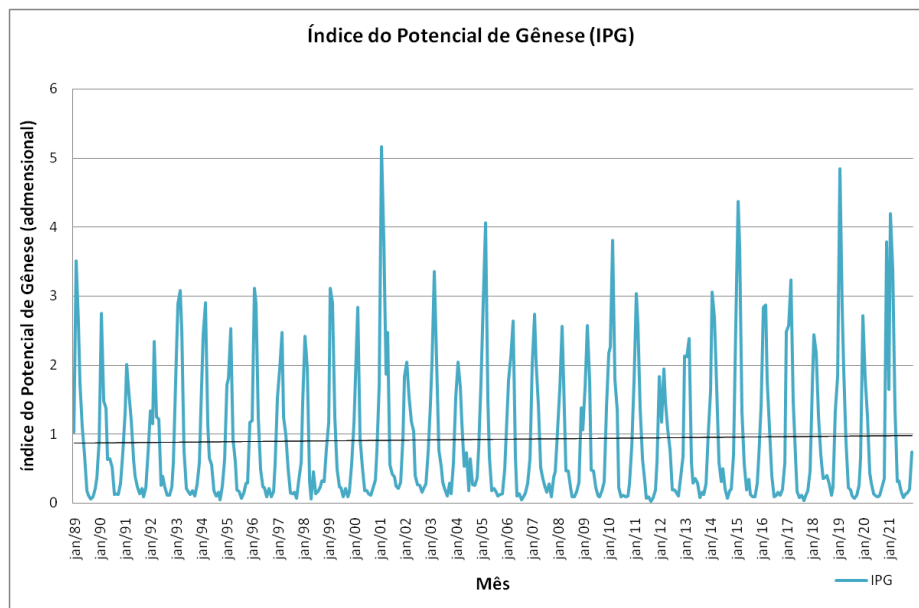


Figura 12. Climatologia mensal do Índice do Potencial de Gênese (adimensional) entre 1989 a 2021. A linha preta representa a reta de tendência linear no período estudado.

A Tabela 3 apresenta o valor do IPG durante a pré- e a ciclogênese. O IPG na pré-ciclogênese (ciclogênese) varia de 0,01 (0,42) no ciclone Eçaí a 21,41 (22,71) no Anita. O menor valor do IPG na ciclogênese foi encontrado no CS Ribeiro, J. G. M.; Da Paz, G. T.; Reboita, M. S.; Gozzo, L. F.

Deni (0,35). A variabilidade espacial do IPG também é ressaltada nas Figuras 13 e 14. Essas figuras indicam que os CS não possuem um valor padrão de IPG que possa ser usado como indicativo de sua gênese, o que seria uma informação útil para

os centros de previsão operacional de tempo. Entretanto, ciclones subtropicais quando acoplados a uma estrutura do tipo bloqueio mostram maior valor de IPG, o que pode ser uma informação útil nas atividades de previsão de tempo. Como, por

exemplo, os CS Anita (22,71), Bapo (9,27), Cari (20,99), Jaguar (6,51), que ocorreram sob uma estrutura de bloqueio tipo *cutoff low*, obtiveram valores mais elevados de IPG comparados aos demais sistemas.

Tabela 3. Média do IPG, cisalhamento e TSM para pré-ciclogênese e ciclogênese dos CS na região de uma caixa com dimensão de 10° x 10° de área com o ciclone centrado no meio, isso significa 5° para cada lado.

Ciclones	Pré-Ciclogênese	Posição Pré-Ciclogênese		IPG	V_{shear} (m s ⁻¹)	TSM (°C)	Ciclogênese	Posição Ciclogênese		IPG	V_{shear} (m s ⁻¹)	TSM (°C)
		Lat	Lon					Lat	Lon			
Anita	18Z 7 Mar 2010	22,5° S	40° W	21,41	15	27,5	00Z 8 Mar 2010	23° S	39° W	22,71	25	26,8
Arani	18Z 14 Mar 2011	23° S	40,2° W	19,31	0	26,3	00Z 15 Mar 2011	23° S	40,2° W	14,11	5	26,3
Bapo	00Z 06 Fev 2015	27,2° S	43,2° W	15,55	20	25,4	06Z 06 Fev 2015	27,2° S	43,2° W	9,27	15	24,5
Cari	12Z 15 Mar 2015	27,2° S	45° W	20,26	10	25,6	18Z 10 Mar 2015	27,2° S	45° W	20,99	10	25,4
Deni	06Z 15 Nov 2016	23° S	42,5° W	0,07	30	22,3	12Z 15 Nov 2016	23° S	42,5° W	0,35	25	22,6
Eçaí	18Z 03 Dez 2016	24° S	47,5° W	0,01	15	23,2	00Z 05 Dez 2016	24° S	47,5° W	0,42	35	22,3
Guará	06Z 09 Dez 2017	20° S	42° W	0,82	30	24,6	12Z 09 Dez 2017	20° S	42° W	1,5	25	24,5
Jaguar	00Z 19 Mai 2019	21° S	38,2° W	8,56	25	25,2	06Z 19 Mai 2019	22° S	38,2° W	6,51	25	26,3
Kurumi	12Z 23 Jan 2020	26° S	39,5° W	2,18	30	24,8	18Z 23 Jan 2020	26,2° S	39,5° W	3,2	35	23,3
Mani	18Z 25 Out 2020	21° S	40,5° W	0,59	15	24,5	00Z 26 Out 2020	22° S	40,5° W	2,89	25	23,6
Oquirá	06Z 27 Dez 2020	30° S	40,7° W	8,56	15	23,3	12Z 27 Dez 2020	31° S	40,7° W	2,98	20	23
Potira	12Z 19 Abr 2021	27° S	42° W	6,96	15	25,2	18Z 19 Abr 2021	27° S	42° W	4,63	25	24,3
Raoni	00Z 27 Jun 2021	33° S	53° W	0,15	40	16,9	06Z 28 Jun 2021	33° S	53° W	7,12	40	27
Ubá	00Z 09 Dez 2021	27° S	39° W	1,96	35	23,6	06Z 09 Dez 2021	27° S	39° W	1,29	30	22,6

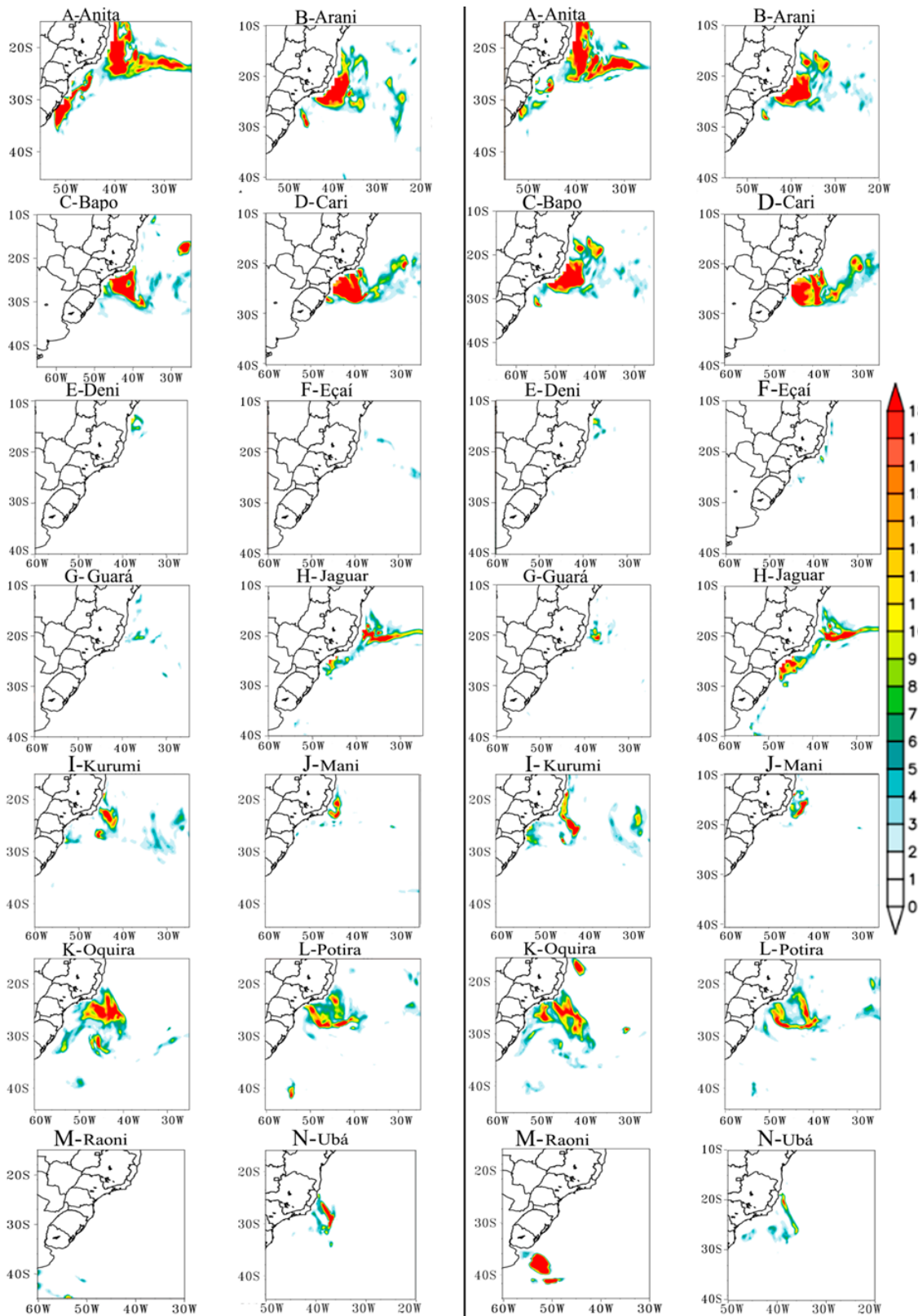


Figura 13. Pré-Ciclogênese: Índice do Potencial de Gênese (IPG) (adimensional).

Figura 14. Ciclogênese: Índice do Potencial de Gênese (IPG) (adimensional).

Conclusão

Como os CS sobre o oceano Atlântico Sul são sistemas atmosféricos que ainda necessitam de estudos para melhor compreensão dos processos físicos de gênese e desenvolvimento, esse foi o foco do presente trabalho. Assim, também foi verificado se o IPG possuía valor similar em todos os ciclones estudados para ser um indicativo da ocorrência desses sistemas. Destaca-se, que esse foi o primeiro estudo que avaliou o IPG em um conjunto de CS na bacia do oceano Atlântico Sul.

Foram analisados 14 ciclones que receberam nome na bacia do oceano Atlântico Sul entre 2010 e 2021. Exceto o Anita, ocorrido em 2010, os demais receberam denominação pela Marinha do Brasil. Entre os principais resultados desse estudo têm-se que:

- Processo de gênese: a análise do processo de gênese, baseado no ponto de vista da escala sinótica, mostrou que cinco CS se formam corrente abaixo de um cavado nos níveis médios da atmosfera e nove em um ambiente com padrão de bloqueio (tipo *cutoff low*). Como a maioria dos ciclones estudados ocorrem num ambiente com estrutura de bloqueio, isso indica que a condição de fraco cisalhamento vertical do vento é um fator importante para os ciclones subtropicais.

- índice do potencial de gênese: o valor do IPG nos períodos pré- e ciclogênese é bem variável entre os casos estudados. O ciclone Deni mostrou o menor valor (0,35) de IPG na sua gênese enquanto o ciclone Anita o maior valor (22,71). Em decorrência da falta de um valor padrão, talvez o IPG não seja adequado como ferramenta a ser utilizada na previsão de ciclones subtropicais nas práticas operacionais.

Por fim, destaca-se que ainda são necessários estudos associados aos processos físicos de gênese e intensificação dos ciclones subtropicais na bacia do oceano Atlântico Sul.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos centros de meteorologia que disponibilizaram os dados usados nesse estudo e à CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

Referências

- Andrelina, B., Reboita, M. S., 2021. Climatologia do Índice do Potencial de Gênese de Ciclones Tropicais nos Oceanos Adjacentes à América do Sul. Anuário do Instituto de Geociências 44.
- Bister, M., Emanuel, K. A., 1998. Dissipative heating and hurricane intensity. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 65, p. 233–240, 1998.
- Camargo, S. J. Sobel, A. H., Barnston, A. G., Emanuel, K. A., 2007. Tropical cyclone genesis potential index in climate models. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, v. 59, n. 4, p. 428-443. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00238.x.
- Capucin, B. C., Llopart, M., Reboita, M. S., Iwabe, C. M. N., 2019. Análise Sinótica de um Período Frio em Bauru-SP em Julho de 2015. Anuário do Instituto de Geociências, v. 42, n. 1, p. 53-65. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_53_65.
- C3S, 2017. Copernicus Climate Change Service. ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate, Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/>>. Acesso em: 26 mai. 2022.
- COMET, 2019. Satellite Feature Identification: Blocking Patterns. Cut-off Low. https://www.meted.ucar.edu/norlat/sat_features/blocking_patterns/navmenu.php?tab=1&page=3-0-0&type=flash.
- Costa, N. H. T., Nunes, A. B., 2021. Synoptic comparison between two cases of subtropical cyclones in the South coast of Brazil. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 7, p. 175-183.
- Da Rocha, R. P., Reboita, M. S., Gozzo, L. F., Dutra, L. M. M., De Jesus, E. M., 2018. Subtropical cyclones over the oceanic basins: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, p. 1-2.
- De Jesus, E. M., Da Rocha, R. P., Crespo, N. M., Reboita, M. S., Gozzo, L. F., 2022. Future climate trends of subtropical cyclones in the South Atlantic basin in an ensemble of global and regional projections. *Climate Dynamics*, v. 58, n. 3, p. 1221-1236.
- 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, v. 118, n. 19, p. 10,870-10,883.
- 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*, v. 143, n.704, p. 1539-1553.
- Emanuel, K., 2002. Tropical cyclones. *Annual review of earth and planetary sciences*, v. 31, n. 1, p. 75-104.
- Emanuel, K., Nolan, D. S., 2004. Tropical cyclone activity and the global climate system. In: 26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. 2004.
- Frank, W. M., Ritchie, E. A., 2001. Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes. *Monthly weather review*, v. 129, n.9, p. 2249-2269. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<2249:EO VWSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2249:EO VWSO>2.0.CO;2).
- Gan, M. A., Rao, V. B., 1991. Surface Cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, v. 119, p. 1293-1302.
- Gan, M. A., Reboita, M. S., Seluchi, M. E., 2022. Ciclones e Ciclôgeneses. In: FERREIRA, N. J., CAVALCANTI, I. F. A. *Sistemas meteorológicos atuantes no Brasil*. Oficina de Textos.
- Gozzo, L. F., Da Rocha, R. P., Gimeno, L., Drumond, L., 2017. Climatology and numerical case study of moisture sources associated with subtropical cyclogenesis over the southwestern Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research-atmospheres*. Washington: Amer Geophysical Union, v. 122, n. 11, p. 5636-5653.
- 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*, v. 27, n. 22, p. 8543-8562.
- Goldenberg, S. B., Landsea, C. W., Mestas-Núñez, A. M., Gray, W. M., 2003. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications, *Science*, 293, 474-479, 2003
- Gray, W. M., 1968. Global View of the origin of Tropical Disturbances and Storms. *Monthly Weather Review*, v. 96, n. 10, p. 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).
- Hart, R. E., 2003. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Monthly weather review*, v. 131, n. 4, p. 585-616.
- Knapp, K. R., 2014. NOAA CDR Program: NOAA Climate Data Record (CDR) of Gridded Satellite Data from ISCCP B1 (GridSat-B1) Infrared Channel Brightness Temperature, Version 2, NOAA National Centers for Environmental Information: Asheville, NC, USA.
- Latif, M., Keenlyside, N., Bader, J., 2007. Tropical sea surface temperature, vertical wind shear, and hurricane development, *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. L01710. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006GL027969>.
- 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*, v. 134, n. 11, p. 3029-3053.
- Moon, J., Cha, D. H., Lee, M., Kim, J., 2018. Impact of spectral nudging on real-time tropical cyclone forecast. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 123, n. 12, p. 647-12,660. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JD028550>.
- NORMAN-2019., 2018 Normas da Autoridade Marítima para as Atividades de Meteorologia Marítima. Normas da autoridade marítima para as atividades de meteorologia marítima. Acessado em: 06 nov. de 2022. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br/dhn/files/normam/NORMAN-19-REV-1--Ed2018-CHM.pdf>>.
- Pezza, A. B., Simmonds, I., 2005. The first South Atlantic hurricane: Unprecedented locking, low shear and climate change. *Geophysical Research Letters*, v. 32, n. 15, p. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GL023390>.
- Reboita, M. S., Crespo, N. M., Dutra, L. M. M., Silva, B. A., Capucin, B. C., Da Rocha, R. P., 2021. Iba: the first pure tropical cyclogenesis over the western South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 126, e. e2020JD033431. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JD033431>.
- Reboita, M. S., Da Rocha, R. P., Ambrizzi, T., Sugahara, S., 2010. South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). *Climate Dynamics*, v. 35, p. 1331-1347. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0668-7>.
- Reboita, M. S., Da Rocha, R. P., Oliveira, D. M., 2018. Key features and adverse weather of the named subtropical cyclones over the Southwestern South Atlantic Ocean. *Atmosphere*, v. 10, n. 1, p. 6.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Da Rocha, R. P., Custodio, I. S., 2017a. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I - Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 2, p. 171-186.

- Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-77863220010>>. ISSN 1982-4351.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Da Rocha, R. P., Custodio, I. S., 2017b. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, p. 509-542.
- Reboita, M. S., Gozzo, L. F., Crespo, N. M., Custodio, M. S., Lucyrio, V., De Jesus, E. M., Da Rocha, R. P., 2022. From a Shapiro–Keyser extratropical cyclone to the subtropical cyclone Raoni: An unusual winter synoptic situation over the South Atlantic Ocean. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 148, n. 747, p. 2991-3009.
- Reboita, M. S., Marrafon, V. H., 2021. Ciclones Extratropicais: o que são, climatologia e impactos no Brasil. *Terra e Didática*, v. 17.
- Reboita, M. S., Oliveira, D. M., Da Rocha, R. P., Dutra, L. M. M., 2019. Subtropical cyclone Anita's potential to tropical transition under warmer sea surface temperature scenarios. *Geophysical Research Letters*, v. 46, n. 14, p. 8484-8489.
- Silva, B. A., Reboita, M. S., Crespo, N. M., Da Rocha, R. P., Dutra, L. M. M., 2022. Ciclones subtropicais Guará e Lexi Parte II: processos físicos responsáveis pelas características subtropicais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 01, p. 359-372.
- Van Brummelen, G., 2012. *Heavenly Mathematics: The Forgotten Art of Spherical Trigonometry*. Princeton University Press, p. 208.
- Vianello, R., Alves, A., 2012. *Meteorologia básica e aplicações*. Viçosa, Editora UFV, p. 460.
- Wang, C., Wang, B., Wu, L., Luo, J. J., 2022. A seesaw variability in tropical cyclone genesis between the western North Pacific and the North Atlantic shaped by Atlantic multidecadal variability. *Journal of Climate*, v. 35, p. 2479–2489.
- Wu, Q., Wang, X., Tao, L., 2020. Interannual and interdecadal impact of Western North Pacific Subtropical High on tropical cyclone activity. *Climate Dynamics*, v. 54, p. 2237–2248. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05110-7>.
- X IWCT, 2022. 10th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-10): 5-9 December 2022. Bali, Indonesia, 2022. <https://community.wmo.int/en/iwtc-10-reports>.
- Zehr, R. M., 1992. Tropical cyclogenesis in the western North Pacific. *NOAA Tech, Repository NESDIS 61*, p. 181.

Anexo I: CPS de cada um dos 14 ciclones estudados. Nos diagramas estão indicadas as áreas que se destinam à classificação dos sistemas como subtropicais.

