



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**Análise do Índice do Potencial de Gênese em casos de
ciclones subtropicais que Aharam nome no Oceano
Atlântico Sul entre 2010 a 2021**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Gabriel Teodoro da Paz

Itajubá, MG, Brasil

2022

Análise do Índice do Potencial de Gênese em casos de ciclones subtropicais que ganharam nome no Oceano Atlântico Sul entre 2010 a 2021

por

Gabriel Teodoro da Paz

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Michelle Simões Reboita

**Itajubá, MG, Brasil
2022**

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

**Análise do Índice do Potencial de Gênese em casos de
ciclones subtropicais que ganharam nome no Oceano
Atlântico Sul entre 2010 a 2021**

elaborada por

Gabriel Teodoro da Paz

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Michelle Simões Reboita, Dr^a. (UNIFEI)
(Presidente/Orientadora)



Luiz Felipe Gozzo, Dr. (UNESP)



Natália Machado Crespo, Dr^a. (USP)

Itajubá, 14 de novembro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, irmão, avós, namorada e padrinho, que sempre me incentivaram durante todo meu período de estudo, vocês foram fundamentais. A minha orientadora Michelle Reboita que me deu todo suporte que precisei, serei eternamente grato. Aos colegas que fiz da minha turma durante o curso, principalmente ao Tiago Silva, Thais Aparecida e Sarah Marins.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

Análise do Índice do Potencial de Gênese em casos de ciclones subtropicais que ganharam nome no Oceano Atlântico Sul entre 2010 a 2021

AUTOR(A): GABRIEL TEODORO DA PAZ
ORIENTADOR: MICHELLE SIMÕES REBOITA
Local e Data da Defesa: Itajubá, 14 de novembro de 2022.

O sudoeste do oceano Atlântico Sul é uma região com grande frequência de ciclones subtropicais e esses sistemas podem causar riscos à região costeira bem como a atividades marítimas. O primeiro ciclone subtropical que recebeu nome na bacia do Atlântico Sul foi o Anita em 2010. Como ainda são escassos os estudos sobre ciclones subtropicais no oceano Atlântico Sul, os objetivos do presente estudo são: (a) descrever os principais mecanismos físicos de gênese dos ciclones subtropicais, entre 2010 e 2021, que receberam nome no oceano Atlântico Sul 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 fim de identificar possível padrão que possa ajudar 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 ciclogênese com característica subtropical, mas a adquiriram ao longo do ciclo de vida. 5 CS se formam corrente abaixo de um cavado nos níveis médios da atmosfera, 6 associados com *cut-off-low*, 2 associados com bloqueio dipolo. Como o IPG não mostra um valor padrão entre a pré-ciclogênese e o momento em que esses sistemas tornam-se subtropicais, pois varia de 0,35 na gênese do Deni a 22,71 na gênese do Anita, sugere-se que o índice não seja adequado nas práticas operacionais.

Palavras-chave: impactos costeiros, ciclones subtropicais, análise sinótica, índice do potencial de gênese.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1** - Trajetória dos CS a partir de sua gênese (ponto indicado com a letra A). 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 os estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, respectivamente.
- FIGURA 2** - Exemplo da aplicação da metodologia do CPS para o caso do ciclone Deni
- 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 (200 – 850hPa) (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 – 850hPa) (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 $11\text{ }\mu\text{m}$ (K), direção dos ventos (10 m s^{-1} ; vetores) e centro indicado pelo círculo amarelo.
- FIGURA 8** - Ciclogênese: Temperatura de brilho próxima a $11\text{ }\mu\text{m}$ (K), direção dos ventos (10 m s^{-1} ; vetores) e centro indicado pelo círculo amarelo.
- FIGURA 9** - Pré-Ciclogênese: Corte vertical do desvio zonal de temperatura (em $^{\circ}\text{C}$, preenchido) e velocidade vertical (Pa s^{-1} , contorno).
- FIGURA 10** - Ciclogênese: Corte vertical do desvio zonal de temperatura (em $^{\circ}\text{C}$, preenchido) e velocidade vertical (Pa s^{-1} , contorno).
- 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 entre 1989 a 2021.

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

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

LISTA DE TABELAS

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, e posição final, com base na desconfiguração das isóbaras, tempo de vida, distância percorrida e velocidade média.

TABELA 2 - Indicação do momento em que cada ciclone adquiriu características de subtropical

TABELA 3 - Média do IPG, cisalhamento e TSM para pré-ciclogênese e ciclogênese dos CS na região de uma caixa com dimensão de $10^\circ \times 10^\circ$ de área com o ciclone centrado no meio, isso significa 5° pra cada lado.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

°C – Graus Celsius.

acos – Arco cosseno.

µm – Micron.

CAPE – Energia Potencial Disponível Para Convecção na Camada Limite.

CAPE* – Energia Potencial Disponível Para Convecção e Considera o Ar Que é Levantado

A partir do nível médio do mar

Cd – Coeficiente de transferência de momentum.

CE – Ciclone Extratropical.

CK – Coeficiente de Transferência de Entalpia.

φ1 - Latitude no ponto 1.

φ2 – Latitude no ponto 2.

Δλ – Diferença entre as longitudes

CS – Ciclone Subtropical.

CT – Ciclone Tropical.

D – Distância entre duas coordenadas geográficas.

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

ERA5 – ECMWF Reanalysis v.

GridSat-B1 – Grided Satellite

H – Umidade relativa em 700 hPa.

hPa – Hectopascal.

IPG – Índice do Potencial de Gênese.

K – Temperatura em Kelvin.

Km – Kilômetro.

Lat – Latitude.

Lon – Longitude.

$m s^{-1}$ – Metros por segundo.

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration.

OAS – Oceano Atlântico Sul.

Pa – Pascal.

PNMM – Pressão ao Nível Médio do Mar.

PR – Paraná.

R – Raio da Terra.

RJ – Rio de Janeiro.

RS – Rio Grande do Sul.

SC – Santa Catarina.

SP – São Paulo.

Tb – Temperatura de brilho.

To – Temperatura média no topo da coluna atmosférica.

TS – Temperatura da superfície do mar.

TSM – Temperatura na Superfície do Mar.

u200 – Componente Zonal do Vento em 200 hPa (m s⁻¹)

u8500 – Componente Zonal do Vento em 200 hPa (m s⁻¹)

UTC – Coordinated Universal Time.

v200 – Componente Meridional do Vento em 200 hPa (m s⁻¹)

v850 – Componente Meridional do Vento em 200 hPa (m s⁻¹)

Vpot – Intensidade Potencial do Vento.

Vshear – Magnitude do cisalhamento vertical do vento horizontal entre 200 e 850 hpa.

ζ – Vorticidade relativa.

η – Vorticidade Absoluta.

Φ – Latitude em graus.

Ω – Velocidade angular da Terra.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METODOLOGIA	4
2.1 ÁREA DE ESTUDO.....	4
2.2 DADOS.....	4
2.3.1 CILONES E CICLO DE VIDA.....	4
2.3.2 TRAJETÓRIA E DISTÂNCIA PERCORRIDA.....	5
2.3.3 ÍNDICE DO POTENCIAL DE GÊNESE.....	5
2.3.4 ANÁLISE SINÓTICA.....	6
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	8
3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CICLONES SUBTROPICAIS.....	8
3.2 AMBIENTE DE GÊNESE.....	9
3.3 ÍNDICE DO POTENCIAL DE GÊNESE.....	18
4. CONCLUSÃO	24
5. REFERÊNCIAS	25

1. INTRODUÇÃO

Até a metade do século XX, acreditava-se que os ciclones de escala sinótica eram apenas de dois tipos: 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 ciclogênese 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, 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, assim como os ciclones tropicais, e núcleo frio em níveis superiores, característica dos ciclones extratropicais (da Rocha et al., 2018). Os CS no oceano Atlântico Sul (OAS) se desenvolvem principalmente durante o verão (dezembro a fevereiro) e outono (março a maio) (Gozzo et al., 2014; de Jesus et al., 2022) e passaram a receber nome a partir do advento do ciclone Anita em 2010 (Dias Pinto et al., 2013; Dutra et al., 2017).

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 entre 900 e 600 hPa (V_T^L) e vento térmico entre 600 e 300 hPa (V_T^L). No caso da fase

subtropical dos ciclones no OAS, os sistemas devem apresentar $B < 25$ m, $-|V_T^L| > -50$ e $-|V_T^U| < -10$ (Gozzo et al., 2014). 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. (2019).

O primeiro ciclone tropical registrado no OAS foi o ciclone Catarina, em março de 2004 (Pezza e Simmonds, 2005). Esse sistema ocorreu a partir de uma transição tropical, isto é, o sistema inicia como extratropical e sofre transição para tropical (McTaggart-Cowan et al., 2006). Já 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 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 por 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 e 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), Oquira (2020), Potira (2021), Raoni (2021) e Ubá (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, 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 (2014) considera a vorticidade absoluta em 850 hPa, umidade relativa em 700 hPa, intensidade potencial do vento e o cisalhamento vertical do vento entre 200 e 850 hPa. O cisalhamento vertical do vento horizontal, quando muito intenso, atrapalha a formação dos ciclones tropicais (Goldenberg et al., 2003; Latif et al., 2007) por dificultar a organização da atividade convectiva. Diversos estudos apontam que o cisalhamento vertical do vento

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).

Andreolina 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 valor de IPG atinge os maiores valores em março (3,5; o IPG é uma unidade adimensional e não há um limiar ótimo definido na literatura). Seguindo as ideias propostas por Gray (1968), por mais que o OAS apresente IPG, 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, 2003; 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 de 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 adquirem características subtropicais, a fim de identificar possível valor padrão que possa auxiliar a previsão operacional desses sistemas.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

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

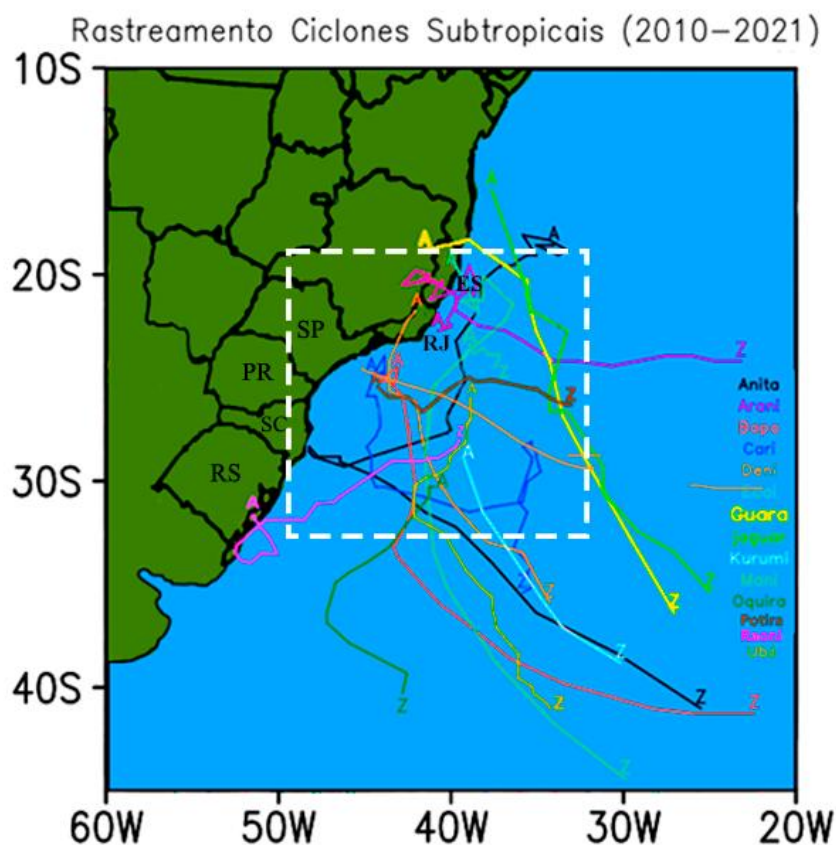


Figura 1 Trajetória dos CS a partir de sua gênese (ponto indicado com a letra A). A área delimitada com linhas tracejadas brancas indica a região usada para cálculo da média do IPG. As siglas ES, RJ, SP, PR, SC e RS indicam os estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, respectivamente.

2.2 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 (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC) compreendendo o período de pré-ciclogênese (adotada como o horário sinótico de 6 horas antes da gênese) ao de ciclólise para cada ciclone estudado. As seguintes variáveis foram utilizadas considerando 16 níveis verticais (200, 300, 400, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 925, 950, 975 e 1000 hPa): geopotencial ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), 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 *Gridded Satellite* (GridSat-B1) fornecidos pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA; Knapp, 2014). Foi utilizado o canal correspondente ao comprimento de onda do infravermelho (próximo a 11 μm) e com dados disponíveis a cada três horas com 0,07° de resolução horizontal.

2.3.1 Ciclones e Ciclo de Vida

Esse estudo analisa 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 ciclogênese 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 ocorre quando a isóbara fechada se desconfigura ou o sistema se interconecta com outro. De acordo com Reboita et al. (2019), a definição da ciclogênese com base na PNMM está relacionada com o fato de que os campos atmosféricos estão mais organizados do que quando a identificação é realizada com a vorticidade relativa. Uma vez localizada a isóbara central do ciclone, a cada 6 horas, é registrada a latitude e longitude de menor

valor de PNMM. Isso permite definir a trajetória de cada ciclone, bem como o tempo de vida e velocidade média.

A identificação da trajetória de um ciclone não traz a informação do tipo desse ciclone, isto é, se inicia com características extratropicais ou subtropicais e como é a sua evolução ao longo do tempo. 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; no 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) em que 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 a todos os ciclones e os resultados são sumarizados em uma tabela na seção resultados.

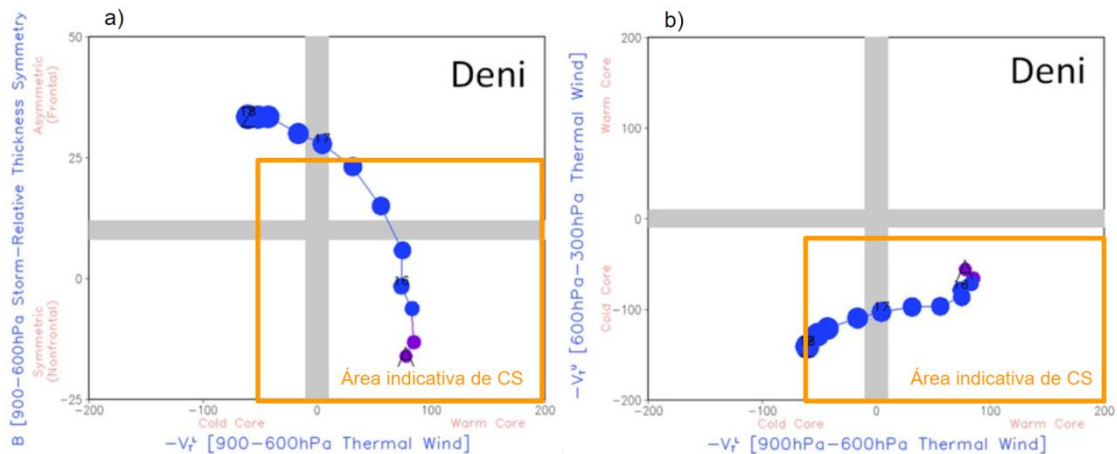


Figura 2 Exemplo da aplicação da metodologia do CPS para o caso do ciclone Deni ocorrido em novembro de 2016: (a) parâmetros B e $-|V_T^L|$ e (b) parâmetros $-|V_T^L|$ e $-|V_T^U|$. A caixa laranja indica a região que define os ciclones como subtropicais. Os parâmetros são mostrados desde a gênese do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

2.3.2 Trajetória e Distância Percorrida

Com base nas informações registradas da posição do ciclone em cada passo de tempo (ver seção 2.3.1), 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 pode-se 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.

2.3.3 Índice do Potencial de Gênese

O IPG é calculado a cada 6 horas (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC). Não são usados dados diários ou mensais para o cálculo do IPG para não se ter um campo suavizado (Andrelin e Reboita, 2020). Segundo Emanuel e Nolan (2004), o IPG é calculado como:

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

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:

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

onde: V_{pot} é a intensidade potencial do vento ($m s^{-1}$), C_k é o coeficiente de transferência de entalpia (adimensional), T_s 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 é representado pela diferença das componentes zonal e meridional do vento entre 200 e 850 hPa (V_{shear} em m s^{-1}):

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

em que V_{shear} é a magnitude do cisalhamento vertical do vento horizontal calculado entre 200 e 850 hPa (m s^{-1}), u_{200} é a componente zonal do vento em 200 hPa (m s^{-1}), u_{850} é a componente zonal do vento em 850 hPa (m s^{-1}), v_{200} é a componente meridional do vento em 200 hPa (m s^{-1}), v_{850} é a componente meridional do vento em 850 hPa (m s^{-1}).

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 35,5 e 49,5 °O e 21 e 30,5 °S (Figura 1). Por fim, será calculada a tendência do índice para o período de 1989 a 2021 e a significância estatística com o teste *t-Sudent* considerando 95% de confiança.

2.3.4 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 ω . Em (d) são apresentados perfis verticais com latitude central dos ciclones fixada.

3. Resultados e Discussão

3.1 Características Gerais dos Ciclones Subtropicais

A Figura 1 mostra a trajetória dos CS. Todos os sistemas, exceto Raoni, tiveram sua gênese a norte da latitude 30° 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, Oquira 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).

A Tabela 1 mostra as principais informações (data de gênese e ciclólise, tempo de vida, distância percorrida e velocidade média) de cada CS estudado. O Anita foi o ciclone com maior tempo de vida (5 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).

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, e 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	21,75° S	38,75° W	00Z 13 Mar 2010	42,75° S	26,5° W	5	4245	33 (9,17)
Arani	00Z 15 Mar 2011	22,5° S	40,25° W	18Z 17 Mar 2011	25,5° S	24,25° W	2	1628	20 (5,56)
Bapo	06Z 06 Fev 2015	27,50° S	43,25° W	06Z 10 Fev 2015	43° S	23,5° W	4	3390	28 (7,78)
Cari	18Z 10 Mar 2015	27,25° S	45° W	12Z 13 Mar 2015	37,75° S	38,25° 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	18Z 04 Dez 2016	28° S	44,5° W	18Z 06 Dez 2016	28,5° S	36° W	2	920	17 (4,72)
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	38,25° 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)

Oquirá	12Z 27 Dez 2020	31,75° S	40,75° W	12Z 30 Dez 2020	42° S	43,25° 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 28 Jun 2021	33° S	53° W	12Z 01 Jul 2021	27° S	40° W	3	2058	26 (7,22)
Ubá	06Z 09 Dez 2021	27° S	39° W	12Z 13 Dez 2021	42° S	34° W	4	2311	22 (6,11)

O passo seguinte do estudo foi identificar em que momento do ciclo de vida os ciclones estudados apresentavam características de sistemas subtropicais. Para tanto, os parâmetros do CPS foram analisados e os resultados estão compilados na Tabela 2. Apenas dois ciclones (Eçaí e Raoni) tiveram as características subtropicais adquiridas após a ciclogênese (Tabela 2). A Tabela também indica os mecanismos físicos descritos na literatura que contribuíram para a gênese dos ciclones em estudo.

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 conforme a literatura. Para complementação da tabela, os mecanismos físicos que serão descritos na próxima seção dos ciclones ainda não apresentados na literatura, aparecem em *itálico* na tabela.

Ciclone	Data quando o ciclone se torna subtropical	Mecanismo de Gênese	Referência Adicional
Anita	primeira posição	bloqueio dipolo	Dias Pinto et al., 2013; Dutra et al., 2017; Reboita et al., 2019
Arani	primeira posição	cavado com pequena amplitude	Reboita et al., 2017b; Reboita et al., 2019
Bapo	primeira posição	bloqueio dipolo	Reboita et al., 2019
Cari	primeira posição	cutoff low	Reboita et al., 2019; Costa e Nunes, 2021
Deni	primeira posição	cavado com pequena amplitude	Reboita et al., 2019
Eçaí	24 horas após à gênese	<i>cutoff-low</i>	Reboita et al., 2019; Costa e Nunes, 2021

Guará	primeira posição	cavado com pequena amplitude	Andreina Silva et al. 2022 a,b; Gan, Reboita and Seluchi (2022)
Jaguar	primeira posição	<i>cutoff-low</i>	
Kurumí	primeira posição	<i>cutoff-low</i>	
Mani	primeira posição	<i>cavado com pequena amplitude</i>	
Oquirá	primeira posição	<i>cutoff-low</i>	
Potira	primeira posição	<i>cavado</i>	
Raoni	24 horas após a gênese	seclusão quente e cutoff-low	Reboita et al., 2022
Uba	primeira posição	<i>cutoff-low</i>	

3.2 Ambiente de Gênese

Com a finalidade de mostrar as principais características sinóticas da gênese dos CS, esta seção apresenta os campos sinóticos da pré-ciclogênese e ciclogênese de cada sistema estudado.

As Figura 3 e 4 mostram que alguns dos CS, tiveram sua gênese a leste de um cavado no campo da altura geopotencial em 500 hPa (Arani (B), Deni (E), Guará (G), Mani (J) e Potira (L)), ou embebidos numa estrutura barotrópica propiciada por um *cutoff-low* (Cari (D), Eçaí (F). Jaguar (H), Kurumi (I), Oquirá (K) e Ubá (N)) ou por um bloqueio dipolo (Anita (A) e Bapo (C)).

Os ciclones que possuem gênese com maior pressão central são Oquirá (L) e Jaguar (H) com 1014 hPa, enquanto o Raoni (M) foi o CS que iniciou com menor pressão (994 hPa) (Figura 3 e 4). A leste e sudeste dos CS predomina o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que contribui com ventos de quadrante norte para o transporte de umidade para a região dos ciclones, o que concorda com o estudo de Gozzo et al. (2017), e a contribuição do ASAS na direção e intensidade do vento é mostrada nas Figuras 7 e 8.

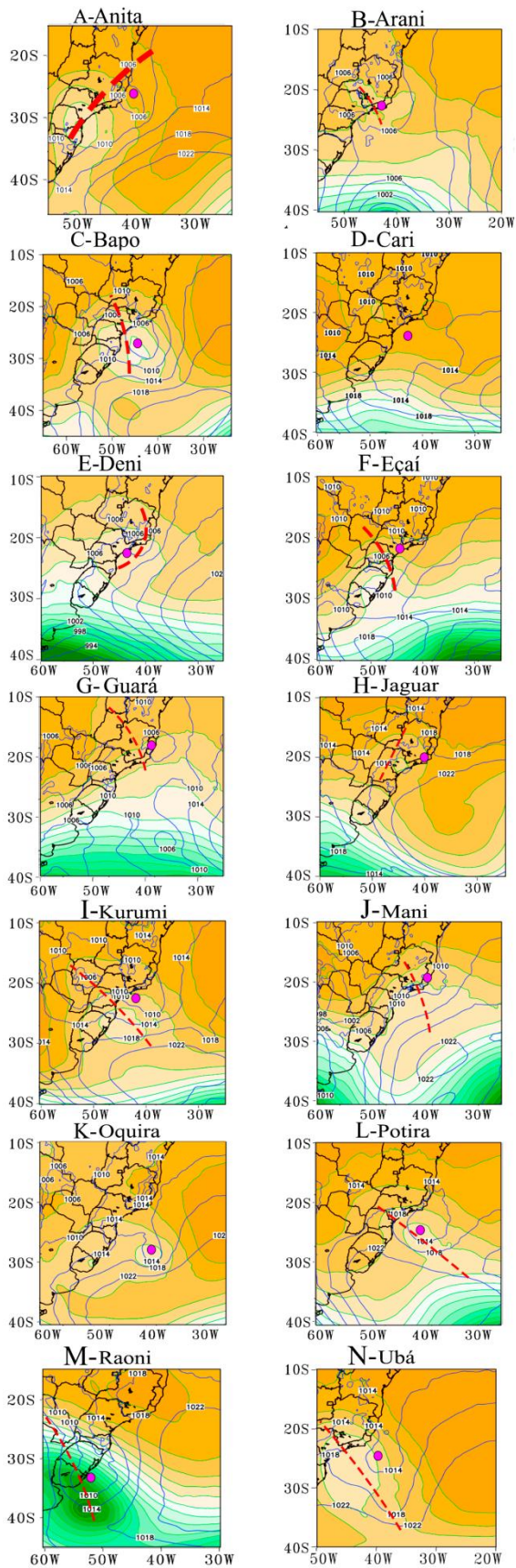


Figura 3 Pré-Ciclogênese: altura geopotencial em 500 hPa (m; preenchido) e

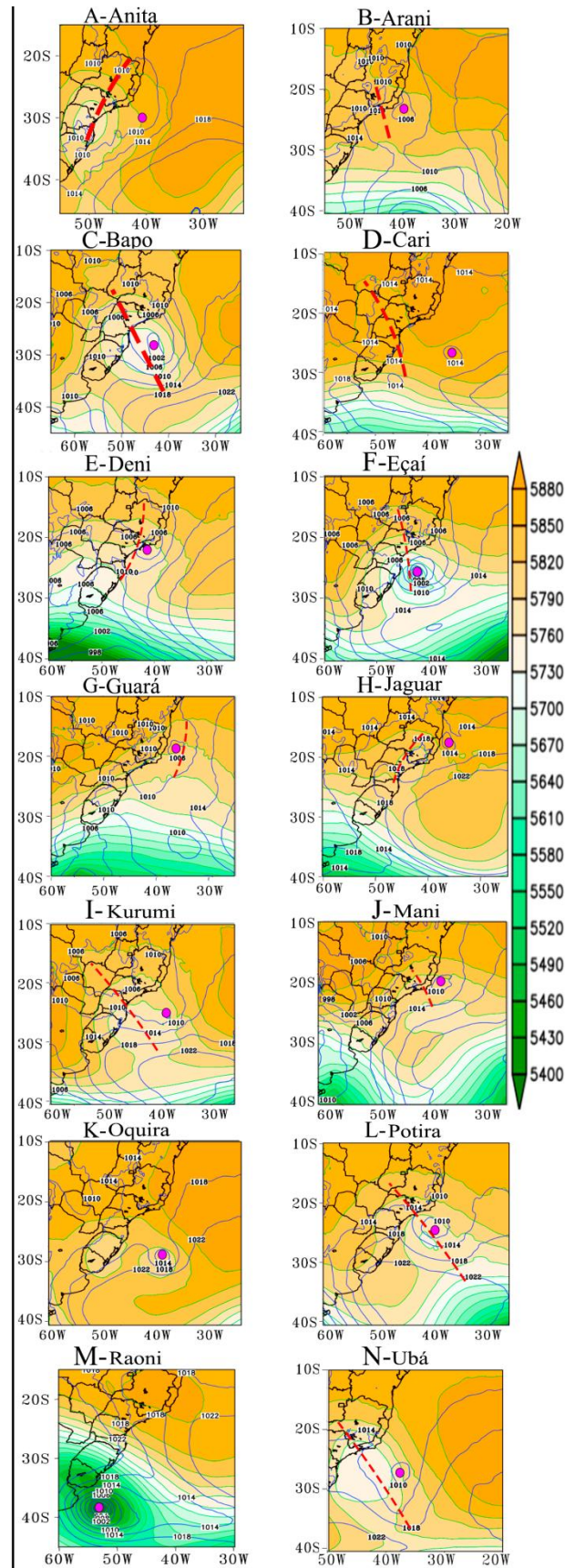


Figura 4 Ciclogênese: altura geopotencial em 500 hPa (m; preenchido) e PNMM (hPa;

PNMM (hPa; contorno). A posição central dos ciclones na gênese é indicada com círculo rosa. A linha vermelha tracejada indica a posição dos cavados.	contorno). A posição central dos ciclones na gênese é indicada com círculo rosa. A linha vermelha tracejada indica a posição dos cavados.
--	---

Nas Figuras 5 e 6 são mostrados os campos de cisalhamento vertical do vento e TSM. Quando o cisalhamento vertical do vento é positivo (negativo) indica que os ventos em altos níveis (200 hPa) são mais intensos (fracos) do que os em baixos níveis da atmosfera (850 hPa) e, se a intensidade do cisalhamento for 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 (A), Arani (B), Cari (D), Eçaí (F), o ambiente barotrópico é bem configurado pelo cisalhamento vertical do vento mais fraco. Durante a gênese dos CS (Figura 6), o cisalhamento vertical do vento foi menor (5 m s^{-1}) no Arani (B) e Eçaí (F), e maior (35 m s^{-1}) no Kurumi (I). Cerca de 50% dos ciclones estudados apresentam cisalhamento vertical do vento menor do que o valor climatológico de 25 m s^{-1} ; Andreлина e Reboita, 2021) na região delimitada na Figura 1. Os CS Deni (E), Guará (G), Jaguar (H), Kurumi (I), Raoni (M) e Ubá (N) são os que apresentam valores de cisalhamento superiores à climatologia.

Segundo Gray (1968), a TSM maior do que 26°C é uma das condições necessárias, mas não suficientes para gênese do CT. Embora a TSM possa ajudar a gênese, os CS podem se formar sobre TSM menor do que esse valor. De acordo com as Figuras 5 e 6, o valor de TSM mais baixo durante a gênese foi de 16°C no Raoni e o maior valor foi de $26,8^\circ\text{C}$ no Anita.

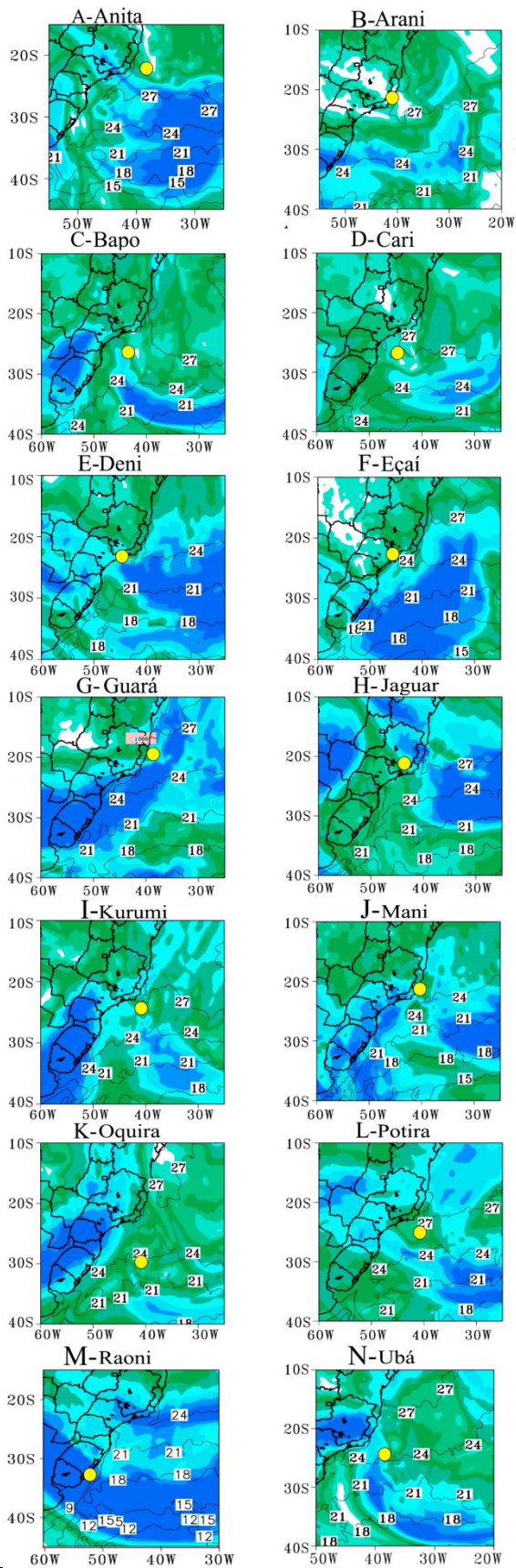


Figura 5 Pré-Ciclogênese: Cisalhamento vertical do vento (200 – 850hPa) (m s^{-1} ; preenchido) e temperatura na superfície do

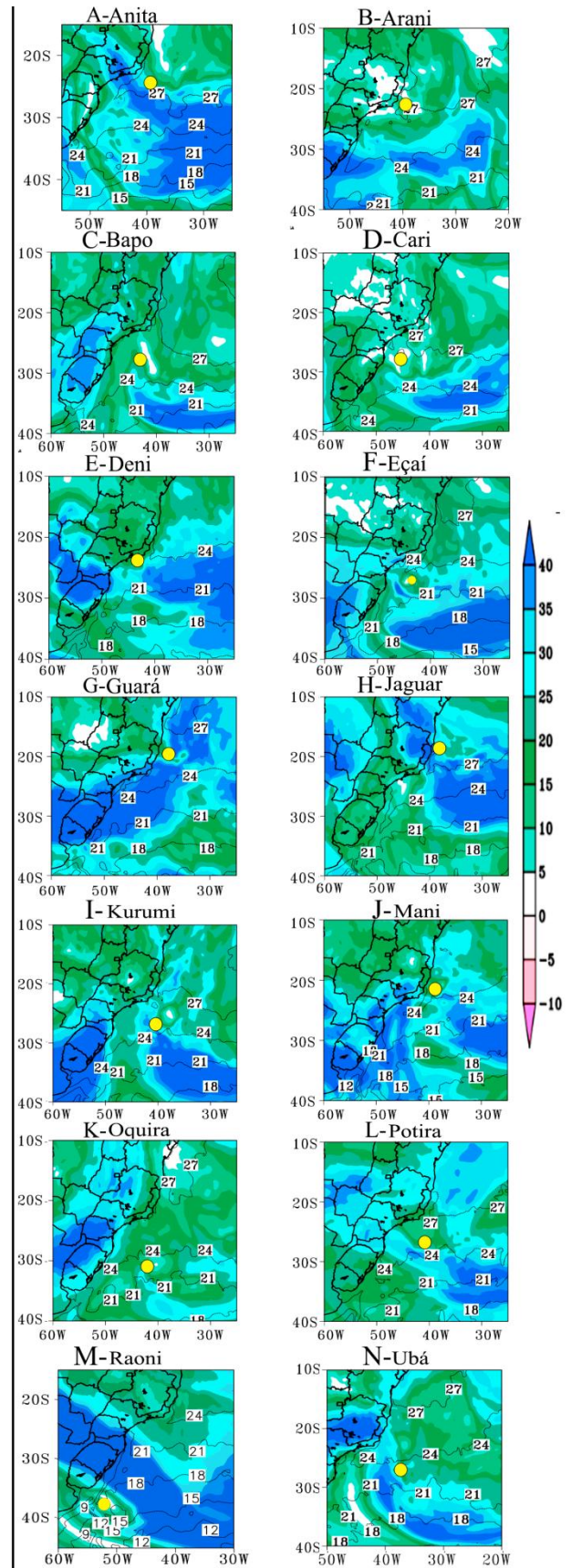


Figura 6 Ciclogênese: Cisalhamento vertical

mar (°C; contorno) e centro indicado pelo círculo amarelo.	do vento (200 – 850hPa) (m s ⁻¹ ; preenchido) e temperatura na superfície do mar (°C; contorno) e centro indicado pelo círculo amarelo.
--	--

As Figuras 7 e 8 destacam a ocorrência da banda de nebulosidade acompanhando o escoamento do vento que converge para a região do ciclone. As nuvens associadas aos ciclones apresentam T_b abaixo de 220 K (tons brancos). Essa nebulosidade representa nuvens convectivas na região ao redor do centro do ciclone, logo indicando grande liberação de calor latente por condensação na atmosfera, intensificando os movimentos ascendentes, visto na [Figura 6](#), e contribuindo para diminuição da pressão em superfície (Reboita et al., 2019). Com relação aos ventos, esses são mais intensos no setor sul dos ciclones e com direção predominantemente de leste.

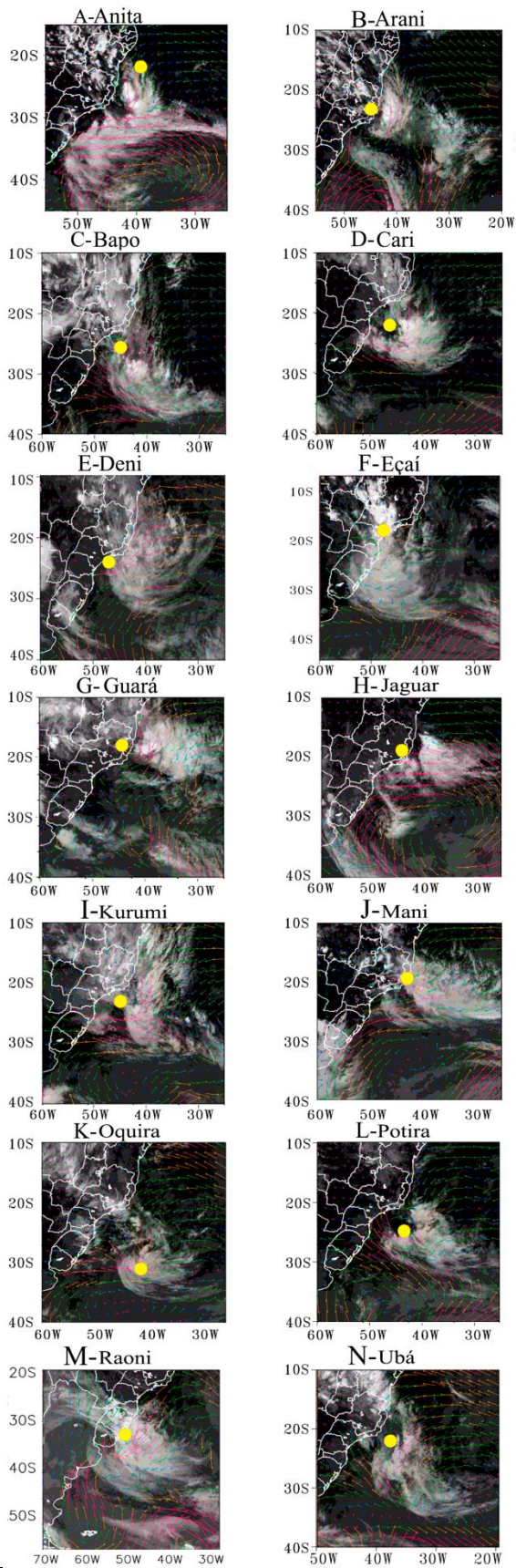


Figura 7 Pré-Ciclogênese: Temperatura de brilho próxima a 11 μm (K), direção e intensidade dos ventos (10 m s⁻¹; vetores) e

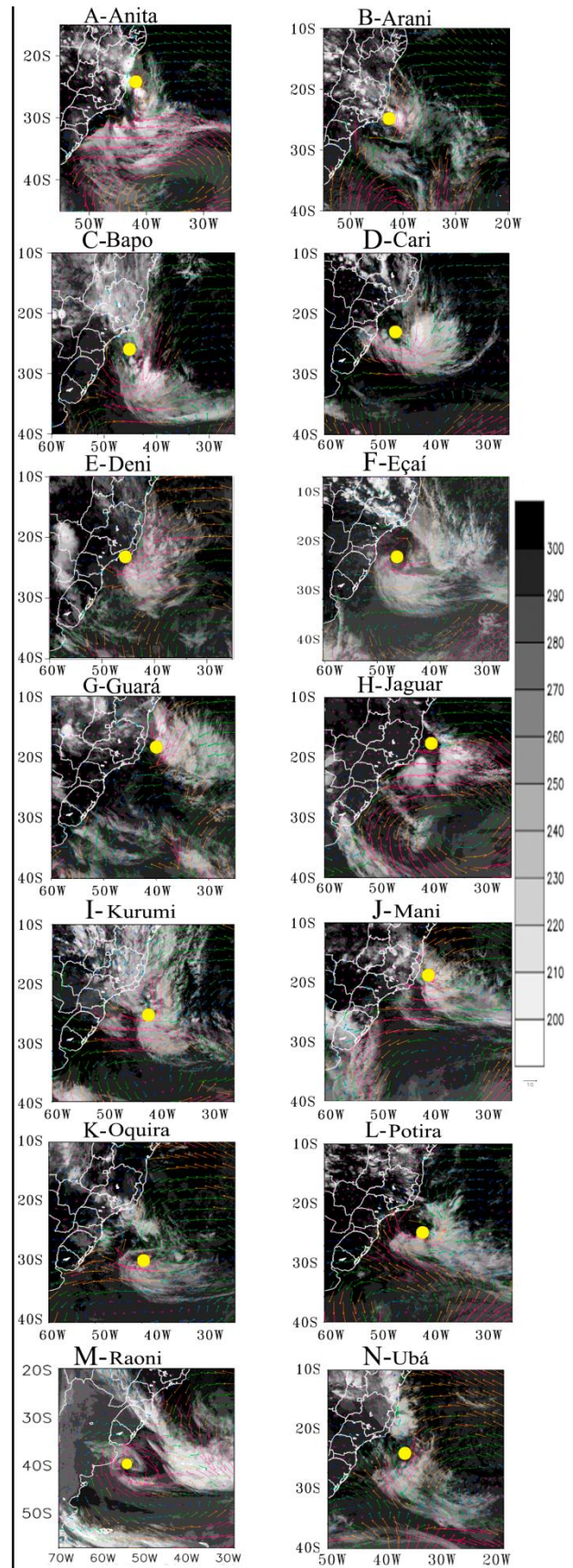


Figura 8 Ciclogênese: Temperatura de brilho próxima a 11 μm (K), direção e intensidade dos ventos (10 m s⁻¹; vetores) e

centro indicado pelo círculo amarelo.	centro indicado pelo círculo amarelo.
---------------------------------------	---------------------------------------

Para analisar a estrutura vertical dos ciclones foram obtidos cortes verticais oeste-leste com base na latitude e longitude central desses sistemas. Para os estágios de pré- e ciclogênese foram identificados os pontos centrais e utilizados 10° de incremento de longitude para os cortes zonais. Com relação ao estágio de pré-ciclogênese, é possível observar valores mais quentes que a média zonal, principalmente nas porções leste (Anita (A), Arani (B), Deni (E), Eçaí (F), Guará (G) e Mani (J)) e oeste (Jaguar (H), Raoni (M) e Ubá (N)) dos centros dos respectivos ciclones. É possível também identificar valores de velocidade vertical negativa (entre -0,4 e -0,8) presente em todos os ciclones no período de pré-ciclogênese, com exceção do ciclone Cari (D). No período de ciclogênese é possível observar uma intensidade na velocidade vertical negativa e observa-se uma camada mais fria que a média zonal mais próxima à superfície. De maneira geral, nos dois estágios apresentados, a velocidade vertical negativa representa movimentos ascendentes relacionados ao levantamento de ar devido à convergência nestes ciclones. Com relação ao desvio de temperatura mais frio na ciclogênese pode estar relacionado à transferência de energia (fluxos de calor latente e sensível) do oceano para a atmosfera adjacente resfriando assim as camadas de ar adjacente ao mar (Hawkins e Imembo, 1976; Reboita et al., 2018).

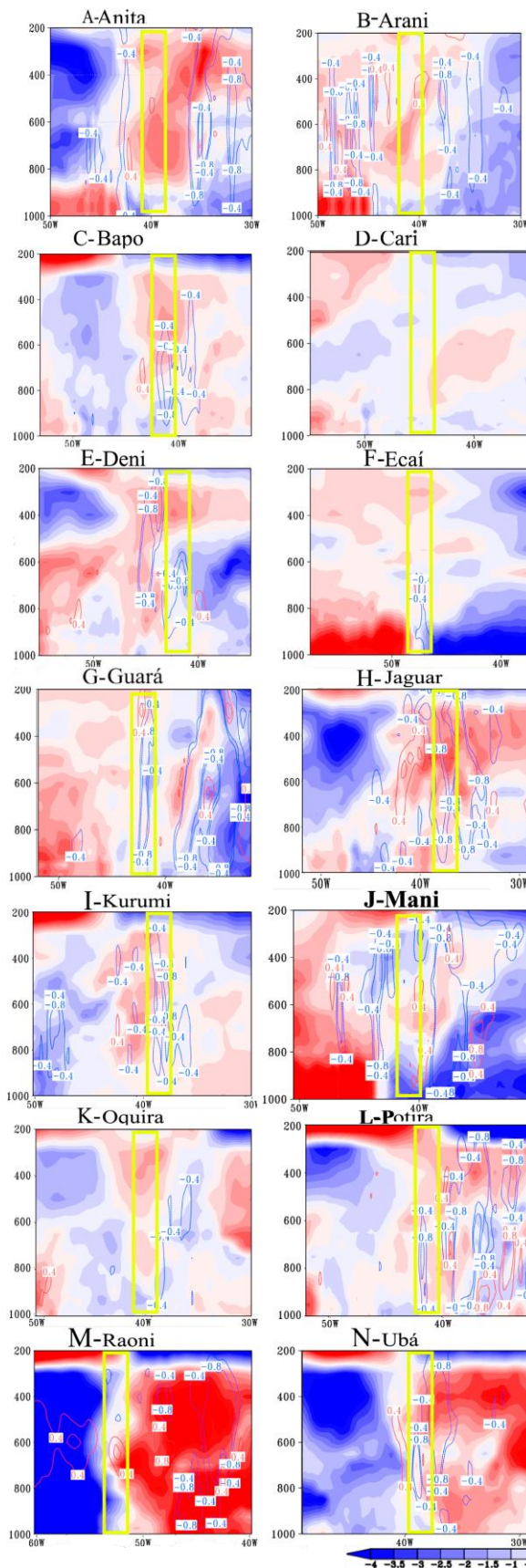


Figura 8 Pré-Ciclogênese: Corte vertical do desvio zonal de temperatura (em °C,

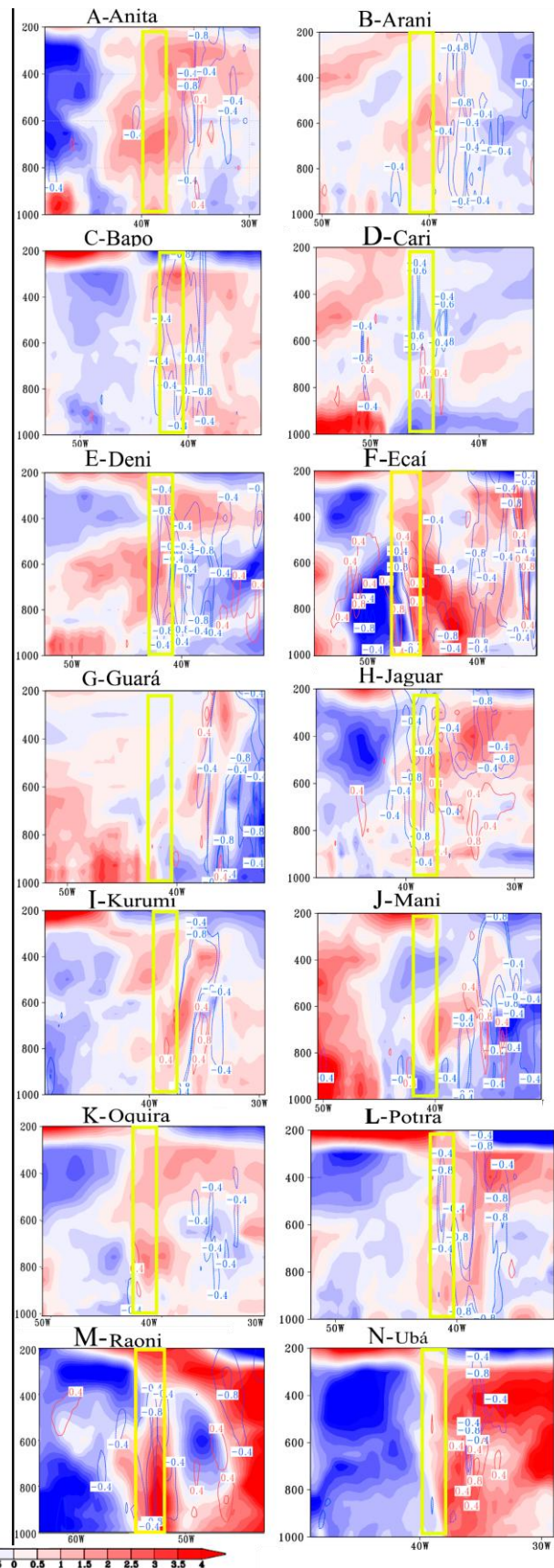


Figura 9 Ciclogênese: Corte vertical do desvio zonal de temperatura (em °C,

preenchido) e velocidade vertical (Pa s^{-1} , contorno) e centro indicado pelo quadrado amarelo.

preenchido) e velocidade vertical (Pa s^{-1} , contorno) e centro indicado pelo quadrado amarelo

3.3 Índice do Potencial de Gênese (IPG)

Apesar do IPG ter sido formulado para identificar regiões com potencial para gênese de CT (Camargo et al., 2007; Andrelina e Reboita, 2021; Wang et al., 2022), ele também pode ser usado como indicativo para os CS (Andrelina e Reboita, 2021). A Figura 10 apresenta o *boxplot* para 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 dezembro, o grande desvio positivo é decorrente da influência do ciclone Oquirá.

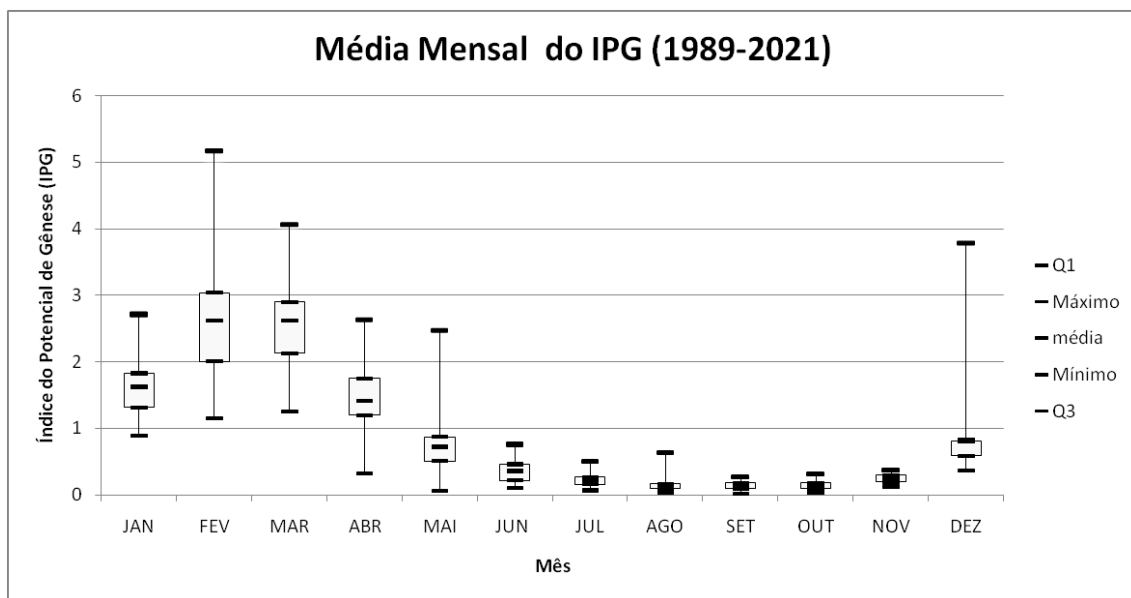


Figura 11 Boxplot do Índice do Potencial de Gênese a cada 6 horas, entre 1989 e 2021, computado na região delimitada na Figura 1.

A Figura 12 mostra a média mensal do IPG de 1989 a 2021 na região delimitada na Figura 1. Há um ciclo anual bem definido e uma ligeira tendência positiva do IPG, que, no entanto, não é estatisticamente significativa ao nível de 95% de confiança com base no teste de hipótese *t-Sudent*.

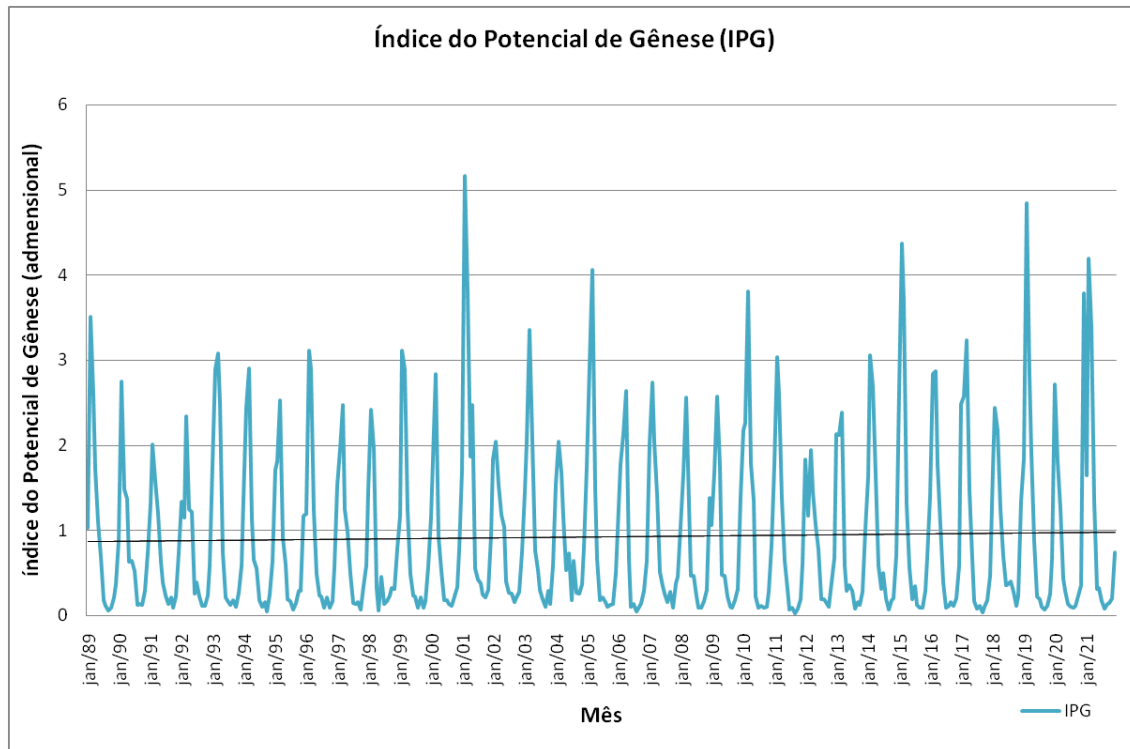


Figura 12 Climatologia Mensal do Índice do Potencial de Gênese entre 1989 a 2021.

A Tabela 3 mostra o valor do IPG durante a pré- e a ciclogênese. O IPG na pré-ciclogênese varia de 0,01 no ciclone Eçaí a 21,41 no Anita, para a ciclogênese varia de 0,35 no Deni a 22,71 no Anita. A variabilidade do IPG também é ressaltada nas Figuras 13 e 14. A variação nos valores do IPG revela que os CS não possuem um valor padrão que possa ser usado como indicativo de sua ocorrência, o que seria uma informação útil para os centros de previsão operacional de tempo.

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

Ciclones	Pré-Ciclogênese	Posição Pré-Ciclogênese		IPG	Vshear (m s ⁻¹)	TSM (°C)	Ciclogênese	Posição Ciclogênese		IPG	Vshear (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	40,25° W	19,31	0	26,3	00Z 15 Mar 2011	23° S	40,25° W	14,11	5	26,3
Bapo	00Z 06 Fev 2015	27,25° S	43,25° W	15,55	20	25,4	06Z 06 Fev 2015	27,25° S	43,25° W	9,27	15	24,5
Cari	12Z 15 Mar 2015	27,25° S	45° W	20,26	10	25,6	18Z 10 Mar 2015	27,25° 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 2017	24° S	47,5° W	0,01	15	23,2	18Z 04 Dez 2016	24° S	47,5° W	0,42	5	23,0
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	38,25° W	8,56	25	25,2	06Z 19 Mai 2019	22° S	38,25° 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	26,25° 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	40,75° W	8,56	15	23,3	12Z 27 Dez 2020	31° S	40,75° 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	10	16
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

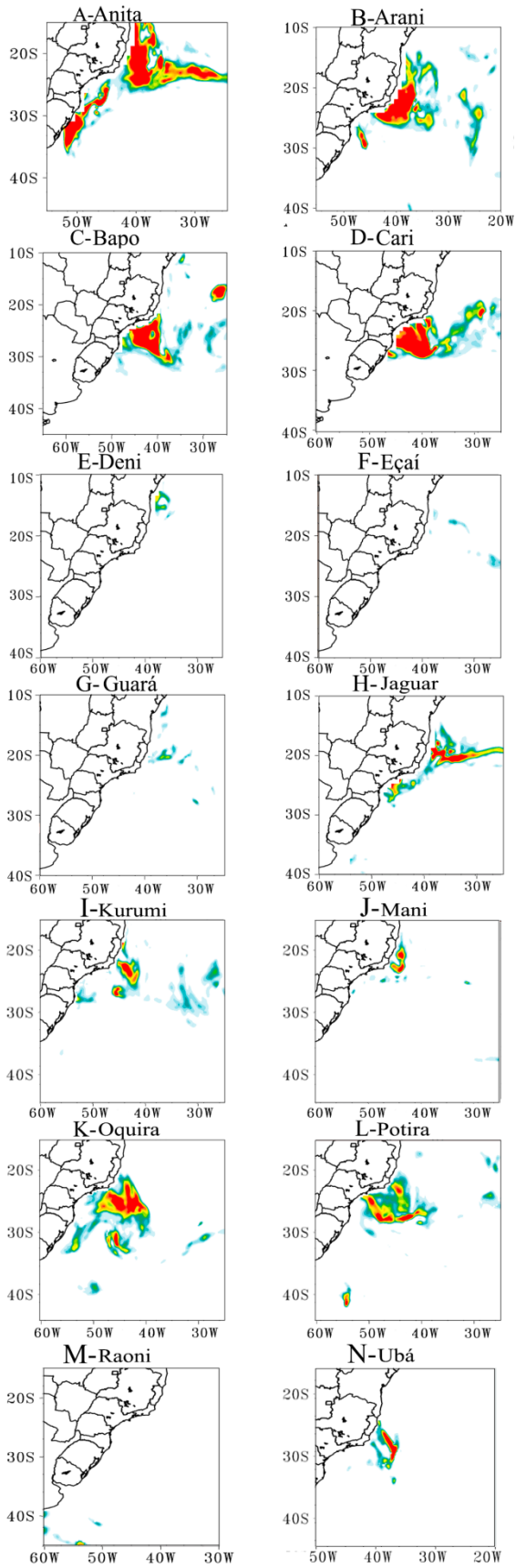


Figura 13 Pré-Ciclogênese: Índice do Potencial de Gênese (IPG) (adimensional).

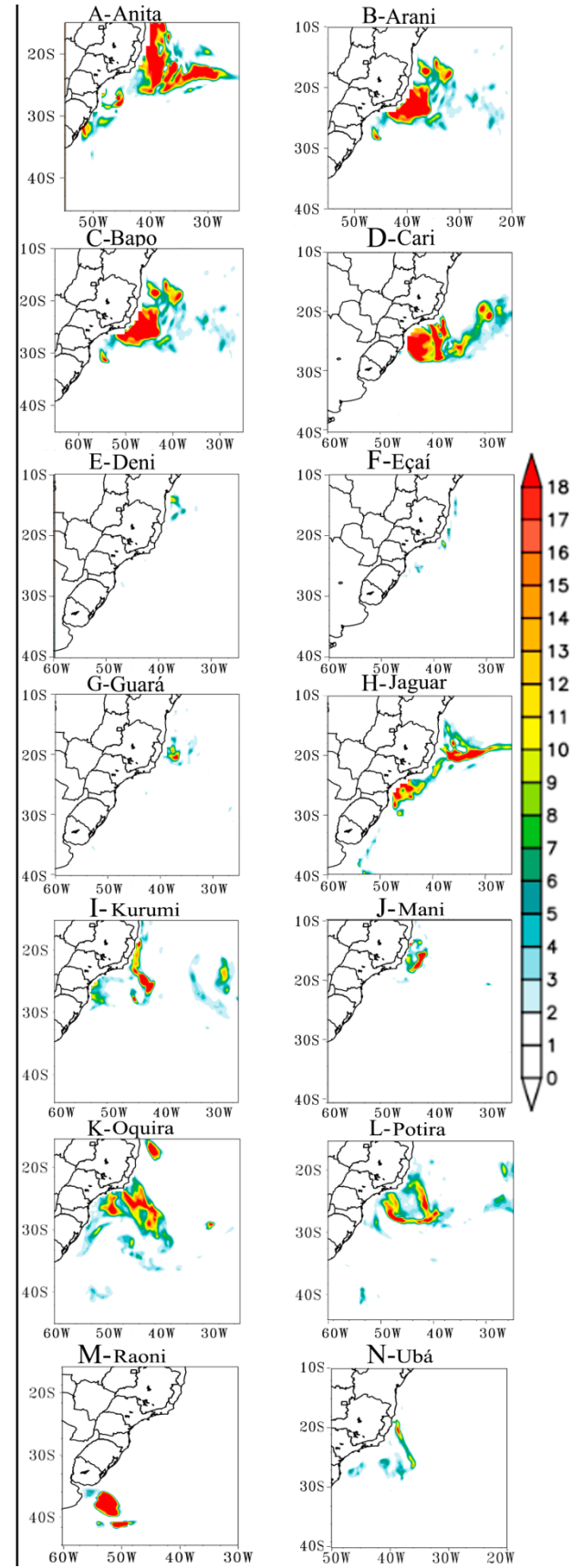


Figura 14 Ciclogênese: Índice do Potencial de Gênese (IPG) (adimensional).

4. CONCLUSÃO

Como os CS sobre o 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. Além disso, teve-se como motivação verificar 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.

Assim, 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 5 CS se formam corrente abaixo de um cavado nos níveis médios da atmosfera, 6 associados com *cut-off-low*, 2 associados com bloqueio dipolo. Por fim, a média do cisalhamento vertical do vento entre 200 e 850 hPa é de 20 m s^{-1} na gênese desses sistemas e a TSM é de 24°C .
- 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, pode-se concluir que o IPG não serve como indicador de CS para auxiliar as práticas de previsão operacional de tempo.

5. REFERÊNCIAS

- ANDRELINA, B.; REBOITA, M. S. Climatologia do Índice do Potencial de Gênese de Ciclones Tropicais nos Oceanos Adjacentes à América do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021.
- C3S. Copernicus Climate Change Service. ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate, Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 2017. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/>. Acesso em: 26 mai. 2022.
- COSTA, Nathália Helena Teixeira; NUNES, André Becker. 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, 2021.
- DA ROCHA et al. Subtropical cyclones over the oceanic basins: a review. **Annals of the New York Academy of Sciences**, [S. l.], p. 1-2, 2018.
- DE JESUS, E. M.; DA ROCHA, R. P.; CRESPO, N. M.; REBOITA, M. S.; GOZZO, L. F. 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, 2022.
- DIAS PINTO, J. R.; REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P. 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, 2013.
- DUTRA, L. M. M.; DA ROCHA, R. P.; LEE, R. W.; PERES, J. R. R.; DE CAMARGO, R. 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., 2017.
- EMANUEL, K. Tropical cyclones. **Annual review of earth and planetary sciences**, v. 31, n. 1, p. 75-104, 2003.

EMANUEL, K.; NOLAN, D. S. Tropical cyclone activity and the global climate system. In: **26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology**. 2004.

FRANK, W. M.; RITCHIE, E. A. Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes. **Monthly weather review**, v. 129, n.9, p. 2249-2269, 2001. 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.; REBOITA, M. S.; SELUCHI, M. E. **Ciclones e Ciclôgeneses**. In: FERREIRA, N. J.; CAVALCANTI, I. F. A. *Sistemas meteorológicos atuantes no Brasil*. Oficina de Textos, 2022.

GOZZO, L. F. et al. 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, 2017.

GOZZO, L. F. et al. Subtropical cyclones over the southwestern South Atlantic: Climatological aspects and case study. **Journal of Climate**, v. 27, n. 22, p. 8543-8562, 2014.

GOLDENBERG, S. B. et al. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications, **Science**, 293, 474–479, 2003.

GRAY, W. M. Global View of the origin of Tropical Disturbances and Storms. **Monthly Weather Review**, v. 96, n. 10, p. 669-700, 1968. 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, Robert E. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. **Monthly weather review**, v. 131, n. 4, p. 585-616, 2003.

HAWKINS, H. F.; IMEMBO, S. M. The structure of a small, intense hurricane-Inez, 1966. **Mon. Weather Rev.**, v. 104, p. 418–442, 1976.

KNAPP, K. R. **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, 2014.

LATIF, M.; KEENLYSIDE, N.; BADER, J, Tropical sea surface temperature, vertical wind shear, and hurricane development, **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. L01710, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006GL027969>.

MCTAGGART-COWAN, R. et al. Analysis of hurricane Catarina (2004). **Monthly Weather Review**, v. 134, n. 11, p. 3029-3053, 2006.

NORMAN-2019. **Normas da Autoridade Marítima para as Atividades de Meteorologia Marítima**. Normas da autoridade marítima para as atividades de meteorologia marítima. [Acessado 06 Novembro 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. The first South Atlantic hurricane: Unprecedented locking, low shear and climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 15, p. 1-5, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GL023390>.

REBOITA, Michelle Simões et al. 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, 2022.

REBOITA, M. S. et al. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I - Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia** [online], v. 32, n. 2 [Acessado 23 Maio 2022] , pp. 171-186, 2017a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-77863220010>>. ISSN 1982-4351.

REBOITA, M. S. et al. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 509-542, 2017b.

REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; OLIVEIRA, D. M.. Key features and adverse weather of the named subtropical cyclones over the Southwestern South Atlantic Ocean. **Atmosphere**, v. 10, n. 1, p. 6, 2018.

REBOITA, M. S. et al. Subtropical cyclone Anita's potential to tropical transition under warmer sea surface temperature scenarios. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 14, p. 8484-8489, 2019.

REBOITA, M. S.; MARRAFON, V. H. Ciclones Extratropicais: o que são, climatologia e impactos no Brasil. **Terra e Didática**, v. 17, 2021.

REBOITA, M. S. et al. South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). **Climate Dynamics**, v. 35, p. 1331–1347, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0668-7>.

RODGERS, E.; OLSON, W.; HALVERSON, J.; SIMPSON, J.; PIERCE, H. Environmental forcing of supertyphoon Paka's (1997) latent heat structure. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 12, p. 1983-2006, 2000.

SILVA, B. A. et al. 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, 2022.

CAMARGO, S. J.; SOBEL, A. H.; BARNSTON, A. G.; EMANUEL, K. A. Tropical cyclone genesis potencial index in climate models. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 59, n. 4, p. 428-443, 2007. DOI: [10.1111/j.1600-0870.2007.00238.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2007.00238.x)

VAN BRUMMELEN, G. **Heavenly Mathematics: The Forgotten Art of Spherical Trigonometry**. Princeton University Press, 208 p, 2012.

VIANELLO, R.; ALVES, A. Meteorologia básica e aplicações. Viçosa, **Editores UFV**, 460 p., 2012.

WU, Q., WANG, X.; TAO, L. Interannual and interdecadal impact of Western North Pacific Subtropical High on tropical cyclone activity. **Climate Dynamics**, v. 54, p. 2237–2248, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05110-7>.

ZEHR, R. M. **Tropical cyclogenesis in the western North Pacific**. NOAA Tech, Repository NESDIS 61, 181 p., 1992.

