

Ciclones extratropicais causadores de eventos extremos no sul do Brasil no inverno de 2023

EXTRATROPICAL CYCLONES CAUSING EXTREME EVENTS IN SOUTHERN BRAZIL IN THE WINTER OF 2023

FABIANA DA ROCHA BARTOLOMEI¹, MICHELLE SIMÕES REBOITA², ROSMERI PORFÍRIO DA ROCHA³

1 - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, BACHAREL EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS, INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS, ITAJUBÁ, MG, BRASIL.

2 - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, PROFESSOR ADJUNTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS, INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS, ITAJUBÁ, MG, BRASIL.

3 - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, PROFESSOR ADJUNTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS, INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS, SÃO PAULO, SP, BRASIL.

EMAIL: FABI.BARTOLOMEI@UNIFEI.EDU.BR, REBOITA@UNIFEI.EDU.BR, ROSMERIR.ROCHA@IAG.USP.BR.

Abstract: Introduction. In the winter of 2023, two synoptic-scale cyclones were responsible for approximately 17 fatalities and various damages in southern Brazil. **Objective.** As these systems caused severe weather, the present study aims to investigate whether they had any distinct characteristics compared to climatology. **Methodology.** Data from different sources are utilized in the analysis of synoptic scale. **Results.** The anomalous pattern of the June cyclone followed an initial southwest trajectory, leading it to impact the states of Santa Catarina and Rio Grande do Sul. In the case of the July cyclone, the distinction was the genesis between Paraguay, Argentina, and the state of Rio Grande do Sul, a region with low cyclone frequency according to climatological studies. **Conclusion.** As it moved southeastward, the cyclone caused precipitation and strong winds over the continent until it was completely over the ocean.

Resumo: Introdução. No inverno de 2023, dois ciclones de escala sinótica foram responsáveis por cerca de 17 óbitos e vários prejuízos no sul do Brasil. **Objetivo.** Por terem sido sistemas que causaram tempo severo, o presente estudo objetiva verificar se eles tiveram alguma característica distinta em relação à climatologia. **Metodologia.** Dados de diferentes fontes são utilizados na análise de escala sinótica. **Resultados.** O padrão anômalo do ciclone de junho foi sua trajetória inicial para sudoeste, o que lhe fez atingir os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. No caso do ciclone de julho, a distinção foi a gênese entre o Paraguai, a Argentina e o Estado do Rio Grande do Sul, que é uma região com pouca frequência de ciclogêneses, de acordo com estudos climatológicos. **Conclusão.** Ao se deslocar para sudeste, o ciclone causou precipitação e ventos fortes sobre o continente até estar totalmente sobre o oceano.

Citation/Citação: Bartolomei, F., Reboita, M. S., & Rocha, R. P. da. (2023). Ciclones extratropicais causadores de eventos extremos no sul do Brasil no inverno de 2023. *Terræ Didática*, 20(Publ. Contínua), 1-13, e024003. doi: 10.20396/td.v20i00.8675100.



Artigo submetido ao sistema de similaridade

Keywords: Winds, Precipitation, Socioeconomic impacts, Atmosphere.

Palavras-chave: Ventos, Precipitação, Impactos socioeconômicos, Atmosfera.

Manuscript/Manuscrito:

Received/Recebido: 12/12/2023

Revised/Corrigido: 03/01/2024

Accepted/Aceito: 05/01/2024

Editor responsável: Celso Dal Ré Carneiro 

Revisão de idioma (Inglês): Hernani Aquini Fernandes Chaves 



Introdução

A costa leste da América do Sul apresenta três regiões propícias à formação de ciclones de escala sinótica: (a) os setores costeiros entre o sudeste e parte norte da região sul do Brasil, (b) o extremo sul do Brasil e Uruguai e (c) a costa do sul da Argentina (Gan & Rao, 1991, Reboita et al., 2010, 2017a,b, 2023, Gramscianinov et al., 2019, Crespo et al., 2021, Reboita & Marrafon, 2021). Os ciclones de escala sinótica se caracterizam por possuir diâmetro de $\sim 10^3$ km e tempo de vida médio de 3 dias (Bluestein, 1992, Reboita et al., 2010, 2017a,b). Esses sistemas possuem centro de baixa pressão, giro horário no Hemisfério Sul e energia para gerar ventos intensos e volumes elevados de chuva.

Exceto na costa da Argentina, onde os ciclones de escala sinótica são do tipo extratropical, nas demais regiões os ciclones podem ser extratropicais, subtropicais ou tropicais. A média mensal da frequência de ciclones na costa sul/sudeste do Brasil é de 2,5 sistemas, enquanto entre o extremo sul do Brasil e o Uruguai é de 2,7 sistemas. Somente a porção sul da Argentina ultrapassa a frequência dessas regiões, na costa leste da América do Sul, com média mensal de 4,5 sistemas (Reboita et al., 2010).

Vários estudos (Marcelino et al., 2004, Reboita et al., 2009, Brasiliense et al., 2018, Faria et al., 2023) têm documentado as condições de tempo extremo associadas com os ciclones nas costas das

regiões sul e sudeste do país, que impactam edificações e causam o transporte da água do mar para o continente e as consequentes inundações. Em janeiro de 2000, um ciclone subtropical ajudou a organizar a chuva sobre a bacia do Rio Paraíba, gerando precipitação extrema (Brasiliense et al., 2018). Um caso similar ocorreu em janeiro de 2020, em que a intensificação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), associada ao ciclone subtropical Kurumí, levaram ao aumento da convergência do fluxo de umidade sobre a região sudeste do país. Essa combinação gerou um evento extremo de precipitação, especialmente sobre o Estado de Minas Gerais, que culminou em um efeito cascata de enchentes e inundações, deslizamentos, danos à população e perdas de vidas (Dalagnol et al., 2022). No mês de março de 2004, o ciclone tropical Catarina causou um volume elevado de precipitação, na zona costeira dos estados do Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC), e ventos que causaram danos a inúmeras construções (Marcelino et al., 2004). Em maio de 2008, um ciclone extratropical fez a precipitação exceder a média climatológica do mês em algumas localidades costeiras da região sul do Brasil (Reboita et al., 2009). No dia 30 junho de 2020, o Estado de SC foi afetado por ventos fortes associados a uma estrutura de mesoescala embebida no ramo frontal frio de um ciclone extratropical explosivo, com centro sobre o oceano (Giehl et al., 2020, Faria et al., 2023).

Recentemente, os estados do RS e SC foram fortemente afetados por dois ciclones extratropicais num intervalo de um mês. Na madrugada do dia 16 de junho de 2023, um ciclone extratropical, que inicialmente se formou na costa da região sudeste no dia 14, migrou anormalmente para sudoeste e causou ventos intensos sobre o RS e SC (G1-RBS, 2023a). Em Porto Alegre, o sistema contribuiu para que a precipitação do mês de junho de 2023 fosse a mais volumosa desde 1916 (141,7 mm segundo o Instituto Nacional de Meteorologia). Além disso, o ciclone causou impactos que levaram a óbito pelo menos 16 pessoas (G1-RBS, 2023b). Entre a noite de 12 de julho de 2023 e a manhã seguinte, um ciclo-

ne extratropical, que se formou na região entre o Paraguai, norte da Argentina e oeste do Estado do RS, propiciou chuvas e ventos fortes que causaram muitos danos a residências, deixando mais de 260 pessoas desalojadas e 330 desabrigados no RS (G1b, 2023). Uma morte foi registrada no município de Rio Grande (RS), associada com queda de árvore (GZH, 2023).

Com base no apresentado, o objetivo deste estudo é descrever as características básicas e o processo de gênese desses dois ciclones ocorridos no inverno de 2023, bem como os ventos e precipitação associados a esses sistemas que foram responsáveis por danos e óbitos na região em estudo.

Metodologia

Área de Estudo

A área de estudo, mostrada na Figura 1, é a costa das regiões sul e sudeste do Brasil e o oceano Atlântico Sudoeste. A Figura 1 também apresenta a trajetória dos ciclones objeto de estudo (detalhes sobre a identificação dos ciclones são apresentados no item *Identificação e Rastreamento dos Ciclones*).

Dados

Os dados usados no estudo provêm de diferentes fontes:

Estações meteorológicas: dados de intensidade do vento a 10 metros de altura, com frequência horária, e precipitação diária dos meses de junho e julho de 2023 foram obtidos das estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia

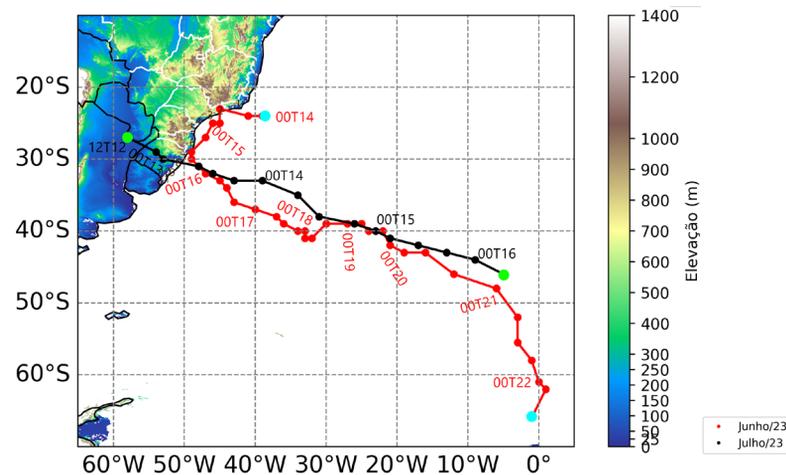


Figura 1. Área de estudo e trajetória dos ciclones, objeto do estudo, ocorridos em junho (vermelho, posição inicial às 0000 UTC do dia 14/06/2023) e julho (preto, posição inicial às 1200 UTC do dia 12/07/2023) de 2023. No continente também é apresentada a topografia em metros

Tabela 1. Informações das estações meteorológicas automáticas do INMET usadas no estudo

Código	Código da Estação	Cidade Sede	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)	Região
1	A606	Arraial do Cabo	22,98	42,02	5,00	Sudeste
2	A619	Paraty	23,22	44,73	3,00	Sudeste
3	A771	São Paulo	23,72	46,68	771,00	Sudeste
4	A746	Barra do Turvo	24,96	48,42	659,89	Sudeste
5	A807	Curitiba	25,45	49,23	922,91	Sul
6	A806	Florianópolis	27,60	48,62	4,87	Sul
7	A834	Tramandaí	30,01	50,14	4,56	Sul
8	A801	Porto Alegre	30,05	51,17	41,18	Sul
9	A887	Pelotas	31,80	52,41	13,00	Sul
10	A802	Rio Grande	32,08	52,17	4,92	Sul
11	A836	Rio Branco	32,53	53,38	31,48	Sul

(INMET) (Tab. 1). O link para acesso aos dados é <https://bdmep.inmet.gov.br/#>.

Reanálise: para os dias 12 a 18 de junho, referido como caso 1, e 11 a 25 de julho de 2023, referido como caso 2, foram obtidas da reanálise ERA5 (Hersbach et al., 2020) variáveis em níveis verticais (geopotencial, componentes zonal e meridional do vento, temperatura do ar, componente vertical do movimento – velocidade vertical –, umidade relativa e umidade específica) e em superfície (Pressão ao Nível Médio do Mar, PNMM) dos horários sinóticos padrão: 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC. Os dados possuem resolução horizontal de 0,25° e, embora sejam globais, no estudo se restringiu a grade às coordenadas 0°-60° S e 90° W-0°. O link para acesso aos dados é <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.

Estimativas de Satélite: as estimativas a cada 6 horas de precipitação para os dois ciclones em estudo foram obtidas *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN). Os dados possuem resolução horizontal de 0,25° e estão disponíveis em <https://chrsdata.eng.uci.edu/>.

Identificação e Rastreamento dos Ciclones

Com base nos dados de PNMM, para cada horário sinótico, foram plotadas isóbaras com intervalos de 4 hPa, em que a identificação do centro do ciclone foi visual. O horário em que apareceu a primeira isóbara fechada foi considerado como o de ciclogênese e a coordenada central (latitude e longitude) dessa isóbara foi registrada. A análise é realizada até o decaimento do sistema, que é definido pelo momento em que não há mais isóbaras fechadas ou o sistema se conecta a outro. Com as coordenadas geográficas a cada horário sinótico é possível mostrar a trajetória do ciclone (Fig. 1) bem como definir o seu tempo de vida, distância percorrida e velocidade média.

Cada cinco horários sinóticos consecutivos correspondem a 24 horas de duração do sistema. A distância percorrida é computada considerando o deslocamento do sistema a cada 6 horas e somando todos os valores obtidos para obtenção da distância total. Para tanto, utiliza-se a equação (Van Brummelen, 2012):

$$D = R \left[\sin(\varphi_1) \sin(\varphi_2) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \cos(\Delta\lambda) \right] \quad (1)$$

onde φ_1 e φ_2 são, respectivamente, a latitude (em radianos) da posição inicial e final do ciclone a cada 6 horas, $\Delta\lambda$ é a diferença entre a longitude inicial e final, a cada 6 horas e R é o raio da Terra (6.371 km). No presente estudo, a distância é calculada em km.

Conhecendo-se a distância percorrida (D) e o tempo de vida (t), a velocidade média (km/h) do ciclone é dada por:

$$V_m = \frac{D}{t} \quad (2)$$

Análises: características básicas, gênese e impactos

As análises serão iniciadas com as características básicas dos ciclones (trajetória, tempo de vida, distância percorrida e velocidade média). Para descrever os mecanismos físicos que causaram a gênese dos dois ciclones em estudo são elaborados os seguintes campos sinóticos:

- PNMM, espessura da camada 500/1000 hPa e intensidade do vento superior a 30 m/s em 250 hPa: a PNMM permite a localização dos sistemas ciclônicos e anticiclônicos, a espessura da camada, que é obtida pela diferença de altura geopotencial entre 500 e 1000 hPa, é um indicador de regiões com contrastes térmicos (gradientes horizontais de temperatura do ar); o campo da intensidade do vento superior a 30 m/s em 250 hPa é um indicador dos jatos em altos níveis na atmosfera. A combinação

desses três campos fornece uma visão geral da estrutura vertical da atmosfera.

- Cisalhamento vertical da intensidade do vento horizontal entre 500 e 1000 hPa e altura geopotencial e divergência de massa em 250 hPa: o cisalhamento vertical do vento corresponde à diferença entre a intensidade do vento no nível de 500 e 1000 hPa; essa variável permite uma visão acoplada dos baixos e altos níveis da atmosfera, a altura geopotencial é extremamente útil para mostrar o padrão das ondas (cavados e cristas) na atmosfera e, quando associada ao campo da divergência de massa, é de fundamental importância para a identificação de mecanismos forçantes à ciclogênese. A divergência de massa é calculada como:

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3)$$

onde u e v são, respectivamente, as componentes zonal e meridional do vento (m/s) e x e y , as distâncias leste-oeste e norte-sul, respectivamente. A equação é calculada em coordenadas esféricas (vide Holton, 2004).

- Umidade relativa média entre 850 e 500 hPa, altura geopotencial em 500 hPa e velocidade vertical: a combinação desses campos fornece um diagnóstico termodinâmico da atmosfera. Atmosfera úmida e com movimentos verticais ascendentes (representados por valores negativos dessa variável) são importantes para a formação de nuvens e também para a retirada de massa próximo à superfície.
- Advecção horizontal de temperatura do ar em 850 hPa e direção (vetores) e divergência do fluxo de umidade integrado na vertical (1000 a 100 hPa). A advecção horizontal de temperatura do ar é calculada como

$$AT = -\vec{V} \cdot \vec{\nabla} T = -\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (4)$$

sendo T a temperatura do ar e u e v , respectivamente, as componentes zonal e meridional do vento no nível de 850 hPa. A advecção de temperatura indica se uma dada região está recebendo ar quente ou frio. Já o fluxo de umidade integrado na vertical e a sua divergência indicam se umidade está convergindo ou divergindo numa dada região e é calculado como:

$$Q_u = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_o} q u \, dp$$

$$Q_v = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_o} q v \, dp$$

$$\vec{Q}_t = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_o} q \vec{v} \, dp \quad (5)$$

sendo Q_u , Q_v e Q_t , respectivamente, o fluxo de umidade zonal, meridional e total, g é a força gravitacional (m/s^2), q é a umidade específica (kg/kg), \vec{v} é o vetor velocidade do vento e p_t e p_o representam o nível de pressão em 100 hPa e em 1000 hPa, respectivamente. Q_u , Q_v e \vec{Q}_t têm unidade $kg/m \, s^{-1}$. Já a divergência calculada com os componentes do fluxo de umidade integrado na vertical possui unidade $kg/m^2 \, s^{-1}$. Todas as equações são resolvidas em coordenadas esféricas.

O conhecimento da estrutura térmica dos ciclones em estudo é obtido por intermédio da metodologia do *Cyclone Phase Space* (CPS; Hart, 2003). São calculados três parâmetros, a partir da altura geopotencial em 300, 600 e 900 hPa, que indicam se o sistema tem natureza frontal ou não-frontal. Os parâmetros são simetria térmica (B), que indica se o sistema é frontal ou não, e vento térmico em baixos ($-|V_T^L|$) e altos ($-|V_T^U|$) níveis da atmosfera para avaliar como os ventos mudam de intensidade com a altura. Essa metodologia se encontra descrita em detalhes em da Rocha et al. (2019) e em Reboita et al. (2018) e, com base nos estudos para o oceano Atlântico Sul, os sistemas são classificados como segue: ciclones extratropicais $B \gg 0$, $-|V_T^L| < 0$ e $-|V_T^U| < 0$; ciclones subtropicais $B < 25$, $-|V_T^L| > -50$, $-|V_T^U| < -10$ e ciclones tropicais $B < 10$, $-|V_T^L| > 0$, $-|V_T^U| > 0$

A última parte das análises concentra-se na descrição dos registros de chuva e vento obtidos de diferentes fontes de dados, como descrito na seção *Dados*, segundo duas perspectivas: a Lagrangiana e a Euleriana. Na primeira, a chuva e o vento são analisados ao longo da trajetória dos ciclones, enquanto, na segunda, essas variáveis são analisadas em pontos fixos, que são as estações de medição.

Resultados

Características dos Ciclones

A trajetória dos ciclones é mostrada na Figura 1 e nas Tabelas 2 e 3. O ciclone extratropical de junho (caso 1 indicado com linha vermelha na Fig. 1) teve a sua gênese sobre o litoral do Rio de Janeiro, com

pressão de 1019 hPa, e se deslocou anormalmente para sudoeste, atingindo a costa de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul. O sistema se manteve por dois dias próximo à costa. Na sequência, adquiriu trajetória padrão dos ciclones extratropicais que são para sudeste. Esse sistema percorreu 7558 km em 210 horas (~9 dias), com velocidade média de 36 km/h (10 m/s) (Tab. 2). Enquanto a velocidade média segue a do padrão climatológico descrita em Reboita et al. (2010), o tempo de vida foi superior à média de 3 dias.

O ciclone de julho (caso 2 indicado com linha preta na Figura 1) se formou sobre o continente, entre Paraguai, Argentina e RS, com pressão inicial de 1005 hPa. Esse local, de acordo com os estudos climatológicos de Gramscianinov et al. (2019) e Crespo et al. (2021), é um dos que apresenta menor frequência de ciclogêneses em comparação às outras áreas de gênese na América do Sul. Essa ciclogênese continental permitiu que o sistema estivesse mais tempo sobre o continente (cerca de 12 horas) (Fig. 1), à medida que se deslocava para

Tabela 2. Características básicas do ciclo de vida do ciclone com gênese às 0000 UTC no dia 14 de junho de 2023

Data	Hora (UTC)	Latitude (S)	Longitude (W)	Pressão Central (hPa)	Distância Percorrida a cada 6h (km)	Velocidade Média (km/h)
14/06/2023	00	24	39	1019	0	0
14/06/2023	06	24	41	1019	203,2	33,9
14/06/2023	12	23	45	1019	422,2	70,3
14/06/2023	18	25	45	1019	223,0	37,2
15/06/2023	00	25	46	1016	100,8	16,8
15/06/2023	06	25	46	1018	0	0
15/06/2023	12	25	46	1016	0	0
15/06/2023	18	27	47	1012	244,4	40,7
16/06/2023	00	29	49	1010	297,1	49,5
16/06/2023	06	30	49	1008	108,3	18,1
16/06/2023	12	31	48	1008	149,4	24,9
16/06/2023	18	32	47	1008	143,9	24,0
17/06/2023	00	33	45	1008	216,7	36,1
17/06/2023	06	34	44	1008	147,5	24,6
17/06/2023	12	36	43	1005	240,9	40,2
17/06/2023	18	37	40	1002	289,3	48,2
18/06/2023	00	38	37	1002	288,5	48,1
18/06/2023	06	39	36	1000	138,9	23,2
18/06/2023	12	40	34	1000	206,4	34,4
18/06/2023	18	40	33	995	85,2	14,2
19/06/2023	00	41	33	995	108,3	18,1
19/06/2023	06	41	32	995	84,0	14,0
19/06/2023	12	39	30	1000	280,6	46,8
19/06/2023	18	39	27	1000	259,4	43,3
20/06/2023	00	39	25	1000	173,0	28,9
20/06/2023	06	40	24	1000	143,3	23,9
20/06/2023	12	40	22	1000	170,4	28,4
20/06/2023	18	42	21	1000	238,2	39,7
21/06/2023	00	43	19	995	196,5	32,7
21/06/2023	06	43	16	990	244,1	40,7
21/06/2023	12	46	12	990	458,7	76,5
21/06/2023	18	48	6	985	506,8	84,5
22/06/2023	00	52	3	975	494,8	82,5
22/06/2023	06	55,5	3	970	388,6	64,8
22/06/2023	12	58	1	965	305,7	51,0
Tempo de Vida (Horas)	210	Distância Percorrida Total (km)	7558,1	Velocidade Média Total (km/h)	36,0	

Tabela 3. Características básicas do ciclo de vida do ciclone com gênese às 1200 UTC no dia 12 de julho de 2023

Data	Hora (UTC)	Latitude (S)	Longitude (W)	Pressão Central (hPa)	Distância Percorrida a cada 6h (km)	Velocidade Média (km/h)
12/07/2023	12	27	58	1005	0,0	0,0
12/07/2023	18	29	54	999	451,3	75,2
13/07/2023	00	30	53	1000	147,4	24,6
13/07/2023	06	31	48	995	491,7	82,0
13/07/2023	12	32	46	995	219,8	36,6
13/07/2023	18	33	43	990	302,5	50,4
14/07/2023	00	33	39	995	373,0	62,2
14/07/2023	06	35	34	990	511,7	85,3
14/07/2023	12	38	31	995	427,9	71,3
14/07/2023	18	39	26	995	449,0	74,8
15/07/2023	00	40	23	993	280,4	46,7
15/07/2023	06	41	21	990	202,4	33,7
15/07/2023	12	42	17	989	351,1	58,5
15/07/2023	18	43	13	985	346,2	57,7
16/07/2023	00	44	9	985	341,2	56,9
16/07/2023	06	46	5	980	385,1	64,2
Tempo de Vida (Horas)	96	Distância Percorrida Total (km)	5280,7	Velocidade Média Total (km/h)	55,0	

sudeste, contribuindo para alterações nas condições de tempo em todo o RS. O ciclone percorreu 5280 km em 96 horas (4 dias) com velocidade média de 55 km/h (~15,3 m/s) (Tab. 3). O tempo de vida desse sistema foi mais próximo ao climatológico.

Em relação à gênese, os sistemas apresentam menor pressão atmosférica quando formados mais em direção ao polo, devido à influência do padrão da circulação geral da atmosfera. Um fato relevante é que mesmo sistemas ciclônicos com pressão que não é considerada baixa (1019 hPa), mas que se formam nas cercanias do sudeste do Brasil, são causadores de condições de mau tempo.

uma alta pós-frontal com centro de 1031 hPa e da região de intenso gradiente horizontal de temperatura do ar, que é representado pelas linhas de espessura na Figura 2a. Esse ciclone tem o mesmo mecanismo dinâmico de ciclogênese do padrão cli-

Gênese dos Ciclones

Caso 1: junho de 2023

Às 0000 UTC do dia 14 de junho de 2023 surge uma isóbara fechada no campo de PNMM entre a costa dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, caracterizando a presença de um ciclone (Fig. 2a). Em baixos níveis da atmosfera, o ciclone está localizado a norte de

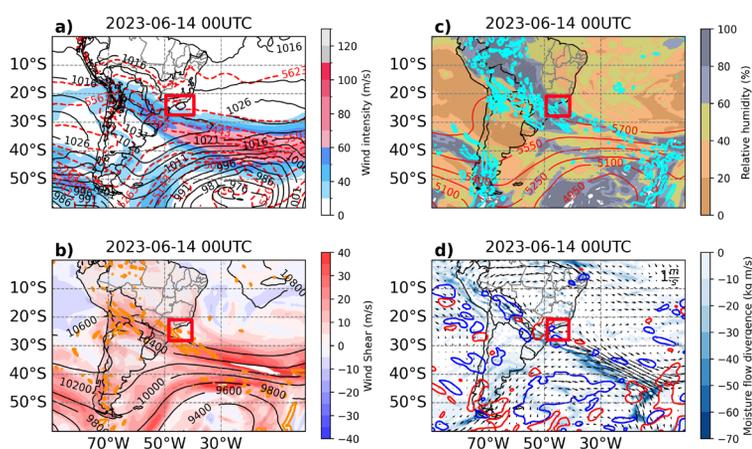


Figura 2. Campos atmosféricos durante a gênese do ciclone no dia 14 de junho de 2023 às 0000 UTC. a) pressão ao nível médio do mar (hPa, linhas pretas), espessura da camada 500/1000 hPa (gpm, linhas vermelhas tracejadas) e intensidade do vento superior a 30 m/s em 250 hPa (colorido), b) cisalhamento vertical da intensidade do vento horizontal entre 500-1000 hPa (m/s, colorido), divergência de massa em 250 hPa maior que e altura geopotencial em 250 hPa (gpm), c) umidade relativa média entre 850 e 500 hPa (%), colorido), altura geopotencial em 500 hPa (gpm, linhas vermelhas) e velocidade vertical menor que -0,2 (Pa/s, linhas em azul claro) em 500 hPa e d) advecção horizontal de temperatura do ar em 850 hPa (°C/hora) sendo as linhas vermelhas indicativas de advecção quente e as linhas azuis de advecção fria e direção (kg/m s⁻¹, vetores) e divergência do fluxo de umidade integrado na vertical entre 1000 e 100 hPa (kg/m² s⁻¹, colorido)

matológico da costa sudeste do Brasil, também chamada de RG1 (Reboita et al., 2012, Jesus et al., 2022): uma forçante em altos níveis da atmosfera, que é a divergência horizontal de massa decorrente da presença de um cavado que migra do Pacífico para o Atlântico (Fig. 2b) e processos termodinâmicos, representados pela presença de umidade na coluna atmosférica (Fig. 2c), convergência do fluxo de umidade e advecção de ar quente em 850 hPa (Fig. 2d). O ar quente e úmido recebido na região de gênese foi na sua grande maioria transportado da região tropical pelos jatos de baixos níveis a leste dos Andes (Fig. 2d). A combinação do mecanismo dinâmico com os processos termodinâmicos contribui para a ascensão de ar de níveis baixos para mais altos, o que é indicado pelos valores negativos do movimento ascendente em 500 hPa (Fig. 2c). Em adição, a remoção de ar próximo à superfície leva a consequente queda de pressão atmosférica. Ar que ascende transportando umidade é um “combustível” para formação de nuvens e, no caso do sistema em análise, como o cisalhamento vertical do vento é fraco na região de formação do ciclone (Fig. 2b), isso contribui para que a convecção se organize e intensifique ainda mais os movimentos ascendentes na atmosfera. Portanto, isso ressalta a importância dos processos termodinâmicos na gênese desse sistema.

As condições atmosféricas previamente descritas se mantêm até o final do dia 15 servindo como combustível para o desenvolvimento do ciclone (figuras não mostradas). De acordo com a Figura 3a-b, o ciclone teve gênese do tipo subtropical e se manteve com essa característica durante as primeiras 24 horas do ciclo de vida. Esse resultado está de acordo com o campo da espessura da camada, que não indica gradientes de temperatura no centro desse sistema (figuras não mostradas), o que lhe conferiria característica de sistema extratropical. Ciclones subtropicais são candidatos potenciais a se tornarem tropicais, quando da ocorrência de certas

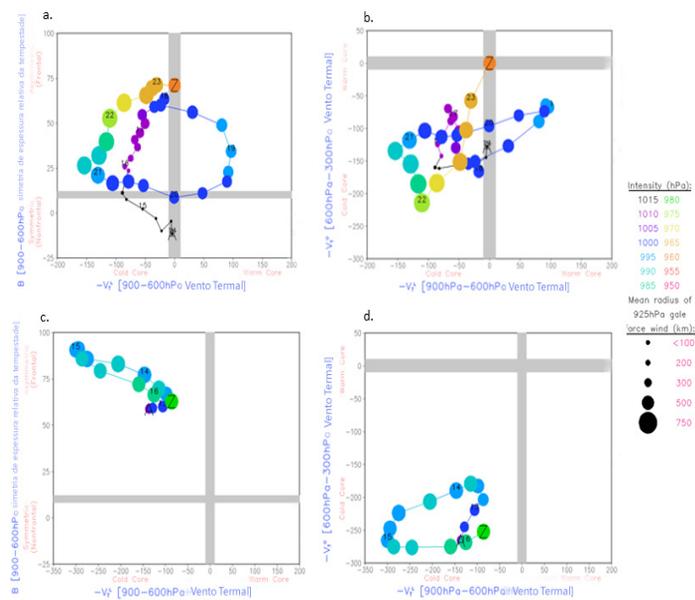


Figura 3. Diagrama de fase dos ciclones estudados. A indica o início do ciclo de vida dos ciclones e Z e decaimento. Na coluna esquerda são representados os parâmetros $B < 10$ e $-|V_T^L|$ e na direita $-|V_T^L|$ e $-|V_T^U| > 0$

características da atmosfera como persistência numa dada região de atuação de bloqueio atmosférico (Wood et al., 2023), mas isso não ocorreu com o sistema em estudo. Além disso, o sistema se deslocou para um ambiente baroclínico que favoreceu sua evolução para um sistema extratropical (Fig. 3a-b, Fig. 6).

Um fato relevante é que o sistema não segue a trajetória climatológica padrão, que é para leste/sudeste, pois a alta pós-frontal se desloca para leste de forma que cerca o setor leste do ciclone, mas ao mesmo tempo vai se enfraquecendo no setor sudoeste da baixa. Esse fato, associado ao padrão da divergência de massa em altos níveis da atmosfera (figuras não mostradas), contribui para o ciclone se deslocar para sudoeste (Fig. 4). Situações como essas já foram descritas em estudos prévios (Reboita et al., 2009, 2018, Dias Pinto et al., 2013).

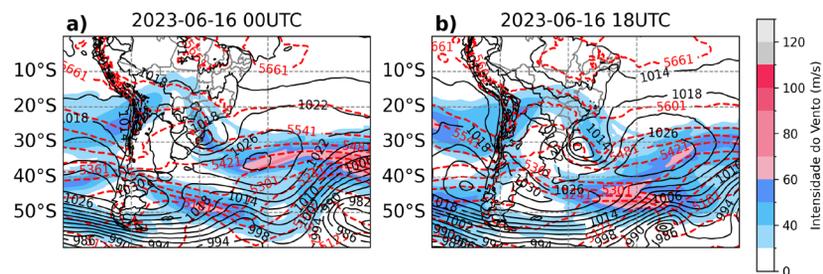


Figura 4 Pressão ao nível médio do mar (hPa, linhas pretas), espessura da camada 500/1000 hPa (gpm, linhas vermelhas tracejadas) e ventos com intensidade superior a 30 m/s em 250 hPa (colorido) para o 16 de junho de 2023 às 0000 e 1800 UTC

Caso 2: julho de 2023

No dia 12 de julho de 2023 às 1200 UTC surge uma isóbara fechada entre o Paraguai, a Argentina e Estado do RS, caracterizando a gênese do ciclone caso 2 (Fig. 5a), que foi do tipo extratropical e se manteve com essa característica por todo o seu ciclo de vida (Fig. 3c-d). Como o caso 2 se configurou sobre o continente, recebeu por mais tempo a influência direta do ciclone (chuva e ventos) comparado a casos em que os sistemas se desenvolvem na costa.

O processo de formação do ciclone caso 2 (Fig. 5b) também segue o padrão clássico da região ciclogênica do extremo sul do Brasil e Uruguai (Seluchi, 1995, Reboita et al., 2012) – chamada de RG2 –, mas com uma diferença em relação à posição da gênese, que é mais continental. A formação de ciclones de escala sinótica na RG2 ocorre associada a cavados em médios e altos níveis da atmosfera que se deslocam do oceano Pacífico para o Atlântico. À medida que esses cavados atravessam os Andes, a subsidência causa aquecimento adiabático que se associa ao efeito térmico no noroeste da Argentina, favorecendo a intensificação da baixa conhecida como baixa do Noroeste da Argentina (Seluchi et al., 2012), que tem caráter estacionário. Entretanto, nos campos de PNMM a perturbação em baixos níveis da atmosfera decorrente da influência do cavado em médios e altos níveis se mostra como uma isóbara alongada entre o nordeste da Argentina e a RG2 e, na sequência, o centro de baixa pressão transiente se configura próximo à costa do extremo sul do Brasil e/ou Uruguai, quando encontra condições propícias para sua intensificação (Vera et al., 2002, Reboita et al., 2012). Essas condições podem ser o cavado semi-estacionário de origem orográfica, convergência do fluxo de umidade, advecção de ar quente, gradientes de temperatura da superfície do mar e/ou transferência de fluxos de calor turbulentos mar-ar.

Embora a região de gênese do caso 2 também apareça nos estudos climatológicos, essa possui menor frequência de ciclones do que outros locais ciclogênicos da América do Sul (Gramscianinov et al., 2019, Crespo et al., 2021). Por outro lado, é uma região fonte de sistemas convectivos de mesoescala,

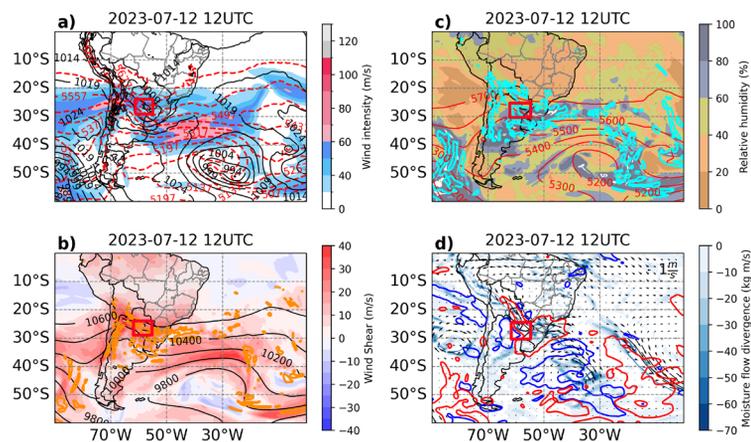


Figura 5. Similar à Figura 4, mas para o ciclone com gênese às 1200 UTC do dia 12 de julho de 2023

principalmente no período de primavera e verão (Salio et al., 2007, Bruik et al., 2019). Portanto, a ciclogênese do caso 2 merece atenção.

A Figura 7a-c mostra um cavado em níveis médios e altos da atmosfera entre 25°-30° S sobre o norte da Argentina favorecendo divergência de massa (Fig. 5b) e movimentos ascendentes na atmosfera (Fig. 5c). Esse cavado tem pouca extensão leste-oeste quanto amplitude. Já a Figura 5d mostra intensa convergência do fluxo de umidade juntamente com a advecção de ar quente para a região de formação do ciclone; o que chama a atenção nessa figura é o padrão do fluxo de umidade proveniente dos trópicos, que é mais típico do período de verão do que do inverno (Montini et al., 2019). Um fato que deve ser levado em consideração é que em julho de 2023 o evento El Niño já estava atuando. Esse fenômeno altera os padrões de circulação geral da atmosfera (Reboita et al., 2021c) e, na América do Sul, algumas dessas alterações são a intensificação do jato subtropical (Magaña & Ambrizzi, 2005, Silva et al., 2009) e o predomínio de anomalias ciclônicas no escoamento atmosférico nas cercanias do sudeste sul-americano (favorecidas pelo trem de ondas que emana do oceano Pacífico) (Mo & Peagle, 2001, Reboita et al., 2021d). O jato subtropical, estando mais intenso sobre os subtrópicos, pode causar divergência de massa favorecendo movimentos ascendentes na atmosfera com conseqüente queda de pressão na superfície. Esse fator e, também, as anomalias ciclônicas produzidas pelo trem de ondas proveniente do Pacífico favorecem a presença de um gradiente horizontal de pressão trópicos-subtrópicos que é um dos responsáveis

pela maior frequência e intensidade de episódios de jato de baixos níveis a leste dos Andes em direção a sudeste da América do Sul, o que contribui para transportar mais ar quente e úmido dos trópicos para os subtropicais (Silva et al., 2009). A resposta da atmosfera é, portanto, o desenvolvimento de sistemas convectivos de mesoescala nos subtropicais (Bruik et al., 2019), justamente na região em que o ciclone caso 2 se formou.

O ambiente em que o caso 2 se formou estava propício ao desenvolvimento de um sistema convectivo de mesoescala, mas o diferencial para sua gênese pode ter sido a configuração do cavado em níveis médios e altos que é distinto do precursor de sistemas convectivos de mesoescala apresentado por Salio et al. (2007). Esses autores mostraram que os sistemas convectivos se desenvolvem quando há um cavado com grande amplitude a sul de 30°S e com eixo em 80°W promovendo uma área de *jet streak* a sua direita, que, por sua vez, induz divergência na sua entrada. Por meio de análise visual comparativa entre a Figura 5c e a Figura 15 de Salio et al. (2007), sugere-se que a região dominada por divergência de massa é mais ampla no presente estudo. Isso em associação ao suporte de ar quente e úmido de origem tropical podem ter sido os “ingredientes” da ciclogênese continental.

O centro do ciclone se mantém sobre o continente entre às 1200 e 1800 UTC do dia 12 de julho e muito próximo da costa às 0000 UTC do dia 13 (Fig. 1). Nos horários seguintes, à medida que o cavado em médios e altos níveis migra para leste, o ciclone já se encontra com centro mais afastado da costa, mas seu setor oeste ainda influencia o continente (Fig. 6).

Impactos

O caso 1 foi responsável por 16,1 mil pessoas desabrigadas ou desalojadas, além de 16 óbitos no Estado do RS (Folha de São Paulo, 2023). Os produtores rurais tiveram um prejuízo de cerca de R\$16,3 milhões na agropecuária, além da perda do solo fértil com as correntezas (G1a, 2023). O caso 2 foi responsável por prejuízos em pelo menos 51 municípios no Estado do RS, sendo que 790 mil moradores ficaram sem luz e entre as vítimas, um óbito, 23 pessoas feridas, 261 desalojadas e 331 desabrigados (G1b, 2023). No âmbito econômico, diversos voos atrasaram ou foram cancelados devido ao congelamento das asas no Estado do Paraná no dia 15 de julho (Folha de São Paulo, 2023).

Nessa seção, é apresentada a precipitação e a intensidade máxima do vento sob duas perspectivas: a primeira seguindo a trajetória dos ciclones (lagrangeana) e a segunda por meio de dados registrados em estações meteorológicas (euleriana) em várias localidades (Tab. 1). Na segunda análise, para a precipitação são mostrados os acumulados diários nos dias 14, 15, 16 e 17 de junho e 12, 13 e 14 de julho bem como uma comparação com a climatologia mensal. Para o vento, são apresentados os registros nos horários das 1200, 1800 e 2100 UTC, que são aqueles em que há observação nas estações meteorológicas convencionais.

Figura 6, perspectiva lagrangeana, nota-se que o ciclone de junho causou menor volume de chuva e ventos mais fracos (Fig. 6a,c) sobre o continente comparado ao caso de julho (Fig. 6b,d). Em junho, a região costeira foi a mais afetada.

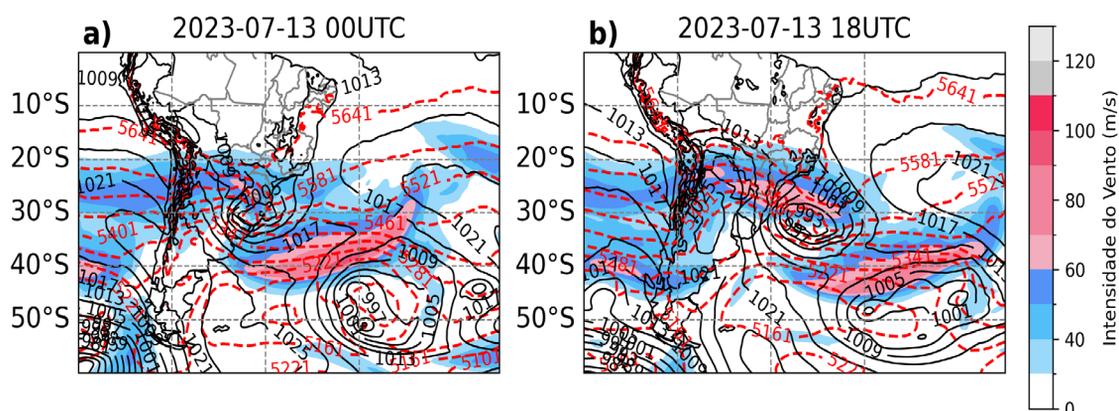


Figura 6. Pressão ao nível médio do mar (hPa, linhas pretas), espessura da camada 500/1000 hPa (gpm, linhas vermelhas tracejadas) e ventos com intensidade superior a 30 m/s em 250 hPa (colorido) para o 13 de julho de 2023 às 0000 e 1800 UTC

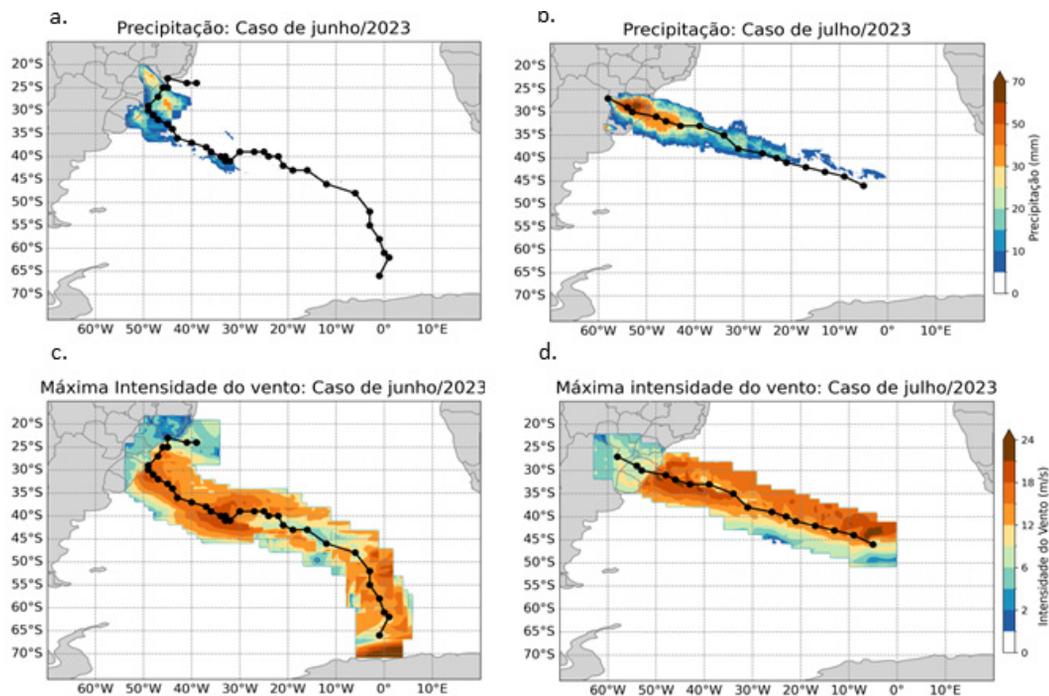


Figura 7. Precipitação (mm) e intensidade do vento máxima (m/s) ao longo da trajetória dos ciclones. Para o caso de junho, a base de dados de precipitação não fornece dados a sul de 60°S

Considerando os registros em estações meteorológicas, no caso 1, Porto Alegre apresentou máxima precipitação no dia 16, com um acumulado de aproximadamente 80 mm, o que representa 63% do total mensal climatológico (Fig. 7a). Já Florianópolis teve um acumulado de 60 mm no dia 15, que equivale a 68% do esperado para o mês. De forma geral, a precipitação diária nas estações analisadas na região sul do país teve maior volume entre os dias 15 e 16 de junho e uma diminuição a partir do dia 17. Na região sudeste, Barra do Turbo, Interlagos e Paraty também registraram precipitação, mas com menores percentuais em relação à climatologia mensal (Fig. 7b). Para a intensidade do vento, tanto a Figura 8c quanto a Figura 10a indicam que os ventos foram mais fortes na costa da região sul e durante os dias 15 e 16. Por exemplo, a estação meteorológica de Tramandaí registrou ventos com intensidade de 19,8 m/s no dia 15 (Fig. 8a).

No caso 2, a precipitação foi mais fraca nas estações da região sudeste, já que o ciclone estava mais distante dessa. Por outro lado, foram registrados volumes elevados no sul do país (Fig. 1-c-d). Por exemplo, em Rio Grande, no dia 13, a precipitação acumulada diária foi de 132 mm que excedeu em 6% a média climatológica mensal, o que representa 7,4 mm a mais (Fig. 8c). Com relação aos ventos (Fig. 8f), esses foram mais intensos entre os dias

12 e 13. Em Porto Alegre, no dia 13 às 1200 UTC, a velocidade atingiu 23 m/s.

Conclusões

Este estudo teve como objetivo avaliar as características básicas e o processo de gênese de dois ciclones ocorridos durante o inverno de 2023 na costa do Brasil que causaram danos e óbitos.

O ciclone formado no dia 14 de junho na costa do Estado do Rio de Janeiro iniciou-se com características do tipo subtropical e, após 24 horas, evoluiu para um sistema extratropical. A sua gênese esteve associada com a influência de um cavado em médios e altos níveis da atmosfera e a processos termodinâmicos. Seu diferencial em relação aos sistemas que se formam na mesma região foi o deslocamento para sudoeste causado por influência de um sistema de alta pressão ao sul que dificultou sua trajetória. Assim, o sistema acabou afetando o tempo nos estados do sul do Brasil. Nesse episódio ocorreram 16 óbitos.

O ciclone com gênese no dia 12 de julho durante todo o seu ciclo de vida se manteve com características extratropicais. Esse sistema se formou sobre o continente entre o Paraguai, Argentina e o Estado do RS, que, de acordo com os estudos climatológicos, é uma região favorável ao desenvolvimento de sistemas convectivos de mesoescala e com menor

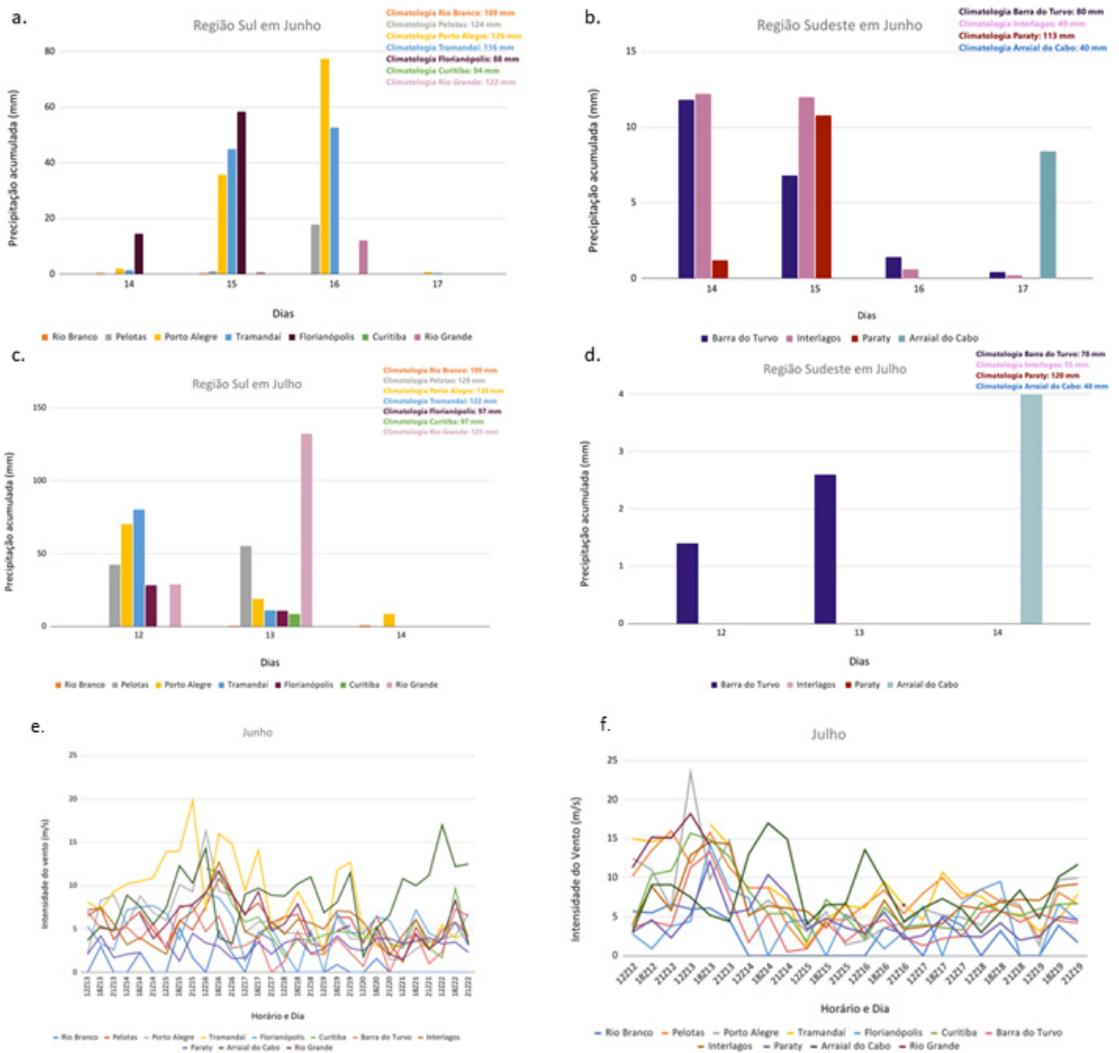


Figura 8. Precipitação acumulada diária (mm) para (a) região sul em junho, (b) região sul em julho, (c) região sudeste em junho, (d) região sudeste em julho, e intensidade do vento (m/s) registrado nas estações da região sul e sudeste para (e) junho e (f) julho

frequência de ciclogêneses, quando comparada com as demais áreas ciclogênicas da América do Sul. Assim, foram importantes para a ciclogênese continental a combinação do suporte dinâmico de um cavado transiente em níveis médios e altos da atmosfera, que é distinto do precursor de sistemas convectivos de mesoescala descrito por Salio et al. (2007), com a contribuição do transporte de ar úmido e quente dos trópicos para os subtropicos em baixos níveis da atmosfera. Como o sistema tem deslocamento para sudeste, até atingir completamente o oceano Atlântico, afetou bastante o Estado do RS com precipitação e ventos intensos. No episódio foram registrados três óbitos.

Projeções climáticas para o final do século apontam que embora o número total de ciclones possa diminuir nas regiões analisadas neste estudo, os

sistemas se tornarão mais intensos (Reboita et al., 2021a,b). Portanto, os tomadores de decisão precisam desde já criar medidas de mitigação e adaptação aos problemas causados por esses sistemas tendo em vista o bem estar da população. Ademais, também é importante disseminar o conhecimento de alguns termos meteorológicos à população, a fim de evitar pânico e medo entre os membros da sociedade. Embora, nos últimos anos, a mídia tenha introduzido vários termos meteorológicos como frentes, ciclones e Zona de Convergência do Atlântico Sul, eles ainda não são totalmente compreendidos pela população. O fato ficou claro com o episódio ocorrido em SC no ano de 2020 (Faria et al., 2023). Os estragos causados por uma linha de instabilidade foram totalmente atribuídos ao ciclone explosivo com centro localizado no oceano. Depois do episó-

dio, moradores do sul do Brasil ficam apreensivos com a palavra, quando a mídia relata a previsão de ciclones na costa. Embora por um lado seja bom que a população se mantenha em alerta com episódios que possam ter potencial de risco, por outro pode causar problemas à saúde mental.

Agradecimentos

As autoras agradecem à Fapemig, CNPq e FAPESP (proc. 2022/05476-2) pelo suporte financeiro recebido e aos centros que disponibilizaram os dados usados no estudo.

Taxonomia CRediT: • Contribuição dos autores: Conceitualização; Curadoria de dados; Análise formal; Investigação; Metodologia; Validação; Visualização; Escrita – rascunho original; Escrita – revisão & edição – Fabiana da Rocha Bartolomei. Conceitualização; Administração do projeto; Recursos; Supervisão; Escrita – revisão & edição: Michelle Simões Reboita. Investigação; Metodologia; Validação; Visualização; Escrita – rascunho original – Rosmeri Porfírio da Rocha. • Conflitos de interesse: Os autores certificam que não têm interesse comercial ou associativo que represente um conflito de interesses em relação ao manuscrito. • Aprovação ética: Não aplicável. • Disponibilidade de dados e material: Disponível no próprio texto. • Reconhecimentos: Os autores agradecem à Fapemig e CNPq pelo suporte financeiro recebido e aos centros que disponibilizam os dados usados no estudo. • Financiamento: Fapemig, CNPq.

Referências

- Bluestein, H. (1992). *Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes*. Vol. 1, Principles of kinematics and dynamics. Oxford University Press.
- Brasiliense, C.S., Dereczynski, C.P., Satyamurty, P., Chou, S.C., da Silva Santos, V.R., & Calado, R.N. (2018). Synoptic analysis of an intense rainfall event in Paraíba do Sul river basin in southeast Brazil. *Meteorological Applications*, 25, 66-77. doi: 10.1002/met.1670.
- Bruick, Z. S., Rasmussen, K. L., Rowe, A. K., & McMurdie, L. A. (2019). Characteristics of Intense Convection in Subtropical South America as Influenced by El Niño-Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 147, 1947-1966. doi: 10.1175/MWR-D-18-0342.1.
- Crespo, N. M., Rocha, R. P. da, Sprenger, M., & Wernli, H. (2021). A potential vorticity perspective on cyclogenesis over centre-eastern South America. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 41(1), 663-678. doi: 10.1002/joc.6644.
- Dalagnol, R., Gramscianinov, C. B., Crespo, N. M., Luiz, R., Chiquetto, J. B., Marques, M. T. A., Dolif Neto, G., ..., & Sparrow, S. (2022). Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change? *Climate Resilience and Sustainability*, 1(15). doi: 10.1002/cli.2.15.
- Dias Pinto, J. R., Reboita, M. S., & Rocha, R. P. da. (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 Atmosphere*, 118, p. 10.870-10.883. doi: 10.1002/jgrd.50830.
- Faria, L. F., & Reboita, M. S. (2023). Eventos meteorológicos associados ao ciclone explosivo ocorrido em junho de 2020 e impactos socioambientais no Estado de Santa Catarina. Rio Claro: *Geografia*, 48(1), 1-27.
- Folha de São Paulo. (2023). *Rio Grande do Sul confirma 16ª morte causada por ciclone*. São Paulo: Folha de São Paulo. URL: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2023/06/ciclone-chega-a-15a-morte-e-e-maior-desastre-climatico-da-historia-do-rs.shtml>. Acesso 20.11.2023.
- G1-RBS. (2023a). *Ciclone extratropical continua sobre RS e deve manter chuva e ventos fortes*. G1, Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. URL: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2023/06/16/ciclone-extratropical-continua-sobre-o-rs-e-deve-mant>ter-chuva-e-ventos-fortes-veja-previsao.ghtml. Acesso 20.11.2023.
- G1-RBS. (2023b). *Ciclone no RS: sobe para 16 o número de mortos*. G1, Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. URL: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2023/06/20/ciclone-no-rs-sobe-para-15-0-numero-de-mortos-uma-pessoa-seguc-desaparecida.ghtml>. Acesso 20.11.2023.
- G1. (2023). *RS tem 425 desabrigados e 433 desalojados após passagem de ciclone, aponta Defesa Civil*. Portal G1, Rio Grande do Sul. URL: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2023/07/14/desabrigados-e-desalojados-apos-passage-de-ciclone-rs.ghtml>. Acesso 20.11.2023.
- G1a. (2023). *Produtores rurais sofrem com prejuízo milionário após ciclone no RS*. G1, Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. URL: <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/globo-rural/noticia/2023/06/25/produtores-rurais-sofrem-com-prejuizo-milionario-apos-ciclone-no-rs.ghtml>. Acesso 20.11.2023.
- G1b. (2023). *Ciclone no RS: temporais causam estragos em municípios e quase 800 mil ficam sem luz no RS*. G1, Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. URL: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2023/07/13/ciclone-no-rs-temporais-causam-estragos-em-34-municipios-e-quase-500-mil-ficam-sem-luz-no-rs-video.ghtml>. Acesso 20.11.2023.
- Gan, M. A. & Rao V. B. (1991). Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119(5), 1293- 1302. doi: 10.1175/1520-0493(1991)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2.
- Giehl, A. L., Luca, F. V., Padrão, G. A., Elias, H. T., Alves, J. R., Gugel, J. T., Mondardo, M., Goulart Júnior, R., & Marcondes, T. (2020). Efeitos socioeconômicos causados pelo ciclone extratropical no estado de Santa Catarina em 2020. Florianópolis: *Epagri*, 57 p.
- Gramscianinov, C. B., Hodges, K. I., & Camargo, R. (2019). The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones. *Climate Dynamics*, 53(7-8), 4115-4140. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04778-1>.
- GZH. (2023). *Identificado idoso morto após ter a casa atingida por árvore durante ciclone em Rio Grande*. GZH, Rio Grande do Sul. URL: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2023/07/identificado-idoso-morto-apos-ter-a-casa-atingida-por-arvore-durante-ciclone-em-rio-grande-ckl1oplg300g001519e8j3ov0.html>. Acesso 20.11.2023.

- Hart, R. E. (2003). A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Monthly Weather Review*, 131, 585-616.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horanyi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., ... & Schepers, D. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049.
- Holton, J.R. (2004) *Introduction to Dynamic Meteorology*. Amsterdam: Elsevier, 4, 535p.
- Jesus, E. M. de, Rocha, R. P. da, 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*, 58(3-4), 1221-1236. doi: 10.1007/s00382-021-05958-8.
- Magaña, V., & Ambrizzi, T. (2005). Dynamics of subtropical vertical motions over the Americas during El Niño boreal winters. *Atmósfera*, 18(4), 211-235.
- Marcelino, E. V., Marcelino, I. P. V. O., & Rudorff, F. M. (2004). *Cyclone Catarina: Damage and vulnerability assessment*. Florianópolis, Brasil. URL: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris%401912/2006/01.13.11.33/doc/cyclone%20catarina.pdf>. Acesso 07.01.2024.
- Mo, K. C., & Paegle, J. N. (2001). The Pacific-South American modes and their downstream effects. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21(10), 1211-1229. doi: 10.1002/joc.685.
- Montini, T. L., Jones, C., & Carvalho, L. M. (2019). The South American low-level jet: A new climatology, variability, and changes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(3), 1200-1218. doi: 10.1029/2018JD029634.
- Reboita, M. S., & Marrafon, V. H. (2021). Ciclones Extratropicais: o que são, climatologia e impactos no Brasil. *Terrae Didactica*, 17, 1-13, e021032. doi: 10.20396/td.v17i00.8666028.
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Crespo, N. M., Dutra, L. M. M., Ferreira, G. W. S., Rehbein, A., Drumond, A., Rocha, R. P. da, & Souza, C.A. (2021c). Impacts of teleconnection patterns on South America climate. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1504(1), 116-153. doi: 10.1111/nyas.14592.
- Reboita, M. S., Crespo, N. M., & Gozzo, L. F. (2023). Uma introdução à análise de massas de ar, frentes e ciclones extratropicais na América do Sul. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(6), 3263-3282. doi: 10.26848/rbgfv16.6.p3263-3282.
- Reboita, M. S., Crespo, N. M., Torres, J. A., Reale, M., Rocha, R. P. da, Giorgi, F., & Coppola, E. (2021b). Future changes in winter explosive cyclones over the Southern Hemisphere domains from the CORDEX-CORE ensemble. *Climate Dynamics*, 57, 3303-3322. doi: 10.1007/s00382-021-05867-w.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P. da, & Custódio, I. S. (2017a). Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I - Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2), 171-186. doi: 10.1590/0102-77863220010.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P. da, & Custódio, I. S. (2017b). Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(4), 509-542. doi: 10.1590/0102-7786324002.
- Reboita, M. S., Iwabe, C. M. N., Rocha, R. P. da, & Ambrizzi, T. (2009). Análise de um ciclone semi-estacionário na costa sul do Brasil associado a bloqueio atmosférico. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24, 407-422. doi: 10.1590/S0102-77862009000400004.
- Reboita, M. S., Krusche, N., Ambrizzi, T., & Rocha, R. P. da (2012). Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. *Terrae Didactica*, 8(1), 35-50. doi: 10.20396/td.v8i1.8637425.
- Reboita, M. S., Oliveira, K. R., Corrêa, P. Y. C., & Rodrigues, R. (2021d). Influência dos diferentes tipos do fenômeno El Niño na precipitação da América do Sul. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(2), 729-742.
- Reboita, M. S., Reale, M., Rocha, R. P. da, Giorgi, F., Giuliani, G., Coppola, E., Nino, R. B. L., ..., & Cavazos, T. (2021a). Future changes in the winter-time cyclonic activity over the CORDEX-CORE southern hemisphere domains in a multi-model approach. *Climate Dynamics*, 57, 1533-1549. doi: 10.1007/s00382-020-05317-z.
- Reboita, M. S., Rocha, R. P. da, Ambrizzi, T. & Sugahara, S. (2010). South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). *Climate Dynamics*, 35(7-8), 1331-1347. doi: 10.1007/s00382-009-0668-7.
- Reboita, M. S., Rocha, R. P. da, Souza, M. R. de, & Llopart, M. (2018). Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean: Had-GEM2-ES and RegCM4 projections. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 38, 2866-2879. doi: 10.1002/joc.5468.
- Rocha, R. P. da, Reboita, M. S., Gozzo, L. F., Dutra, L. M. M., & Jesus, E. M. de. (2019). Subtropical cyclones over the oceanic basins: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences journal*, 1-19. doi: 10.1111/nyas.13927.
- Salio, P., M. Nicolini, & E. J. Zipser. (2007). Mesoscale Convective Systems over Southeastern South America and Their Relationship with the South American Low-Level Jet. *Monthly Weather Review*, 135, 1290-1309. doi: 10.1175/MWR3305.1.
- Seluchi, M. E., & Saulo, A. C.. (2012). Baixa do Noroeste Argentino e Baixa do Chaco: características, diferenças e semelhanças. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(1), 49-60. doi: 10.1590/S0102-77862012000100006.
- Seluchi, M.E. (1995). Diagnóstico y pronóstico de situaciones sinópticas conducentes a ciclo-génesis sobre el este de Sudamérica. *Geofísica Internacional*, 34(2), 171-186. doi: 10.22201/igeo-f.00167169p.1995.34.2.737.
- Silva, G. A. M., Ambrizzi, T., & Marengo, J. A. (2009). Observational evidences on the modulation of the South American Low Level Jet east of the Andes according the ENSO variability. *Annales Geophysicae*, 27, 645-657. doi: 10.5194/angeo-27-645-2009.
- Van Brummelen, G. (2012). *Heavenly mathematics: the forgotten art of spherical trigonometry*. Princeton: Princeton University Press. 208 p.
- Vera, C. S., Vigiariolo, P. K., & Berbery, E. H. (2002) Cold Season Synoptic-Scale Waves over Subtropical South America. *Monthly Weather Review*, 130, 684-699. doi: 10.1175/1520-0493(2002)130<0684:CSSS-WO>2.0.CO;2.
- Wood, K., Yanase, W., Beven, J., Camargo, S. J., Courtney, J. B., Fogarty, C., ... & Riboldi, J. (2023). Phase transitions between tropical, subtropical, and extratropical cyclones: A review from IWTC-10. *Tropical Cyclone Research and Review*. doi: 10.1016/j.tcr.2023.11.002.
- extratropical cyclones: A review from IWTC-10. *Tropical Cyclone Research and Review*. doi: 10.1016/j.tcr.2023.11.002.