



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Ciclone Subtropical Biguá: Caracterização, Impactos e Simulação com o RegCM5 no Modo de Convecção Permitida

Stefanny Helena dos Santos Silva¹, João Gabriel Martins Ribeiro¹, Michelle Simões Reboita¹,
Thales Chile Baldoni¹ e Luiz Felipe Gozzo²

¹Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, Minas Gerais, Brasil. d2021017353@unifei.edu.br, reboita@unifei.edu.br, gabrielmr472@unifei.edu.br e d2025100995@unifei.edu.br. ²Departamento de Física e Meteorologia, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, São Paulo, Brasil. luiz.gozzo@unesp.br

Artigo recebido em 04/06/2026 e aceito em 15/07/2026

RESUMO

Este estudo analisa, do ponto de vista sinótico e de modelagem numérica, um ciclone subtropical que se formou entre o Paraguai, nordeste da Argentina e oeste do estado do Rio Grande do Sul (RS), às 18:00 UTC do dia 13 de dezembro de 2024, e que foi responsável por ventos fortes que causaram queda de árvores, interrupção de serviços básicos e colapso de estruturas no RS. Também é objetivo do estudo verificar a performance do *Regional Climate Model (RegCM5)*, em modo de convecção permitida (CP), na representação das variáveis precipitação e ventos a 10 m de altura. Para a realização do estudo foram utilizados dados de diferentes fontes como de estações meteorológicas automáticas, reanálise ERA5, dados do satélite GOES-16 e do radar de Canguçu (RS). O ciclone subtropical, chamado de Biguá pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), após sua gênese, migrou para sudeste e teve ciclólise ao se unir a outro ciclone às 00:00 UTC do dia 16 de dezembro. A ciclogênese foi associada a um cavado de pequena amplitude em altos níveis da troposfera, que favoreceu a divergência de massa, e que evoluiu para um padrão de baixa desprendida (*cutoff low*). Esse ambiente propiciou uma situação de fraco cisalhamento vertical do vento horizontal ($< 10 \text{ m s}^{-1}$), o que favoreceu a organização da convecção no sistema. Usando a metodologia do espaço de fase dos ciclones, o sistema desde a sua gênese é classificado como subtropical. Por fim, através de métricas estatísticas, mostrou-se que o modelo RegCM5 em modo CP foi hábil em representar a variabilidade horária das variáveis intensidade do vento a 10 m, componentes zonal e meridional do vento e precipitação, embora com alguns vieses. Um destaque do modelo foi a representação dos ventos intensos próximos à costa do RS no dia 15 de dezembro, que são registrados em estimativas de satélite e não aparece na reanálise ERA5. Palavras-chave: ciclogênese, ciclone subtropical, ventos intensos, modelagem numérica

Subtropical Cyclone Biguá: Characterization, Impacts and Simulation with RegCM5 in Convection Permitting Mode

ABSTRACT

This study analyzes a subtropical cyclone that formed over Paraguay, northeastern Argentina, and western Rio Grande do Sul State (southern Brazil) at 1800 UTC on 13 December 2024, from both synoptic and numerical modelling perspectives. The system was responsible for strong winds that caused tree falls, disruption of essential services, and structural damage across Rio Grande do Sul. The study evaluates the performance of the Regional Climate Model (RegCM5), operating in convection-permitting (CP) mode, in representing precipitation and 10-m wind fields. Data from multiple sources were employed, including automatic weather stations, the ERA5 reanalysis, GOES-16 satellite imagery, and observations from the Canguçu weather radar. The subtropical cyclone, named Biguá by the Brazilian Navy Hydrography Center (CHM), moved southeastward after its genesis and underwent cyclolysis when it merged with another cyclone at 0000 UTC on 16 December. Cyclogenesis was associated with a short-wave upper-level trough that enhanced mass divergence and subsequently evolved into a cutoff low pattern. This environment provided weak vertical wind shear ($< 10 \text{ m s}^{-1}$), favoring the organization of convection within the system. Using the cyclone phase space methodology, the system was classified as subtropical from its genesis onward. Statistical metrics indicate that RegCM5 in CP mode successfully represented the hourly variability of 10-m wind speed, zonal and meridional wind components, and precipitation, although some biases were identified. A notable result was the model's ability to reproduce intense winds near the coast of Rio Grande do Sul on 15 December, a feature detected in satellite-derived estimates but not represented in the ERA5 reanalysis.

Keywords: cyclogenesis; subtropical cyclone; strong winds; numerical modelling

Introdução

Os ciclones de escala sinótica são centros de baixa pressão atmosférica com circulação no sentido horário no Hemisfério Sul, diâmetro da ordem de 10^3 km e duração de dias (Reboita et al., 2024a). Esses sistemas podem ser classificados em três tipos: tropicais, extratropicais e subtropicais (Hart, 2003; Reboita et al., 2017a,b, 2024a; Wood et al., 2023). Isso não significa que um sistema que tem gênese como extratropical, por exemplo, irá por todo o seu ciclo de vida manter essa característica. Como a atmosfera é um *continuum*, um sistema pode ter sua ciclogênese num tipo e sofrer transição para outro tipo.

Como em Reboita et al. (2017a,b) é apresentado um estudo detalhado das características dos três tipos de ciclones de escala sinótica, e em Reboita et al. (2024a) há uma discussão sobre a evolução histórica das pesquisas a respeito de ciclones na América do Sul e no Atlântico Sul, abrangendo desde os primeiros estudos até as investigações mais recentes sobre a projeção climática desses sistemas, o presente texto limita-se a uma breve diferenciação entre cada tipo de sistema. Essa síntese, baseada em Reboita et al. (2017a,b; 2024a), é acompanhada da **Tabela 1**.

Os ciclones extratropicais se formam em latitudes médias associados à energia dos gradientes horizontais de temperatura em baixos níveis da atmosfera bem como pela influência dinâmica dos cavados que viajam em médios/altos níveis da troposfera ou dos jatos de altos níveis. Os ciclones extratropicais possuem diâmetro, em geral, maior do que 3000 km, setor frio no lado oeste do seu centro e quente no leste, mas que tende a se tornar totalmente frio à medida que o sistema atinge a fase de maior intensidade, e ventos mais intensos em altos níveis do que próximo à superfície (**Tabela 1**). Já os ciclones tropicais se formam nas regiões tropicais associados a distúrbios ciclônicos em baixos níveis no escoamento de leste sobre águas oceânicas aquecidas. Isso favorece a evaporação, que é a principal fonte de energia desses sistemas. Os ciclones tropicais são caracterizados por núcleo quente em toda a troposfera e possuem ventos mais intensos próximo à superfície (máximos gradientes de pressão atmosférica) que decrescem de intensidade com a altura (**Tabela 1**). Quando os ventos em baixos níveis atingem mais do que 119 km/h são denominados de furacão na bacia do oceano Atlântico Norte e Pacífico Leste e de tufão na bacia do Pacífico Oeste. Os ciclones subtropicais apresentam características híbridas, isto é, se assemelham aos ciclones tropicais, devido

à presença de núcleo quente em baixos níveis da troposfera, e aos ciclones extratropicais, devido ao núcleo frio em altos níveis (**Tabela 1**).

As características descritas dos três tipos de ciclones podem ser apresentadas num diagrama de fase dos ciclones (*Cyclone Phase Space*, CPS), método desenvolvido por Hart (2003). Tal diagrama mostra a evolução da estrutura térmica de um ciclone ao longo do seu ciclo de vida e é usado para analisar ciclones nas diferentes bacias oceânicas, como no oceano Atlântico Sul (Reboita et al., 2022, 2024b; Conrado et al., 2024; Souza et al., 2025) e Norte (Wood e Ritchie, 2014; Wei et al., 2017; Zarzycki et al., 2017; Bieli et al., 2020; Jones et al., 2023), no mar Mediterrâneo (Arsenis et al., 2025; Cioni et al., 2016; Gutiérrez-Fernández et al., 2024; Kouroutzoglou et al., 2021; Varlas et al., 2023; Saraceni et al., 2025), no oceano Pacífico (Kitabatake, 2011; Song et al., 2011; Irie e Takemi, 2023; Chen et al., 2025) e no oceano Índico (Bieli et al., 2019; Datt et al., 2020).

O entendimento sobre as características de cada ciclone e de suas transições é um assunto de constante discussão na comunidade científica. Em 2022, durante o *Workshop* Internacional sobre Ciclones Tropicais (IWTC) da Organização Meteorológica Mundial (WMO) foi destacada a necessidade de definições claras sobre ciclones subtropicais e sistemas em transição bem como a discussão entre os cientistas do globo sobre a possibilidade ou não de se ter uma única metodologia (com mesmos parâmetros) que pudesse ser aplicada em todas as bacias oceânicas para a classificação destes sistemas. O grupo de trabalho sobre meteorologia tropical (WWRP) da WMO, em novembro de 2025, realizou um *workshop* especialmente para discussões desses tópicos. Uma das principais conclusões foi que a metodologia do CPS tem suas limitações e não pode ser usada com uma única configuração para todas as bacias oceânicas. Além disso, destacou-se que a definição dos tipos de sistemas (como apresentada nos parágrafos anteriores) e transições já está mais consolidada pela comunidade científica (Wood et al., 2023; Reboita et al., 2026).

No oceano Atlântico Sul, os ciclones subtropicais são mais frequentes entre a costa sul-sudeste do Brasil, no verão e outono (Gozzo et al., 2014; Pérez-Alarcón et al., 2024), e podem ter gênese como subtropical ou adquirir essa estrutura pela transição de ciclone extratropical para subtropical (Reboita et al., 2022). Nem todos os ciclones subtropicais que se formam no Atlântico Sul recebem nome pelo Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (CHM), somente aqueles com possibilidades de impactos na região costeira são denominados (NORMAM/701-DHN, 2023).

Tabela 1 Principais características dos ciclones extratropicais, tropicais e subtropicais. Compilação realizada através de estudos de caso e resultados dos trabalhos citados. Fonte: os autores.

Característica	Ciclones Extratropicais	Ciclones Tropicais	Ciclones Subtropicais
Principais Processos de Formação	Gradiente horizontal de temperatura em baixos níveis da atmosfera e ondas de oeste em médios e altos níveis.	Presença de algum mecanismo que cause anomalia ciclônica em superfície e associação com fluxos turbulentos no sentido mar-ar.	Ondas de oeste em níveis médios/altos; vórtice ciclônico de altos níveis, cisalhamento horizontal do vento em baixo níveis.
Inclinação do Tubo de Vorticidade Relativa Ciclônica Estágios: Gênese (Gên), Maturidade (Mat.) e Decaimento (Dec.)			
Anomalia de Altura Geopotencial (Z) Anomalia negativa indica baixa pressão (B) e anomalia positiva, alta pressão (A)			
Anomalia de Temperatura no Núcleo do Sistema Anomalia fria (F) e anomalia quente (Q)			

Andreлина e Reboita (2021) mostraram que a costa brasileira entre outubro e abril possui sinal mais intenso do Índice do Potencial de Gênese (IPG), uma métrica desenvolvida por Emanuel e Nolan (2004) que relaciona vários ingredientes necessários para o desenvolvimento de sistemas tropicais (que também pode ser útil para subtropicais). Porém, a presença do índice não significa que ciclones tropicais/subtropicais irão se desenvolver, pois é necessário algum “gatilho” para a gênese. Nessa mesma linha, Ribeiro et al. (2023) verificaram que os ciclones subtropicais que receberam nome pelo CHM entre 2010 e 2021 no Atlântico Sul apresentaram IPG com valores variáveis entre o período pré e gênese, ou seja, não há um valor do índice que possa ser utilizado como padrão. Os autores também descreveram o ambiente de formação dos ciclones subtropicais: dos 14 ciclones estudados, 5 ciclones tiveram gênese associada a cavados em níveis médios da atmosfera e 9 com padrão de bloqueio (tipo *cutoff low*). Este resultado levou à conclusão de que a condição de fraco cisalhamento vertical do vento horizontal é um fator importante para os ciclones subtropicais. Complementando, Ferreira et al.

(2025) descreveram a importância do fraco cisalhamento vertical do vento horizontal para a formação do ciclone subtropical Yakecan em março de 2022 no Atlântico Sudoeste.

Após o estudo de Ribeiro et al. (2023), outros três ciclones subtropicais receberam nome no Atlântico Sul: o Yakecan, ocorrido em 2022 (Ferreira et al., 2025), o Biguá em dezembro de 2024 e o Caiobá em março de 2026. Esses dois últimos ainda não têm descrição na literatura (exceto o relatório operacional do CHM, 2024, para o Biguá). Por isso, o Biguá é o foco do presente estudo. Como os ciclones subtropicais não são tão frequentes, é importante um estudo detalhado de cada caso para a compreensão do ambiente de formação, intensificação e estruturas de mesoescala embebidas nesses sistemas. Tais estruturas são aquelas associadas com os eventos extremos (chuva e vento) e para serem estudadas demandam dados em alta resolução, maior do que aqueles oferecidos pela reanálise. Assim, estimativas de radar e simulações numéricas são utilizadas para análise dos sistemas de mesoescala.

Ainda mais desafiador é avaliar como os modelos climáticos regionais simulam os padrões

de mesoescala associados com os ciclones. É necessário grande poder computacional para executar modelos numéricos em alta resolução horizontal e em modo de convecção-permitida (*convection permitting* - CP). Modelos em modo CP são aqueles em que as acelerações verticais são explicitamente resolvidas, não sendo necessário o uso de esquemas para parametrização da convecção (da Rocha et al., 2025), que pode ser uma grande fonte de incerteza para as simulações. Magalhães et al. (2025) é um dos poucos estudos até o momento que explora as características de mesoescala de um ciclone no Atlântico Sul usando o modelo *Weather Research and Forecast* (WRF) em modo climático.

Os autores analisaram a performance do modelo (em modo CP) na representação do ciclo diurno das variáveis precipitação e componentes do vento a 10 m, bem como as características das frentes associadas ao ciclone e verificaram que o modelo WRF-CP foi eficiente em representar as bandas de máxima precipitação registradas em imagens de radar. Durante a fase de oclusão, quando a precipitação e os ventos atingiram a costa do estado do Rio Grande do Sul (RS), o modelo mostrou *skill* em simular a fase e intensidade da precipitação, mas algumas limitações foram observadas na representação da intensidade do vento.

Em meados de dezembro de 2024 um ciclone se desenvolveu sobre o nordeste da Argentina, próximo à fronteira com o Brasil, e se deslocou pelo estado do RS causando condições adversas de tempo como chuvas fortes e intensas rajadas de vento no sul e na metade leste desse estado (METSUL, 2025). Segundo o boletim da Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul, foram registradas ocorrências em seis municípios (AGORA RS, 2024). Em Butiá, a 84 km de Porto Alegre, a cobertura de uma quadra esportiva desabou no dia 15, durante o vendaval, deixando duas pessoas feridas (DIÁRIO DO NORDESTE, 2024). Além desse desabamento, os ventos fortes associados ao ciclone causaram queda de árvores, destelharam casas e destruíram pontes, bem como afetaram o fornecimento de energia elétrica para cerca de 230 mil clientes da Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica Equatorial (CEEE); a Rio Grande Energia (RGE) também registrou inúmeras ocorrências, pois o vento forte atingiu a rede elétrica nas regiões dos vales, metropolitana e da serra no RS (CNN, 2024). De acordo com o Departamento Municipal de Água e Esgotos, a queda de energia elétrica afetou o abastecimento de água em Porto Alegre, interrompendo o funcionamento da estação que

atende os bairros do Partenon, Agronomia, Vila dos Sargentos, Jardim Bento Gonçalves e Vila Tijuca (BDF, 2024). Ainda no dia 15 de dezembro, um avião da Gol, que viajava de Guarulhos com destino a Porto Alegre, realizou um pouso de emergência na Base Aérea de Canoas, a 19 km de distância do aeroporto de destino. O piloto do Boeing 737, que transportava 186 pessoas (G1, 2024), declarou o código “PAN PAN”, indicando uma situação urgente, mas que ainda não é uma ameaça imediata à vida ou ao equipamento (GLOBO, 2024).

O ciclone mencionado é o Biguá, o penúltimo sistema a receber nome pelo CHM (o mais recente ocorreu em março de 2026). O CHM classificou o sistema como tempestade subtropical com base nos dados disponibilizados durante e imediatamente após a ocorrência do evento. Como sistemas tropicais e subtropicais são menos frequentes do que os extratropicais nas proximidades da América do Sul e considerando que o CHM não utiliza dados pós-processados, como reanálises, em seus boletins operacionais (os quais podem fornecer uma representação mais realista das condições atmosféricas), este estudo tem como objetivo analisar, por meio de dados de reanálise de última geração, o processo de gênese do ciclone e suas características, a fim de definir sua classificação ao longo do ciclo de vida. Além disso, busca-se verificar como o modelo *Regional Climate Model* (RegCM), em modo CP, simula as condições meteorológicas associadas ao ciclone, bem como sua capacidade de representar algumas das estruturas de mesoescala relacionadas ao centro de baixa pressão. Este estudo é relevante tanto do ponto de vista teórico quanto prático, pois o conhecimento gerado pode contribuir para aprimorar o trabalho dos previsores em ambiente operacional.

Material e métodos

Área de Estudo

A área de estudo compreende o estado do RS, parte de Santa Catarina (SC) e o setor sudoeste do oceano Atlântico Sul (**Figura 1**). O RS possui relevo dividido em quatro unidades geomorfológicas: Planalto Sul-Rio-Grandense, Planalto Norte-Rio-Grandense, Depressão Central e a Planície Litorânea (Becker & Nunes, 2012). Conforme a classificação climática de *Köppen*, o clima predominante no RS é o temperado sempre úmido e com verão quente (Cfa) (Alvares et al., 2013).

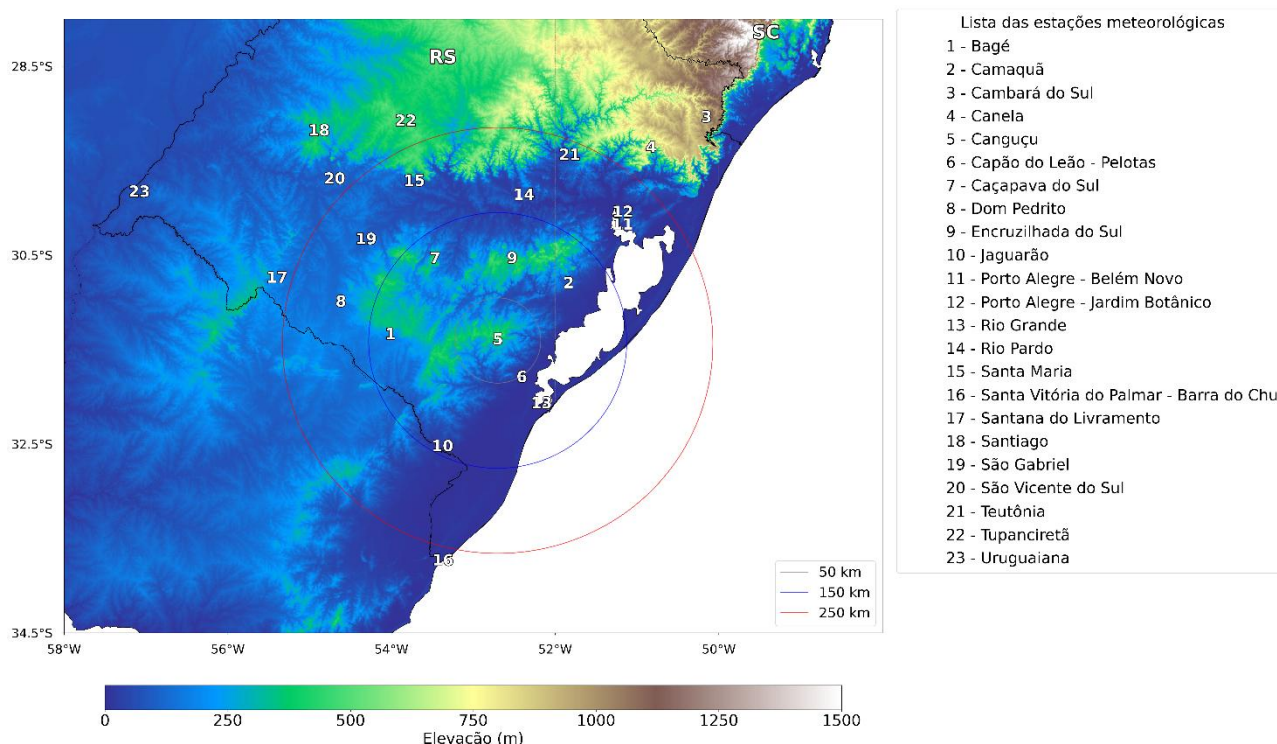


Figura 1 Área de estudo, topografia (em metros), localização das 23 estações meteorológicas automáticas do INMET utilizadas e a localização do radar de Canguçu (curto alcance: 50 km - linha cinza, médio alcance: 150 km - linha azul e longo alcance (vigilância): 250 km linha vermelha). A topografia provém dos dados de elevação do *OpenTopography* (2025).

Dados

Para a análise do ciclone subtropical Biguá, foram utilizados dados de diferentes fontes:

a) Estações meteorológicas: Dados horários de precipitação e intensidade e direção do vento, no período de 10 a 20 de dezembro de 2024, foram obtidos de 23 estações meteorológicas automáticas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibilizados em seu acervo (<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>). Tais estações estão localizadas no estado do RS, conforme ilustrado na **Figura 1**.

b) Dados de Satélite: Foram utilizados dados de temperatura de brilho (Tb) do Canal 13 (infravermelho - 10,3 μ m) do Sensor ABI (*Advanced Baseline Imager*) a bordo do satélite geoestacionário GOES-16, referentes ao período de 10 a 20 de dezembro de 2024. Os dados foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em seu acervo (https://ftp.cptec.inpe.br/goes/goes16/retangular/c_h13/2024/12/). O GOES-16 apresenta resolução temporal de 10 minutos, a resolução espacial do Sensor ABI, para o canal 13, é de aproximadamente 2 km (OSCAR, 2025).

Para os ventos a 10-m de altura, também foram utilizadas as estimativas obtidas por um

scatterometer a bordo do satélite Oceansat-2; o produto, denominado de OSCAT3, possui cobertura global diária (OSCAR, 2026; NOAA, 2018; <https://manati.star.nesdis.noaa.gov/datasets/OSCAT3Data.php>).

c) Dados de Radar: No período de ocorrência do ciclone, os radares Morro da Igreja (SC) e Santiago (RS) apresentaram muitas falhas. Os dados mais consistentes foram registrados pelo radar de Canguçu (entre as 10:00 e 15:00 UTC do dia 15 de dezembro de 2024). O radar meteorológico Doppler de Canguçu (RS) está localizado nas coordenadas 31°24'14"S e 52°42'06"W, a 466,57 metros acima do nível médio do mar (**Figura 1**) e opera na banda S (comprimento de onda de 10 cm, cerca de 2,7 a 3 GHz), com feixe de micro-ondas com abertura aproximada de 2°. As varreduras são realizadas a cada 10 minutos, com operação contínua 24 horas por dia com alcance de até 400 km e é operado pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA).

Por meio de acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), os dados brutos são processados e disponibilizados ao público. No processamento, os dados são transformados no formato *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI), distribuídos em 15 níveis verticais, entre 2 km e 16 km de altitude. O produto CAPPI é obtido a partir da refletividade do

radar, coletada para cada azimute e elevação. Após a definição dos níveis de altura, realiza-se a interpolação utilizando as informações contidas em cada elevação do *Plan Position Indicator* (PPI), formando, assim, um campo de refletividade em altitude constante. Ao final da varredura, obtém-se um volume tridimensional de dados, que representa todo o perfil vertical de refletividade (em dBZ) dentro da área de cobertura. Considerando a resolução horizontal do modelo utilizado neste estudo, os dados de radar foram devidamente processados para a mesma resolução espacial (1 km × 1 km). Para complementar o estudo, foi analisado o vento radial através da variável *corrected velocity*; o radar Doppler mede a velocidade de um alvo com base na variação de fase entre sinais refletidos em pulsos consecutivos; ao comparar a mudança de fase, o comprimento de onda e o intervalo de tempo, calcula-se a magnitude da componente da velocidade na direção ou afastamento do sensor (Calheiros et al., 2017; Araujo, 2018). A variável apresentada no PPI corresponde à mudança temporal da velocidade radial, sendo que valores positivos indicam afastamento do alvo em relação ao radar, enquanto valores negativos indicam aproximação (Miller et al., 2022).

d) Dados em Ponto de Grade: Foram utilizadas variáveis atmosféricas provenientes da reanálise ERA5, disponibilizada pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF; Hersbach et al., 2020). A ERA5 fornece dados meteorológicos com frequência horária e resolução horizontal de 0,25° x 0,25°. As variáveis em níveis verticais em coordenada de pressão utilizadas foram geopotencial, umidade específica, componentes zonal e meridional do vento, temperatura e velocidade vertical e, em superfície, temperatura da superfície do mar (TSM), as componentes zonal e meridional do vento a 10 m, a pressão ao nível médio do mar (PNMM) e os fluxos turbulentos de calor latente e sensível. Para as variáveis em coordenadas de pressão, foram utilizados os níveis de 1000, 950, 925, 900, 850, 800, 750, 700, 600, 550, 500, 400, 300, 250 e 200 hPa. O geopotencial foi transformado em altura geopotencial (Z) ao ser dividido pela aceleração da gravidade.

Também foram utilizados dados do *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN), que se baseia em procedimentos de classificação e aproximação de funções de redes neurais para estimar a precipitação em cada pixel da imagem de temperatura de brilho no infravermelho obtidas por satélites

geoestacionários globais. Esses dados possuem frequência horária, resolução horizontal de 0,25° x 0,25° e estão disponíveis no portal do *Center for Hydrometeorology and Remote Sensing* (CHRS) (<https://chrsdata.eng.uci.edu/>).

Modelo Climático Regional

O uso de um modelo climático regional possibilita aumentar a resolução espacial em relação às reanálises globais, permitindo o estudo dos campos meteorológicos de mesoescala. O modelo climático regional utilizado neste estudo é o *Regional Climate Model* versão 5 (RegCM5), desenvolvido pelo *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP). O RegCM5 é um modelo de área limitada, não hidrostático e que resolve as equações primitivas da atmosfera em coordenadas sigma-pressão (Coppola et al., 2025).

A versão mais recente incorpora atualizações na dinâmica e na física do modelo, incluindo esquemas avançados de microfísica de nuvens, radiação e camada limite planetária. Dependendo da resolução horizontal adotada, o RegCM5 permite tanto simulações com o uso de parametrização de convecção profunda quanto configurações em modo de CP, nas quais a convecção é explicitamente resolvida pela dinâmica do modelo.

Para esse estudo, as condições de fronteira fornecidas ao modelo provêm da reanálise ERA5 a cada 6 horas, incluindo também os campos de temperatura da superfície do mar (TSM). Foi utilizada resolução horizontal de 4 km (configurando uma simulação em modo de CP) e 18 níveis verticais, em um domínio com projeção *rotated latitude/longitude* (ROTLLR), composto por 401 pontos de latitude e 351 pontos de longitude. Após vários testes de domínio e de parametrizações físicas definiu-se que a melhor configuração para a simulação do ciclone Biguá compreende o esquema de camada limite planetária UW-PBL (ibltyp=2), o esquema de microfísica de nuvens de Nogherotto/Tompkins (ipptls=2) e o esquema de Zeng et al. (1998) para os fluxos oceânicos. A simulação foi integrada por 6 dias (11 a 17 de dezembro de 2024), com passo de tempo de 60 segundos, e saídas horárias para variáveis de superfície, com coordenadas centrais em 29°S e 56°W. Essas configurações apresentaram melhor desempenho na representação da trajetória, intensificação e estrutura do ciclone na área de estudo.

Análises

a) Padrão da Nebulosidade: Inicialmente, analisou-se o padrão das nuvens através da Tb nas imagens geradas com os dados do satélite GOES-16. No canal do infravermelho, as nuvens baixas e com pouco desenvolvimento vertical (topos mais quentes) são representadas em tons mais escuros e as nuvens altas ou as nuvens Cumulonimbus, que se formam em níveis baixos, mas possuem grande extensão na vertical (topos mais frios), em tons mais brilhantes. Topos de nuvens com $T_b \leq 235$ K ($\sim 38^\circ\text{C}$) são utilizados para identificar sistemas convectivos (Mapes e Houze, 1993; Kotarba e Wojciechowska, 2025). Além disso, é apresentado o vento a 10 m de altura sobreposto ao campo da nebulosidade.

b) Identificação das Características Básicas do Ciclone: No campo de PNMM, quando surge a primeira isóbara fechada, as coordenadas geográficas do centro dessa isóbara vão indicar a posição central do ciclone (o primeiro registro indica o nascimento do ciclone, denominado de ciclogênese), enquanto o valor da PNMM neste ponto central, a intensidade do sistema. Após essa primeira identificação, a PNMM é analisada a cada 6 horas, até o momento em que não há mais isóbaras fechadas, ou em outras palavras, até quando o ciclone deixa de existir, o que é chamado de ciclólise. Com isso, é possível determinar o tempo de vida (número de horas), intensidade (valor da PNMM) e deslocamento do sistema (direção e velocidade). Para calcular a distância percorrida entre duas posições do ciclone é usada a equação de Haversine (eq. 1) (Maria et al., 2020).

$$d = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (\text{eq. 1})$$

onde d é a distância em quilômetros, r é o raio aproximado da Terra (6378 km), φ_2 é a latitude do ponto 2, φ_1 é a latitude do ponto 1, λ_2 é a longitude do ponto 2, λ_1 é a longitude do ponto 1, com as latitudes e longitudes em graus. A soma da distância a cada duas posições até o decaimento do sistema corresponde a distância total percorrida pelo ciclone. Já a velocidade média corresponde à razão entre a distância e o tempo, computada a cada 6 horas.

c) Ambiente de Gênese e de Evolução do Ciclone: Com os campos atmosféricos da reanálise ERA5, foram construídos mapas para os horários sinóticos-padrão: 00:00, 06:00, 12:00 e 18:00 UTC do dia 12 ao dia 18 de dezembro de 2024 (nesse estudo, somente alguns horários serão mostrados). São apresentados:

- PNMM, intensidade do vento superior a 30 m s^{-1} em 250 hPa (o que caracteriza os jatos em altos níveis da troposfera) e espessura da camada entre 500 e 1000 hPa: a combinação desses três campos permite obter uma visão da estrutura vertical da atmosfera. A PNMM permite identificar a posição de sistemas anticiclônicos e ciclônicos em superfície; a espessura da camada (obtida como a diferença da altura geopotencial entre 500 e 1000 hPa) indica regiões de contrastes térmicos (gradientes), enquanto os jatos em 250 hPa podem ser usados como *proxies* para identificar regiões propícias à divergência e convergência de massa em altos níveis da troposfera.

- Cisalhamento vertical do vento horizontal entre os níveis de 1000 e 500 hPa, altura geopotencial e divergência de massa em 250 hPa: o cisalhamento vertical é obtido através da diferença da intensidade do vento em dois níveis distintos, no caso 500 e 1000 hPa. Essa variável é um *proxy* para identificar gradientes horizontais de temperatura do ar em baixos níveis e, também, é indicativa de ambiente necessário para o desenvolvimento de nuvens de tempestade (análise de mesoescala). A altura geopotencial em 250 hPa mostra a localização de cristas e cavados em altos níveis, enquanto a divergência de massa em 250 hPa auxilia na identificação de áreas com divergência (movimentos ascendentes) e convergência (movimentos subsidentes) em altos níveis da troposfera.

- Advecção horizontal de temperatura do ar e direção e intensidade do vento em 850 hPa: a advecção horizontal de temperatura do ar é obtida através do produto escalar entre o vento horizontal e o gradiente horizontal de temperatura do ar ($-\vec{V} \cdot \vec{\nabla T}$) no nível atmosférico de interesse. Essa grandeza é usada para indicar o transporte de ar frio ou quente de/para uma dada localidade. Já a direção e a intensidade do vento em 850 hPa ajudam a explicar de onde vem o ar que chega a um determinado local contribuindo para a advecção quente ou fria.

- Umidade relativa média (1000-500 hPa), movimento vertical e altura geopotencial em 500 hPa: a umidade relativa média, que corresponde à média entre todos os níveis verticais obtidos entre 1000 a 500 hPa, mostra, em percentual, a quantidade de vapor d'água disponível no ar entre a baixa e média troposfera e, quando combinada a movimentos verticais ascendentes, favorece a formação de nebulosidade. Por isso, também é mostrado nesse estudo o movimento vertical

(somente valores negativos, que são indicativos de ar ascendendo) no nível de 500 hPa. Adiciona-se a essas variáveis, a altura geopotencial em 500 hPa, que indica a localização das cristas e cavados.

- Além dos campos espaciais das variáveis anteriormente mencionadas, é mostrada a máxima intensidade do vento a 10 m de altura seguindo a trajetória do ciclone, bem como a média do cisalhamento vertical do vento horizontal e da divergência do fluxo de umidade integrado na vertical entre 1000-500 hPa (eqs. 2-4), que é calculado como (Peixoto e Oort, 1992):

$$\text{div}Q = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{g} \int_0^{p_z} q \vec{V} dp \right) \quad (\text{eq. 2})$$

sendo $\vec{V} = u_i + v_j$, as componentes do fluxo de umidade integrado na vertical são:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{Q}_\lambda = \int_0^{p_0} q u \frac{dp}{g} \quad (\text{eq. 3})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{Q}_\phi = \int_0^{p_0} q v \frac{dp}{g} \quad (\text{eq. 4})$$

em que q é a umidade específica (kg kg^{-1}), u e v são as componentes horizontais do vento (m s^{-1}) e g a gravidade (m s^{-2}). A unidade da divergência de $\vec{Q}$ é dada em $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$, enquanto a unidade dos componentes do fluxo de umidade é em $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

d) Classificação do Ciclone: Para definir o tipo de ciclone em estudo, é utilizado o Diagrama de Fase do Ciclone (*Cyclone Phase Space*, CPS) proposto por Hart (2003), que só necessita de duas informações: as coordenadas da trajetória do sistema (**Tabela 2**) e a variável altura geopotencial nos níveis de 900, 600 e 300 hPa. A metodologia do CPS se encontra descrita em detalhes, por exemplo, em Hart (2003), Gozzo et al. (2014) e Ferreira et al. (2025). Portanto, aqui só serão mencionados os parâmetros e os valores que indicam cada tipo de sistema. A simetria térmica (B) é um parâmetro que indica se o sistema tem temperatura mais homogênea (caso dos ciclones tropicais) ou mais heterogênea (setor frio e quente dos ciclones extratropicais). O $B < 10$ é esperado para casos de ciclones tropicais, enquanto $B \gg 10$ em casos de ciclones extratropicais. Para os ciclones subtropicais que se originam na América do Sul e Atlântico Sul, considera-se $B < 25$ (Gozzo et al., 2014). Os parâmetros vento térmico em baixos níveis ($-|V_T^L|$) e vento térmico em altos níveis ($-|V_T^U|$) estão relacionados com a intensidade dos ventos, sendo que para ciclones tropicais se espera ventos mais intensos em baixos níveis e em ciclones extratropicais em altos níveis da troposfera. Ciclones tropicais são caracterizados

por $-|V_T^L|$ e $-|V_T^U| > 0$, ciclones extratropicais são caracterizados por $-|V_T^L|$ e $-|V_T^U| < 0$, e ciclones subtropicais no oceano Atlântico Sul assumem valores de $-|V_T^L| > -50$ e $-|V_T^U| < -10$ (Gozzo et al., 2014). Para cada passo de tempo de um ciclone, os três limiares são calculados e indicarão em que fase o sistema está.

e) Características de Mesoescala do Ciclone e Validação do RegCM5: Nessa etapa, o modelo será validado de três formas:

- Para 15 de dezembro, o dia de ventos mais intensos na costa do RS, serão comparados os mapas da intensidade e direção do vento simulada com os da ERA5.

- Também para o dia 15 será avaliado o padrão espacial da precipitação simulada, que será comparado com estimativas de precipitação dos dados de radar e do produto PERSIANN. A estimativa de radar é obtida a partir do CAPPI de 3 km de altitude e da relação Z-R de Marshall-Palmer, que converte a refletividade (Z) em precipitação (R) (Marshall e Palmer, 1948).

- Por fim, serão extraídas séries temporais horárias, no período de 11 a 17 de dezembro, da simulação referentes aos locais das estações meteorológicas mostradas na **Figura 1**; então, a precipitação, intensidade do vento a 10 m e os componentes zonal e meridional do vento serão comparados com os dados observados pelas estações meteorológicas. Para a obtenção das séries temporais simuladas, para cada horário é calculada uma média na área da estação definida por 3 x 3 pontos de grade. Serão computadas entre as séries simuladas e observadas as seguintes estatísticas: coeficiente de correlação de Pearson (r), que indica a força e o sinal da relação linear entre os conjuntos de dados, variando de -1 a +1; o viés, que quantifica superestimativas ou subestimativas da simulação; e a raiz do erro quadrático médio (RMSE), que mede a magnitude dos erros calculando a raiz quadrada da média das diferenças quadradas.

Resultados e Discussão

Padrão Espacial da Nebulosidade

Antes da apresentação das características básicas do ciclone (local de gênese, trajetória etc.) é importante conhecer a evolução temporal da nebulosidade e dos ventos em baixos níveis da atmosfera para que se tenha uma visão espacial consolidada do sistema a fim de facilitar as discussões seguintes. Portanto, a **Figura 2** mostra

a Tb e a direção e intensidade do vento a 10 m acima da superfície. No dia 13 de dezembro às 06:00 UTC (**Figura 2a**), entre a Argentina e o Brasil predomina $T_b < -60^\circ\text{C}$, que é indicativo de nuvens convectivas (Mapes e Houze, 1993; Machado e Rossow, 1993; Kotarba e Wojciechowska, 2025), e nessa mesma região os ventos são fracos. Já sobre o oceano, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) está bem configurado e promovendo ventos intensos sobre todo o litoral do sul do Brasil. No dia 13 às 18:00 UTC (**Figura 2b**), a banda de nebulosidade se desloca para leste atuando sobre todo o sudeste da América do Sul (região formada pelo nordeste da Argentina, sul do Brasil e Uruguai) e já é evidente no vento um giro ciclônico entre o nordeste da Argentina e RS. Com o passar do tempo, o padrão da nebulosidade e a circulação se tornam mais característicos de ciclone de escala sinótica, isto é, nebulosidade acompanhando o giro ciclônico mais intenso. O sistema também se desloca para leste, ao mesmo tempo que os ventos produzidos pelo ciclone se tornam mais intensos (**Figura 2c-d-e**). Sobre o RS, os ventos apresentaram máxima intensidade ao longo do dia 15 (**Figura 2f-g**).

A análise das isóbaras permitiu definir o dia 13 de dezembro de 2024 às 18:00 UTC como o da gênese do ciclone, entre o nordeste da Argentina e o RS (**Figura 3a**). Ao longo do ciclo de vida, o ciclone se deslocou em direção ao oceano Atlântico, onde se conecta com outro sistema no dia 16 de dezembro, momento que caracteriza a sua ciclólise. O ciclone inicialmente tem um pequeno deslocamento para nordeste, depois para sudeste, quando chega ao litoral do RS e, por fim, apresenta um deslocamento anômalo para nordeste (**Figura 3a**). A ciclogênese iniciou com pressão central de 1003,9 hPa e essa atinge seu mínimo (995,2 hPa) às 12:00 UTC do dia 15, o que indica a máxima intensidade do ciclone (**Figura 3b**).

O ciclone percorreu 1083 km em 54 horas (**Tabela 2**), o que indica uma velocidade média de 20,06 km/h ($5,57 \text{ m s}^{-1}$). Essa velocidade média é inferior à velocidade da climatologia total de ciclones de escala sinótica na região que é de $\sim 10 \text{ m s}^{-1}$ (Reboita et al., 2010), mas similar à velocidade média de ciclones subtropicais documentada por Gozzo et al. (2014), que varia entre $3,17 \text{ m s}^{-1}$ a $4,10 \text{ m s}^{-1}$.

Características Básicas do Ciclone

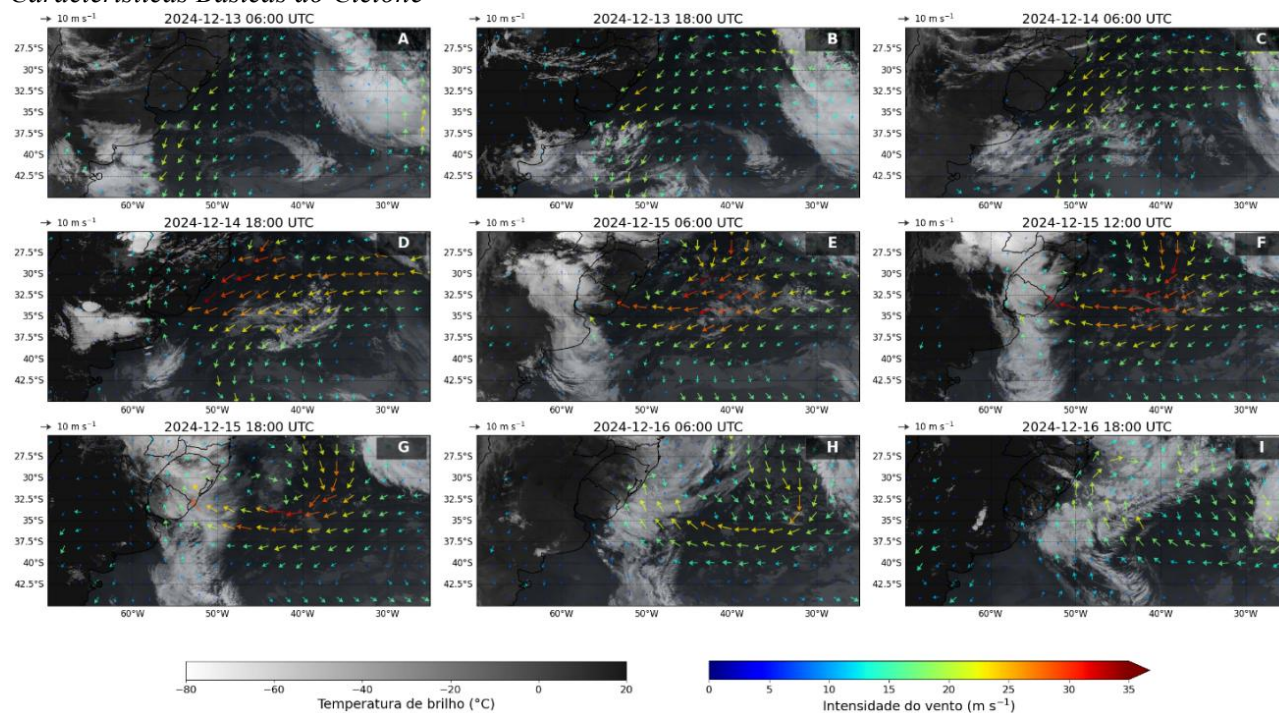


Figura 2 Temperatura de brilho ($^\circ\text{C}$, tons de cinza) e intensidade e direção do vento a 10 m de altura (m s^{-1} , setas), dos dados de referência, ao longo do ciclo de vida do ciclone em estudo.

Tabela 2 Informações básicas do ciclone em estudo.

Data	Hora (UTC)	Latitude (°S)	Longitude (°W)	Pressão (hPa)	Distância a cada 6 horas (km)	Tempo (h)	Velocidade a cada 6 horas (km/h)	Distância Acumulada (km)	Ciclo de Vida
13/12/2024	1800	30	58	1003	0	0	0	0	Ciclogênese
14/12/2024	0000	29,50	57	1003	111,40	6	18,57	111,40	
14/12/2024	0600	31,50	54,00	1003	363,39	6	60,65	474,79	
14/12/2024	1200	31,50	52,25	1002	165,91	6	27,65	640,70	
14/12/2024	1800	31,75	51,50	1000	76,26	6	12,71	716,96	
15/12/2024	0000	32,50	51,75	999	86,66	6	14,44	803,62	Início da Maturidade
15/12/2024	0600	32,25	51,75	997	27,80	6	4,63	831,42	
15/12/2024	1200	32,25	51,75	995	0,00	6	0,00	831,42	
15/12/2024	1800	31,50	51,50	996	86,67	6	14,45	918,09	Início do Decaimento
16/12/2024	0000	30,75	50,00	1001	165,35	6	27,56	1083,44	Ciclólise
Total	54 horas						Média = 20,06 km/h	1083,44 km	

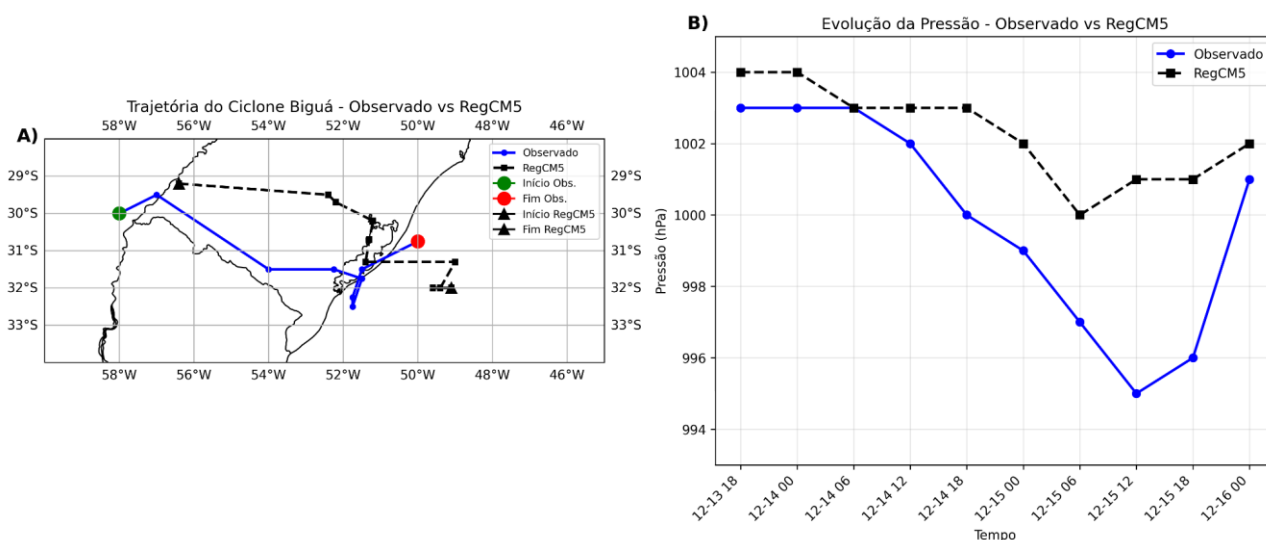


Figura 3 (a) Trajetória do ciclone com gênese no dia 13 de dezembro de 2024 às 18:00 UTC (a posição a cada 6 horas é indicada na figura) e **(b)** variação da PNMM (hPa) no centro do ciclone com base em dados extraídos da reanálise ERA5 (azul) e no modelo RegCM5 (preto tracejado).

Processo de Gênese e Ciclo de Vida

A **Figura 4** mostra cinco estágios do ciclo de vida do ciclone em estudo: (1) pré-ciclogênese, que é o período antes de aparecer a primeira isóbara fechada; (2) ciclogênese, quando aparece a primeira isóbara fechada, (3) maturidade (baixo valor de pressão central), (4) início do processo de decaimento e (5) ciclólise, que nesse estudo foi definida como o momento em que o ciclone de

interesse se conecta com um outro ciclone, o que leva a perda das suas características.

1) Pré-Ciclogênese: O horário das 06:00 UTC do dia 13 de dezembro, isto é, 12 horas antes da gênese do sistema, foi selecionado para mostrar o ambiente precursor do ciclone. Esse horário é caracterizado pela presença da Baixa do Noroeste da Argentina, um sistema termo-orográfico (Escobar e Seluchi, 2012; Fagundes et al., 2021),

de um gradiente horizontal de temperatura em superfície, não muito intenso, no nordeste da Argentina e arredores, indicado pelo espaçamento entre as linhas de espessura da camada 500-1000 hPa, e jatos em 250 hPa (**Figura 4a**): um escoamento a cerca de 35°S e outro em 25°S. O jato mais a norte tem característica subtropical enquanto o do centro da Argentina é devido aos contrastes térmicos, o que pode ser inferido pelos valores elevados de cisalhamento vertical do vento horizontal (**Figura 4b**). Enquanto a altura geopotencial em 250 hPa é mais zonal sobre a Argentina (**Figura 4b**), em 500 hPa mostra um cavado entre esse país e o Paraguai e o RS. Mesmo com o escoamento mais zonal em 250 hPa, há cavados de onda curta que parecem contribuir para a presença de divergência (**Figura 4c**). Em 850 hPa há um escoamento do Paraguai e arredores para o RS e outro em sentido contrário sobre o centro da Argentina; esses escoamentos contribuem para advecções horizontais de ar quente e frio, respectivamente (**Figura 5a**). No período analisado, a camada atmosférica entre 1000 e 500 hPa é bastante úmida entre o Paraguai, Argentina e sul do Brasil e, nesse mesmo local, há movimentos ascendentes em 500 hPa (**Figura 5b**).

2) Ciclogênese: No dia 13 de dezembro às 18:00 UTC, uma isóbara de 1005 hPa torna-se fechada entre o Paraguai, nordeste da Argentina e estado do Rio Grande do Sul, caracterizando a gênese do ciclone (**Figura 4c**). A pressão na **Figura 4c** é maior do que a apresentada na **Figura 3b**, uma vez que representa a isóbara que delimita uma área de baixa pressão, enquanto a **Figura 3b** mostra a menor pressão identificada no centro do sistema. O ciclone localiza-se sobre uma região de fracos contrastes térmicos horizontais e de fraco cisalhamento vertical do vento, mas que está rodeada por áreas com maior cisalhamento vertical (**Figura 4c-d**). Esse fato é mostrado, quando se calcula a média do cisalhamento na área ao redor do ciclone, pois esse chega a 25 m s⁻¹ (**Figura 6**).

A advecção horizontal de temperatura também não mostra o predomínio de um único sinal, de forma que há ar frio e quente na região de gênese (**Figura 5c**). A ciclogênese parece estar associada ao cavado de pequena amplitude (extensão norte-sul) em 250 hPa, que se move para leste, propiciando divergência em altos níveis na região de gênese desde o período pré-ciclogênese (**Figura 4b-d**). Além disso, o ambiente pré-

ciclogênese úmido favoreceu ar menos denso, facilitando os movimentos ascendentes (**Figura 5b-d**). Comparado com o período pré-ciclogênese, o da gênese do ciclone mostra em 850 hPa um escoamento de quadrante norte mais enfraquecido para a região do ciclone (**Figura 5c**), mas que ainda é importante para o transporte de umidade, que é evidenciado pela presença de convergência do fluxo de umidade integrado na vertical na região do ciclone (**Figura 6**). Os ventos a 10 m de altura atingem intensidades superiores a 10 m s⁻¹ (**Figura 6**).

3) Maturidade: No dia 15 de dezembro às 00:00 UTC, o sistema já começa a atingir a maturidade, com pressão central inferior a 1000 hPa (**Figura 3b**). A sequência temporal das imagens do deslocamento do ciclone (a cada 6 horas, mas com apenas 5 tempos mostrados aqui) auxiliou na sua correta localização, pois no horário das 00:00 UTC, surge um segundo centro de baixa pressão na costa do estado de Santa Catarina (**Figura 4e**). A altura geopotencial em 250 hPa mostra amplificação do cavado, com a costa do Rio Grande do Sul a leste de seu eixo, propiciando divergência que mantém o ciclone em superfície (**Figura 4f**). Os ventos em altos níveis mais intensos localizam-se a norte do eixo do cavado (**Figura 4e**). Isso indica que o ciclone está numa região de fraco cisalhamento vertical (~8 m s⁻¹, **Figura 4f, 6**) e, como localiza-se sobre o oceano, os fluxos turbulentos de calor latente e sensível, que somados são de ~143 W m⁻² (figura não mostrada), devem contribuir para a convecção organizada e, conseqüentemente, para a continuidade da queda de pressão na superfície. Esse valor dos fluxos é ligeiramente superior ao da climatologia de Andrelina e Reboita (2021). Em termos de advecção horizontal de temperatura do ar, o giro ciclônico do sistema faz com que predomine advecção quente no lado centro leste da baixa (**Figura 5e**), que também é uma região úmida (**Figura 5f**). O padrão da altura geopotencial e do cisalhamento vertical do vento horizontal aqui descritos segue o padrão de ciclones subtropicais ocorridos no domínio da América do Sul e Atlântico Sul (da Rocha et al., 2019; Ribeiro et al., 2023; Ferreira et al., 2025). O vento a 10 m de altura ultrapassa 17,5 m s⁻¹ ao longo do dia 15 de dezembro (**Figura 6**), o que segundo o NORMAM/701-DHN (2023), permite classificar o ciclone como tempestade subtropical.

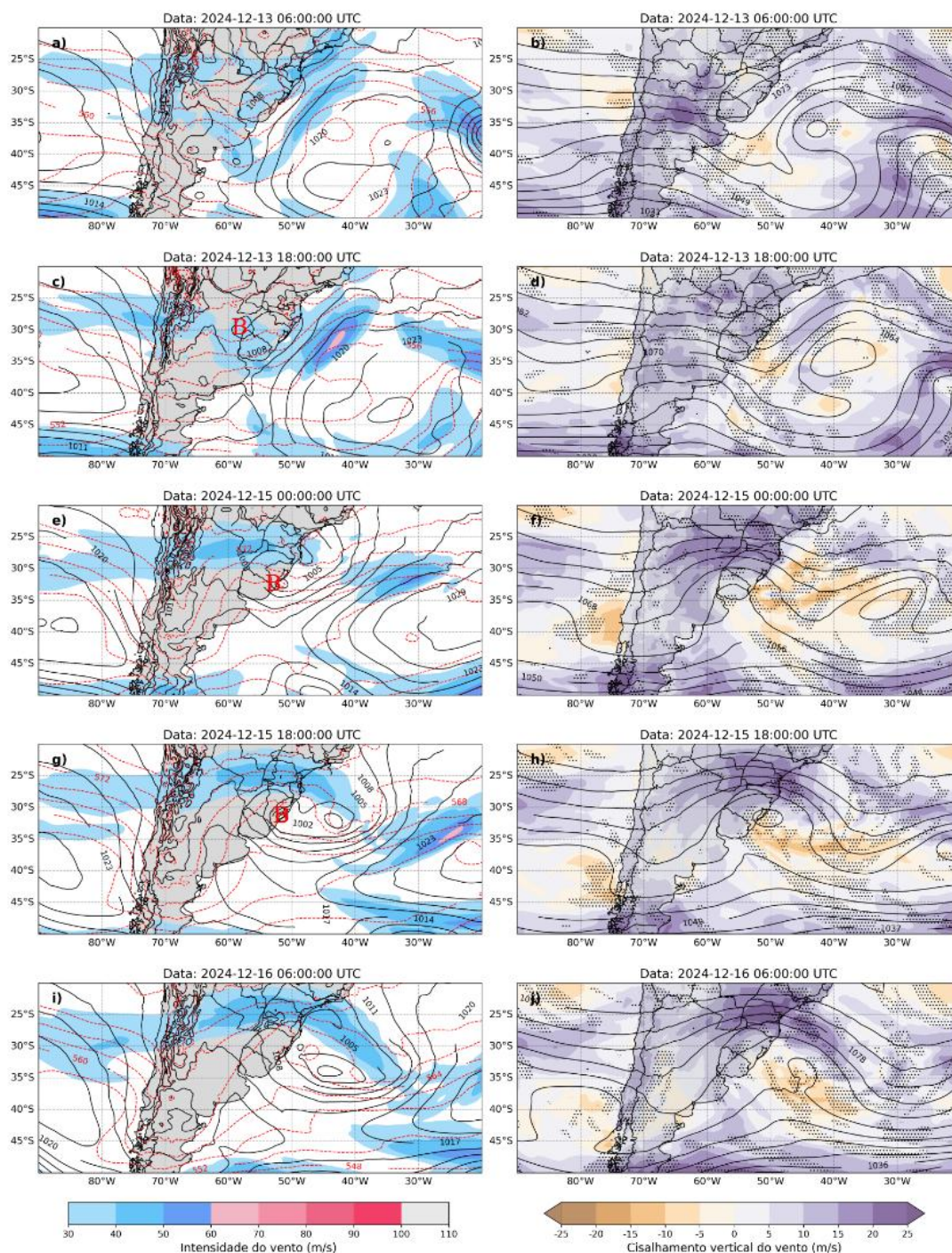


Figura 4 Evolução sinótica do ciclone ocorrido entre os dias 13 e 16 de dezembro de 2024. **(a, c, e, g, i)** PNMM (hPa, linhas pretas), espessura da camada entre 1000–500 hPa (m; linhas tracejadas vermelhas) e jatos em 250 hPa (intensidade $> 30 \text{ m s}^{-1}$; colorido); **(b, d, f, h, j)** cisalhamento vertical do vento horizontal entre 1000-500 hPa (m s^{-1} ; colorido), divergência em 250 hPa $> 1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (pontilhado) e altura geopotencial em 250 hPa (m; linhas pretas). **(a-b)** representam o estágio de pré-ciclogênese; **(c-d)**, a ciclogênese (primeira isóbara fechada); **(e-f)**, o estágio de maturidade (baixo valor de pressão central); **(g-h)**, início do processo de decaimento e **(i-j)** ciclólise, pois o sistema de interesse se conecta com outro ciclone. A letra B indica a posição do ciclone.

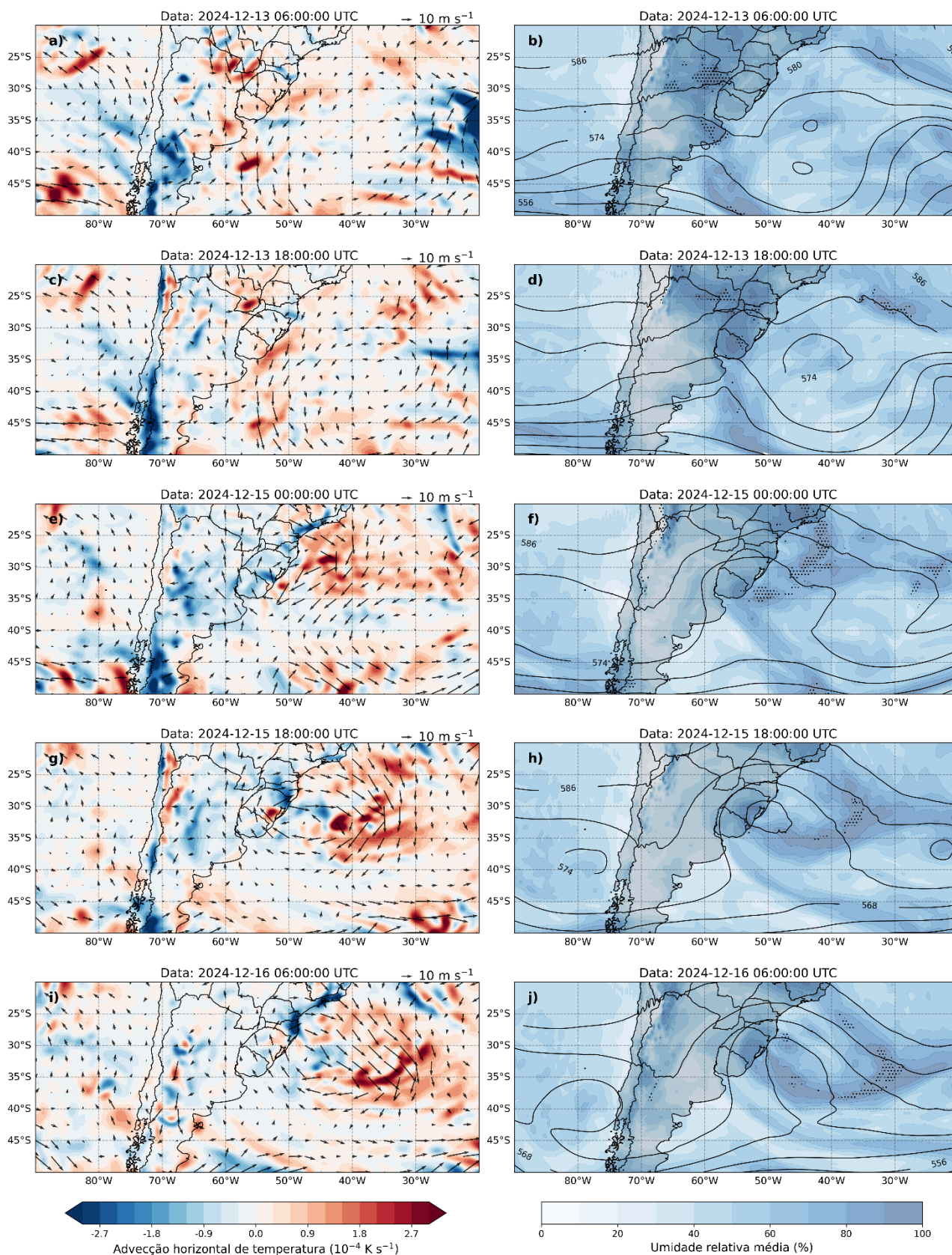


Figura 5 Similar à Figura 4, mas para (a, c, e, g, i) a advecção horizontal da temperatura (10^{-4} K s^{-1} ; colorido) e direção e intensidade do vento (m s^{-1} , setas) em 850 hPa, e (b, d, f, h, j) umidade relativa média entre 1000-500 hPa (%; colorido), altura geopotencial em 500 hPa (m, linhas pretas) e velocidade vertical ascendente em 500 hPa (valores inferiores a -6 Pa s^{-1} ; pontilhado).

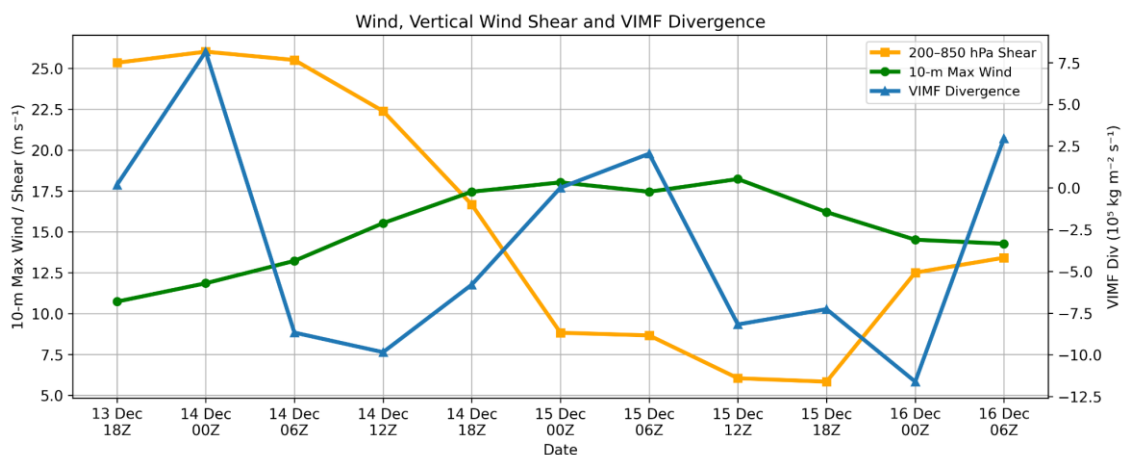


Figura 6 Variáveis ao longo do ciclo de vida do ciclone: vento de máxima intensidade a 10 m de altura (m s^{-1}) e média do cisalhamento vertical do vento horizontal 200-850 hPa (m s^{-1}) e da divergência do fluxo de umidade integrada entre 1000-500 hPa ($10^5 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). A cada passo de tempo é construída uma caixa, em que o centro corresponde às coordenadas do ciclone, e se estendendo para 5° nas direções norte, sul, leste e oeste.

4) Início do Processo de Decaimento: O dia 15 de dezembro às 18:00 UTC é considerado o início do decaimento, pois a pressão no centro do ciclone torna-se mais alta depois de ter atingido um mínimo às 12:00 UTC (**Figura 3b**). Além disso, o vento máximo a 10 m já não excede $17,5 \text{ m s}^{-1}$ (**Figura 6**). Às 18:00 UTC, há uma configuração que se assemelha a de *cutoff low* na altura geopotencial em 250 hPa (**Figura 4h**). Além disso, o centro do cavado se localiza numa área que os ventos bifurcam, as maiores intensidades estão a norte e sul do sistema. Como o cavado/*cutoff low* se desloca para leste, o seu centro se acopla com a baixa em superfície (**Figura 4g**) e a maior parte dessa região é dominada por fraco cisalhamento vertical do vento (**Figura 4h**). Devido à vortacidade ciclônica, no lado leste do sistema predomina a advecção de ar quente em baixos níveis da atmosfera, sendo também a região com os ventos mais intensos (**Figura 5g**); que é uma característica típica dos ciclones subtropicais no oceano Atlântico Sul (Reboita et al., 2019). Destaca-se, ainda, que o local de máxima advecção quente também concentra os máximos de umidade na região do ciclone (**Figura 5h**).

5) Ciclólise: No dia 16 de dezembro às 00:00 UTC, o sistema se une ao ciclone originado na costa de Santa Catarina e que se deslocou para sudeste (**Figura 4i**). Essa junção altera a configuração espacial do ciclone e, portanto, neste estudo, considera-se seu final

Classificação do Ciclone

A **Figura 7** apresenta o CPS do ciclone em estudo. De acordo com os limiares estabelecidos para ciclones subtropicais no Atlântico Sul (vide metodologia), o sistema em análise pode ser classificado como subtropical em todo o seu ciclo de vida. O CHN definiu a gênese do ciclone no dia 14 e o classificou como tempestade subtropical no dia 15 de dezembro entre às 0000 e 1200 UTC e deste último horário ao dia 16 às 12:00 UTC como depressão subtropical. De acordo com o NORMAM/701-DHN (2023), depressão subtropical são os ciclones híbridos com ventos inferiores a 34 nós (63 km/h ou $17,5 \text{ m s}^{-1}$) ou Força 7 na Escala Beaufort e tempestade subtropical quando os ventos atingem intensidade igual ou superior a 34 nós (63 km/h) ou Força 8 na Escala Beaufort. Como o ciclone apresentava potencial perigo, pois se manteve na costa do Brasil, o CHM o nomeou, seguindo a lista de nomes por eles definida. Assim, o ciclone foi chamado de Biguá (do tupi guarani “ave marinha”).

A diferença no período do ciclone e na classificação entre o presente estudo e o CHM é devido ao fato de que aqui são utilizados os produtos reavaliados, como a reanálise ERA5, na definição do ciclone. Já o serviço realizado no CHM utiliza informações em tempo quase real, como as análises atmosféricas do modelo *Global Forecasting System* (GFS), que podem conter inconsistências. Mesmo assim, ambos os estudos convergem para o fato de que o ciclone foi subtropical. Até essa seção, não se tinha atribuído o nome ao ciclone, pois era necessário realizar a análise do CPS para confirmação da característica subtropical.

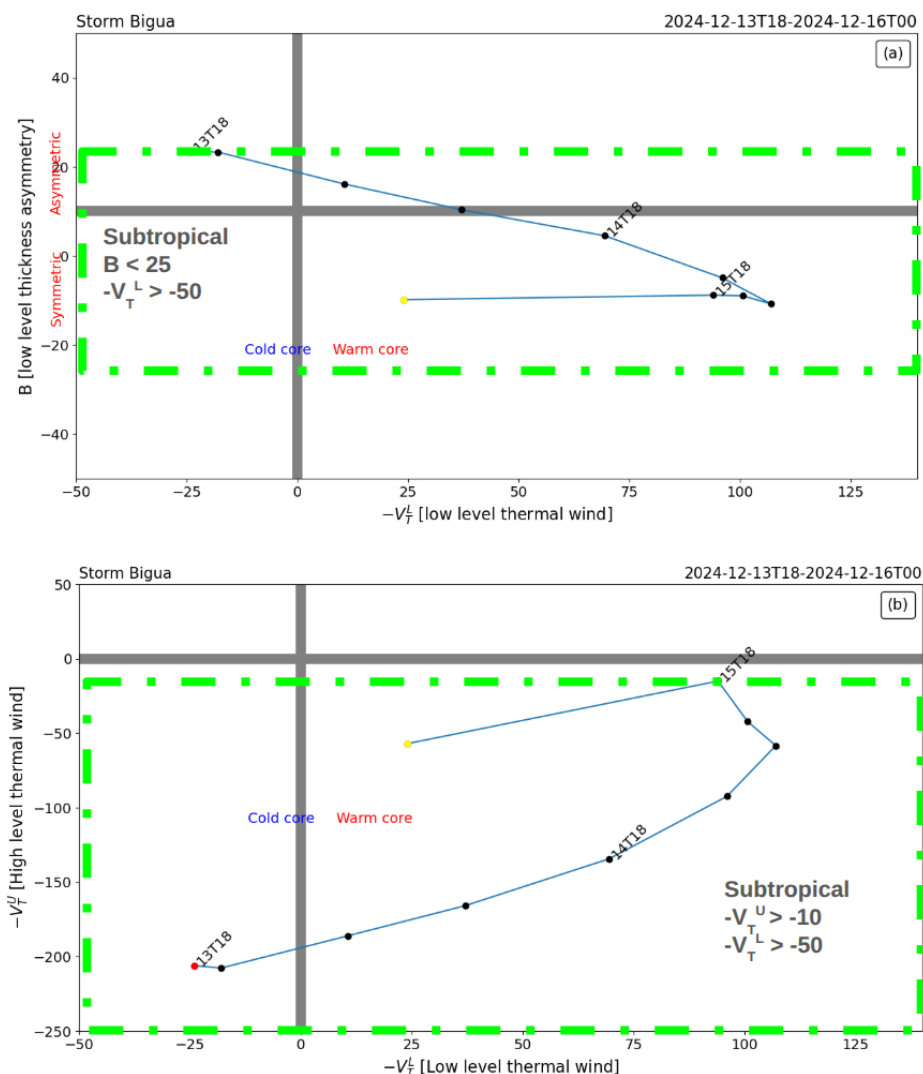


Figura 7 Diagrama de fase do ciclone (*Cyclone Phase Space - CPS*) entre 13 de dezembro de 2024 às 18:00 UTC e 16 de dezembro de 2024 às 00:00 UTC. **(a)** diagrama $B \times -|V_T^L|$ e **(b)** diagrama $-|V_T^U| \times -|V_T^L|$. A linha tracejada verde delimita a área do CPS indicativa de ciclones subtropicais sobre o oceano Atlântico Sul. O círculo vermelho marca o primeiro tempo de vida do ciclone, o círculo amarelo, o tempo final, e os círculos pretos representam os tempos intermediários.

Características de Mesoescala do Ciclone e Validação do RegCM5

a) Variáveis obtidas de Radar: Na **Figura 2** foi mostrado que os ventos produzidos pelo ciclone foram mais intensos no RS no dia 15, quando o centro do sistema já se encontrava na costa (**Figuras 2-5**). A fim de explorar as características de mesoescala do ciclone no dia 15, as **Figuras 8 e 9** mostram informações de radar: a refletividade corrigida (dBZ) no CAPPI de 3 km, o que permite identificar regiões convectivas, e a velocidade radial do vento (m s^{-1}) no primeiro PPI, que permite inferir sobre o deslocamento do sistema e possível rotação das nuvens convectivas, respectivamente. Não há informação sobre toda a área do radar, por falhas instrumentais. Mesmo assim, é possível

verificar a assinatura de centros convectivos associados ao ciclone (refletividade acima de 35 dBZ) juntamente com sinais de aproximação e afastamento de centros convectivos com base na variável de velocidade radial.

Às 12:06 UTC (**Figura 8d**), o sistema exibe as características de formação de centros convectivos no formato de arco, com refletividade superior a 50 dBZ, um indicador de ventos fortes (Klimowski et al., 2004). Simultaneamente (**Figura 9d**), nota-se o surgimento de núcleos de ventos afastando-se (vermelho) e aproximando-se (azul) do radar com velocidades superiores a 20 m s^{-1} , indicativo do deslocamento do sistema. Entre 12:06 UTC e 15:06 UTC (**Figuras 9d-g**), o deslocamento do sistema torna-se ainda mais

pronunciado, exibindo um padrão de dipolo bem definido sobre o centro do radar. Isso caracteriza o movimento do ciclone para leste e nordeste (**Figura 2a**). O arco de refletividade avança (**Figura 8d-g**) acompanhando a velocidade radial (**Figura 9d-g**).

A partir das 15:36 UTC, o arco na refletividade começa a enfraquecer, mas pequenos

núcleos convectivos com valores próximos a 40 dBZ ainda estão configurados (**Figura 8h**). Às 16:36 UTC, o sistema perde a forma de arco e os núcleos de refletividade apresentam valores inferiores a 40 dBZ (**Figura 8i**). Após as 18:06 UTC ocorre a transição para um padrão de refletividade mais estratiforme e a desorganização do campo de ventos (**Figuras 8j-l e 9j-l**).

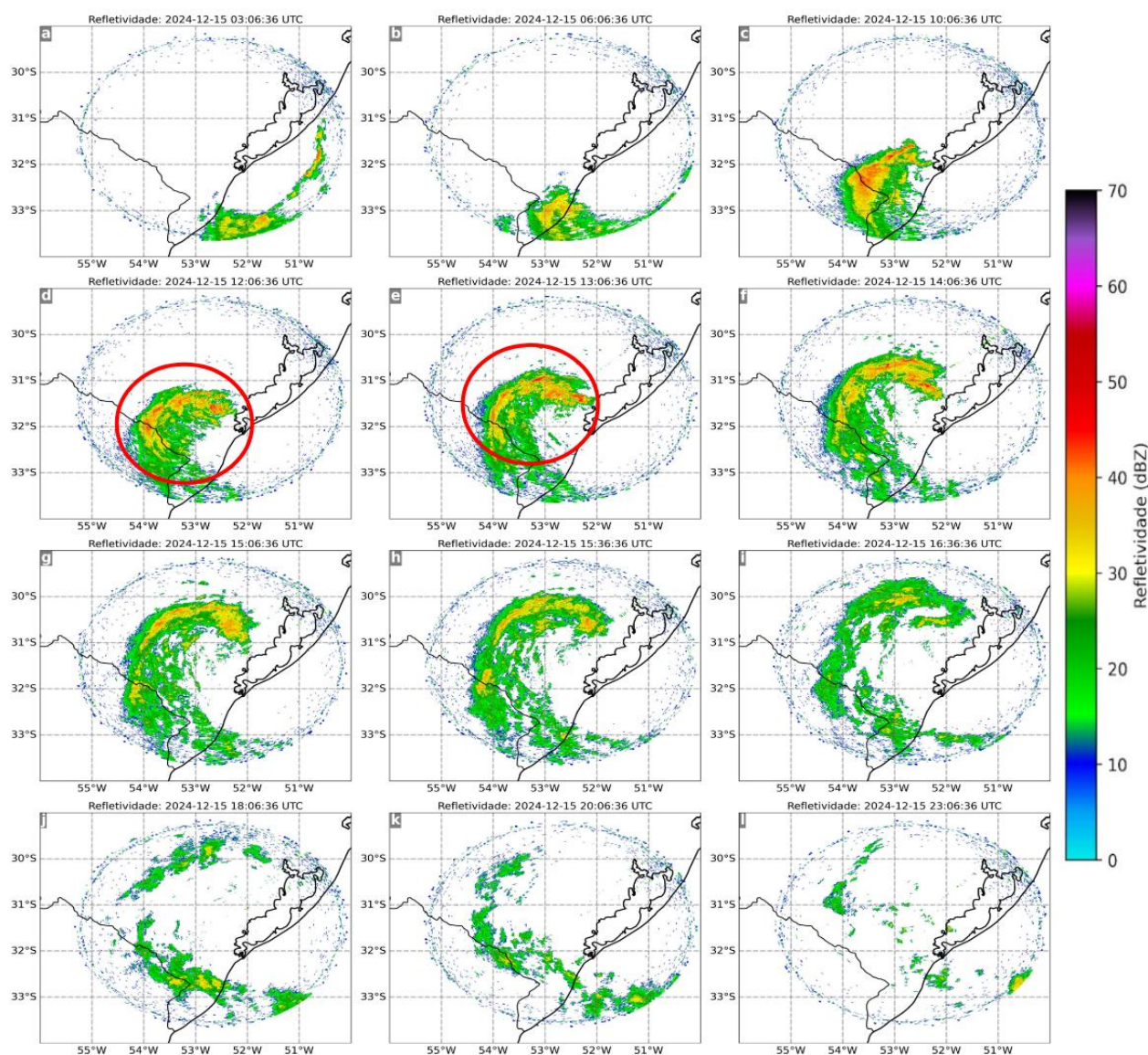


Figura 8 Refletividade corrigida (dBZ) no CAPPI (3 km de altitude) do radar de Canguçu (RS) em diferentes horários do 15 de dezembro de 2024.

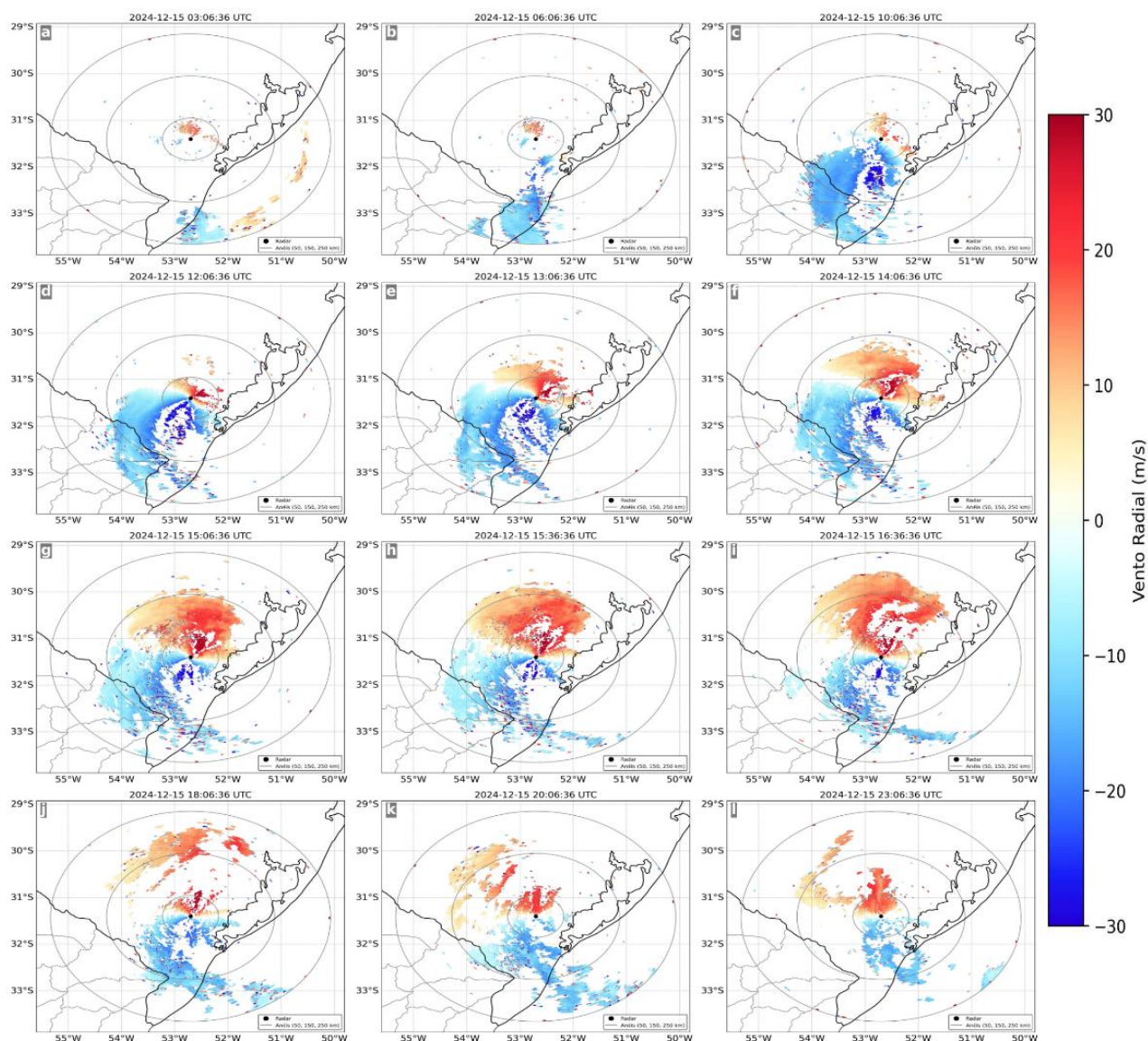


Figura 9 Velocidade radial do vento (m s^{-1}) obtida utilizando o radar de Canguçu em nível PPI, com ângulo de elevação de $0,5^\circ$, no dia 15 de dezembro de 2024. Os valores negativos (azul) indicam ar aproximando-se do radar e valores positivos (vermelho) indicam ar afastando-se. Os círculos concêntricos indicam as distâncias de 50, 150 e 250 km em relação ao radar.

b) Validação do RegCM5: Na **Figura 3**, juntamente com as informações extraídas da reanálise, são apresentados os resultados da simulação do ciclone com o modelo RegCM5 em modo CP. A gênese do ciclone simulado ocorre ligeiramente a leste da posição registrada na reanálise, enquanto a trajetória do centro de menor pressão apresenta um deslocamento para norte em relação à ERA5 (**Figura 3a**). Embora visualmente pareça haver uma grande diferença entre as trajetórias, a distância entre elas é inferior a 200 km, valor relativamente pequeno considerando a dimensão espacial do ciclone, que abrange uma grande parte do Rio Grande do Sul e áreas adjacentes. Em relação à pressão atmosférica no

centro do sistema, o RegCM5 a subestima ao longo de todo o ciclo de vida do ciclone, simulando um sistema menos intenso em comparação com a reanálise (**Figura 3b**).

Ainda são escassos os estudos que avaliam o desempenho de modelos em modo CP na simulação de ciclones e, principalmente no Atlântico Sul (Magalhães et al., 2025), e de suas estruturas de mesoescala, de modo que este trabalho contribui para preencher essa lacuna na literatura. O fato de o modelo simular o centro do sistema mais ao norte e menos intenso não significa, necessariamente, que ele não seja capaz de representar adequadamente o padrão espacial e a evolução temporal de outras variáveis

meteorológicas. Assim, na sequência, são apresentadas as validações da precipitação e dos ventos a 10 m de altura.

A validação é iniciada mostrando o dia 15 de dezembro de 2024, que foi selecionado por apresentar ventos mais intensos e refletividade na forma de arco no RS (latitudes entre 30° e 33°S). Para esse dia, a chuva acumulada entre 10:00 e 22:00 UTC (por limitação dos dados do radar não foi possível definir um período de 24 horas) é comparada com três conjuntos de dados: a chuva estimada pelo radar obtida com a relação Z-R de Marshall-Palmer, as estimativas do produto PERSIANN e com as estações meteorológicas do INMET (**Figura 10**).

A estimativa de radar (**Figura 10a**) mostra precipitação na região que se estende da fronteira do RS com o Uruguai (~32°S e 54°W), com acumulados de 50 mm, para o centro-sul do estado (~30°-31°S e 54°-52°W), com acumulados de cerca de 15 a 20 mm, coincidindo com a localização do máximo mostrado no campo de refletividade em formato de arco (**Figura 8**). O PERSIANN (**Figura 10b**), embora mostre uma área mais extensa de chuva no centro-sul do RS, indica magnitudes próximas às do radar. Por outro lado, os dois conjuntos de dados subestimam a precipitação comparados com as estações do INMET, que mostram acumulados de 58 mm

(Jaguarão) próximo ao máximo de 50 mm nos demais dados e 52 mm (Canguçu) na região em que a refletividade apresenta forma de arco (**Figura 10c**). A norte de 30°S não há registro de precipitação nas estimativas do radar e do PERSIANN, enquanto baixos acumulados (< 14 mm) foram registrados nas estações meteorológicas. Essa diferença destaca a incerteza que se tem nos conjuntos de dados utilizados na validação de modelos (Cavazos et al., 2024). Muitas vezes pode-se atribuir uma performance baixa para os modelos, não pelo desempenho deles, mas pela qualidade dos dados com os quais são comparados.

No caso da simulação do RegCM5 em modo CP (**Figura 10c**) é representado o padrão espacial da chuva descrito nos dados do radar e PERSIANN, mas com superestimativas. Por outro lado, o modelo se aproxima mais das estações do INMET. Na região a cerca de ~32°S e 54°W, o modelo simula acumulados entre 75 a 100 mm, enquanto na região da refletividade em forma de arco, entre 50 e 75 mm. Nesta última, os valores são mais próximos aos observados pela estação meteorológica de Canguçu. Apesar dessa boa performance do modelo, há um viés úmido a norte de 30°S, onde nas estações do INMET os acumulados variam entre 0 e 14 mm e no RegCM5 são superiores a 150 mm.

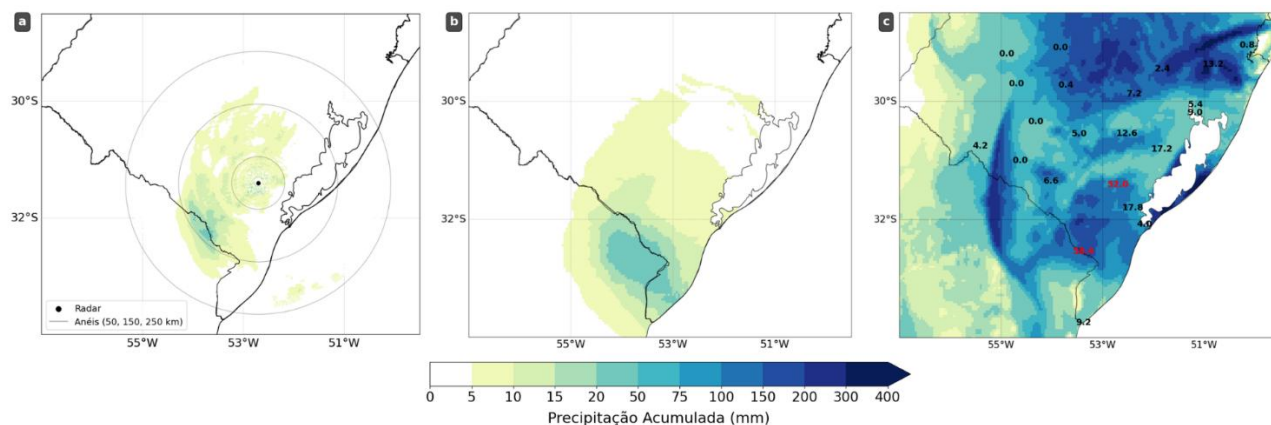


Figura 10 Precipitação acumulada (mm) no dia 15 de dezembro de 2024 entre 10:00 e 22:00 UTC. (a) Precipitação obtida pelo radar de Canguçu (RS) em nível CAPPI (3 km), sendo que os valores representam a integração temporal da taxa de chuva via relação de Marshall-Palmer. Os círculos concêntricos indicam as distâncias de 50, 150 e 250 km em relação ao radar; (b) precipitação do produto PERSIANN e (c) precipitação simulada pelo modelo RegCM5 e observações das estações meteorológicas do INMET. Os pontos vermelhos indicam estações com precipitação ≥ 20 mm.

A intensidade e direção do vento nos horários das 06:00 e 18:00 UTC do dia 15 de dezembro são apresentadas na **Figura 11**. Embora o padrão espacial da intensidade do vento não seja tão similar ao da ERA5, os valores simulados se assemelham aos das estações meteorológicas. Por

exemplo, no horário das 18:00 UTC, o RegCM5 simula ventos próximos aos máximos de $11,1 \text{ m s}^{-1}$ em Caçapava do Sul (estação 7) e $11,4 \text{ m s}^{-1}$ em Canguçu (estação 5), **Figura 11b**. O modelo também mostra um máximo de ventos próximo a 51°W (entre o norte da Laguna dos Patos e as

latitudes do extremo sul do RS, que variam de 14 a mais de 20 m s^{-1} (72 km h^{-1}), e não aparece na ERA5 (**Figura 11b**). Esse é o destaque para o uso de modelos em modo CP, pois permitem representar estruturas que não aparecem em dados com resolução espacial mais grosseira. Esse máximo de vento simulado é coerente com as estimativas diárias de vento sobre o oceano do OSCAT3, que indicam ventos com intensidade variando de 10 a mais de 25 nós ($\sim 47 \text{ km h}^{-1}$) (**Figura 12**). Portanto, dessa análise conclui-se que os modelos em modo CP podem trazer informações úteis, principalmente para a navegação.

É interessante destacar que os três conjuntos de dados em análise (RegCM5, PERSIANN e INMET) mostram ventos mais intensos no centro-sul do RS. Por outro lado, muitas notícias da mídia (vide introdução) destacaram mais impactos associados aos ventos do ciclone nos arredores de Porto Alegre no dia 15 de dezembro (mas sem mencionar a hora das ocorrências). Às 18:00 UTC desse dia, hora dos máximos ventos observados na ERA5 e no modelo,

os ventos registraram intensidade de 3,7 e 6,8 m s^{-1} (13 e 25 km h^{-1}) nas estações de Porto Alegre; valores ligeiramente intensos. Entretanto, destaca-se que rajadas de vento muitas vezes estão associadas a tempestades muito localizadas, não sendo as informações capturadas pelas estações meteorológicas. Por isso, a magnitude dos estragos reportados pela mídia podem parecer não tão coerentes com a intensidade do vento registrada pelas estações meteorológicas.

Para uma validação mais robusta do RegCM5, selecionaram-se as séries temporais simuladas do local de oito estações meteorológicas para representar a evolução temporal das variáveis precipitação, intensidade do vento a 10 m e de suas componentes zonal e meridional. Essa evolução é mostrada desde antes da formação do ciclone (dia 11) até após a sua ciclólise (dia 17) (**Figura 13**). Já as métricas de validação (correlação de Pearson (r), raiz do erro médio quadrático (RMSE) e viés) são apresentadas na **Tabela 3**.

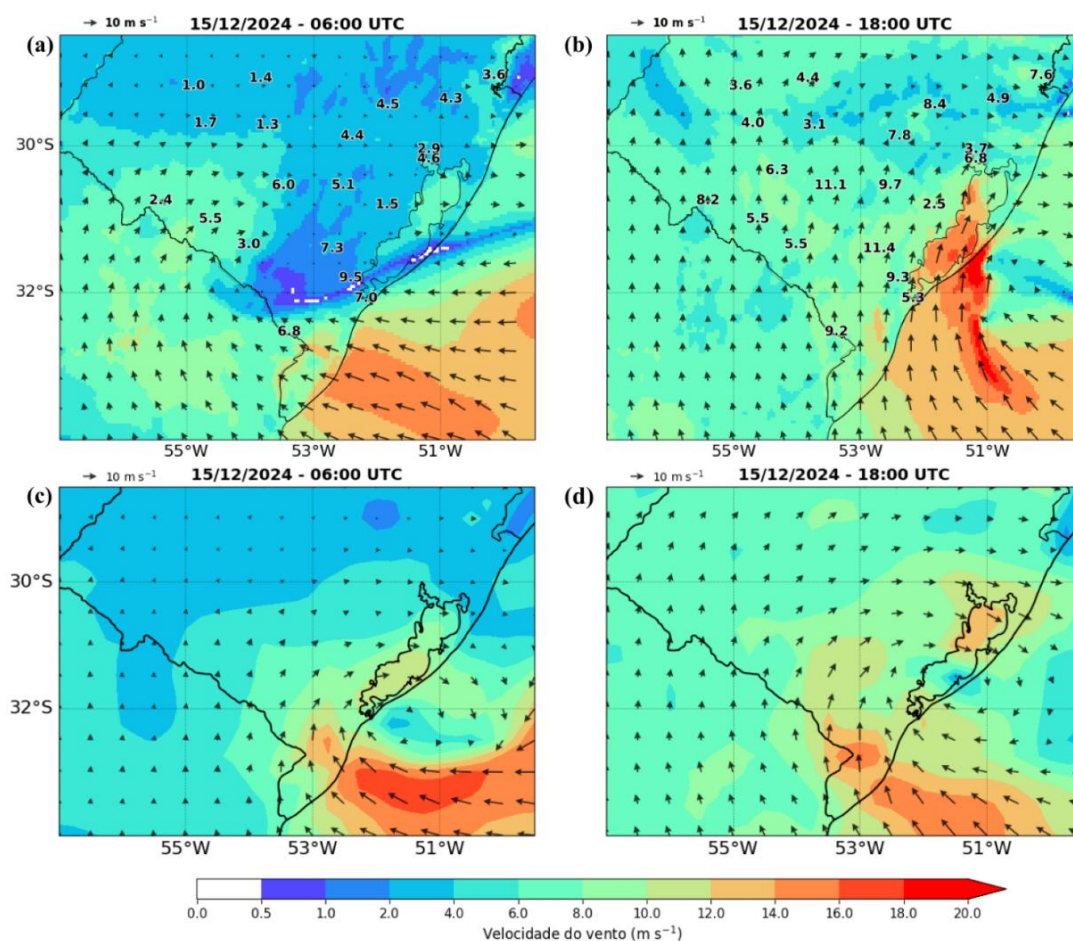


Figura 11 Intensidade (m s^{-1} ; cores) e direção do vento (setas) a 10 m de altura para no dia 15 de dezembro de 2024 nos horários de 06:00 UTC e 18:00 UTC. (a) e (b) apresentam a simulação RegCM5 e valores observados nas estações meteorológicas do INMET (pontos). (c) e (d) apresentam o vento da reanálise ERA5.

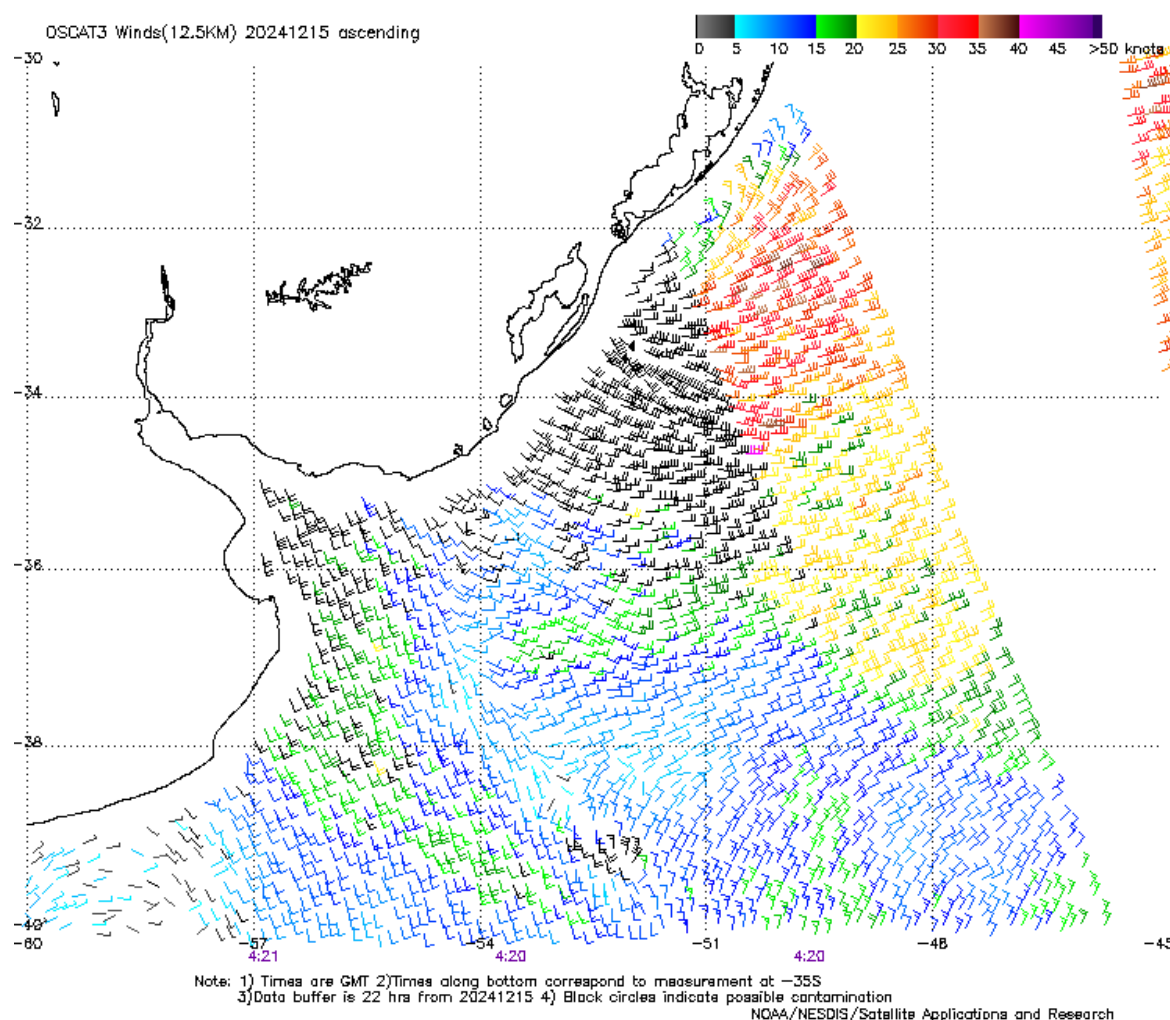


Figura 12 Estimativas de intensidade (nós) e direção (barbelas) dos ventos do produto OSCAT3 no dia 15 de dezembro de 2024.

A **Figura 13** mostra que a performance do RegCM5 varia conforme a localização geográfica das estações meteorológicas: para as estações próximas às regiões litorâneas ou à Laguna dos Patos, o modelo superestimou a intensidade do vento, enquanto no interior ocorreu subestimativa, com o valor de viés entre $-1,5$ e $3,1 \text{ m s}^{-1}$ (**Tabela 3**). Os valores de RMSE variam de $1,5$ a $3,4 \text{ m s}^{-1}$, com maiores desvios nas estações do centro-sudeste do RS (Camaquã: $3,4 \text{ m s}^{-1}$; Capão do Leão: $3,0 \text{ m s}^{-1}$; Rio Grande: $2,5 \text{ m s}^{-1}$) (**Tabela 3**). Esta foi a região na qual o Biguá teve maior impacto, sendo registradas rajadas de vento de 84 km h^{-1} em Canguçu, 83 km h^{-1} em Caçapava do Sul e 81 km h^{-1} em Capão do Leão (Redação RS, 2024). Para a componente zonal (u) (**Figura 13 a2-h2**), que é indicativa de ventos de oeste e leste, o modelo apresenta viés negativo e para a componente meridional (v) (**Figura 13a3-h3**),

ventos de norte e sul, apresenta, em geral superestimativa. Estações como Caçapava do Sul ($r = 0,8$), Canguçu ($r = 0,5$) e Bagé ($r = 0,8$) mostram que o modelo consegue reproduzir bem a evolução temporal da componente meridional, embora existam vieses de magnitude dos picos de vento. A precipitação (**Figura 13 a4-h4**) foi a variável com o menor desempenho do modelo, apresentando correlações mais baixas ($0,1$ a $0,4$) e viés negativo indicando subestimativa da chuva associada ao ciclone em quatro das oito estações. O maior viés absoluto ocorreu em Jaguarão ($-0,4 \text{ mm/h}$), conforme destaque na **Figura 13e4**. Em suma, a principal informação obtida com a **Figura 13** é que o RegCM5 em modo CP consegue reproduzir a variabilidade temporal das variáveis em análise, mesmo para a precipitação, o modelo consegue registrar a chuva nos horários ou próximo ao da ocorrência dessa.

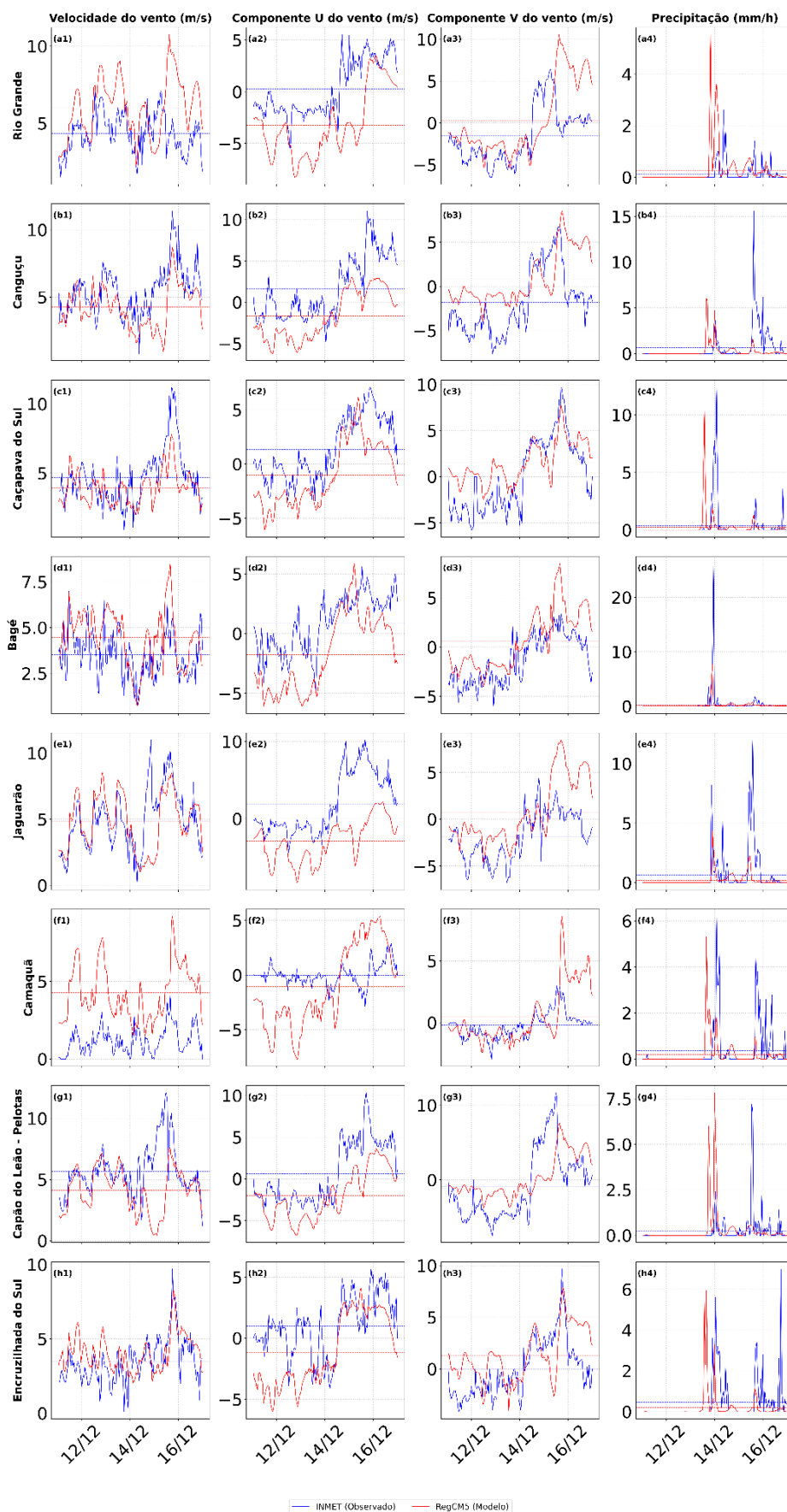


Figura 13 Séries temporais das variáveis horárias: intensidade do vento a 10 m (m s^{-1}), componente zonal do vento (u , m s^{-1}), componente meridional do vento (v , m s^{-1}) e precipitação (mm), de 11 a 17 de dezembro de 2024, obtidas das estações meteorológicas do INMET (linha azul) e simulação do RegCM5 (linha vermelha) para as estações: **(a1–a4)** Rio Grande; **(b1–b4)** Canguçu; **(c1–c4)** Caçapava do Sul; **(d1–d4)** Bagé; **(e1–e4)** Jaguarão; **(f1–f4)** Camaquã; **(g1–g4)** Capão do Leão - Pelotas; **(h1–h4)** Encruzilhada do Sul.

Tabela 3 Estatísticas (r, viés e RMSE) de desempenho do RegCM5 para a intensidade do vento, componentes zonal e meridional e precipitação horária no local de oito estações do INMET.

Estações	Velocidade do vento ($m s^{-1}$)			Componente u ($m s^{-1}$)			Componente v ($m s^{-1}$)			Precipitação ($mm h^{-1}$)		
	r	viés	RMSE	r	viés	RMSE	r	viés	RMSE	R	viés	RMSE
Rio Grande	0,4	1,7	2,5	0,7	-3,5	4,3	0,5	1,8	4,4	0,2	0,2	0,8
Canguçu	0,6	-1,2	2,0	0,8	-3,3	4,0	0,5	2,7	4,3	0,1	-0,4	1,9
Caçapava do Sul	0,6	-0,8	1,7	0,9	-2,4	2,8	0,8	1,5	3,0	0,1	-0,1	1,8
Bagé	0,6	1,0	1,6	0,8	-2,6	3,3	0,8	1,9	2,7	0,4	-0,2	2,2
Jaguarão	0,5	-0,1	2,2	0,6	-4,8	5,7	0,6	2,6	3,7	0,4	-0,4	1,7
Camaquã	0,5	3,1	3,4	0,2	-1,0	3,9	0,5	0,7	2,1	0,1	-0,2	1,1
Capão do Leão - Pelotas	0,1	-1,5	3,0	0,7	-2,6	3,6	0,6	1,1	4,0	0,2	0,1	1,2
Encruzilhada do Sul	0,5	0,6	1,5	0,6	-2,2	3,2	0,5	1,4	2,9	0,1	-0,3	1,3

Embora o RegCM5 em modo CP tenha capturado a variabilidade temporal do vento e da precipitação, há vieses em intensidade (superestimativas e subestimativas). Sugere-se que, em parte, esses vieses podem refletir limitações na representação dos processos turbulentos da camada limite planetária e da interação atmosfera-superfície, além de possíveis influências da própria geografia peculiar da região, que conta com topografia acidentada principalmente no nordeste do RS e área costeira. Ainda no caso da precipitação, o expressivo viés úmido simulado ao norte de 30°S (onde os acumulados superaram 150 mm, contrariando as observações do INMET), pode ter influência das limitações no esquema de microfísica utilizado (Nogherotto/Tompkins). Em resoluções de 4 km, embora a convecção profunda seja resolvida explicitamente, processos de escala de subgrade (como microfísica de nuvens e interações com o relevo do Planalto Sul-Rio-Grandense) ainda dependem de parametrizações como de formulações de partição de fases de água.

Conclusões

O presente estudo permitiu caracterizar a formação, evolução e dissipação do ciclone subtropical Biguá, que atuou sobre o RS, com gênese às 18:00 UTC do dia 13 de dezembro de 2024 e ciclólise às 00:00 UTC do dia 16 de dezembro de 2024, no momento em que se uniu a outro ciclone. Os principais resultados obtidos estão sintetizados a seguir:

Mecanismo de gênese: A ciclogênese ocorreu sobre o continente, entre o Paraguai, o nordeste da Argentina e o oeste do Rio Grande do Sul. O sistema desenvolveu-se associado a um cavado de pequena amplitude em altos níveis da troposfera, que promoveu divergência de massa e favoreceu a intensificação da baixa pressão em superfície. Posteriormente, esse cavado evoluiu para uma baixa despreendida (*cutoff low*), estabelecendo um ambiente de fraco cisalhamento vertical do vento horizontal ($< 10 m s^{-1}$), condição que favoreceu a organização, manutenção e persistência da atividade convectiva ao longo do ciclo de vida do ciclone.

Classificação do Ciclone: A metodologia do CPS mostrou que o ciclone teve característica de sistema subtropical durante todo o seu ciclo de vida, corroborando as análises sinóticas realizadas.

Performance do RegCM5 (Simulação de Chuva e Vento): Em termos de trajetória e pressão atmosférica no centro do ciclone, o RegCM5 em modo CP deslocou a trajetória ligeiramente para norte e subestimou a pressão central. Entretanto, a representação da intensidade do vento e da precipitação no centro-sul do RS foi mais similar às estações do INMET do que às estimativas do radar e do PERSIANN que mostraram menos chuva que as estações meteorológicas. Destaca-se que o modelo em modo CP simulou ventos intensos próximos à costa do RS que não foram capturados pela reanálise, mas estavam presentes nas estimativas do OSCAT3. Além disso, na análise correspondente ao local de oito estações meteorológicas, as métricas estatísticas indicaram

performance satisfatória do modelo na representação da evolução temporal das variáveis (intensidade do vento a 10 m, componentes zonal e meridional do vento e precipitação), embora com subestimativa no caso da precipitação. Mesmo assim, sugere-se mais testes de configuração para melhor representação dos ciclones no sul do Brasil.

Os resultados deste estudo reforçam a relevância de redes de monitoramento meteorológico densas, contínuas e de alta qualidade, capazes de fornecer dados com frequência temporal e resolução espacial compatíveis com as exigências dos modelos numéricos de alta resolução. No caso analisado, os impactos mais expressivos associados ao ciclone foram relacionados aos ventos intensos, mais do que aos acumulados de precipitação, conforme reportado por veículos de mídia. Tal constatação evidencia a importância do monitoramento observacional para a identificação e previsão dos ciclones e de suas estruturas de mesoescala associadas, frequentemente responsáveis pelos eventos de tempo adverso que afetam a sociedade. Investimentos em observação atmosférica constituem, portanto, um elemento fundamental para o avanço da previsão do tempo e para a mitigação dos impactos de eventos meteorológicos extremos.

É importante destacar que este estudo apresenta algumas limitações. Primeiramente, a ERA5, embora amplamente utilizada como conjunto de dados de referência, resulta da assimilação de observações em um modelo numérico de previsão do tempo e, portanto, está sujeita às incertezas inerentes ao processo de modelagem. Isso ficou evidente na ausência da faixa de ventos intensos próxima à costa em 15 de dezembro, estimada pelo produto OSCAT-3 e reproduzida pelo RegCM5. Além disso, os dados derivados de satélite e radar utilizados na caracterização do ambiente e na validação do modelo constituem estimativas sujeitas às limitações de seus respectivos algoritmos. No caso do PERSIANN, a precipitação é estimada por meio de redes neurais artificiais aplicadas principalmente à temperatura de brilho do topo das nuvens obtida por sensores infravermelhos. Consequentemente, o produto pode subestimar precipitações associadas a nuvens quentes e rasas, cuja assinatura em infravermelho é pouco expressiva, e superestimar a precipitação quando topos de nuvens muito frios, como cirrus de alta altitude, não estão efetivamente associados à chuva na superfície (Hong et al., 2004; Nguyen et al., 2018). Por fim, embora tenham sido realizados testes de sensibilidade para a seleção das

parametrizações físicas empregadas, essas representações simplificadas dos processos atmosféricos permanecem como uma fonte de incerteza e podem influenciar a qualidade das simulações.

Os resultados obtidos fornecem subsídios práticos diretamente aplicáveis aos sistemas de monitoramento e previsão operacional no sul do Brasil. A identificação de que o ciclone Biguá gerou ventos intensos de até 84 km h^{-1} serve de alerta para os previsores, pois a gravidade dos impactos costeiros e continentais de ciclones não deve ser mensurada apenas pelo gradiente baroclínico.

Por fim, destaca-se que o estudo contribui no avanço do conhecimento, uma vez que apresenta contribuições inéditas em termos do entendimento da dinâmica do ciclone subtropical Biguá e do desempenho do RegCM5 em modo de convecção permitida, bem como das limitações encontradas.

Agradecimentos: Os autores agradecem aos centros meteorológicos que disponibilizam os dados usados nesse estudo e ao CNPq e FAPEMIG pelos recursos usados na infraestrutura computacional do nosso laboratório de trabalho.

Referências

- Agora RS. (2024, 16 de dezembro). Ciclone provoca queda de árvores e destelhamento no RS. <https://agorars.com/agora-no-tempo/ciclone-provoca-queda-de-arvores-e-destelhamento-no-rs/>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Andreina, B., & Reboita, M. S. (2021). Climatologia do Índice do Potencial de Gênese de Ciclones Tropicais nos Oceanos Adjacentes à América do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências* 44. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_39515.
- Araujo, C. de S. (2018). Relação entre raios e microfísica para potencial uso em assimilação de dados. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. Repositório Institucional do INPE. <http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/05.30.22.01/doc/publicacao.pdf>
- Arsenis, S. T., Siozos, A. I., & Nastos, P. T. (2025). Thermodynamic Study of a Mediterranean Cyclone with Tropical Characteristics in September 2020. *Atmosphere*, 16(6), 722. <https://doi.org/10.3390/atmos16060722>

- Becker, E. L. S., & Nunes M. P. (2012). Relevo do Rio Grande do Sul, Brasil, e sua representação em maquete. *Revista Percursos - NEMO*, 4(2), 113-132. <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/Percursos/article/view/49542>
- Bieli, M., Camargo, S. J., Sobel, A. H., Evans, J. L., & Hall, T. (2019). A Global Climatology of Extratropical Transition. Part I: Characteristics across Basins. *Journal of Climate*, 32(12), 3557-3582. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0518.1>
- Bieli, M., Sobel, A. H., Camargo, S. J., Murakami, H., & Vecchi, G. A. (2020). Application of the cyclone phase space to extratropical transition in a global climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(4), e2019MS001878. <https://doi.org/10.1029/2019MS001878>
- Brasil de Fato. (2024, 16 de dezembro). Ciclone subtropical Biguá deixa milhares de gaúchos sem luz, queda de árvores e destelhamento. <https://www.brasildefato.com.br/2024/12/16/ciclone-subtropical-bigua-deixa-milhares-de-gauchos-sem-luz-queda-de-arvores-e-destelhamento/>
- Calheiros, A.J.P., Enoré, D.P., Mattos, E.V., Costa, I.C., & Machado, L.A.T. (2017). Sistema de previsão imediata: Descrição dos produtos. *Sistema de previsão imediata: Descrição dos produtos* (Relatório Técnico). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/11.24.10.25/doc/publicacao.pdf>
- Cavazos, T., Bettolli, M. L., Campbell, D., Sánchez Rodríguez, R. A., Mycoo, M., Arias, P. A., Rivera, J., Reboita, M. S., Gulizia, C., Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., Stephenson, T. S., Sörensson, A. A., Cerezo-Mota, R., Castellanos, E., Ley, D., & Mahon, R. (2024). Challenges for climate change adaptation in Latin America and the Caribbean region. *Frontiers in Climate*, 6, 1392033. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1392033>
- CHM, Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil. (2024). Tempestade Subtropical Biguá: Relatório Pós-Evento. Niterói. Disponível: https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br/chm/files/ciclones/relat%C3%B3rio_pos_evento_bigu%C3%A1.pdf. Acesso 30 mar. 2025.
- Chen, M. H., Zhan, R. F., Wang, Y., & Lu, X. Q. (2025). Extratropical Transition of Tropical Cyclones in the Western North Pacific: Part I. Statistical Characteristics. *Journal of Tropical Meteorology*, 31, 453-466. <https://doi.org/10.3724/j.1006-8775.2025.013>
- Cioni, G., Malguzzi, P., & Buzzi, A. (2016). Thermal structure and dynamical precursor of a Mediterranean tropical-like cyclone. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(697), 1757-1766. <https://doi.org/10.1002/qj.2773>
- CNN Brasil. (2024, 16 de dezembro). Ciclone subtropical atinge o RS e causa apagão, destelhamentos e alagamentos. <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/sul/rs/ciclone-subtropical-atinge-o-rs-e-causa-apagao-destelhamentos-e-alagamentos/>
- Conrado, E. T. d. C., da Rocha, R. P., Reboita, M. S., & Cardoso, A. A. (2024). Cyclone Classification over the South Atlantic Ocean in Centenary Reanalysis. *Atmosphere*, 15(12), 1533. <https://doi.org/10.3390/atmos15121533>
- Coppola, E., Giorgi, F., Giuliani, G., Pichelli, E., Ciarlo, J. M., Raffaele, F., Nogherotto, R., Reboita, M. S., Lu, C., Zazulie, N., et al. (2025). The 5th generation regional climate modeling system, RegCM5: the first convection-permitting European wide simulation and validation over the CORDEX-CORE domains. *Climate Dynamics*, 63, 428. <https://doi.org/10.1007/s00382-025-07913-3>
- Datt, I., Camargo, S., Sobel, A. H., Bieli, M., McTaggart-Cowan, R., & Wang, Z. (2020, January). Relationship between Tropical Cyclone Development Pathways and Extratropical Transition. In *American Meteorological Society Meeting Abstracts* (Vol. 100, p. S223).
- da Rocha, R. P., Reboita, M. S., & Ribeiro, J. G., M. (2025). Modelagem Climática: da Gênese à Escala da Convecção Permitida. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(3), 2289-2311. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.3.p2289-2311>
- da Rocha, R.P., Reboita, M.S., Gozzo, L.F., Dutra, L.M.M., & de Jesus, E.M. (2019). Subtropical cyclones over the oceanic basins: a review. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1436, 138-156. <https://doi.org/10.1111/nyas.13927>
- Diário do Nordeste. (2024, 16 de dezembro). Ciclone subtropical Biguá atinge Rio Grande do Sul com vendavais de até 100 km/h. <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/ultima-hora/pais/ciclone-subtropical-bigua-atinge-rio-grande-do-sul-com-vendavais-de-ate-100-kmh-1.3594758>
- Emanuel, K., & Nolan, D. S. (2004). Tropical cyclone activity and the global climate system. In: *26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*. 2004.

- Escobar, G. C. J. & Seluchi, M. E. (2012). Classificação sinótica dos campos de pressão atmosférica na América do Sul e sua relação com as baixas do Chaco e do Noroeste Argentino. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(3), 365-375. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000300011>.
- Fagundes, F. F. A., Bastos, I. R. P., Reboita, M. S., & Escobar, G. C. J. (2021). Análise de um Episódio de Baixa Térmica do Noroeste da Argentina. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(1), 094-105. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.1.p094-105>
- Ferreira, I. R.P., Reboita M. S., & Gozzo, L. F. (2025). Ambiente associado à gênese do ciclone Yakecan em maio de 2022 no Oceano Atlântico Sul. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(6), 4236-4251. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.6.p4236-4251>
- G1 RS. (2024, 16 de dezembro). Ciclone subtropical atinge RS com vendaval de até 100 km/h, deixando feridos e milhares sem luz. <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/12/16/ciclone-subtropical-atinge-rs-com-vendaval-de-ate-100-kmh-deixando-feridos-e-milhares-sem-luz.ghtml>
- Gozzo, L. F., da Rocha, R. P., Reboita, M. S., & Sugahara, S. (2014). Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic: Climatological Aspects and Case Study. *Journal of Climate*, 27(22), 8543-8562. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00149.1>
- Gutiérrez-Fernández, J., Miglietta, M. M., González-Alemán, J. J., & Gaertner, M. A. (2024). A new refinement of Mediterranean tropical-like cyclones characteristics. *Geophysical Research Letters*, 51(8), e2023GL106429. <https://doi.org/10.1029/2023GL106429>
- Hart, R. E. (2003). A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Monthly Weather Review*, 131, 585-616. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131%3C0585:ACPSDF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131%3C0585:ACPSDF%3E2.0.CO;2)
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M. et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hong, Y., Hsu, K. L., Sorooshian, S., & Gao, X., (2004). Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 1834-1853, <https://doi.org/10.1175/JAM2173.1>
- Irie, K., & Takemi, T. (2023). Characteristics of Nepartak (2021), a subtropical cyclone controlled by an upper-tropospheric cutoff low. *Atmospheric Science Letters*, 24, e1177. <https://doi.org/10.1002/asl.1177>
- Jones, E., Parfitt, R., Wing, A. A., & Hart, R. (2023). Anomalias de temperatura da superfície do mar na Corrente do Golfo associadas à transição extratropical de ciclones tropicais do Atlântico Norte. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL102904. <https://doi.org/10.1029/2023GL102904>
- Kitabatake, N. (2011). Climatology of extratropical transition of tropical cyclones in the western North Pacific defined by using cyclone phase space. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 89(4), 309-325. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2011-402>
- Klimowski, B., Hjelmfelt, M. & Bunkers, M. (2004). Radar Observations of the Early Evolution of Bow Echoes. *Weather and Forecasting*. 19. 727-734. 10.1175/1520-0434(2004)019<0727:ROOTEE>2.0.CO;2.
- Kotarba, A. Z., & Wojciechowska, I. (2025). Satellite-based detection of deep-convective clouds: the sensitivity of infrared methods and implications for cloud climatology. *Atmospheric Measurement Techniques*, 18(12), 2721-2738. <https://doi.org/10.5194/amt-18-2721-2025>
- Kouroutzoglou, J., Samos, I., Flocas, H. A., Hatzaki, M., Lamaris, C., Mamara, A., & Emmanouil, A. (2021). Analysis of the Transition of an Explosive Cyclone to a Mediterranean Tropical-like Cyclone. *Atmosphere*, 12, 1438. <https://doi.org/10.3390/atmos12111438>
- Machado, L., & Rossow, W.B. (1993). Structural Characteristics and Radiative Properties of Tropical Cloud Clusters. *Monthly Weather Review*, 121 (12), 3234-3260. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<3234:SCARPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<3234:SCARPO>2.0.CO;2)
- Magalhães, M. H. d. O. A., Reboita, M. S., da Rocha, R. P., Baldoni, T. C., Gomes, G. D., & Mattos, E. V. (2025). Convection-Permitting Ability in Simulating an Extratropical Cyclone Case over Southeastern South America. *Atmosphere*, 16(6), 675. <https://doi.org/10.3390/atmos16060675>

- Mapes, B. E., & Houze, R. A. (1993). Cloud Clusters and Superclusters over the Oceanic Warm Pool. *Monthly Weather Review.*, 121, 1398–1416, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<1398:CCASOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<1398:CCASOT>2.0.CO;2).
- Maria, E., Budiman, E., Haviluddin, H., & Taruk, M. (2020). Measure distance locating nearest public facilities using Haversine and Euclidean Methods. *Journal of Physics Conference Series 2020*, 1450, 012080. doi:10.1088/1742-6596/1450/1/012080
- Marshall, J. S., & Palmer, W. Mc K. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, 5, 165–166. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2)
- MetSul Meteorologia. (2024, 15 de fevereiro). NASA registra o ciclone subtropical Biguá sobre o Rio Grande do Sul. <https://metsul.com/nasa-registra-o-ciclone-subtropical-bigua-sobre-o-rio-grande-do-sul/>
- Miller, M. A., Yuter, S. E., Hoban, N. P., Tomkins, L. M., & Colle, B. A. (2022). Detecting wave features in Doppler radial velocity radar observations. *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 1689–1702, <https://doi.org/10.5194/amt-15-1689-2022>.
- NORMAM/701-DHN. (2023). Normas da Autoridade Marítima para as Atividades de Meteorologia Marítima. Normas da autoridade marítima para as atividades de meteorologia marítima. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br/chm/files/2024-12/normam-701.html>>
- Nguyen, P., Ombadi, M., Sorooshian, S., Hsu, K. L., AghaKouchak, A., Braithwaite, D., Ashouri, H., & Thorstensen, A. R. (2018). The PERSIANN family of global satellite precipitation data: a review and evaluation of products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 5801–5816, <https://doi.org/10.5194/hess-22-5801-2018>
- O Globo. (2024, 16 de dezembro). Avião da Gol com falha técnica faz pouso de emergência na Base Aérea de Canoas durante ciclone Biguá. <https://oglobo.globo.com/brasil/noticia/2024/12/16/aviao-da-gol-com-falha-tecnica-faz-pouso-de-emergencia-na-base-aerea-de-canoas-durante-ciclone-bigua.ghtml>
- OpenTopography. (2025). OpenTopography Dataset Catalog. OpenTopography [Online] v. 1.0. Disponível: <https://portal.opentopography.org/datasets>. Acesso: 20 nov. 2025.
- Observing Systems Capability Analysis and Review Toll - OSCAR. Satellite: GOES-16. (2025). Disponível em: < https://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/goes_16>. Acesso 02 fev. 2026.
- Peixoto, J. P. & Oort, A. H *Physics of Climate*. New York, NY: American Institute of Physics.
- Pérez-Alarcón, A., Coll-Hidalgo, P., Fernández-Alvarez, J. C., Sorí, R., da Rocha, R. P., Reboita, M. S., Nieto, R., & Gimeno, L. (2024). Quantifying the related precipitation and moisture sources in the lifecycle of subtropical cyclones in the South Atlantic basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150, 2765–2782. <https://doi.org/10.1002/qj.4734>
- Reboita, M.S., da Rocha, R.P., Ambrizzi, T. et al. (2010). South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). *Climate Dynamics* 35, 1331–1347. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0668-7>
- Reboita, M. S., Gan, M. A., da Rocha, R. P., & Custódio, I. S. (2017a). Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I - Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2), 171–186. <https://doi.org/10.1590/0102-77863220010>
- Reboita, M. S., Gan, M. A., da Rocha, R. P., & Custódio, I. S., (2017b). Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(4), 509-542. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324002>
- Reboita, M. S., da Rocha, R. P., & Oliveira, D. M. d. (2019). Key Features and Adverse Weather of the Named Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic Ocean. *Atmosphere*, 10(1), 6. <https://doi.org/10.3390/atmos10010006>
- Reboita, M. S., Gozzo, L. F., Crespo, N. M., Custodio, M. S., Lucyrio, V., de Jesus, E. M., et al. (2022). From a Shapiro–Keyser extratropical cyclone to the subtropical cyclone Raoni: An unusual winter synoptic situation over the South Atlantic Ocean. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(747), 2991–3009. <https://doi.org/10.1002/qj.4349>
- Reboita, M. S., Crespo, N. M., da Rocha, R. P., & Gozzo, L. F., (2024a). Synoptic-Scale Cyclones Affecting South America and the South Atlantic Ocean. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.970>
- Reboita, M. S., Nogueira, N. C. D. O., Gomes, I.B d. S., Palma, L.L d. C., & da Rocha, R.P. (2024b). Assessment of a Tropical Transition over the Southwestern South Atlantic Ocean:

- The Case of Cyclone Akará. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(11), 1934. <https://doi.org/10.3390/jmse12111934>
- Reboita, M. S., Yanase, W., Wang, Z., Fogarty, C., Hart, R., McTaggart-Cowan, R., Beven, J., Earl-Spurr, C., Flauonias, E., Mukhopadhyay, P., Aziz, N. A., Beckley, I. C., Takamura, N., Li, L., & Caltabiano, N. (2026). Toward Unified Global Frameworks for Cyclone Classification and Phase Transitions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 107, E805–E812. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-26-0072.1> Redação RS. (2024, 15 de dezembro). Ciclone Biguá: 6 cidades registram danos e mais 200 mil clientes sem luz no RS. <https://redacaors.com.br/ciclone-bigua-cidades/>
- Ribeiro, J. G., Paz, G., Reboita, M. S., & Gozzo, L. F., (2023). Análise do Índice do Potencial de Gênese em Ciclones Subtropicais na Costa do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16, 2832-2857. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.5.p2832-2857>
- Saraceni, M., Silvestri, L., & Cerlini, P. B. (2025). Analyzing the Mediterranean Tropical-like Cyclone Ianos Using the Moist Static Energy Budget. *Atmosphere*, 16(5), 562. <https://doi.org/10.3390/atmos16050562>
- Song, J., Han, J., & Wang, Y. (2011). Cyclone phase space characteristics of the extratropical transitioning tropical cyclones over the western North Pacific. *Acta Meteorologica Sinica*, 25(1), 78-90. <https://doi.org/10.1007/s13351-011-0006-y>
- Souza, D. C., Ranieri, V. A., Dias, P. L. S., Flores, A. R., & Camargo, R. (2026). Revisiting the rare transition of a South Atlantic cyclone to tropical storm Akará: Energy cycle and stratosphere-troposphere interaction. *Climate Dynamics*, 64, 94. <https://doi.org/10.1007/s00382-026-08062-x>
- Varlas, G., et al. (2023). Investigating the impact of sea surface temperature on the development of the Mediterranean tropical-like cyclone “Ianos” in 2020. *Atmospheric Research*, 291, 106827. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106827>
- Wei, G. F., Zhu, P. J., Jiang, J., & Liu, H. J. (2017). Analysis of structure evolution and environmental conditions of tropical cyclones over the western North Pacific during extratropical transition. *Journal of Tropical Meteorology*, 23(1).
- WMO. (2025). Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (OSCAR): Instrument Details - ABI. OSCAR [Online] v. 2.0. Disponível: <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/abi>. Acesso: 02 fev. 2026.
- Wood, K., Yanase, W., et al. (2023). Phase transitions between tropical, subtropical, and extratropical cyclones: A review from IWTC-10. *Tropical Cyclone Research and Review*, 12(4), 294-308. <https://doi.org/10.1016/j.tccr.2023.11.002>
- Wood, K. M., & Ritchie, E. A. (2014). A 40-year climatology of extratropical transition in the eastern North Pacific. *Journal of Climate*, 27(15), 5999-6015. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00645.1>
- Zarzycki, C. M., Thatcher, D. R., & Jablonowski, C. (2017). Objective tropical cyclone extratropical transition detection in high-resolution reanalysis and climate model data. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(1), 130-148. <https://doi.org/10.1002/2016MS000775>
- Zeng, X., Zhao, M., & Dickinson, R. E. (1998). Intercomparison of Bulk Aerodynamic Algorithms for the Computation of Sea Surface Fluxes Using TOGA COARE and TAO Data. *Journal of Climate*, 11, 2628–2644. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<2628:IOBAAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<2628:IOBAAF>2.0.CO;2)