



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Avaliação de Desempenho dos Modelos Operacionais WRF, BRAMS, ETA e BAM em Prever Ciclogêneses

Bruno Miranda de Brito¹, Manoel Alonso Gan¹, Antonio Marcos Vianna Campos¹, Sergio Henrique Soares Ferreira¹

¹Meteorologista do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São Jose dos Campos, SP, Brasil.
E-mails: bruno.brito@inpe.br; Manoel.gan@inpe.br; Marcos.vianna@inpe.br; Sergio.ferreira@inpe.br;

Artigo recebido em 23/09/2024 e aceito em 02/12/2025

RESUMO

Ciclogêneses ocorrem entre o oeste do oceano Atlântico Sul e a costa do continente Sul-americano. Ciclones causam grandes impactos na sociedade e são necessários modelos atmosféricos precisos para mitigar os impactos ambientais. O atual estudo visa avaliar o desempenho de rodadas operacionais dos modelos WRF, BRAMS, ETA e BAM, que foi feita através de análises sinóticas entre setembro de 2022 e agosto de 2023. Há dois propósitos principais: identificar os erros para auxiliar na melhoria dos modelos e divulgar os erros para utilização na meteorologia operacional. Foram encontradas 92 ocorrências de ciclones e, por trimestre, foram 20 em SON22, 25 em D22JF23, 22 em MAM23 e 25 em JJA23. Os modelos apresentaram erros de posição do centro dos ciclones maiores nas longitudes. Os primeiros (segundos) desvios mais persistentes são para noroeste (sudeste) que sugere tendência de atraso (adiantamento). Quanto mais tempo de previsão do evento tende a piorar o resultado de posicionamento dos ciclones, mas ocorrem exceções devido às condições iniciais. O WRF (BRAMS e ETA) apresentou os melhores resultados nas previsões de 24 e 48h (96 e 120h). O BAM obteve melhor resultado em poucos casos. A inadequada simulação da Cordilheira dos Andes é o provável principal fator dos erros.

Palavras-chave: ciclones, posicionamento, América do Sul.

Performance Evaluation of The WRF, BRAMS, ETA and BAM Operational Models In Predicting Cyclogenesis

ABSTRACT

Cyclogenesis occurs between the west of the South Atlantic Ocean and the coast of the South American continent. Cyclones cause major impacts on society and accurate atmospheric models are needed to mitigate environmental impacts. The current study aims to evaluate the performance of operational runs of the WRF, BRAMS, ETA and BAM models, which was carried out through synoptic analyzes between September 2022 and August 2023. There are two main purposes: to identify errors to assist in improving the models and publicize errors for use in operational meteorology. 92 occurrences of cyclones were found and, per quarter, there were 20 in SON22, 25 in D22JF23, 22 in MAM23 and 25 in JJA23. The models presented larger cyclone center position errors in longitudes. The first (second) most persistent deviations are to the northwest (southeast) which suggests delay (advancement). The longer the event is forecast, the worse the outcome of cyclone positioning tends to be, but exceptions occur due to initial conditions. The WRF (BRAMS and ETA) presented the best results in the 24 and 48h (96 and 120h) forecasts. BAM achieved better results in a few cases. The inadequate simulation of the Andes Mountains is the main factor behind the errors.

Keywords: cyclones, positioning, South America.

Introdução

A troposfera é influenciada por sistemas transientes que alteram a circulação atmosférica e determinam as condições do tempo sobre a América do Sul (AS). Dentre os sistemas transientes de escala sinótica, que atuam na AS,

têm-se os sistemas frontais (Escobar & Rosa, 2024a; Escobar & Rosa, 2024b; Reis et al., 2022); ciclones extratropicais e subtropicais (Cardoso et al., 2022; De Jesus et al., 2022; Gan et al., 2021; Gramcianinov et al., 2025; Ribeiro et al., 2023; Stojanovic et al., 2021; Silva et al., 2022; Wood et

al., 2023) e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) (Choquehuanca et al., 2024; Morais et al., 2021; Pinheiro et al., 2024) ou cavados em altos e médios níveis. Quando esses sistemas atuam na região, alterações no tempo podem ocorrer, como queda ou aumento acentuado de temperatura, precipitação intensa, granizo e ventos severos.

O atual estudo tem foco nos ciclones e, mais especificamente, nas ciclogêneses ou no início do ciclo de vida dos ciclones. Os ciclones são definidos como um centro de baixa pressão com circulação ciclônica. Ou seja, sentido horário no Hemisfério Sul (HS) e sentido anti-horário no Hemisfério Norte (HN) na troposfera (Reboita & Marrafon, 2021). Os estudos identificaram os centros dos ciclones subjetivamente e, posteriormente de forma objetiva (Bartolomei et al., 2023; Reboita et al., 2021). Outro conceito imprescindível ao se estudar esse sistema meteorológico é o de ciclogênese, que é definido como formação e intensificação da circulação ciclônica (ACM, 2024).

No processo de ciclogênese, os demais sistemas meteorológicos citados anteriormente (VCAN e cavado em altos níveis) são fundamentais ou fazem partes dos ciclones (como as frentes fria e quente). Na região em estudo, os ciclones que mais atuam são os ciclones extratropicais, depois os subtropicais e em casos muito raros os ciclones tropicais, como a formação do ciclone Catarina no final de março do ano de 2004 (Lauton et al., 2021; Pérez-Alarcón et al., 2022; Pérez-Alarcón et al., 2024; Reboita et al., 2021; Reboita & Marrafon, 2021; Reboita et al., 2024; Wood et al., 2023). Segundo o glossário de meteorologia os ciclones extratropicais são tempestades de escala sinótica que não são ciclones tropicais, e são frontais e migratórios presentes em médias e altas latitudes.

Ciclogênese em superfície na AS foi estudada por alguns autores como Avila et al. (2021); Bartolomei et al. (2023); Escobar e Rosa, 2024a; Escobar e Rosa, 2024b e Reboita et al. (2021). Estes estudos mostraram que os ciclones em geral se formam no setor oeste do Atlântico Sul, próximo à costa da AS. Duas regiões foram mostradas com máximos de ciclogêneses durante o ciclo anual: no inverno, encontra-se sobre o Uruguai, e no verão, localiza-se sobre o leste da Argentina (Golfo de São Matias) (Destéfani, et al., 2025). Um terceiro núcleo foi encontrado próximo ao litoral do Estado de São Paulo (De Jesus et al., 2022; Gramscianinov et al., 2025; Ribeiro et al.,

2023), o qual pode esta associada aos ciclones subtropicais.

A previsão das condições de tempo é um dos grandes desafios enfrentados no desenvolvimento de modelos atmosféricos e na meteorologia operacional. Este desafio tem sido vencido com a utilização de modelos de Previsão Numérica de Tempos (PNT) cada vez mais precisos. Em meados da década de 1980 começou a implantação do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) com o objetivo de operacionalizar a PNT e de clima, a fim de melhorar a destreza das previsões. Desde então, a avaliação sinótica dos modelos tem avançado com o propósito de auxiliar nas melhorias na modelagem. Também apresentar os resultados desta avaliação para a meteorologia operacional tomar conhecimento dos prováveis erros dos modelos. Para que o desenvolvimento dos modelos numéricos continue é importante analisar as condições atmosféricas associadas aos eventos meteorológicos relevantes sobre a AS.

Sendo assim, neste artigo, realiza-se um estudo de avaliação do posicionamento previsto pelos modelos WRF, BRAMS, ETA e BAM dos casos de ciclogêneses. Para isso, foi necessário identificar e contabilizar inicialmente os eventos de ciclones mensais, trimestrais e o total do ano. Calculou-se a diferença (previsão menos análise) na posição do centro dos ciclones apenas no momento de formação. Depois, foram feitos a averiguação da porcentagem em prever as ciclogêneses, a porcentagens das precisões dos modelos em acertá-las e a Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ). A partir dos erros do posicionamento das ciclogêneses é possível fazer outros estudos futuros associadas à destreza dos modelos quanto a outras características dos ciclones e a sistemas meteorológicos ou padrões atmosféricos associados em sua formação. A análise feita neste estudo e sua continuação posterior ajudarão a PNT, a meteorologia operacional e a sociedade.

Material e Métodos

Foram utilizados cinco conjuntos de dados (uma análise numérica e quatro previsões):

- I. Análises do modelo meteorológico global GFS (Global Forecast System). O modelo GFS é um modelo de previsão do tempo produzido pelo NCEP (National Center for Environmental Prediction), que pertence à NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). O EMC (Environmental Modeling Center) desenvolve, aperfeiçoa e monitora sistemas de

assimilação de dados e modelos atmosféricos e oceânicos, usando métodos avançados de processamento. O modelo GFS fornecido pelo EMC/NCEP possui as seguintes características: Representação horizontal: espectral, com transformação para uma grade Gaussiana; Representação vertical: coordenada sigma; Resolução horizontal: triangular espectral; Resolução vertical: 64 níveis sigma, irregularmente espaçados. Foram utilizadas as seguintes informações: 1º) período entre 01 de setembro de 2022 até 31 de agosto de 2023; 2º) resolução espacial da análise de 0,25° x 0,25°; 3º) variação temporal de 6 horas; 4º) variável: pressão ao nível médio do mar (MSLP, Mean Sea-Level Pressure); e 5º) as análises do GFS foram interpoladas para a grade dos modelos. Os conjuntos de dados de previsão a seguir (de II a V) foram inicializados a partir das condições iniciais da atmosfera extraídas das análises do Global Data Assimilation feita com o modelo atmosférico global GFS/NCEP.

- II. Previsões do modelo regional WRF (Weather Research and Forecasting). O modelo têm as seguintes características e especificações: 1º) Coordenada vertical – híbridas (sigma - pressão); 2º) Resolução horizontal das rodadas de 7km; 3º) Tipo de grade horizontal - grade C de Arakawa; 4º) Advecção horizontal - euleriano e semi-Lagrangiano; 5º) Advecção vertical – 5º ordem; 6º) Inicialização por modos normais; 7º) Radiação atmosférica – RRTMG para ondas curtas e longas (Iacono et al., 2008); 8º) Fluxos superficiais ar - mar - Opção 1 (Green & Zhang, 2013); 9º) Microfísica de nuvens - Ferrier (Rogers et al., 2001); 10º) Convecção rasa/profunda - New Tiedtke (Zhang & Wang, 2017); 11º) Camada limite planetária - Yonsei University YSU (Hong et al., 2006); 12º) Camada superficial - Monin-Obukhov (Zhang & Anthes, 1982). As informações utilizadas são previsões de 24, 48, 72, 96 e 120 horas aos eventos de ciclogêneses, variação temporal de 6 horas e a variável de MSLP (essas informações são iguais nos demais modelos a seguir).
- III. Previsões do modelo regional BRAMS (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System). O modelo tem as seguintes características e especificações: 1º) coordenada vertical – Sigma - z (terrain-following); 2º) resolução horizontal das rodadas de 8 km; 3º) Tipo de grade horizontal – Arakawa C; 4º) Advecção horizontal - euleriano e semi-lagrangiano; 5º) Advecção vertical - 3ª ordem para U, V, W, PI, THETA (Rodrigues et al., 2019); 6º) Inicialização por modos normais; 7º) Radiação atmosférica - RRTMG_SW para radiação de onda curta 3.8; RRTMG_LW para radiação de onda longa 4.85 (Morcrette et al., 2018; Oreopoulos et al., 2012); 8º) Fluxos superficiais ar - mar – Modelo de solo/vegetação Jules, fornecendo fluxos superficiais de momentum, calor latente e sensível e radiativo, bem como CO₂ e outros gases traços (Clark et al., 2011; Moreira et al., 2017); 9º) Microfísica de nuvens - Hybrid single - and double-moment for water vapor, cloud droplets, rain, cloud ice (pristine), snow, and graupel (Thompson & Eidhammer, 2014); 10º) Parametrização de convecção - Grell - Freitas: mass flux, scaleaware, trimodal formulation (deep, congestus and shallow plumes) (Freitas et al., 2018); 11º) Camada limite planetária - Prognóstico de TKE com fechamento de ordem 2.5 (Mellor & Yamada, 1982); 12º) Gravity Wave Drag N/A.
- IV. Previsões do modelo meteorológico regional ETA. Características e especificações do modelo: 1º) coordenada vertical – eta + cut-cells (Mesinger et al., 2016); 2º) resolução horizontal das rodadas de 8km; 3º) Tipo de grade horizontal – Grade E; 4º) Advecção horizontal - finite volume type; 5º) Advecção vertical - Piecewise-linear - finite volume type (Mesinger & Jovic, 2002); 6º) Inicialização por modos normais; 7º) Radiação atmosférica - Ondas curtas: esquema Lacis-Hansen (Lacis & Hansen, 1974) e Ondas longas: esquema Fels-Schwarzkopf (Fels & Schwarzkopf, 1975); 8º) Fluxos superficiais ar-mar (Charnock, 1955); 9º) Microfísica de nuvens (Ferrier et al., 2002); 10º) Convecção rasa/profunda - Esquema Betts-Miller (Betts & Miller, 1986); 11º) Camada limite planetária – Mellor -Yamada Nível 2.5, NN parâmetros; 12º) Gravity Wave Drag - Form drag.
- V. Previsões do modelo meteorológico global BAM, na versão Híbrida. O modelo têm as seguintes características e especificações: 1º) coordenada vertical – 64 camadas híbridas (sigma - pressão); 2º) resolução das rodadas – TQ0666L064 (~20km); 3º) Tipo de grade horizontal - Número de ondas (espaço espectral) Grid-A (espaço físico); 4º) Advecção horizontal - Euleriano e Semi-Lagrangiano; 5º) Advecção vertical - Diferença finitas; 6º) Inicialização por modos normais; 7º) Radiação atmosférica - Clirad (NASA); 8º) Fluxos superficiais ar - mar - UKMET parametrization; 9º) Microfísica de

nuvens (Morrison, 2009); 10°) Convecção rasa/profunda - Arakawa-Shubert simplificado; 11°) Camada limite planetária (Bretherton & Park, 2009); 12°) Gravity Wave Drag - GWD - Alpert (Alpert et al., 1996).

O critério para identificação dos ciclones foi baseado nas cartas de superfície do modelo GFS. Os ciclones são identificados quando pelo menos uma isóbara, traçada com intervalo de 3 hPa, se encontra fechada na área em estudo (especificada na Figura 1), e com duração igual ou superior a um dia. Apenas foi analisado o momento da ciclogênese em todos os ciclones estudados e não foram analisados os demais momentos do ciclo de vida. Esses ciclones foram identificados também na análise do modelo GFS, interpolada para a grade dos modelos WRF, BRAMS, ETA e BAM. O mesmo critério de identificação utilizado nas análises também foi usado nas previsões dos modelos, sempre no horário sinótico das 00UTC e no momento mais próximo das ciclogêneses. Esse tempo sinótico foi utilizado devido aos modelos operacionais do INPE ter rodadas apenas neste horário.

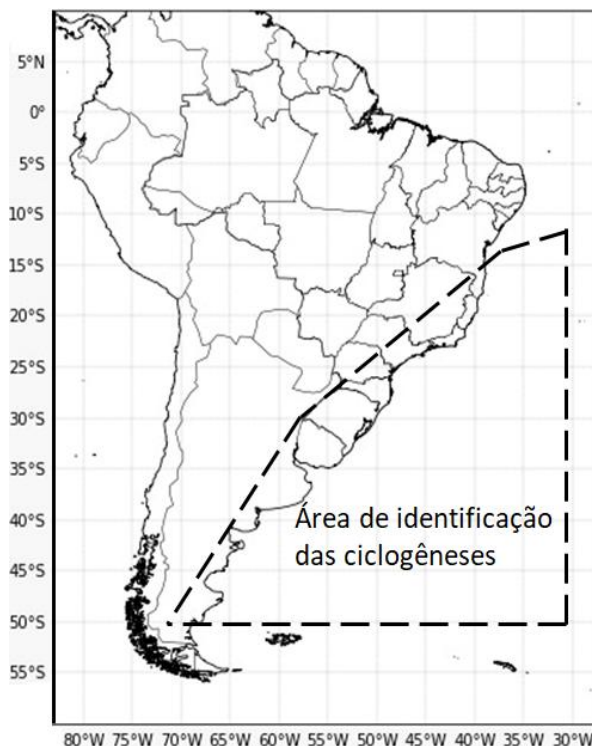


Figura 1 – Área de identificação das ciclogêneses em um ano (nos quatro trimestres de SON22, D22JF23, MAM23 e JJA23), que são utilizados para a avaliação dos modelos atmosféricos.

Todos os episódios de ciclogêneses foram estudados e analisados individualmente e subjetivamente. Também os eventos foram acompanhados nos períodos em que ocorreram.

Primeiro, foram vistos os casos individuais como apresentado da Figura 2. Depois, foram feitas análises mensais e se seguiu para análises trimestrais até um total de um ano de estudo. Os quatro trimestres analisados foram SON22 (primavera), D22JF23 (verão), MAM23 (outono) e JJA23 (inverno) para o HS. Além disto, antes do início deste trabalho foram analisados alguns episódios reais como testes e para a criação deste procedimento metodológico. E visa o desenvolvimento de método da avaliação de desempenho dos modelos através de uma análise sinótica.

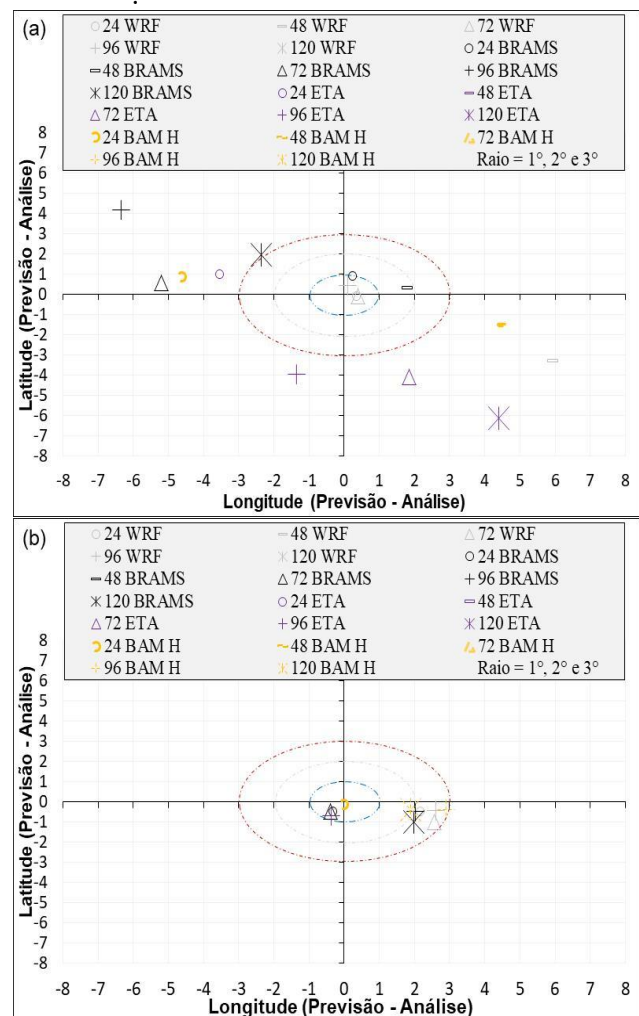


Figura 2 – Diferenças da posição do ciclone na previsão (24 até 120h) menos a posição do ciclone na análise do GFS interpolada na grade de cada modelo para os casos individuais de 07 de julho de 2023 (a), que representa a maioria dos casos em estudo, e de 14 de junho de 2023 (b), que representa padrões em exceções dos casos estudados. Foi utilizado o momento das 00UTC e os modelos em estudo.

Os modelos são avaliados a partir das diferenças (previsão menos análise) da posição do centro do ciclone, definido como o ponto central da primeira isóbara fechada. Os valores são calculados em graus de latitude e longitude e classificados como ótimo, bom, razoável, ruim e muito ruim, conforme critérios da Tabela 1. Quando acima de 15° (muito ruim) não foram consideradas nas análises. As avaliações das ciclogêneses identificadas no período de estudo são feitas para as previsões de 24, 48, 72, 96 e 120 horas de antecedência

Também os modelos foram analisados quanto a sua qualidade com base em todos os casos e com relação aos casos previstos (não mostrado). O alvo principal dos modelos para fornecer ótimo cenário para o trabalho da meteorologia operacional é de até 1° de raio (diferença entre previsão e análise). Esse alvo de até 1° de erro indica uma diferença insignificante, que não gera grandes prejuízos à previsão de tempo operacional. Também foram calculados os valores da REMQ para todos os modelos e previsões.

Tabela 1 – Limiares para avaliar objetivamente a qualidade dos modelos. Determinadas faixas tem um significado de qualidade.

LIMIARES DE DIFERENÇA ENTRE PREVISÃO E ANÁLISE	QUALIDADE DA PREVISÃO DOS MODELOS PARA CICLONES
Até 1°	Ótimo
> 1° e <= 2°	Bom
> 2° e <= 3°	Razoável
> 3°	Ruim
> 15°	Muito Ruim

Tabela 2 – Ciclogêneses em quatro trimestres (SON2022, D2022JF2023, MAM2023 e JJA2023) na área em estudo (Figura 1).

Trimestres		SON22 Primavera		D22JF23 Verão		
Meses	S 22	O 22	N 22	D 22	J 23	F 23
Nº na área	6	8	6	9	8	8
Número Total por Trimestre		20		25		

Trimestres		MAM23 Outono		JJA23 Inverno		
Meses	M 23	A 23	M 23	J 23	J 23	A 23
Nº na área	7	8	7	9	11	5
Número Total por Trimestre		22		25		
				Nº total		
				92		

Resultados e Discussão

Número de ciclogêneses

As ciclogêneses consideradas são formadas na área em estudo apresentada na Figura 1, no setor oeste do oceano Atlântico Sul e costa do continente Sul-americano, entre o estado da Bahia até parte do sul da Argentina. O total de ciclogêneses foi de 92 casos nos quatros trimestres (Tabela 2). Os números de episódios de ciclogêneses por trimestre foram de 20, 25, 22 e 25 em SON22, D22JF23, MAM23 e JJA23, respectivamente.

Ocorreram mais casos no verão e inverno e menos eventos nas estações de transição (Tabela 2). A estação do verão apresentou a mesma quantidade de casos devido aos casos de ciclones subtropicais identificados na área em estudo, pois como é conhecido, os ciclones extratropicais tem uma frequência maior de formação no inverno (Zhan & Chen, 2023). O número total de eventos inclui ciclones extratropicais predominantemente e ciclones subtropicais (Cardoso et al., 2022; Gramcianinov et al., 2025; Ribeiro et al., 2023; Silva et al., 2022; Wood et al., 2023). O mês de julho (agosto) de 2023 observou-se mais (menos)

eventos, que chegou a 11 (5) casos. Dezembro de 2022 e junho de 2023 registraram nove casos em cada mês.

Diferenças das previsões dos modelos nas ciclogêneses

Primeiramente, foram analisados todos os 92 casos de forma individual (não apresentado). Todos os modelos em estudo tiveram previsões em que apresentou melhor desempenho. Na Figura 2a (apresentado anteriormente apenas como exemplo do caso de 07 de julho de 2023), é a tendência geral ao analisar os casos individualmente. Neste caso mostra o modelo WRF com resultados melhores, seguido pelos modelos BRAMS, ETA e BAM. No entanto, houve casos em que o modelo BAM obteve melhor resultado (demonstrado antes somente como exemplo na Figura 2b, para o evento de 14 de junho de 2023). Neste último caso, o modelo WRF não obteve o melhor desempenho. Sendo assim, observa-se que cada caso possui características diferentes. E cada modelo também apresenta erros específicos nas simulações para cada situação atmosférica devido às resoluções e configurações diferentes de cada modelo.

As Figuras de 3 a 7 mostram as dispersões dos erros das previsões (de 24 até 120h, respectivamente) comparadas com as posições dos ciclones nas análises, as quais foram construídas para os trimestres SON22, D22JF23, MAM23 e JJA23. Nos quatro trimestres e para as previsões de 24 a 120 horas, os modelos tiveram erros maiores na longitude do que na latitude. Também os erros tiveram uma tendência maior de possuir uma orientação entre mais a noroeste (maior frequência) e a sudeste. Essas tendências de erros indicam um atraso e um adiantamento das ciclogêneses, respectivamente. Esses erros de direção podem estar relacionados a não adequada simulação da Cordilheira dos Andes, bem como outros fatores relacionados ao processo de formação dos ciclones. Os Andes influenciam a circulação atmosférica num grande espectro de escalas, desde a geração de ondas de montanha até o posicionamento das ondas planetárias e influenciam as ciclogêneses (Martinez et al., 2024).

Na avaliação de desempenho das previsões de 24 horas de antecedência (Figuras 3a até 3d para os quatro trimestres), os modelos simularam os ciclones próximos das suas respectivas posições nas análises (ou dentro de um raio de até 3°). Nota-se ainda uma grande concentração de previsões muito perto da posição

dos ciclones observados nas análises (as porcentagens desses diagnósticos dos modelos serão discutidas no item: Porcentagens de acertos das previsões dos modelos e REMQ).

No trimestre de JJA23 houve mais casos de previsões a leste do observado nas análises, mais do que nos demais trimestres. Isto ocorreu como reflexo do mês de junho de 2023 (não mostrado), quando apresentou resultados mais a leste na previsão comparado com a análise. Como os núcleos de ciclogêneses mudam de posição em diferentes estações (Dalanhese et al., 2023), é possível que essas diferenças também sejam responsáveis por erros diferentes dos modelos. No trimestre de SON22, houve mais previsões a noroeste comparado com as análises, indicativo de atraso do sistema. Mas o modelo BAM mostrou uma tendência maior de ter erros mais a sudeste, o que indica adiantamento do ciclone em SON22.

Nas previsões de 48h (Figuras 4a, 4b, 4c e 4d), os resultados da avaliação da performance dos modelos não tiveram a mesma qualidade do que em 24h. Mas os resultados dos modelos quanto às ciclogêneses mostraram-se também próximos das suas respectivas posições nas análises. Nos quatro trimestres, houve mais previsões a noroeste comparado com as análises, indicativo de atraso do sistema. No trimestre JJA23, quase houve um balanço entre números de erros para leste e para oeste. Ainda assim, os erros para leste tendem a ser com diferenças menores do que os erros para oeste. Neste trimestre, também houve uma concentração de pequenas diferenças em comparação com a análise. Portanto, os modelos têm acerto razoável nas previsões de 48h de antecedência.

Na previsão de 72h (Figuras 5a até 5d), os modelos simularam os ciclones mais dispersos das suas respectivas posições observadas nas análises, quando comparadas com as previsões de 24 e 48h. Os modelos começam a não ter acerto razoável na previsão de 72h. Os erros são mais direcionados para noroeste comparado com a análise. No trimestre JJA23, houve resultados diferentes, pois os erros foram mais na direção leste - oeste. Neste trimestre ainda observou-se mais erros para leste, diferente do resultado dos demais trimestres, principalmente o modelo BAM. Esse resultado no trimestre de JJA23 reflete mais os erros do mês de junho de 2023 (não mostrado), pois teve algumas previsões a leste do observado nas análises.

Na avaliação de desempenho das previsões de 96h (Figuras 6a, 6b, 6c e 6d) e 120h de antecedência (Figuras 7a até 7d) em geral foram mais dispersos do que as previsões entre 24

e 72h. Ou seja, tiveram maiores erros de posição em comparação com as análises. As diferenças ocorreram mais para oeste e noroeste, principalmente nas estações de transição. Sobretudo, no trimestre JJA23 registraram-se mais previsões a leste da análise, tanto em 96 como em 120h. Esse resultado foi mais visível em junho de 2023 (não mostrado). O modelo BAM previu um número maior de casos mais a leste, nos trimestres de verão (D22JF23) em 96h e inverno (JJA23) em 96 e 120h.

As Figuras 8a até 8d apresentam as porcentagens de acerto das previsões dos modelos WRF, BRAMS, ETA e BAM. E são referentes ao posicionamento dos ciclones no momento mais próximo à sua formação nos trimestres de SON22, D22JF23, MAM23 e JJA23. Essas figuras não representam a qualidade da precisão da previsão quanto ao posicionamento, mas se o ciclone foi ou não previsto. Não foram analisados os possíveis casos de ciclones previstos erradamente que não existiram na análise.

O modelo WRF previu mais vezes os ciclones entre 24 e 72h de antecedência. Os modelos BRAMS e ETA obtiveram resultados semelhantes. À maioria das vezes esses três modelos simularam os ciclones. O modelo BAM simulou menos de 50% dos ciclones em 72h (96h) de antecedência em três quartos dos trimestres, ou seja, apenas no trimestre SON22 ficou com 55% (50%). O modelo BRAMS obteve em geral melhor resultado em 96 e 120h. Mas, principalmente, no trimestre de inverno (JJA23), a avaliação de desempenho do modelo ETA chegou a 72 e 60% nas previsões de 96 e 120h, respectivamente.

Houve uma tendência de mais acertos quando as rodadas das previsões foram mais próximas dos eventos de ciclogêneses. No entanto, algumas vezes, as previsões de 96h obtiveram melhor resultado do que às 72h, como no trimestre de D22JF23.

Também existiram outras situações, como em 72h obter melhor resultado do que em 48h, e assim por diante. É mais provável que isto ocorra devido a erros nas condições iniciais dos modelos, ou até que o problema eventualmente seja das próprias análises do modelo GFS, quando acarreta erros em todos os modelos avaliados. Se o resultado é diferente faz o meteorologista operacional ter dúvidas se o modelo tem se ajustado ao que realmente será ou se houve um problema nas condições iniciais que os modelos utilizaram. Sendo assim, na previsão do tempo é necessário averiguar a qualidade das informações

utilizadas inicialmente na rodada dos modelos. Também é preciso criar um sistema para as rodadas dos modelos que garanta uma ótima qualidade nas condições iniciais.

Vale a pena mencionar que quando neste estudo é dito que os modelos não previram o ciclone, não significa que os modelos erraram totalmente. Considerar errado 100% seria uma avaliação depreciativa e não real. Não prever os ciclones quase sempre significou que houve uma situação mais fraca simulada pelos modelos, ou seja, foi previsto apenas um cavado no lugar de uma isóbara fechada. Evidentemente, houve situações que os modelos simularam alta pressão no lugar de uma baixa pressão e o erro foi realmente muito grande. Erros maiores assim foram registrados, principalmente, nas previsões de 96 e 120h e pelo modelo BAM.

Os modelos têm uma tendência de acertar menos quando a rodada tem mais horas de antecedência aos eventos de ciclogêneses. Os modelos acertam mais em 24h e um pouco menos em 48h. Em 72h, começa a declinar o resultado e em 96 e 120h, aparentemente o resultado não é confiável para a previsão de tempo. Os modelos não previram as ciclogêneses com 96h de antecedência ou mais, devido a não calcularem adequadamente os principais fatores (cavado em altos níveis, termo baroclínica e calor latente) do processo de formação dos ciclones.

É possível também que fatores indiretos (como o ômega, que quando errado modifica o termo baroclínico; Gan et al., 2021) acarretem problemas nos fatores principais. Quando na previsão dos modelos há um atraso na posição do cavado da onda curta de Rossby em altos e médios níveis, por consequência, também ocorre erro no desenvolvimento de ciclones em superfície (Choquehuanca et al., 2024; Dalanhese et al., 2023; Zilli & Hart, 2021).

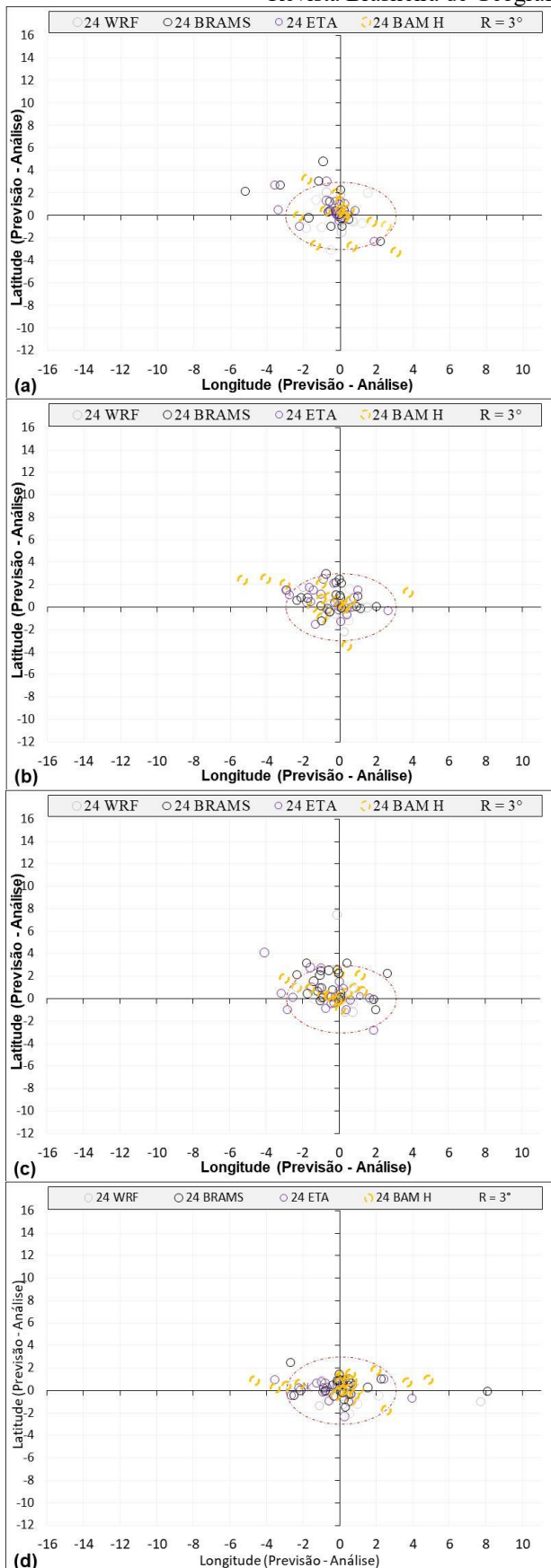


Figura 3 – Dispersão da previsão de 24 horas de antecedência nos casos de ciclogêneses para os trimestres de SON22 (a), D22JF23 (b), MAM23 (c) e JJA23 (d).

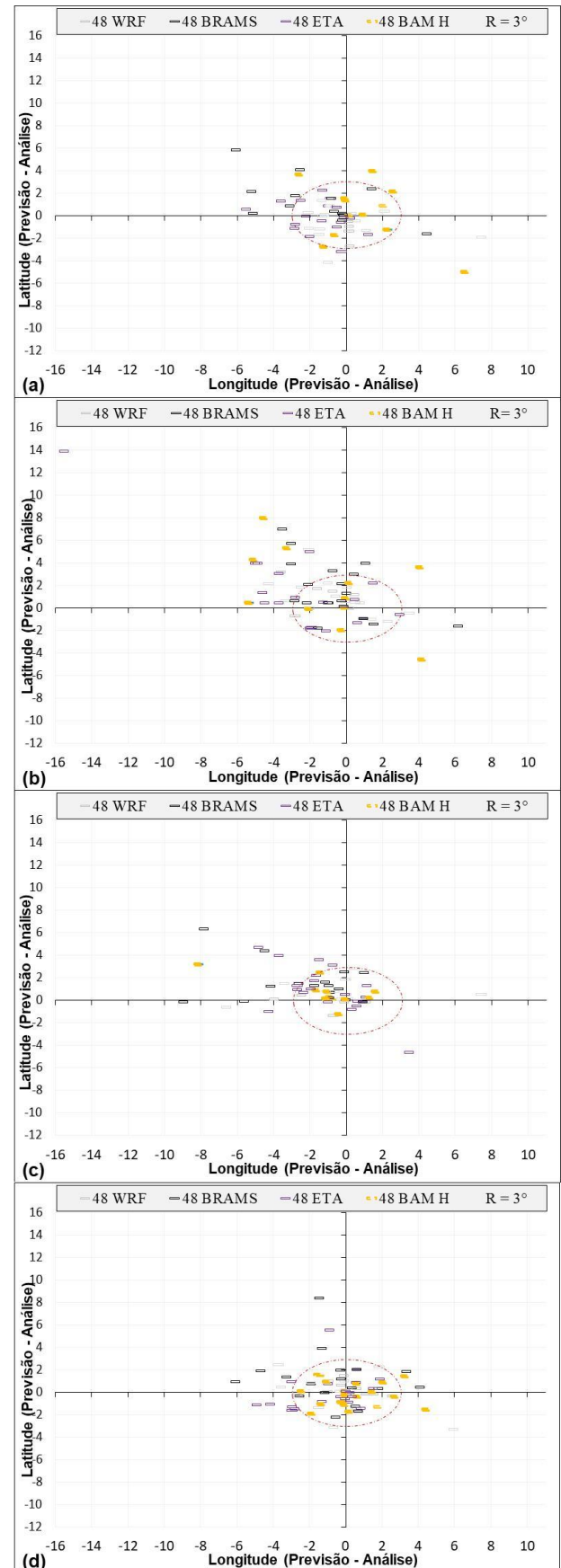


Figura 4 – Idem à Figura 3 para 48 horas de antecedência.

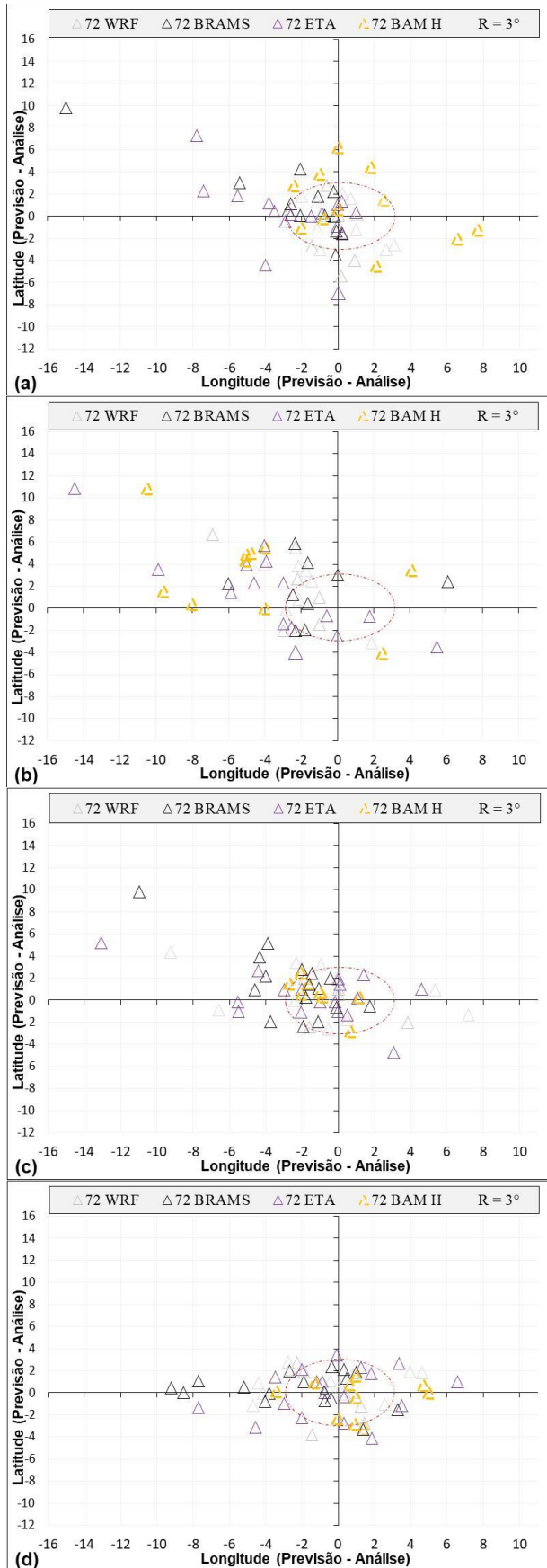


Figura 5 – Idem à Figura 3 para 72 horas de antecedência.

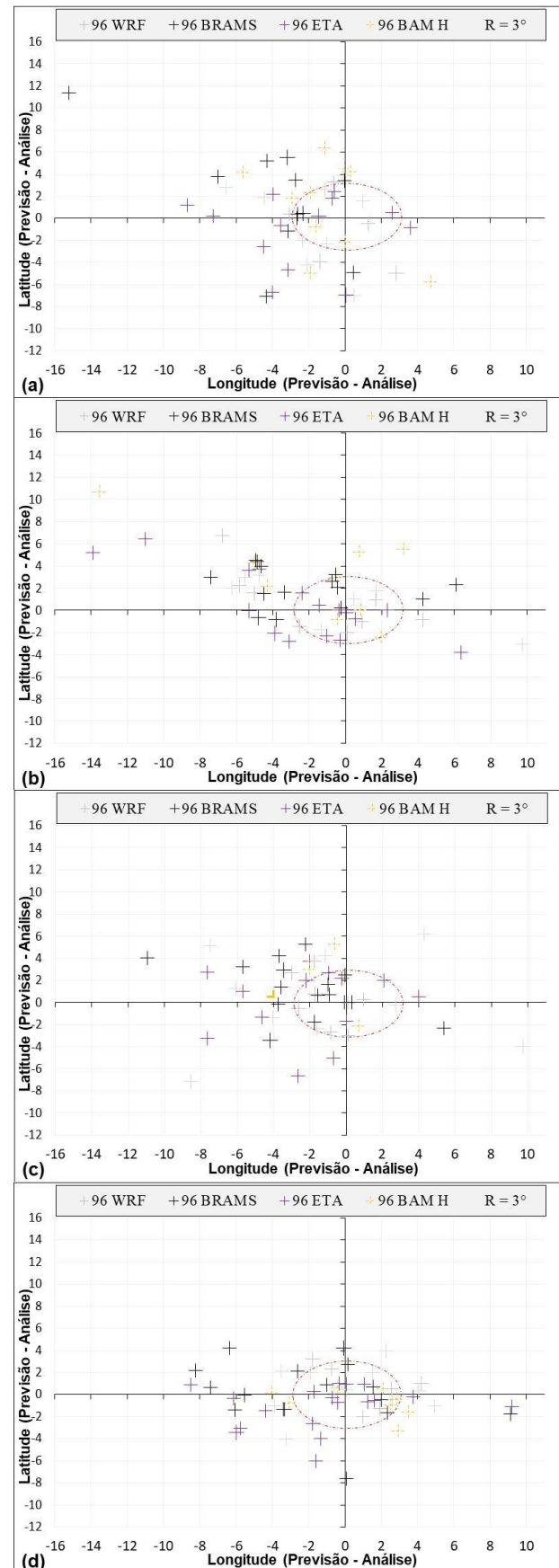


Figura 6 – Idem à Figura 3 para 96 horas de antecedência.

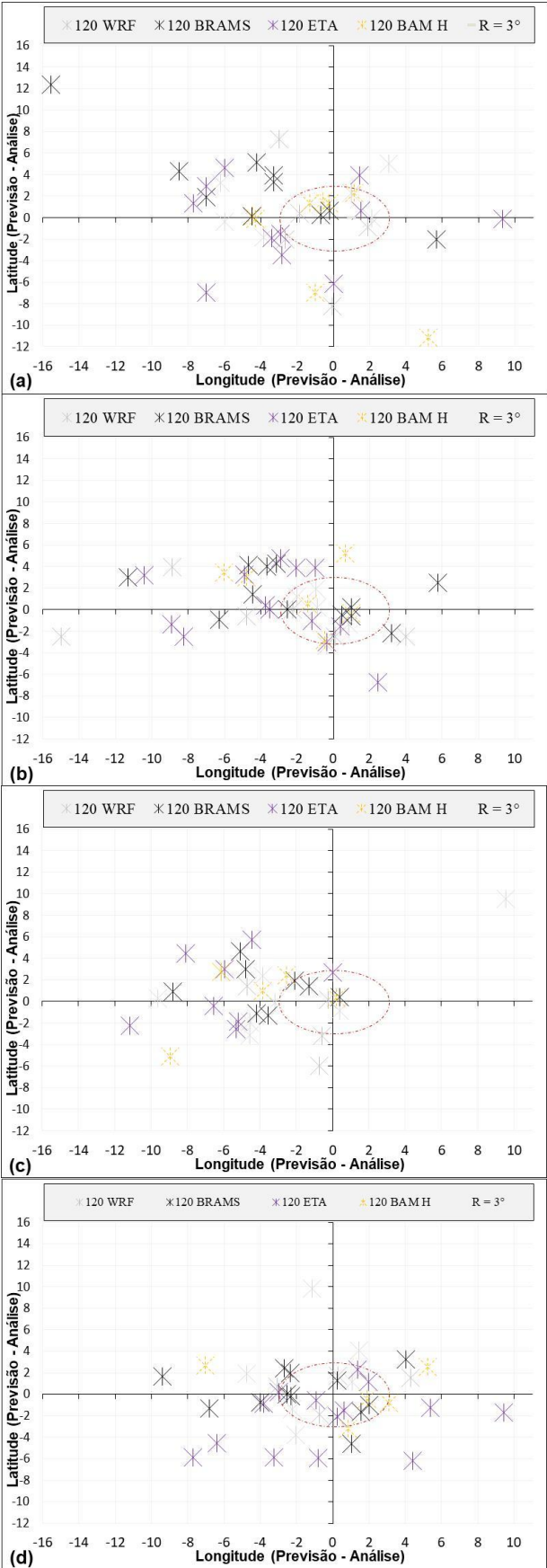


Figura 7 – Idem à Figura 3 para 120 horas de antecedência.

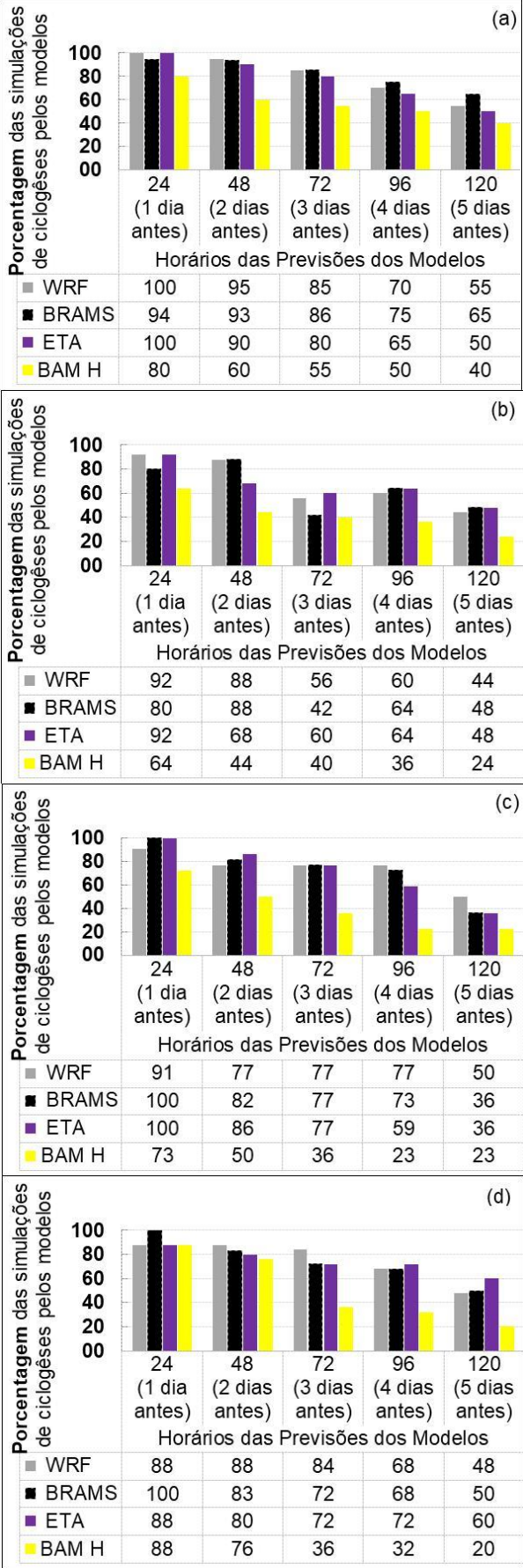


Figura 8 – Extensão das simulações dos modelos referente aos casos de ciclogêneses

nos trimestres de SON22 (a), D22JF23 (b), MAM23 (c) e JJA23 (d).

Porcentagens de acertos das previsões dos modelos e REMQ

As Figuras 9 a 13 apresentam as porcentagens de acertos das previsões distribuídas em limiares de erros. Os quatro limiares apresentados na tabela 1 subdividem a precisão das previsões. As porcentagens foram calculadas para as previsões de 24, 48, 72, 96 e 120 horas com base em todos os casos e com relação aos casos previstos (não apresentados).

Na avaliação de desempenho até 1° de diferença, o modelo WRF em geral apresentou melhor desempenho (Figura 9) e ultrapassou os 50% de acerto em relação a todos os casos. E com relação aos casos previstos chegou a 56,52% (não mostrado). Exceto no trimestre de JJA23, que ficou abaixo dos 50%. Neste último trimestre, o modelo BRAMS obteve o melhor resultado e atingiu o alvo em 64% dos casos, mas não obteve bom resultado em todos os trimestres. Mas ainda assim, neste trimestre, o modelo WRF teve melhor resultado até o raio de 3°.

O modelo WRF (BRAMS) nos quatro trimestres chegou ao máximo de ter 5% (25%) de eventos com previsões acima de 3° de diferença. No mês de março (não apresentado) os modelos apresentaram um resultado pior comparado com os meses anteriores, pois quase não houve erro nas previsões da posição do ciclone dentro de 1° de raio (Figura 9).

O resultado do modelo ETA para 24h de antecedência é um pouco inferior no geral ao do modelo BRAMS (Figura 9). O modelo BAM tem o menor desempenho em precisão na previsão de ciclogêneses, que chega apenas a ter 36,36% (50%) com relação a todos os episódios (casos previstos não foram mostrados).

Nas previsões de 48h de antecedência, as exatidões dos modelos diminuem bastante. O modelo WRF continua, em geral, a conseguir os melhores resultados em até 1° de diferença, e chega a ter 31,82% (41,18%) dos casos totais como mostra na Figura 10c (casos previstos; não mostrado). Mas no trimestre JJA23 (SON22) o modelo ETA (BRAMS) chegou a 28% (25%) como apresentado na Figura 10d (Figura 10a).

Na avaliação do modelo BAM nas previsões de 48h de antecedência (Figura 10) mostrou resultados piores, porém em um raio de até 3° obteve o melhor resultado. Todos os modelos avaliados têm resultados que devem ser descartados, mas também qualidades que devem

ser consideradas na previsão operacional de tempo.

Na previsão de 72h de antecedência há muitos erros acima de 3° (Figura 11), mas o maior número de previsões ainda está dentro do razoável. O modelo WRF alcançou dois trimestres (MAM23 e JJA23) com melhor resultado em até 1° (Figuras 11c e 11d, respectivamente).

A partir desta previsão de 72h de antecedência, o foco é mais em até 3° de limiar. Neste critério, o modelo BRAMS (BAM) obteve melhor resultado nos trimestres de SON22 e D22JF23 (MAM23 e JJA23) como apresentado nas Figuras 11a e 11b (Figuras 11c e 11d, respectivamente). Esses modelos em outros trimestres obtiveram resultados ruins. O modelo BAM, no trimestre de D22JF23, teve 40% dos casos totais (Figura 11b) posicionados acima de 3° e significou 100% dos casos previstos (não mostrado).

O desempenho dos modelos em 96 e 120h foram ruins (Figuras 12 e 13). Em 96h (120h), o melhor resultado dentro de 1° de raio foi do modelo ETA (BRAMS) com 12% (10%) nos trimestres de verão e inverno (primavera), apresentado nas Figuras 12c e 12d (Figura 13a). Gan et al. (2021) também mostrou resultado com menor subestimativa para o modelo ETA, mas nesse estudo se referia a energia cinética, que pode ter refletir em erros na posição do ciclone. É preciso avaliar em estudos futuros a relação entre os erros em todos os termos da equação da energética cinética com o posicionamento e intensidade dos ciclones na AS (De Souza & Piva, 2023; Priestley et al., 2023).

O modelo BAM, nas previsões de 96 e 120h de antecedência, apresentaram poucos casos com erros maiores do que 3 graus de diferença entre previsão e análise (Figuras 12 e 13). Mas isto ocorreu devido a ter poucas previsões das ciclogêneses, pois em muitas previsões o modelo não previu o ciclone e, assim, as porcentagens relativas aos casos previstos são altas (não apresentado). Os modelos BRAMS e ETA em geral tiveram resultados mais assertivos em 96 e 120h de antecedência, apesar da baixa qualidade (Figuras 12 e 13).

Os valores da REMQ foram altos e tiveram uma tendência de aumento entre as previsões de 24 até 120h em todos os modelos (Figura 14). Também em geral o modelo WRF obteve menores valores de REMQ, seguido dos modelos BRAMS, ETA e BAM. No verão (Trimestre D22JF23, Figura 14b) o modelo BAM (ETA) obteve maiores valores de REMQ em 72h

(48h) de antecedência do que em 96 e 120h (72 até 120h).

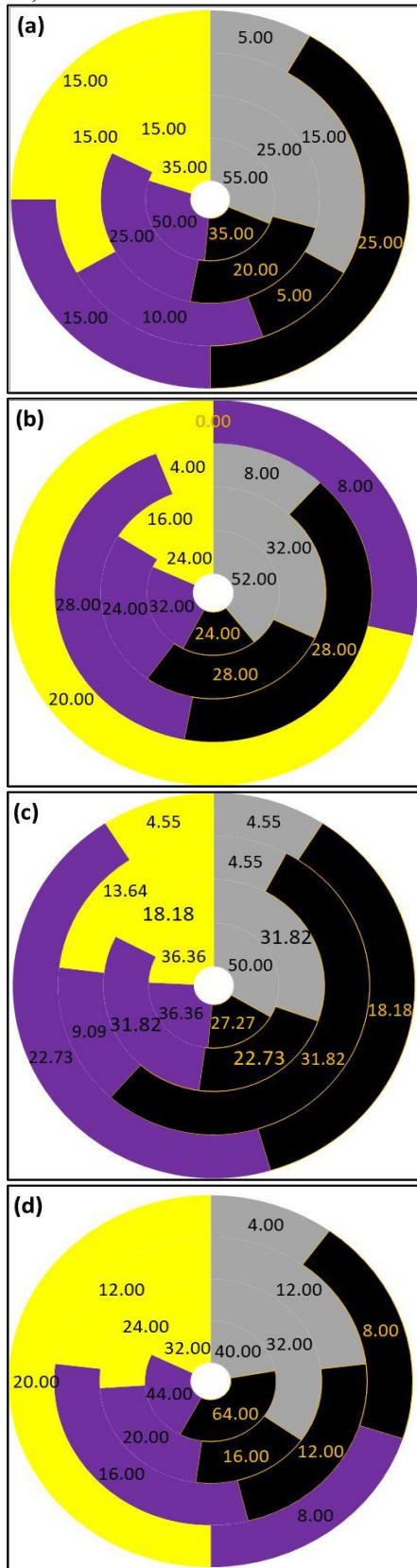


Figura 9 - Porcentagens das previsões em limiares de até 1° de raio no 1° círculo no centro; entre >1° e <=2° no 2° círculo; entre >2° e <=3° no 3° círculo; e > 3° no 4° círculo;

em 24h para SON (a), DJF (b), MAM (c) e JJA (d), para WRF (cinza), BRAMS (preto), ETA (roxo) e BAM (amarelo), em todos os casos.

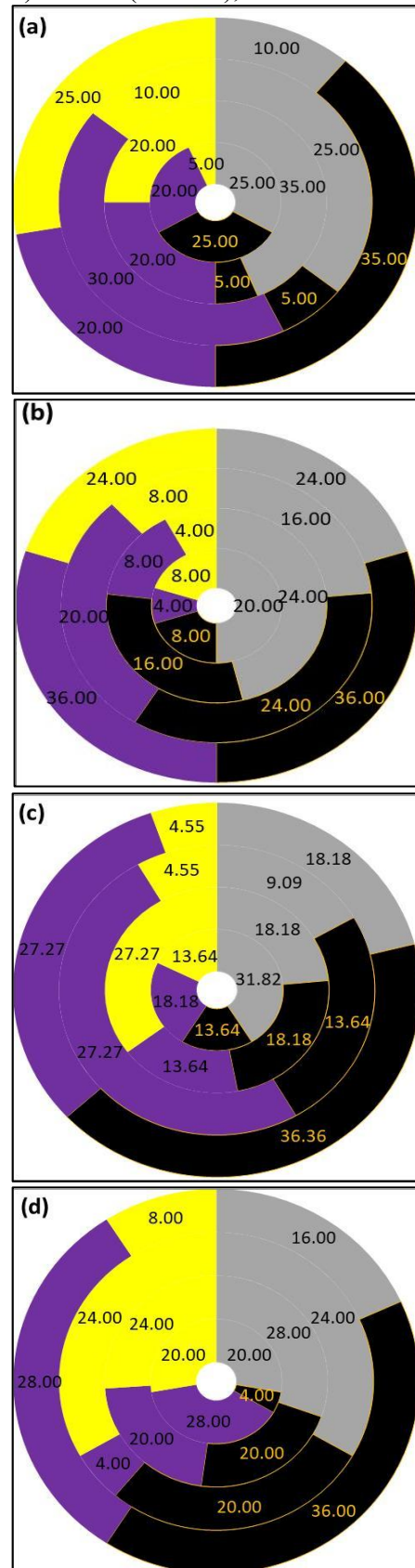


Figura 10 – Idem à Figura 9 para 48 horas de antecedência.

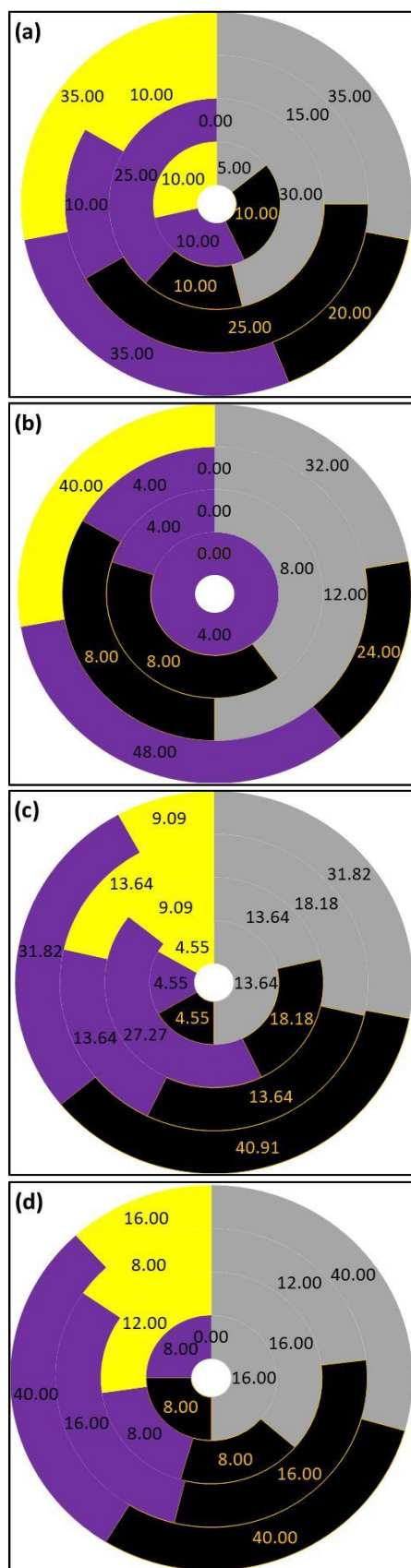


Figura 11 – Idem à Figura 9 para 72 horas de antecedência.

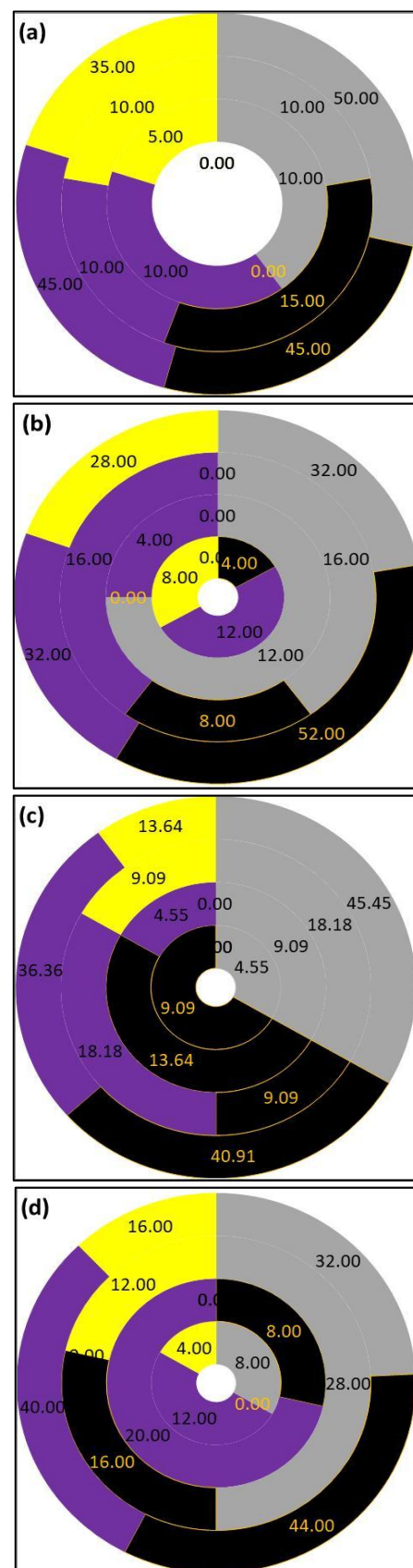


Figura 12 – Idem à Figura 9 para 96 horas de antecedência.

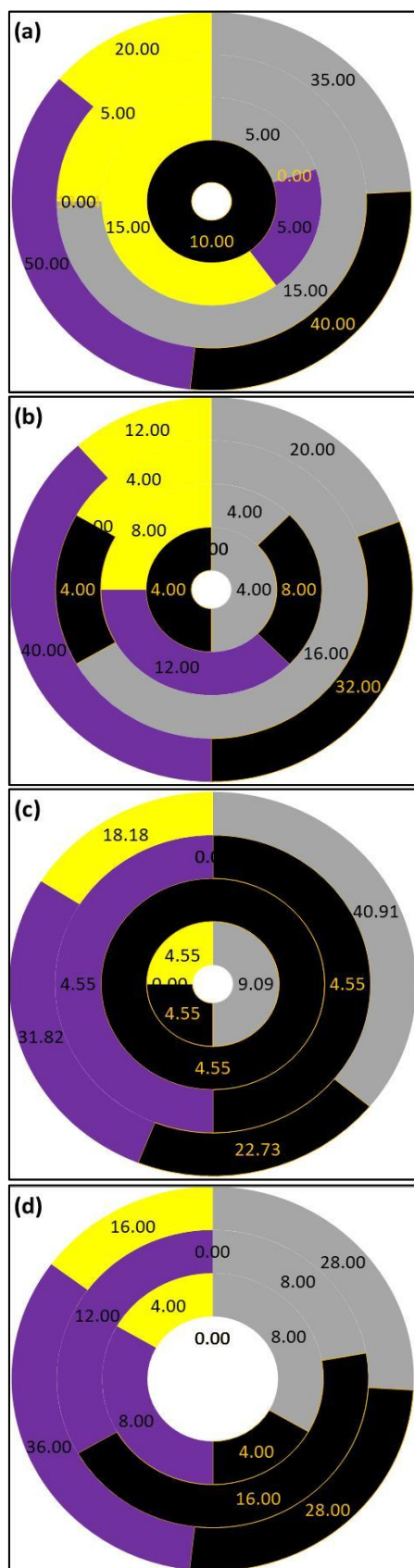


Figura 13 – Idem à Figura 9 para 120 horas de antecedência.

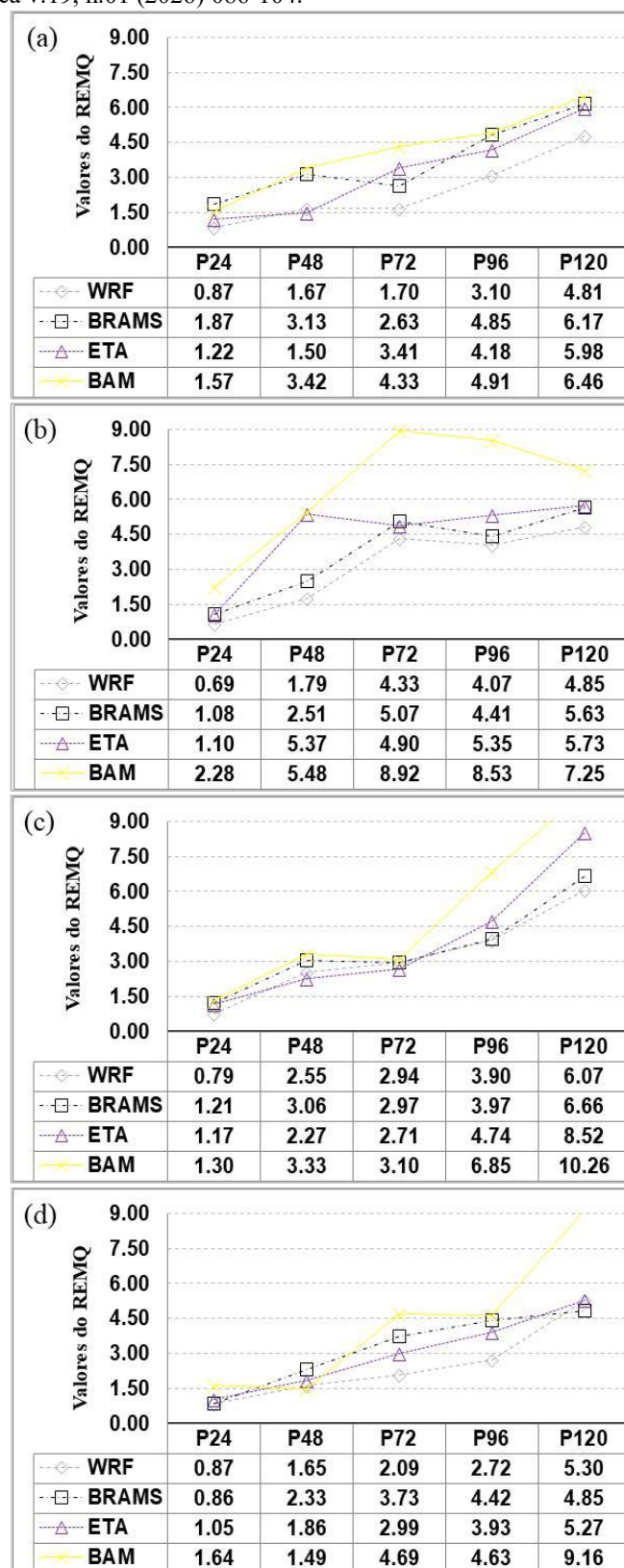


Figura 14 – REMQ nos trimestres de SON22 (a), D22JF23 (b), MAM23 (c) e JJA23 (d).

Conclusões

Foi realizada uma investigação de modelos operacionais (WRF, BRAMS, ETA e BAM) a partir de uma avaliação de desempenho

dos posicionamentos previstos em casos de ciclogêneses. Mediante a posição dos ciclones identificada na análise do modelo GFS se verificou: primeiro, se nas previsões os modelos simularam ou não os ciclones; depois, quando o ciclone foi previsto, calculou-se a diferença (previsão menos análise) na posição do centro do ciclone; terceiro, observou-se a direção dos erros e, em quarto, calculou-se a porcentagem da precisão dos modelos em limiares.

Para realização dessas etapas, o primeiro passo foi identificar e contabilizar os eventos de ciclogêneses. Registrou-se um total de 92 casos, entre 01 de setembro de 2022 e 31 de agosto de 2023. Nos quatro trimestres de SON22 (primavera), D22JF23 (verão), MAM23 (outono) e JJA23 (inverno) houve 20, 25, 22 e 25 ciclogêneses, respectivamente. Esse número de ciclones representam ciclones extratropicais predominantemente. Também ocorreram casos de ciclones subtropicais, o que possibilitou a estação de verão ter o mesmo número de ocorrências do inverno. Os ciclones foram formados na maior parte do litoral leste brasileiro, entre o sul da Bahia e o sul da Argentina, principalmente nas áreas ciclogênicas.

A partir dos episódios de ciclogêneses, notou-se que os modelos tiveram erros, nas previsões de 24, 48, 72, 96 e 120h, mais na longitude do que na latitude. Os modelos simularam as ciclogêneses nas previsões de 24 e 48h, próximo das suas respectivas posições nas análises. Em 72h, as posições adquirem dispersões significativas, e em 96 e 120h os modelos tendem a não acertar as posições identificadas nas análises. Outros erros mais comuns é a tendência das previsões posicionar os ciclones mais a noroeste e, em segundo lugar, mais a sudeste. Esses erros, quanto à direção, revelam em geral um atraso e um adiantamento das ciclogêneses, respectivamente. A não adequada simulação da Cordilheira dos Andes pelos modelos pode ser o principal fator dos erros na posição e no tempo de vida dos ciclones comparados com a análise.

Entre os modelos de PNT em avaliação de desempenho, o WRF obteve em geral os melhores resultados, principalmente em 24 e 48h de antecedência. Os modelos BRAMS e ETA tiveram desempenhos melhores nas previsões de 96 e de 120h. Na previsão de 72h, os três modelos citados anteriormente tiveram desempenho semelhantes. O modelo BAM obteve o pior resultado em todas as previsões nas análises mensais e trimestrais, mas houve casos individuais que atingiu o melhor resultado.

Os meteorologistas operacionais de posse destes quatro modelos teriam mais assertividade ao utilizado os modelos BRAMS e ETA com quatro e cinco dias de antecedência. Depois, analisar os modelos WRF, BRAMS e ETA para 72h. E quando mais próximo do evento, um e dois dias antes, confiar mais do modelo WRF, devido sua precisão. O WRF atinge mais de 50% (maior parte) dos casos em um limiar de até 1° (3°) de raio de diferença em 24h (48h).

Os valores da REMQ foram altos e indicaram baixa previsibilidade. Também os valores da REMQ tiveram uma tendência de aumento entre as previsões de 24 até 120h em todos os modelos. O modelo WRF (BAM) obteve menores (maiores) valores de REMQ.

No entanto, são necessários estudos posteriores com modelos específicos e analisar seus erros particulares e conhecer cada modelo de forma mais detalhada. Os estudos podem ser feito devido as seguintes hipóteses: 1°) cada modelo também simular erros diferentes para cada situação; 2°) as tendências de erros que indicam um atraso ou adiantamento da ciclogênese; 3°) aos erros diferentes dos modelos em diferentes estações do ano; 4°) aos erros nos modelos que acarretam problemas nas previsões mais próximas (entre 24 e 72h) das ciclogêneses do que as previsões mais distantes (entre 96 e 120h); 5°) aos modelos com melhores resultados às vezes tem piores (vice versa); 6°) a necessidade de desenvolver critérios melhores para um melhor entendimento de que não prever ciclones muitas vezes apenas representa sistemas mais fracos ou cavados; 7°) aos erros nos termos do balanço da energia cinética; 8°) aos erros em variáveis meteorológicas; 9°) o quanto as inadequadas simulações da Cordilheira dos Andes afetam as ciclogêneses; e 10°) as tendências de erros a partir de desvios em sistema meteorológicos que influencia na formação dos ciclones.

Vale salientar que as diferenças de posição dos ciclones não consideram as características gerais dos ciclones. Por exemplo, na análise pode existir um ciclone frontal, mas na previsão apenas uma isóbara fechada não frontal. Em considerações mais amplas das características dos ciclones pelos modelos, possivelmente, os erros seriam ainda maiores. Ou os erros seriam apresentados em mais aspectos, mas poderiam oferecer mais pontos de referências aos meteorologistas operacionais em suas previsões.

Enfim, o atual estudo se dedica a somar no desenvolvimento da avaliação de desempenho dos modelos de PNT através da meteorologia

sinótica. É fundamental revelar primeiro os erros concernentes aos posicionamentos nas ciclogêneses para fornecer uma base de erros detalhados dos modelos no futuro. Ou seja, a partir deste primeiro passo, os erros de posição dos ciclones, serão possíveis realizar outros diagnósticos quanto à destreza dos modelos. Também estudos de sistemas meteorológicos ou padrões atmosféricos participantes no processo de ciclogênese. O atual estudo e posteriores aqui indicados ajudam a PNT e a meteorologia operacional, além da sociedade em geral.

Agradecimentos

Ao Grupo de Avaliação de modelos da Divisão de Previsão de Tempo e Clima (DIPTC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Referências

- ACM, Arctic Climatology and Meteorology (2024). Cyclogenesis em <https://web.archive.org/web/20060830135741/http://www.nsidc.org/arcticmet/glossary/cyclogenesis.html>. Wayback Machine National Snow and Ice Data Center.
- Alpert, J., Hong, S. Y., & Kim, Y. J (1996). Sensitivity of cyclogenesis to lower tropospheric enhancement of gravity wave drag using the environmental modeling center medium range model. In: Preprints. 11th Conference on NWP. Norfolk, Virginia. Am. Meteorol. Soc. p. 322–323.
- Avila, V. D. D., Nunes, A. B., & Alves, R. D. C. M. (2021). Comparing explosive cyclogenesis cases of different intensities occurred in Southern Atlantic. *Anais Da Academia Brasileira De Ciências*, 93(3), e20190157. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190157>
- Bartolomei, F., Reboita, M. S., & Rocha, R. P. da. (2023). Ciclones extratropicais causa-dores de eventos extremos no sul do Brasil no inverno de 2023. *Terræ Didática*, 20 (Publ. Continua), 1-13, e024003. <https://doi.org/10.20396/td.v20i00.8675229>
- Betts, A. K., & Miller, M. J (2009). A new convective adjustment scheme: part II: single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and Arctic air-mass data sets. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, v. 112, p. 693-709, 1986. <https://doi.org/10.1002/qj.49711247308>
- Bretherton, C. S., & Park, S (2009). A new moist turbulence parameterization in the Community Atmosphere Model. *Journal of Climate*, v. 22, n. 12, p. 3422-3448. 10.1175/2008JCLI2556.1.
- Cardoso, A. A., da Rocha, R.P., & Crespo, N.M. (2022). Synoptic climatology of subtropical cyclone impacts on near-surface winds over the South Atlantic basin. *Earth and Space Science*, 9(11), e2022EA002482. <https://doi.org/10.1029/2022EA002482>
- Charnock, H (1955). Wind stress on a water surface. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 81, 639–640. <https://doi.org/10.1002/qj.49708135027>
- Clark, D. B., Mercado, L. M., Sitch, S., & Jones, C. D (2011). The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics, *Geosci. Model Dev.* 4, 701–722, doi:10.5194/gmd-4-701. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-701-2011>
- Choquehuanca, B., Godoy, A. A., & Saurral, R. I. (2024). Assessing the skill of high-impact weather forecasts in southern South America: a study on Cut-off Lows, EGUsphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1063>.
- Dalanhese, L., Stuienvolt-Allen, J., & LaPlante, M. (2023). A new climatology of South American extratropical cyclogenesis with an intercomparison among ERA5, JRA55 and the Brazilian Navy. *Int J Climatol.* 2023;43:7050–7066. <https://doi.org/10.1002/joc.8251>
- De Jesus, E.M., da Rocha, R.P., & Crespo, N.M. (2022). Future climate trends of subtropical cyclones in the South Atlantic basin in an ensemble of global and regional projections. *Clim. Dyn.* 58, 1221–1236. <http://hdl.handle.net/11449/229533>
- De Souza, M. R., & Piva, E. D. (2023). Storm tracks and cyclogenesis over the Southern Ocean: An overview with the .1 model. *International Journal Of Climatology*, v. 43, p. 7565-7587. <https://doi.org/10.1002/joc.8280>
- Destéfani, B. A. O., Broggio, M. F., & Garcia, C. A. E. (2025). Climatological Study on Cyclone Genesis and Tracks in Southern Brazil from 1979 to 2019. *Atmosphere*, 16(1), 92. <https://doi.org/10.3390/atmos16010092>
- Escobar, G. C. J., & Rosa, M. B. (2024a). Synoptic patterns associated with heavy rainfall events in the metropolitan region of Porto Alegre, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics* 136:40. <https://doi.org/10.1007/s00703-024-01041>
- Escobar, G. C. J., & Rosa, M. B. (2024b). Synoptic climatology associated with heavy

- rainfallevents in the Itajaí Valley region, Brazil. *Atmosfera* 38, 801-816. <https://doi.org/10.20937/atm.53364>
- Fels, S. B., & Schwarzkopf, M. D (1975). The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. *Journal of the Atmos. Sciences*, v. 32, p. 1475-1488. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=2f4eedbf7298c2d2c07bb4e8e18c946d8d5443de>
- Ferrier, B. S., Lin, Y.; Black, T., & Rogers, E. (2002). Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. In: Conference on Numerical weather prediction, San Antonio, TX. Proceedings... Am. Met. Soc., p 280–283.
- Freitas, S. R. G. A., & Grell, A. M. (2018). Assessing the Grell-Freitas Convection Parameterization in the NASA GEOS Modeling System. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. <https://doi.org/10.1029/2017MS001251>
- Gan, M. A., Ferreira, S. H. S., Piva, E. D., Rozante, J. R., Garcia, J. R. M., Fernandes, A. A., Neves, A. L. O., & Silva, V. M. (2021). Avaliação da Energética Prevista nos Modelos Regionais BRAMS, ETA e WRF: Parte I - Inverno. *Revista brasileira de meteorologia*, v. 36, p. 775-803. <https://doi.org/10.1590/0102-77863640042>
- Gramscianinov, C. B., Cardoso, A. A., da Silva, N. P., Luna-Niño, R., Castillo, N., Cavazos, T., & da Rocha, R. P. (2025). Early-Stage Extratropical Cyclones' Mechanisms Over South America: RCM Added Value and Future Changes in a Warmer Planet. *International Journal of Climatology*, 45(1), e8683. <https://doi.org/10.1002/joc.8683>
- Green, B. W., & Zhang, F (2013). Impacts of Air–Sea Flux Parameterizations on the Intensity and Structure of Tropical Cyclones, *Monthly Weather Review*, 141(7), 2308-2324. [10.1175/MWR-D-12-00274.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00274.1)
- Hong, S.-Y., Noh, Y., & Dudhia, J (2006). A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Mon. Wea. Rev.* 134, 2318. [10.1175/MWR3199.1](https://doi.org/10.1175/MWR3199.1)
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., & Mlawer, E. J (2008). Radiative Forcing by Long-Lived Greenhouse Gases: Calculations with the AER Radiative Transfer Models. *J. Geophys. Res.* 113,29. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- Lacis, A. A., & Hansen, J. E (1974). A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 31, p.118-133.
- Lauton, G., Marta-Almeida, M., S Dorfschäfer, G. A.D., & Lentini, C. (2021). Metocean modulators of the first recorded South Atlantic Hurricane: Catarina. *Geophys. Res. Lett.* 48, e2020GL091416. <https://doi.org/10.1029/2020GL091416>
- Martinez, J.A., Junquas, C., & Bozkurt, D. (2024) Recent progress in atmospheric modeling over the Andes – part I: review of atmospheric processes. *Front. Earth Sci.* 12:1427783. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1427783>
- Mesinger, F., & Jovic, D. (2002). The Eta slope adjustment: contender for an optimal steepening in a piecewise-linear advection scheme? Comparison tests. NCEP Office Note 439. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/11407>
- Mesinger, F., Veljovic, K., & Chou, S. C (2016). The Eta Model: Design, Use, and Added Value, Topics in Climate Modeling, Theodore Hromadka and Prasada Rao (Ed.), InTech. 10.5772/64956
- Mellor, G. L., & Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys.*, 20, 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>
- Morais, M.D.C., Gan, M.A., & Yoshida, M.C (2021). Features of the upper tropospheric cyclonic vortices of Northeast Brazil in life cycle stages. *Int J Climatol* v. 41, p. E39–E58. <https://doi.org/10.1002/joc.6839>
- Morcrette, J.-J., H. W., Barker, J.N.S., & Cole, M.J (2018). Impact of a new radiation package, McRad, in the ECMWF Integrated Forecast System, *Mon. Wea. Rev.*, 136, 4773-4798. [10.21957/j8cvfnmzb](https://doi.org/10.21957/j8cvfnmzb)
- Moreira, D. S., Longo, K. M., & Freitas, S. R (2017). Modelling the radiative effects of biomass burning aerosols on carbon fluxes in the Amazon region, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 14785-14810. <https://doi.org/10.5194/acp-17-14785-2017>
- Morrison, H., Thompson, G., & Tatarskii, V (2009). Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. *Monthly weather review*, v. 137, n. 3, p. 991-1007. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2556.1>

- Oreopoulos, L., Mlawer, E., & Delamere, J. (2012). The Continual Intercomparison of Radiation Codes: Results from Phase I, *J. Geophys. Res.*, 117, D06118. <https://doi.org/10.1029/2011JD016821>
- Pérez-Alarcón, A., Coll-Hidalgo, P., Fernández-Alvarez, J.C., Nieto, R., & Gimeno, L. (2022). Estimation of mean water vapour residence time during tropical cyclones using a Lagrangian approach. *Tropical Cyclone Research and Review*, 11(2), 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.tccr.2022.08.001>
- Pérez-Alarcón, A., Coll-Hidalgo, P., Fernández-Alvarez, J. C., Sorí, R., 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*, 10.1002/qj.4734, 150, 762, (2765-2782). <https://doi.org/10.1002/qj.4734>
- Pinheiro, H. R., Hodges, K. I., & Gan, M. A. (2024). Deepening mechanisms of cut-off lows in the Southern Hemisphere and the role of jet streams: insights from eddy kinetic energy analysis. *Weather and Climate Dynamics*, v. 5, p. 881-894. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-881-2024>
- Priestley, M., Ackerley, D., Catto, J., & Hodges, K. (2023). Drivers of Biases in the CMIP6 Extratropical Storm Tracks. Part II: Southern Hemisphere. *Journal of Climate* 36(5) pp. 1469-1486. [10.1175/JCLI-D-20-0977.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0977.1)
- Reboita, M. S., & Marrafon, V. H. (2021). Ciclones extratropicais: o que são, climatologia e impactos no Brasil. *Terra e Didática* 17:e021032. <https://doi.org/10.20396/td.v17i00.8666028>
- Reboita, M. S., Crespo, N. M., Dutra, L. M. M., Silva, B. A., Capucin, B. C., & Da Rocha, R. P. (2021). Iba: The First Pure Tropical Cyclogenesis Over the Western South Atlantic Ocean. *Journal Of Geophysical Research-Atmospheres*, v. 126. <https://doi.org/10.1029/2020JD033431>
- Reboita, M. S., Nogueira, N. C. d. O., Gomes, I. B. d. S., Palma, L. L. d. C., & da Rocha, R. P. (2024). 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>
- Reis, J. S. d., Gonçalves, W. A., Souza, D. O. d., & Mendes, D. (2022). Evaluation of Atmospheric Features in Natural Disasters due Frontal Systems over Southern Brazil. *Atmosphere*, 13(11). p. 1886. <https://doi.org/10.3390/atmos13111886>
- Ribeiro, J.G., Paz, G., Reboita, M. S., & Gozzo, L. (2023). Análise do Índice do Potencial de Gênese em Ciclones Subtropicais na Costa do Brasil. *Rev. Bras. De Geogr. Física*, 16, 2832–2857. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.5.p2832-2857>
- Rodrigues, L. F., Tomita, S. S., & Ruiz, R. S. R. (2019). Large Parallel version for the BRAMS with Runge-Kutta dynamical core. In: Conference of Computational Interdisciplinary Science.
- Rogers, E. T., Black, B., & Ferrier, Y. (2001). Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. *NWS Technical Procedures Bulletin* 488, NOAA/NWS. <https://www.emc.ncep.noaa.gov/users/mesoimpldocs/mesoimpl/etal2tpb/>
- Silva, B.A., Reboita, M.S., Crespo, N.M., da Rocha, R.P., & Dutra, L.M.M. (2022). Ciclones Subtropicais Guará e Lexi Parte I: Estrutura Térmica e Características Gerais. *Rev. Bras. De Geogr. Física*, 15, 333–342. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p333-342>
- Stojanovic, M., Gonçalves, A., Sorí, R., Vázquez, M., Ramos, A.M., Nieto, R., Gimeno, L., & Liberato, M. L. (2021). Consecutive extratropical cyclones Daniel, Elsa and Fabien, and their impact on the hydrological cycle of mainland Portugal. *Water*, 13(11), 1476. [10.3390/w13111476](https://doi.org/10.3390/w13111476)
- Thompson, G., & Eidhammer, T. (2014). A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone. *J. Atmos. Sci.*, 71, 3636-3658. [10.1175/JAS-D-13-0305.1](https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0305.1)
- Zhang, D., & Anthes, R. A. (1982). A High-Resolution Model of the Planetary Boundary Layer—Sensitivity Tests and Comparisons with SESAME-79 Data, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 21(11), 1594-1609. [10.1175/1520-0450](https://doi.org/10.1175/1520-0450)
- Zhang, C., & Wang, Y. (2017). Projected Future Changes of Tropical Cyclone Activity over the Western North and South Pacific in a 20-Km-Mesh Regional Climate Model. *J. Clim.* 30, 5923–5941. [10.1175/JCLI-D-16-0597.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0597.1)

- Zhan, X., & Chen, L. (2023). Climatology and Changes in Extratropical Cyclone Activity in the Southern Hemisphere during Austral Winters from 1948 to 2017. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 62(8) pp. 971-983. [10.1175/JAMC-D-22-0061.1](https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0061.1)
- Zilli, M., & Hart, N. (2021). Rossby Wave Dynamics over South America Explored with Automatic Tropical–Extratropical Cloud Band Identification Framework. *Journal of Climate* 34(20) pp. 8125-8144. [10.1175/jcli-d-21-0020.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-21-0020.1)
- Wood, K., Yanase, W., Beven, J., Camargo, S.J., Courtney, J.B., Fogarty, C., Fukuda, J., Kitabatake, N., Kucas, M., & McTaggart-Cowan, R. (2023). Phase transitions between tropical, subtropical, and extratropical cyclones: A review from IWTC-10. *Trop. Cyclone Rev.* 12, 294–308. <https://doi.org/10.1016/j.terr.2023.11.002>