

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

O CICLO DE VIDA DOS CICLONES SUBTROPICAIS NO SUDOESTE DO
ATLÂNTICO SUL: O IMPACTO DA CICLOGÊNESE NAS TRAJETÓRIAS E NOS
ACUMULADOS DE PRECIPITAÇÃO

BEATRIZ PEREIRA MIRANDA

ORIENTADORA: PROF.^a DRA. ANA MARIA BUENO NUNES

RIO DE JANEIRO

Julho, 2024

O CICLO DE VIDA DOS CICLONES SUBTROPICAIS NO SUDOESTE DO
ATLÂNTICO SUL: O IMPACTO DA CICLOGÊNESE NAS TRAJETÓRIAS E NOS
ACUMULADOS DE PRECIPITAÇÃO

Beatriz Pereira Miranda

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Avaliada por:

Prof.º D. Sc. Ana Maria Bueno Nunes - IGEO/UFRJ (Orientadora)

Prof.º D. Sc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira - IGEO/UFRJ

Prof.º D. Sc. Edilson Marton - IGEO/UFRJ

RIO DE JANEIRO

Julho, 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração a todos que estiveram ao meu lado ao longo desta jornada acadêmica, tornando possível a realização deste trabalho: À minha família — minha irmã, minha mãe e minha dinha — por todo amor, apoio incondicional e compreensão durante os momentos desafiadores desta caminhada. Aos complexados de mesoescala, que foram uma fonte constante de inspiração e alegria. Nossas conversas longas e cheias de risadas foram o meu refúgio nos momentos mais tensos. A amizade de vocês iluminou os meus dias e me ajudou a manter a perspectiva. Agradeço por me mostrarem a importância das pausas e por me ensinar que, mesmo nas dificuldades, é possível encontrar alguma besteira pra rir. Agradeço, especialmente ao Everson Coqueiro, que, além de amigo, se tornou um irmão nessa vida, a Isabela Costa, que é um presente precioso do universo na minha vida, e a Kamyllin Hildegard, por ser a cola que uniu todas as melhores pessoas, criando uma rede de apoio e amizade que transformou minha jornada. Sem vocês eu não teria conseguido. Também gostaria de expressar minha mais profunda gratidão ao Noé Guimarães por todo o apoio e companheirismo, especialmente na reta final desta jornada. Obrigada por acreditar em mim quando eu mais precisei. À minha orientadora, professora Ana Nunes, pela dedicação incansável e pela inspiração que proporcionou. Agradeço por ter me guiado não apenas no aspecto acadêmico, mas também por ter me ensinado a importância da ética, responsabilidade e paixão pela pesquisa. À banca examinadora, composta pela professora Ana Cristina e pelo professor Edilson, pelos ensinamentos preciosos e pelo carinho demonstrado ao longo desses anos. Ao Centro de Hidrografia da Marinha pela elaboração e disponibilização dos dados utilizados neste trabalho. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Iniciação Científica associada ao projeto desenvolvido no laboratório GEMMAS-UFRJ intitulado “Análise de Eventos Extremos em Áreas Urbanas e Costeiras”. À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo auxílio financeiro ao projeto “Modelagem Numérica de Alta Resolução para Avaliação dos Impactos dos Extremos Hidrometeorológicos sobre Áreas Vulneráveis ao Risco de Desastre no Estado do Rio de Janeiro”, processo FAPERJ-APQ1 n.º 210.175/2019, o qual proporcionou a aquisição do equipamento utilizado na pesquisa. E não poderia deixar de mencionar meus gatos, companheiros fiéis que sempre estiveram ao meu lado. A todos vocês, o meu muito obrigada.

RESUMO

Estudos recentes apontam mudanças na frequência e intensidade dos ciclones subtropicais (CSs) no Sudoeste do Atlântico Sul (SOAS). Isso pode aumentar a severidade dessas tempestades em cidades costeiras e sobre rotas marítimas de transporte de pessoas e mercadorias, especialmente quando combinadas com a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A falta de dados observacionais em áreas oceânicas destaca a importância de utilizar ferramentas como uma reanálise global para compreender estes eventos adversos. Este estudo teve como objetivo avaliar o impacto de diferentes tipos de ciclogênese nas trajetórias e acumulados de precipitação de 15 tempestades que ocorreram no SOAS de 2011 a 2022. A reanálise global de quinta geração do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ERA5) reconstruiu o ciclo de vida dessas tempestades, com foco no deslocamento e na precipitação. Os dados de relatórios pós-evento da Marinha do Brasil (MB) e as estimativas de precipitação por satélite serviram para validar os resultados da reanálise global. A ERA5 categorizou a maioria das tempestades de acordo com os relatórios da MB, exceto a tempestade subtropical Jaguar, que não atingiu os limites necessários para classificação como subtropical, conforme definido no diagrama de fases. O diagrama de fases indicou que das tempestades classificadas como subtropicais nesta região, 80% apresentaram ciclogênese subtropical, 13,3% foram extratropicais e apenas uma foi tropical. Em comparação com fatores sazonais, as trajetórias obtidas da ERA5 e dos relatórios da MB revelaram que o tipo de ciclogênese foi decisivo para o deslocamento das CSs. Considerando apenas aqueles com ciclogênese subtropical, 7 dos 12 ciclones estavam associados a eventos de ZCAS. Os eventos combinados de CSs e ZCAS apresentaram uma distribuição mais concentrada e taxas médias mais elevadas, indicando um impacto potencialmente mais severo. Considerando apenas o intervalo de 12 anos, o presente estudo indica um aumento na frequência de CSs na SOAS na segunda parte da década, com base nos dados obtidos dos relatórios da MB. Com um intervalo entre os anos de 2012 e 2014, de 2020 a 2021 houve um número maior de CSs, o que poderia estar associado com a fase fria prolongada do modo de variabilidade climática, El Niño-Oscilação Sul.

THE LIFE CYCLE OF SUBTROPICAL CYCLONES IN THE SOUTHWESTERN SOUTH
ATLANTIC: THE IMPACT OF CYCLOGENESIS ON TRAJECTORY AND
ACCUMULATED PRECIPITATION

ABSTRACT

Recent studies indicate changes in the frequency and intensity of subtropical cyclones (SCs) in the Southwest South Atlantic (SWSA). This may increase the severity of these storms in coastal cities and along maritime transport routes for people and goods, particularly when interacting with the South Atlantic Convergence Zone (SACZ). The lack of observational data in oceanic areas highlights the importance of using a global reanalysis to comprehend these adverse events. This study aims to evaluate the impact of different types of cyclogenesis on the trajectories and accumulated precipitation of 15 storms from 2011 to 2022 in SWSA. The fifth-generation global reanalysis from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ERA5) reconstructed the life cycle of these storms, focusing on their displacement and precipitation. The Brazilian Navy's (Marinha do Brasil-MB) post-event reports and satellite precipitation estimates validated the global reanalysis' results. ERA5 categorized most storms in agreement with MB reports, except for the subtropical storm Jaguar, which did not meet the criteria for subtropical classification as defined in the phase diagram. The phase diagram indicated that of the storms classified as subtropical in this region, 80% exhibited subtropical cyclogenesis, 13.3% were extratropical, and only one was tropical. Compared to seasonal factors, trajectories derived from ERA5 and MB reports revealed that the type of cyclogenesis played a crucial role in the displacement of SCs. Among those with subtropical cyclogenesis, 7 out of 12 cyclones were associated with SACZ events. The SCs and SACZ combined events showed a more concentrated distribution and higher average rates, suggesting a potentially more severe impact. Considering only the 12-year period, the present study indicates an increase in the frequency of SCs in SWSA towards the end of the period, based on data obtained from MB reports. With a gap between 2012 and 2014, from 2020 to 2021 there was an increase in the number of SCs that might be associated with the prolonged cold phase of the climate variability mode, El Niño-Southern Oscillation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	8
1. INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3. DADOS E METODOLOGIA	16
3.1 ÁREA DE ESTUDO	16
3.2 DADOS	16
3.2.1 RELATÓRIOS PÓS-EVENTO DA MARINHA DO BRASIL	16
3.2.2 CMORPH	17
3.2.3 REANÁLISE ERA5	18
3.2.4 GRIDSAT B1	19
3.2.5 EVENTOS DE ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL (ZCAS)	20
3.3 METODOLOGIA	21
3.3.1 RASTREAMENTO DO CENTRO DOS CICLONES	21
3.3.2 DIAGRAMA DE FASES DE CICLONES - CYCLONE PHASE SPACE (CPS)	22
3.3.3 FLUXO DE UMIDADE INTEGRADO VERTICALMENTE	24
3.3.4 PRECIPITAÇÃO ACUMULADA	25
3.3.5 SELEÇÃO DOS EVENTOS CICLÔNICOS	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1 DESCRIÇÃO DOS EVENTOS E IDENTIFICAÇÃO DA GÊNESE A PARTIR DO DIAGRAMA DE FASES	26
4.2 VARIABILIDADE MENSAL E SAZONAL	31
4.3 TRAJETÓRIA DOS CICLONES	32
4.4 PRECIPITAÇÃO	34
4.5 OCORRÊNCIA DE ZCAS EM ASSOCIAÇÃO A EVENTOS CICLÔNICOS	44
4.5.1 ANÁLISE DO PADRÃO ZCAS ATRAVÉS DO VETOR FLUXO DE UMIDADE	47

4.6 ENOS	50
5. CONCLUSÕES	53
6. REFERÊNCIAS	55

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Distribuição de boias meteoceanográficas em operação ao longo da área de responsabilidade brasileira (METAREA V) dentro do domínio do trabalho. 9
- Figura 2. Esquematização do algoritmo de rastreamento do centro dos ciclones a partir da pressão reduzida ao nível médio do mar (PNMM) extraída da reanálise ERA5. 20
- Figura 3. Diagramas de fase com os parâmetros (a) B vs -VTL (b) -VTL vs -VTU resumando as principais categorias de ciclones/tempestades de interesse do trabalho. 23
- Figura 4. Vento térmico entre 900 e 600 hPa X Parâmetro B (m) entre 900 e 600 hPa de todos os sistemas utilizando a reanálise ERA5, para os ciclones: a) Arani, b) Bapo, c) Cari, d) Deni, e) Eçaí, f) Guará, g) Iba, h) Jaguar, i) Kurumi, j) Mani, k) Oquira, l) Potira, m) Raoni, n) Ubá, o) Yakecan. 27
- Figura 5. Vento térmico entre 900 e 600 hPa X Vento térmico entre 600 e 300 hPa de todos os sistemas utilizando a reanálise ERA5, para os ciclones: a) Arani, b) Bapo, c) Cari, d) Deni, e) Eçaí, f) Guará, g) Iba, h) Jaguar, i) Kurumi, j) Mani, k) Oquira, l) Potira, m) Raoni, n) Ubá, o) Yakecan. 28
- Figura 6. Porcentagem de tempestades registradas que atingiram a categoria subtropical, subdividida com relação à gênese do sistema. 30
- Figura 7. a) Distribuição sazonal de tempestades que atingiram a classificação subtropical registradas pela Marinha do Brasil. b) Distribuição anual de tempestades que atingiram a classificação subtropical. c) Distribuição mensal das tempestades de acordo com a gênese. Todas elaboradas dentro do período entre 2011 e 2022. 31
- Figura 8. Uma comparação da trajetória observada das tempestades com a trajetória estimada pela reanálise ERA5. a) Trajetória das tempestades com ciclogênese subtropical, b) Trajetória das tempestades com ciclogênese extratropical, c) Trajetória das tempestades com ciclogênese tropical. 33
- Figura 9. Temperatura de brilho próxima a 11 μm ($^{\circ}\text{C}$) do GRIDSat, para os ciclones: a) Arani, b) Bapo, c) Cari, d) Deni, e) Eçaí, f) Guará, g) Iba, h) Jaguar, i) Kurumi, j) Mani, k) Oquira, l) Potira, m) Raoni, n) Ubá, o) Yakecan. 35
- Figura 10. Comparação da precipitação acumulada (mm) durante o ciclo de vida das tempestades estudadas através do CMORPH e da reanálise ERA5 para os ciclones: a) Arani, b) Bapo, c) Cari, d) Deni, e) Eçaí, f) Guará, g) Iba, h) Jaguar, i) Kurumi, j) Mani, k) Oquira, l)

Potira, m) Raoni, n) Ubá, o) Yakecan. 38

Figura 11. a) Distribuição sazonal da ocorrência de ZCAS, b) Distribuição mensal da ocorrência de ZCAS, c) Distribuição anual da ocorrência de ZCAS. Todos os gráficos foram gerados utilizando os registros disponíveis para o período entre 2011 e 2022 com base nos dados disponibilizados pela Marinha do Brasil. 45

Figura 12. Linhas de corrente (linhas com setas) tangentes ao vetor fluxo médio de umidade verticalmente integrado (FU) ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) computado a partir da ERA5 ao longo do ciclo de vida das tempestades a) Arani, b) Bapo, c) Cari, d) Deni, e) Eçaí, f) Guará, g) Iba, h) Jaguar, i) Kurumi, j) Mani, k) Oquira, l) Potira, m) Raoni, n) Ubá, o) Yakecan. Áreas sombreadas (valores indicados na barra de cores) indicam a precipitação acumulada (mm) no mesmo período de FU. 48

Figura 13. Índice ONI ($^{\circ}\text{C}$) e ocorrência de tempestades que chegaram a uma fase subtropical ao longo do período de 2011 a 2022. 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Categorização de sistemas tropicais e subtropicais a partir da velocidade do vento associada aos fenômenos. Fonte: Adaptado de NORMAM-701/DHN.	14
Tabela 2. Descrição da resolução espacial e temporal do CMORPH	18
Tabela 3. Precipitação máxima obtida através do CMORPH e da ERA5, duração dos eventos, viés, taxa de precipitação por hora e tipo de ciclogênese associada às tempestades.	44
Tabela 4. Datas e duração dos ciclones que se associaram a ZCAS e datas e duração do evento de ZCAS.	47
Tabela 5. Taxa de ocorrência de ciclones por episódio de ENOS positivo, negativo e neutro.	51
Tabela 6. Síntese dos principais resultados.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASAS - Alta Subtropical do Atlântico Sul
CE - Ciclogênese Extratropical
CHM - Centro de Hidrografia da Marinha
CMORPH - Climate Prediction Center morphing technique
COSMO - Consortium for Small-scale Modeling
CPC - Climate Prediction Center
CS - Ciclogênese Subtropical
CSs - Ciclones Subtropicais
CT - Ciclogênese Tropical
DS - Depressão Subtropical
DT - Depressão Tropical
ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENOS - El Niño-Oscilação Sul
GFS - Global Forecast System
GPCP - Global Precipitation Climatology Project
ISCCP - International Satellite Cloud Climatology Project
JBN - Jato de Baixos Níveis Sul-Americano
MB - Marinha do Brasil
NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration
NOGAPS - Navy Operational Global Atmospheric Prediction System
NORMAM-701/DHN - Normas da Autoridade Marítima Para as Atividades de Meteorologia Marítima
ONI - Índice Oceânico Niño
PNBOIA - Programa Nacional de Boias
RG1 - Região 1
RG2 - Região 2
RG3 - Região 3
SiMCosta - Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira
SMM - Serviço Meteorológico Marinho
SOAS - Sudoeste do Oceano Atlântico Sul
TS - Tempestade Subtropical
TT - Tempestade Tropical
WRF - Weather Research & Forecasting Model
ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

1. INTRODUÇÃO

Um estudo recente indica que, no futuro, ciclones subtropicais (CSs) serão menos frequentes, porém mais intensos sobre o Atlântico Sul (de Jesus *et al.*, 2022). Na costa Sul-Sudeste do Brasil existe uma região favorável a formação desses sistemas (Evans e Braun, 2012; Gozzo *et al.*, 2014), os quais podem apresentar características subtropicais desde sua gênese ou sofrer uma transição a partir de sistemas originalmente extratropicais ou tropicais (Hart, 2003).

Reboita *et al.* (2018) caracterizaram sinoticamente a gênese e o desenvolvimento de seis ciclones subtropicais que ocorreram entre 2010 e 2016, e concluíram que, na maioria dos episódios, a precipitação registrada superou a média mensal na parte leste do Sudeste do Brasil, impactando principalmente o Rio de Janeiro (RJ) e o Espírito Santo (ES).

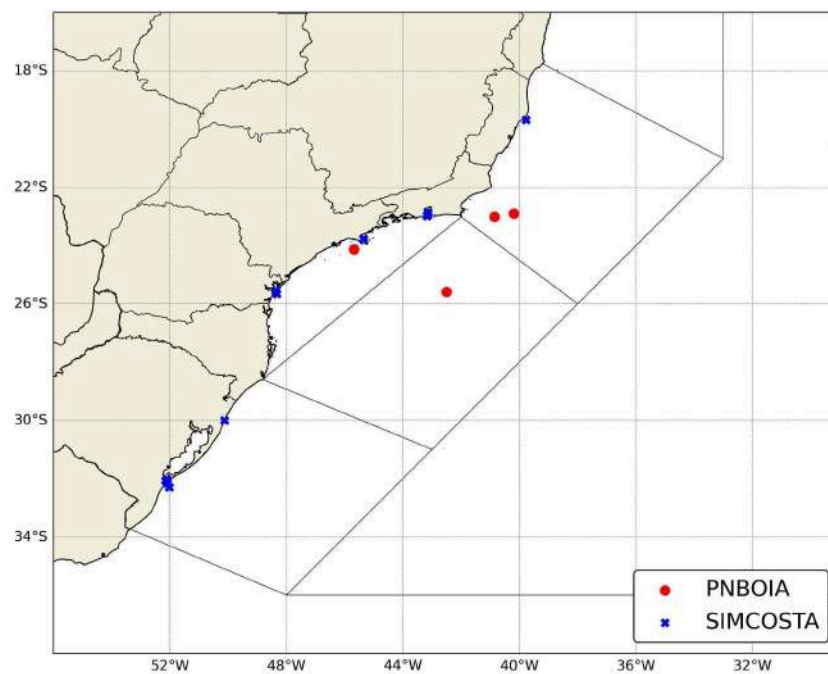
No estudo ora desenvolvido, utilizando como referência os mesmos seis ciclones subtropicais, observou-se que a maioria deles (quatro) ocorreu durante episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), em concordância com Silva e Reboita (2019) que mostram que a existência de ciclones no Sudoeste do Atlântico Sul (SOAS) contribuem para a manutenção da ZCAS, o que poderia ser uma das causas para o aumento na precipitação nesta região.

Além disso, através de uma climatologia para SOAS, Cardoso *et al.* (2022) destacaram a contribuição dos CSs na intensificação do vento e precipitação próxima a costa Sudeste do Brasil. Adicionalmente, os autores concluíram que as condições adversas causadas por CSs afetam desde a costa até o mar aberto. Portanto, a presença de CSs aumenta o risco tanto para a população residente na região costeira, quanto para as operações marítimas de portos e navios, o que poderia ser intensificado pela presença de ZCAS.

No entanto, como compreender tais eventos e sua relação quando ocorrem em conjunto em áreas oceânicas? A falta de registros é a principal dificuldade para estudar fenômenos atmosféricos em alto mar. Os dados observados são essenciais para verificar o desempenho de modelos de previsão, que são as principais ferramentas utilizadas para analisar esses fenômenos. Na Figura 1 é exibida a localização das boias meteoceanográficas disponíveis ao longo da costa Sul e Sudeste do Brasil. Foram contabilizadas quatro boias do Programa Nacional de Boias (PNBOIA) que é um programa multiinstitucional e que conta com boias fixas para coleta de dados. Além dos dados do PNBOIA, o Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta) conta com treze boias fixas e à deriva para a coleta de dados meteorológicos e oceanográficos. Apesar da relevância desses programas

para o monitoramento da costa, ainda há uma escassez de fontes de dados observacionais no SOAS. Dessa forma, torna-se fundamental recorrer a ferramentas como reanálises globais e ao uso de produtos derivados de sensoriamento remoto para o monitoramento dos ciclones na região de interesse. No entanto, deve-se compreender as limitações do uso de reanálises globais que dependem de dados observacionais, porém incluem produtos derivados de satélite, os quais são relevantes para estudos de fenômenos meteorológicos em áreas oceânicas.

Figura 1. Distribuição de boias meteoceanográficas em operação ao longo da área de responsabilidade brasileira (METAREA V) dentro do domínio do trabalho.



Fonte: Elaborada pelo autor

1.1 Objetivos

Este estudo tem como principal objetivo avaliar o impacto de diferentes tipos de ciclogênese nas trajetórias e nos acumulados de precipitação associados a 15 tempestades, que apresentaram características subtropicais entre 2011 e 2022, ao longo da Bacia Sudoeste do Atlântico Sul.

Adicionalmente, pretende-se investigar o efeito da combinação entre os ciclones subtropicais e a Zona de Convergência do Atlântico Sul na precipitação acumulada na área de atuação das tempestades documentadas através de relatórios pós-evento da Marinha do Brasil. Esses relatórios trazem uma análise retrospectiva dos ciclones subtropicais a partir de 2011 até o presente, e servem como base na seleção dos casos, avaliação e verificação de outras ferramentas utilizadas no presente estudo.

Dentro desse contexto, foram examinadas as características de cada um dos ciclones selecionados, os quais manifestaram uma fase subtropical em seu ciclo de vida. Para isso, a pesquisa utilizou variáveis atmosféricas e de superfície de reanálise global de quinta geração de reanálises desenvolvidas no *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, assim como de dados provenientes de produtos derivados de satélites ambientais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“Gênese” é uma palavra que vem do grego antigo e significa “origem” ou “começo” e é comumente usada para se referir ao processo de criação ou origem de algo. Na Meteorologia, ciclogênese é um termo utilizado para descrever o processo de formação e desenvolvimento de ciclones, que são áreas de baixa pressão atmosférica caracterizadas por ventos que giram no sentido horário no Hemisfério Sul e anti-horário no Hemisfério Norte. Ademais, os ciclones podem se desenvolver em diferentes ambientes, estando sujeitos a diferentes forçantes dinâmicas e termodinâmicas. Este fato acarreta na existência de ciclones com padrões distintos entre si.

Desde o século XIX, estuda-se a formação e o comportamento dos ciclones extratropicais. Estes se formam em ambientes com a presença de gradientes horizontais de temperatura na superfície (Bjerknes e Solberg, 1922) e baroclínicos. Por outro lado, os ciclones tropicais, que ganharam notoriedade a partir dos trabalhos de Riehl (1948), Ramage (1959) e Gray (1968), estão associados principalmente à liberação de calor latente proveniente da evaporação em oceanos tropicais (Gray, 1968) e a anomalias ciclônicas na superfície e barotrópicos. Estas duas classificações apresentam características opostas, o que abriu margem para a discussão de sistemas com características mistas. Da Rocha *et al.* (2019) fizeram uma revisão sobre os ciclones subtropicais em distintas bacias oceânicas e ressaltaram que estudos sobre tais eventos tiveram início em meados do século XX, mas, a partir do trabalho de Hart (2003), ganharam notoriedade devido à possibilidade de uma classificação objetiva através do uso de um diagrama que representa as fases do ciclo de vida dos ciclones. Os ciclones subtropicais possuem características de ambas as classificações anteriores, o que define sua natureza híbrida, e a sua manutenção depende, parcialmente, de ambas as fontes de energia (Guishard *et al.*, 2009; Gozzo *et al.*, 2014).

Os ciclones podem derivar de ciclogênese tropical, extratropical ou subtropical. Além disso, à medida que se deslocam, os sistemas podem adquirir características distintas do seu momento de formação. Esse processo é chamado de transição de fase. Dessa forma, quando um ciclone tropical ou subtropical passa a apresentar características extratropicais, ocorre a transição extratropical, que pode ser favorecida quando os ciclones se deslocam para regiões com maiores gradientes de pressão. Em média, cerca de metade das tempestades tropicais no Atlântico, quase um terço das tempestades ocidentais do Pacífico Norte e aproximadamente uma em cada dez tempestades nas águas ocidentais da Austrália passam por transição extratropical, conforme relatado por Hart e Evans (2001). Em um estudo recente, Mokhov *et*

al. (2020) observaram tendências positivas na frequência de transformação de ciclones tropicais em extratropicais em diferentes bacias oceânicas dos Hemisférios Norte e Sul com base em observações durante o período de 1970 a 2019.

Por outro lado, quando um ciclone extratropical ou subtropical adquire características tropicais, ocorre a transição tropical, que pode ocorrer quando a convecção se organiza de modo a obter um núcleo profundo e quente com condições favoráveis de temperatura da superfície do mar (Pezza e Simmonds, 2005; McTaggart-Cowan *et al.*, 2006; Nunes, 2016; Bentley e Metz, 2016).

Uma terceira forma de transição é quando um ciclone tropical ou extratropical desenvolve características subtropicais, caracterizando-se como uma transição subtropical. Essa, por sua vez, pode ocorrer devido ao aumento da baroclinia (tropicais para subtropicais) ou quando a convecção sustenta o desenvolvimento do núcleo quente (extratropicais para subtropicais) (Reboita *et al.*, 2022).

No Brasil, esses sistemas são monitorados e nomeados pela Marinha do Brasil seguindo as diretrizes das Normas da Autoridade Marítima Para as Atividades de Meteorologia Marítima (NORMAM-701/DHN) de 21 de setembro de 2023. Ciclones extratropicais são frequentes ao longo do ano, não recebem nomes e não são categorizados a partir da magnitude da velocidade do vento. Os ciclones tropicais e subtropicais recebem nomes a partir de uma lista pré-existente em tupi antigo e são classificados a partir da magnitude da velocidade do vento associado a eles, como exposto na Tabela 1.

Tabela 1. Categorização de sistemas tropicais e subtropicais a partir da velocidade do vento associada aos fenômenos. Fonte: Adaptado de NORMAM-701/DHN.

Classificação	Vento máximo sustentado a superfície	Escala Beaufort
Depressão Tropical (DT)	Inferior a 34 nós (63 km/h)	Força 7
Tempestade Tropical (TT)	Igual ou superior a 34 nós e inferior a 64 nós (63 a 118 km/h)	Força 8 a 11
Ciclone Tropical ou Furacão	igual ou superior a 64 nós (118 km/h)	Força 12
Depressão Subtropical (DS)	Inferior a 34 nós (63 km/h)	Força 7
Tempestade Subtropical (TS) ou Ciclone subtropical	Igual ou superior a 34 nós e inferior a 64 nós (63 a 118 km/h)	Força 8 a 11

Fonte: Elaborada pelo autor

Desde a década de 90 até os dias atuais, pesquisadores destacam as regiões da costa leste do Sudeste do Brasil (RG1), extremo Sul do Brasil e Uruguai (RG2) e costa Sul da Argentina (RG3) como regiões propícias a ciclogênese (Gan e Rao, 1991; Sinclair, 1995; Reboita *et al.*, 2010; Evans e Braun, 2012; Gozzo *et. al.*, 2014; Reboita e Marrafon, 2021).

Utilizando a reanálise global ERA-40 (Uppala *et al.* 2005) e análises operacionais do *Global Forecast System* (GFS), Evans e Braun (2012) elaboraram uma climatologia de 50 anos (1957–2007) da ocorrência de CSs no oceano Atlântico Sul e destacaram a RG1 como a região de maior densidade de ciclogênese subtropical, com frequência de aproximadamente 1,2 CSs por ano. Gozzo *et. al.* (2014), com uma climatologia de 33 anos, também identificaram essa região como a área de maior concentração de formação de CSs, com frequência de aproximadamente 7 eventos por ano, a partir de duas reanálises globais: ERA-Interim (Dee *et al.* 2011) e NCEP 1 (Kalnay *et al.* 1996). Os autores, no entanto, concluíram que a divergência entre os resultados advém da utilização de limiares menos rígidos para a climatologia.

Vórtices ciclônicos de altos e médios níveis e cavados são os principais mecanismos dinâmicos associados à formação de ciclones subtropicais tanto no Hemisfério Sul quanto no Hemisfério Norte (Evans e Guishard, 2009; Evans e Braun, 2012; Gozzo *et al.*, 2014). Os vórtices e cavados são formados por quebras do fluxo básico de oeste e a divergência a leste desses sistemas em médios e altos níveis favorece a convergência em superfície, o que favorece o abaixamento da pressão. Além disso, majoritariamente, os ciclones subtropicais

que ocorrem nessa região, foram associados a bloqueios do tipo dipolo (Gozzo *et al.*, 2014; Ribeiro *et al.*, 2023), o que pode ter favorecido a diminuição do cisalhamento vertical do vento e auxiliado a organização da convecção, necessária para a manutenção desse tipo de sistema.

A disponibilidade de umidade é essencial tanto para a formação quanto para a manutenção de ciclones subtropicais. Gozzo *et al.* (2017) mostraram, através de um modelo objetivo de trajetória Lagrangiana e experimentos numéricos, que um fluxo de nordeste, associado a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), é a principal fonte de umidade para a RG1 em momentos pré ciclogênese subtropical. Os autores concluíram que esse transporte anômalo de umidade é favorecido durante os meses de verão, quando o setor oeste do ASAS se localiza a leste de sua posição climatológica, próximo à costa brasileira. Além disso, afirmaram que o Jato de Baixos Níveis (JBN) Sul-Americano pouco contribui para o transporte de umidade em direção ao RG1 durante os eventos de ciclogênese subtropical.

Silva *et al.* (2019) associaram os eventos da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) com ciclones que ocorreram no período de 2006 a 2017. Os autores expuseram que aproximadamente 30% dos eventos de ZCAS se associaram a ciclones na costa Sul-Sudeste do Brasil. Sabe-se, no entanto, que a ZCAS é suprimida quando existem condições mais intensas do JBN (Marengo *et al.*, 2004; Da Silva e Ambrizzi, 2010) e que esses se intensificam em anos de El Niños fortes (Bruick *et al.*, 2019).

Em suma, a compreensão dos mecanismos e dos padrões de tempo e clima associados à ciclogênese subtropical na região costeira do Sudeste e Sul do Brasil é crucial para o aprimoramento dos sistemas de monitoramento e previsão meteorológica. A interação complexa entre vários fenômenos atmosféricos, como vórtices ciclônicos, cavados, bloqueios atmosféricos e sistemas de transporte de umidade, ressalta a importância de estudos contínuos e aprofundados nessa área. Além disso, a influência de eventos climáticos globais como El Niño e padrões regionais como a Zona de Convergência do Atlântico Sul, destacam a necessidade de uma abordagem em várias escalas para entender e prever a ocorrência desses eventos, visando mitigar possíveis impactos socioeconômicos e ambientais nas áreas afetadas.

3. DADOS E METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

A área de interesse deste trabalho compreende a região costeira entre o Sul e Sudeste do Brasil (Figura 1), estendendo-se desde a costa sul do estado do Rio Grande do Sul até o litoral do estado do Espírito Santo, englobando boa parte do Sudoeste do Oceano Atlântico Sul. Essa região é especialmente relevante devido à suscetibilidade a impactos de sistemas meteorológicos significativos ao longo do ano, mas principalmente à formação e desenvolvimento de tempestades subtropicais.

3.2 Dados

3.2.1 Relatórios Pós-Evento da Marinha do Brasil

Em 2022, o Serviço Meteorológico Marinho (SMM) do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), divulgou relatórios pós-evento para cada uma das tempestades que atingiram as categorias subtropical ou tropical registradas sob a METAREA. A METAREA é uma região que faz parte do território nacional e, portanto, é de responsabilidade brasileira reunir as principais características dos eventos que ocorrem dentro de seus limites para uso como uma fonte inicial de informações para previsão e estudos mais detalhados. Desde 2011, foram divulgados relatórios de identificação e monitoramento de ciclones subtropicais pela Marinha do Brasil, com colaboração do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da Força Aérea Brasileira (FAB) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Dessa forma, os relatórios fornecem uma visão abrangente da evolução dos eventos quanto a sua classificação, trajetória, emissão de avisos, dados observados e estimados.

Em todos os relatórios disponibilizados até 2023, os modelos regionais operacionais utilizados pelo CHM eram os modelos *Consortium for Small-scale Modeling* (COSMO) e *Weather Research & Forecasting Model* (WRF) e, através deles é que se obteve algumas das informações associadas aos eventos em cada relatório. A definição do centro do sistema e o valor central da pressão foram realizadas com base na análise destes modelos. A trajetória dos sistemas teve como base o posicionamento dos sistemas em cada passo de tempo, inferido através da modelagem numérica, e o comportamento da nebulosidade observadas através de imagens de satélite. A avaliação da natureza das tempestades, a nomenclatura e a

classificação dos eventos são feitas com base na NORMAM-701/DHN e em ferramentas do perfil térmico vertical.

Na maioria dos relatórios, não há dados observacionais disponíveis medidos através de navios, boias meteoceanográficas ou estações meteorológicas nas proximidades dos eventos, o que evidencia o problema associado à disponibilidade de dados em ambiente marítimo discutido na introdução deste trabalho. Em alternativa a medições diretas, são utilizados produtos via satélite que estimam a direção e intensidade do vento, como o *Advanced Scatterometer* (ASCAT METOP-B) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

3.2.2 CMORPH

Em alternativa a registros diretos de precipitação, utilizou-se estimativas de precipitação por satélite. O conjunto de dados selecionado refere-se às estimativas globais de precipitação de alta resolução que são geradas a partir de dados de satélite e passam por um processo de correção por viés em duas etapas (Xie *et al.*, 2017). Na primeira etapa, são produzidos campos de precipitação globais com taxas de precipitação nível 2 provenientes de satélites. Em seguida, o viés das estimativas é removido por meio de comparação com a análise diária do *Climate Prediction Center* (CPC) em superfície obtido através dos dados do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP). Dessa forma, são obtidas as estimativas de precipitação por satélite com a técnica de morphing do CPC (CMORPH) com resolução horizontal de $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$, quase global e em uma resolução temporal de 30 min de janeiro de 1998 até o presente. Para melhorar a experiência do usuário e popularizar o uso deste conjunto de dados, o CMORPH é disponibilizado em três conjuntos de dados com diferentes resoluções de tempo e espaço que estão descritos sucintamente na Tabela 2, a seguir:

Tabela 2. Descrição da resolução espacial e temporal do CMORPH

Conjunto	Resolução Espacial	Resolução Temporal
Full-resolution CMORPH (mm/hora)	8 km x 8 km	30 min
Hourly CMORPH (mm/hora)	0,25° x 0,25°	horária
Daily CMORPH (mm/dia)	0,25° x 0,25°	horária

Fonte: Elaborada pelo autor

Neste trabalho, o CMORPH foi utilizado na sua versão horária com resolução espacial de 0,25°. Foi empregado para a obtenção de acumulados de precipitação ao longo do ciclo de vida das tempestades e em avaliações da precipitação total acumulada de uma reanálise global de mesma resolução.

3.2.3 Reanálise ERA5

Reanálises são reconstruções climáticas globais que combinam observações com modelos numéricos. Elas proporcionam conjuntos de dados consistentes ao longo do tempo, sendo essenciais para análises climáticas e estudos de longo prazo. ERA5 é uma reanálise global de quinta geração do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), e representa um avanço significativo em relação às reanálises anteriores do ECMWF, oferecendo uma combinação de resolução aprimorada, maior quantidade de informações, melhorias nos métodos de assimilação e nos modelos numéricos. A ERA5 cobre o período desde janeiro de 1950 até o presente com resolução espacial horizontal de aproximadamente 31 quilômetros e vertical que compreende 137 níveis. Assimila uma grande variedade de dados, incluindo observações de satélites, balões meteorológicos, boias oceânicas e estações meteorológicas que são combinados por meio de modelos numéricos para criar uma representação espacial e temporal abrangente de parâmetros climáticos, sendo particularmente útil para análises de tendências climáticas e eventos extremos.

Na ERA5, a temperatura da superfície do mar (em inglês, *sea surface temperature*—SST) e a concentração de gelo marinho (em inglês, *sea ice concentration*—SIC) são condições de contorno inferior e fornecidas por conjuntos de dados de nível 4 (dados processados para uso direto dos usuários). Devido ao extenso período de cobertura dessa

reanálise, os produtos utilizados para condições de contorno foram atualizados devido ao período de disponibilidade de cada conjunto de dados. A partir de setembro de 2007 em diante, a SST foi baseada no produto OSTIA, enquanto a SIC foi derivada da Operação OSI SAF, ambas em uma resolução de 0,05 x 0,05 graus. Esses dados fornecem informações cruciais sobre as condições da superfície do mar ao longo do tempo para ERA5.

Para obter informações mais detalhadas sobre a reanálise ERA5, recomenda-se consultar Hersbach *et al.* (2020). Este artigo fornece uma análise abrangente da configuração, metodologia e características do ERA5, abordando diversos aspectos, desde a assimilação de dados até a qualidade e as melhorias em relação às reanálises anteriores.

Para a elaboração desse trabalho, foram utilizadas as seguintes variáveis meteorológicas: a altura geopotencial (m), derivada da variável Geopotencial ($m^2.s^{-2}$) ao ser dividida pela aceleração gravitacional da Terra, $g = 9,80665 m.s^{-2}$, as componentes zonal e meridional do vento (ambas em $m.s^{-1}$) e a umidade específica (kg/kg) em 17 níveis de pressão e as componentes zonal e meridional do vento a 10 m (ambas em $m.s^{-1}$), a precipitação total (mm), as pressões na superfície e a reduzida ao nível médio do mar (Pa) em nível superficial.

3.2.4 GRIDSAT B1

O GridSat B1 é um conjunto de dados derivados de satélites geoestacionários, obtidos como parte do *International Satellite Cloud Climatology Project* (ISCCP). A formulação desse conjunto começa com a coleta de dados brutos dos satélites, incluindo informações sobre temperatura de brilho do canal de infravermelho (IR), visível e vapor d'água. Esses dados são processados para corrigir imperfeições como ruído e distorções. Em seguida, são normalizados tanto intersatélite, para garantir consistência entre diferentes satélites, quanto temporalmente, calibrando os dados em relação a um padrão temporal durante o período de registro do GridSat. Os dados processados são projetados em uma grade global igualmente espaçada usando uma projeção de mapa de ângulo igual e os satélites são combinados selecionando as observações mais próximas do nadir para cada ponto de grade. Por fim, os dados são disponibilizados para a comunidade de pesquisa com resolução horizontal de 0,07° grau a cada 3 horas. Neste trabalho, foram utilizados os dados de temperatura de brilho do canal correspondente ao comprimento de onda do infravermelho (próximo a 11 μm). Mais informações sobre esse conjunto de dados podem ser encontradas em Knapp *et al.* (2011).

3.2.5 Eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

Para quantificação da ocorrência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) entre 2011 e 2022 e verificação da existência desse sistema concomitante a um ciclone subtropical, foram utilizados registros de ZCAS feitos pela Marinha do Brasil, a partir das cartas sinóticas da instituição. A base de dados utilizada foi elaborada e posteriormente disponibilizada via email mediante solicitação. O método utilizado para a contabilização do registro foi a verificação visual de cada carta sinótica disponível no período de interesse. Os resultados foram organizados e disponibilizados em planilhas separadas por mês e ano.

O limiar teórico utilizado para classificação de um evento de ZCAS pela Marinha é de 4 dias de persistência, no entanto, uma análise que leva em conta a experiência individual de cada previsor, é mais relevante para a plotagem ou não do sistema na carta sinótica. Dessa forma, utilizou-se um critério objetivo que não contabiliza casos de ZCAS com duração inferior a 48 h. Apesar disso, na base de dados de ZCAS foram observados eventos com duração menor que 24 h, podendo ser atribuídos a uma classificação errônea do sistema ou discordância entre os previsores. Além disso, na mesma base de dados, não houve distinção entre o extinto conceito da Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) e ZCAS. O filtro de pelo menos 48 h de registro elimina casos duvidosos e melhora a qualidade da base de dados. A partir dos dados restantes, foram contabilizados a quantidade de eventos registrados ao longo desse período e a porcentagem deles que se associou com ciclones subtropicais.

3.2.6 Oceanic Niño Index (ONI)

Para análise da fase do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (Trenberth, 1997), foram obtidos os dados do Índice Oceânico Niño (ONI) através do *Climate Prediction Center* (CPC) que disponibiliza informações sobre períodos quentes (El Niño) e frios (La Niña). Esse índice é calculado com base em uma média móvel de três meses das anomalias da temperatura da superfície do mar na região do Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W). A análise é realizada em intervalos de cinco anos, com atualizações regulares a cada mês. Esses dados servem como uma medida das características do El Niño-Oscilação Sul (ENOS), permitindo a identificação de padrões climáticos ao longo do tempo.

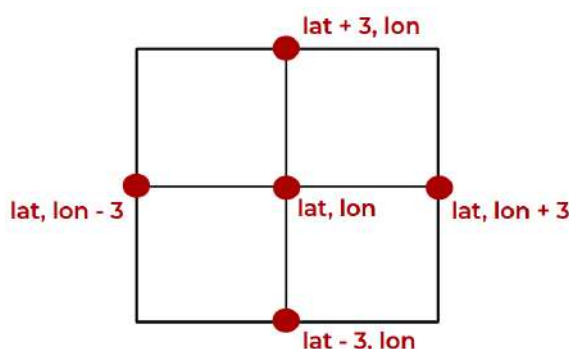
3.3 METODOLOGIA

3.3.1 Rastreamento do Centro dos Ciclones

Neste trabalho, optou-se pelo uso da pressão reduzida ao nível médio do mar para o rastreamento da posição dos sistemas a cada passo de tempo, uma vez que os ciclones já são conhecidos e existe documentação sobre períodos de ocorrência e posicionamento obtidos através de centros operacionais. Além disso, Reboita *et al.* (2019) mostram que a pressão reduzida ao nível médio do mar é mais indicada do que a vorticidade relativa na identificação dos sistemas, justificando o uso desta variável no rastreamento dos ciclones neste trabalho. Dessa forma, a trajetória (pontos de grade associados aos menores valores de PNMM em superfície) apresentada para os 15 sistemas estudados é produzida a partir da reanálise ERA5, ao longo do ciclo de vida de cada tempestade. A identificação desses pontos e os valores de pressão associados a eles foram essenciais para o desenvolvimento dos diagramas elaborados neste trabalho seguindo a metodologia de Hart (2003). Além disso, a gênese dos sistemas é computada no primeiro passo de tempo em que a isóbara de baixa pressão se forma.

A Figura 2 esquematiza o modo com que o rastreamento foi realizado. A primeira etapa do algoritmo de rastreamento é uma estimativa visual da localização do centro do ciclone a partir da plotagem da pressão reduzida ao nível médio do mar (hPa). Os pontos podem ser visualizados no centro da caixa na figura, com a nomenclatura de “lat, lon”. Estas coordenadas são utilizadas para a próxima etapa do algoritmo, onde, a partir dos pontos iniciais, há uma busca pelo menor valor de pressão dentro da caixa.

Figura 2. Esquematização do algoritmo de rastreamento do centro dos ciclones a partir da pressão reduzida ao nível médio do mar (PNMM) extraída da reanálise ERA5.



Fonte: Elaborada pelo autor

3.3.2 Diagrama de Fases de Ciclones - *Cyclone Phase Space (CPS)*

A metodologia do *Cyclone Phase Space* (Hart, 2003) surgiu como uma alternativa ao estudo do desenvolvimento tridimensional da estrutura de ciclones de forma objetiva em razão de numerosos exemplos de estrutura e desenvolvimento não convencionais dentro do *continuum* que separa os ciclones extratropicais clássicos e ciclones tropicais clássicos. A metodologia se baseia em 3 parâmetros calculados em duas camadas da atmosfera que formam um espaço tridimensional para a análise da estrutura dos ciclones. São eles, B , $-V_T^L$ e $-V_T^U$. O parâmetro B representa o gradiente de espessura entre 900-600 hPa relativo ao movimento da tempestade através do ciclone. Este parâmetro quantifica o grau de simetria do centro do ciclone com relação ao seu deslocamento e, portanto, identifica a sua natureza frontal ou não-frontal. Para o cálculo, identifica-se o centro da tempestade e seu deslocamento, a partir disso, define-se o lado direito e o esquerdo dentro de um círculo com raio de 500 km. Com isso, B pode ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$B = h (\underline{\Delta Z_D} - \underline{\Delta Z_E})$$

O hemisfério é representado por h e computa-se 1 para o Hemisfério Norte e -1 para o Hemisfério Sul; $\underline{\Delta Z_D}$ é a espessura média entre 900-600 hPa no semicírculo à direita do movimento; $\underline{\Delta Z_E}$ é a espessura média entre 900-600 hPa no semicírculo à esquerda do movimento.

O parâmetro utilizado para indicar as características térmicas e, conseqüentemente, definir as diferentes fases do ciclone é o vento térmico, representado pelo cisalhamento vertical do vento geostrófico (proporcional ao gradiente horizontal de temperatura média da camada) uma vez na baixa troposfera, 900 hPa a 600 hPa ($-|VTL|$), e outra na alta troposfera 600 hPa e 300 hPa ($-|VTU|$). Esse cálculo é obtido através da perturbação da altura do geopotencial do ciclone (ΔZ), dada por:

$$\Delta Z = Z_{MAX} - Z_{MIN}$$

Z_{MAX} e Z_{MIN} são a altura geopotencial máxima e mínima encontradas em um dado nível de pressão dentro do raio de 500 km do centro da tempestade em superfície, respectivamente.

A estrutura vertical do ciclone (núcleo frio ou núcleo quente) é definida pela derivada de ΔZ , aplicada em duas camadas:

$$\left. \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln(p)} \right|_{900 \text{ hPa}}^{600 \text{ hPa}} = - |V_T^L|$$

$$\left. \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln(p)} \right|_{600 \text{ hPa}}^{300 \text{ hPa}} = - |V_T^U|$$

onde $- |V_T| > 0$ representa núcleo quente e $- |V_T| < 0$, núcleo frio.

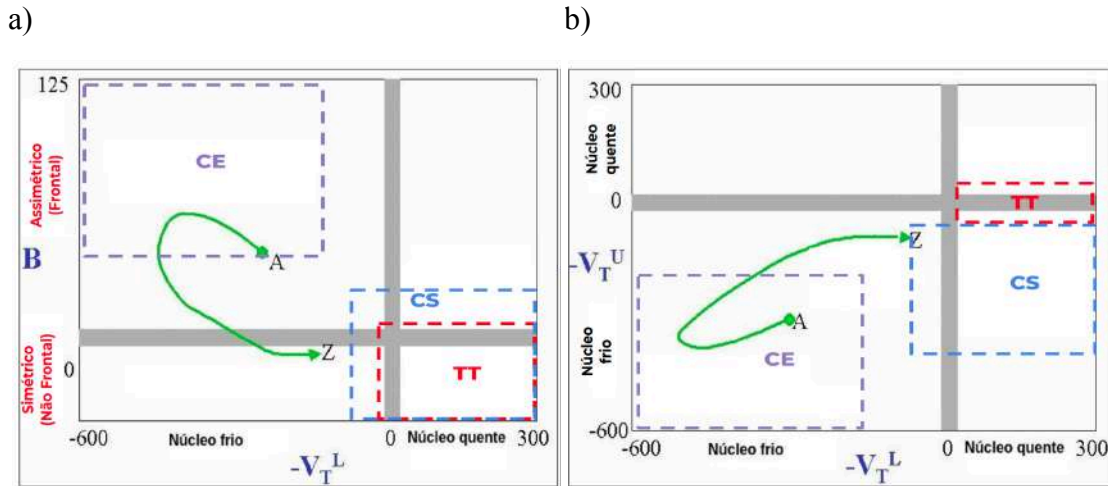
Ao final do cálculo dos três parâmetros obtém-se as três dimensões do espaço de fases dos ciclones. Hart (2003) chama atenção ao fato de que existem muitas outras dimensões a serem analisadas, mas que na elaboração desta metodologia os três parâmetros descritos são os que representam a maior parte da variabilidade entre os ciclones conhecidos em escala sinótica.

O resultado final do diagrama de fases de ciclones é composto por duas figuras que combinam os três parâmetros (Figura 3). Na primeira parte do diagrama há a combinação de $-V_T^L$ (eixo x) vs B (eixo y) e na segunda parte há a combinação de $-V_T^L$ (eixo x) vs $-V_T^U$ (eixo y). Em ambas as partes há quatro quadrantes que representam características diferentes e que quando combinadas são usadas para identificar as fases dos ciclones. O ciclo de vida de determinado ciclone pode ser representado no espaço de fase onde “A” e “Z” marcam o início e o fim do ciclo, respectivamente.

Hart (2003) rastreou e analisou mais de 17.000 ciclones entre 1980 e 1999 através dos dados de reanálise do NCEP/NCAR (Kalnay *et al.* 1996) com $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de resolução espacial e definiu em média os limiares para identificação das principais categorias de ciclones para a utilização dos diagramas de fase. No entanto, os limiares utilizados para a classificação de ciclones a partir do diagrama de fases devem ser definidos para cada bacia oceânica. Para o Sudoeste do Atlântico Sul, os limiares para identificação de CSs foram definidos por Gozzo *et al.* (2014). Segundo os autores, um sistema é considerado subtropical quando, na primeira parte do diagrama, o parâmetro B apresenta valores inferiores a 25 m e, na segunda parte do diagrama, $-|V_T^L| > -50$ e $-|V_T^U| < -10$. Por outro lado, um sistema é considerado extratropical quando $B \gg 0$, $-|V_T^L|$ e $-|V_T^U| < 0$. Atualmente, não existem na literatura limiares definidos para tempestades tropicais na região de estudo, dessa forma, foram utilizados como referência os limiares definidos por Hart (2003), para o Hemisfério Norte com a análise operacional *Navy Operational Global Atmospheric Prediction System*

(NOGAPS) que possui resolução espacial de 1°. Dessa forma, serão consideradas tempestades tropicais, os sistemas que apresentarem $B \sim 0$, $-|V_T^L| \sim 10$ e $-|V_T^U| > -10$.

Figura 3. Diagramas de fase com os parâmetros (a) B vs $-V_T^L$ (b) $-V_T^L$ vs $-V_T^U$ resumizando as principais categorias de ciclones/tempestades de interesse do trabalho.



Fonte: Elaborada pelo autor. Adaptado de Hart (2003)

Nesta pesquisa, os diagramas foram elaborados para cada evento registrado através dos scripts disponibilizados por Robert Hart e Jenni Evans para uso de estudantes e pesquisadores. Os códigos são disponibilizados para utilização através da ferramenta *Grid Analysis and Display System* (GrADS) em <http://moe.met.fsu.edu/~rhart/phasescripts/>.

3.3.3 Fluxo de Umidade Integrado Verticalmente

É calculado para auxiliar na detecção da presença e no posicionamento de ZCAS nos casos selecionados. Dessa forma, avaliou-se o impacto da ZCAS nos acumulados de precipitação. O fluxo de umidade verticalmente integrado é computado da seguinte forma:

$$\mathbf{FU} = (QU, QV), \quad (3.1)$$

$$QU = \frac{1}{g} \int_{ps}^{100} qu dp, \quad (3.2)$$

$$QV = \frac{1}{g} \int_{ps}^{100} qv dp, \quad (3.3)$$

Na Equação 3.1, **FU** ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$) é um vetor que representa o fluxo de umidade integrado verticalmente, cujas componentes zonal e meridional são QU e QV ($m \cdot s^{-1}$), respectivamente. Nas Equações 3.2 e 3.3, qu e qv representam as componentes zonal e meridional do fluxo de umidade em um determinado nível isobárico, respectivamente. A pressão do ar na superfície é dada por ps (hPa) e a aceleração da gravidade, g ($= 9.8 m \cdot s^{-2}$). No cálculo de **FU**, utilizaram-se os valores médios computados ao longo do ciclo de vida do ciclone e obtidos a cada 1 h.

3.3.4 Precipitação Acumulada

A precipitação foi acumulada ao longo do ciclo de vida de cada ciclone para cada ponto do domínio considerado e, para isso, foram utilizados os valores de precipitação provenientes da reanálise ERA5 e das estimativas de precipitação do CMORPH, ambos a intervalos regulares de 1 h. A partir dos acumulados no período de atuação dos ciclones foi obtido o maior valor do domínio considerado para cada sistema.

3.3.5 Seleção dos Eventos Ciclônicos

A partir dos relatórios pós evento da Marinha do Brasil (MB), foram identificados todos os ciclones que atingiram a categoria de tempestade entre os anos de 2011 e 2022. Ao todo foram registrados 15 eventos ao longo deste período. Foram atribuídos a cada um dos eventos, os respectivos nomes: Arani (2011), Bapo (2015), Cari (2015), Deni (2016), Eçaí (2016), Guará (2017), Iba (2019), Jaguar (2019), Kurumi (2020), Mani (2020), Oquira (2020), Potira (2021), Raoni (2021), Ubá (2021) e Yakecan (2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Descrição dos Eventos e Identificação da Gênese a partir do Diagrama de Fases

Com a finalidade de identificar a natureza da gênese dos eventos selecionados, foram elaborados os diagramas de fase para cada uma das tempestades, aplicando a metodologia descrita anteriormente neste trabalho. Os diagramas foram gerados a partir das variáveis disponibilizadas pela reanálise ERA5, a cada 6h (Figuras 4 e 5).

A partir dos diagramas foi analisado o desempenho da ERA5 na reprodução de características primordiais para a classificação dos eventos em suas determinadas fases, previamente classificadas pela MB. Ainda neste tópico, apresenta-se uma descrição dos eventos com base em registros e na literatura consultada.

Dos 15 sistemas selecionados, a tempestade Iba (2019) (Figura 4g e 5g) foi a única a apresentar características tropicais durante a sua gênese. O parâmetro B apresentou valores próximos a zero, denotando característica não frontal, que se manteve ao longo de todo o ciclo de vida. O perfil térmico determinou que essa tempestade possuía núcleo moderadamente quente durante a sua gênese. Essa característica foi alterada ao longo do desenvolvimento do sistema, evoluindo para um padrão de sistemas subtropicais, com núcleo frio em altos níveis e moderadamente quente em baixos níveis. Este sistema foi o segundo evento com características tropicais a se desenvolver no oceano Atlântico Sul. O primeiro foi o ciclone tropical Catarina, que ocorreu em 2004 próximo a costa do estado brasileiro de Santa Catarina (Pezza e Simmonds, 2005; McTaggart-Cowan *et al.*, 2006; Nunes, 2016). Segundo Reboita *et al.* (2020), o ciclone Iba foi a primeira tempestade associada a ciclogênese tropical nesta região cujos processos associados à formação incluíram a interação entre uma frente fria e o ASAS, resultando em cisalhamento de vento horizontal e vortacidade ciclônica. Além disso, condições ambientais favoráveis, como fraco cisalhamento vertical do vento e altas temperaturas da superfície do mar, contribuíram para a gênese do ciclone.

Do outro lado do espectro ciclogênético, encontram-se os ciclones com ciclogênese extratropical. Dentre os eventos analisados, dois foram observados com essa característica, a tempestade Raoni, que ocorreu em 2021 (Figuras 4m e 5m) e a Yakecan, em 2022 (Figuras 4o e 5o). De acordo com Reboita *et al.* (2022), o ciclone subtropical Raoni derivou de um ciclone extratropical que seguia o modelo de desenvolvimento Shapiro-Keyser (Shapiro e Keyser, 1990) e atingiu a categoria de ciclone subtropical que se manteve até o fim do seu ciclo de vida. Reboita *et al.* (2022) destacam que o enfraquecimento do cisalhamento vertical

do vento e a intensificação da seclusão quente (área de ar quente e úmido que se separa da massa principal de ar frio em um ciclone extratropical) foram responsáveis pela transição para a fase subtropical. Estas tempestades apresentaram valores de B consideravelmente acima de 25 m, indicando natureza frontal no início do ciclo de vida. A segunda parte do diagrama de fases confirma que ambos ciclones tiveram gênese extratropical, com núcleo frio nos dois níveis analisados. Os ciclones Raoni e Yakecan também apresentaram aquecimento do núcleo em baixos níveis, passando a apresentar características subtropicais, que se mantiveram até o fim do ciclo de vida.

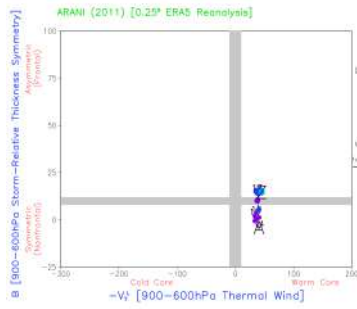
A tempestade subtropical Jaguar, que ocorreu em maio de 2019, apresentou comportamento que não pôde ser definido através da reanálise ERA5 (Figuras 4h e 5h). Para esse caso, considerou-se a classificação obtida a partir do relatório pós-evento desse sistema, onde a gênese foi descrita como subtropical.

As demais tempestades, por sua vez, tiveram ciclogênese subtropical. Em sua maioria, tiveram sua gênese dentro da região RG1, concordando com a climatologia dos ciclones subtropicais que indica a região como favorável a ocorrência desses fenômenos. As tempestades Arani (Figuras 4a e 5a), Deni (Figuras 4d e 5d), Guará (Figuras 4f e 5f), Jaguar (Figuras 4h e 5h) e Mani (Figuras 4j e 5j) ocorreram em março de 2011, novembro de 2016, dezembro de 2017, maio de 2019 e outubro de 2020, respectivamente. Para esses casos, um cavado serviu como mecanismo da gênese (Ribeiro *et al.*, 2023; Romão *et al.*, 2023). Enquanto isso, as tempestades Bapo (Figuras 4b e 5b), Cari (Figuras 4c e 5c), Eçaí (Figuras 4e e 5e), Kurumi (Figuras 4i e 5i), Oquira (Figuras 4k e 5k), Potira (Figuras 4l e 5l) e Ubá (Figuras 4n e 5n), tiveram o padrão de bloqueio *cutoff low* como o mecanismo de formação (Reboita *et al.*, 2019; Costa e Nunes, 2021; Ribeiro *et al.*, 2023).

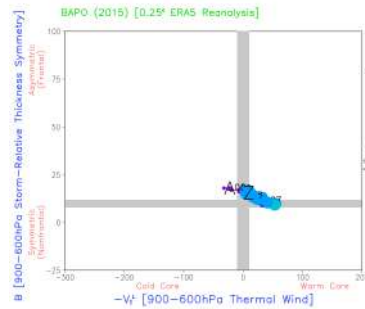
Observou-se que a reanálise ERA5 foi capaz de reproduzir o ciclo de vida da maioria das tempestades, exceto da tempestade subtropical Jaguar. Dessa forma, através da análise dos diagramas de fase e do relatório de tempestades subtropicais, pôde-se observar que dos 15 ciclones registrados, 80% (12 eventos) tiveram ciclogênese subtropical (CS), 13,3% (2 eventos) ciclogênese extratropical (CE) e 6,7% (1 evento) ciclogênese tropical (CT), segundo os limiares adotados (Figura 6).

Figura 4. Vento térmico entre 900 e 600 hPa X Parâmetro B (m) entre 900 e 600 hPa de todos os sistemas utilizando a reanálise ERA5, para os ciclones: a) Arani, b) Bapo, c) Cari, d) Deni, e) Eçaí, f) Guará, g) Iba, h) Jaguar, i) Kurumi, j) Mani, k) Oquira, l) Potira, m) Raoni, n) Ubá, o) Yakecan.

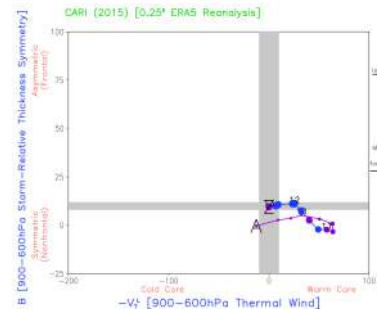
a) Arani



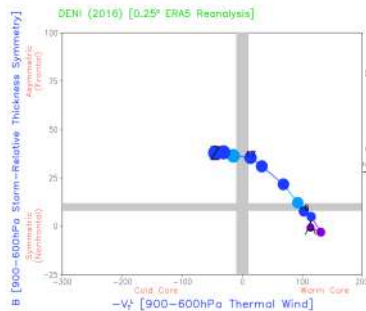
b) Bapo



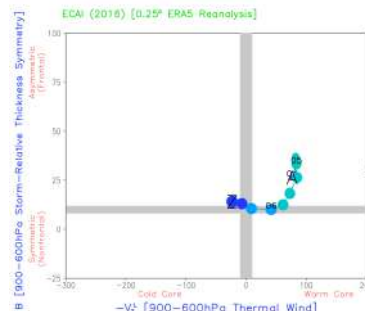
c) Cari



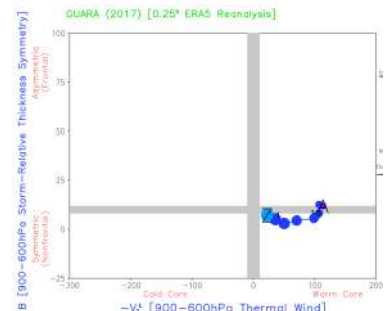
d) Deni



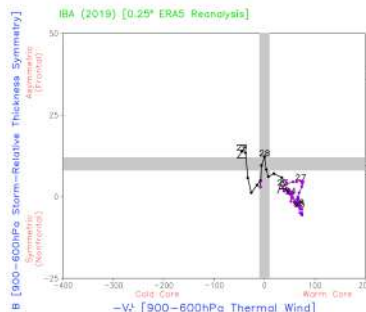
e) Eçaí



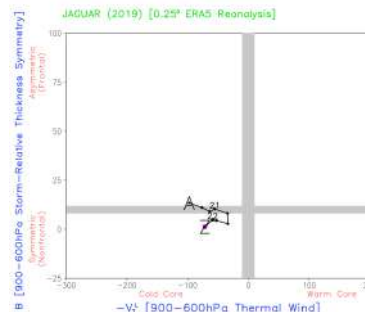
f) Guará



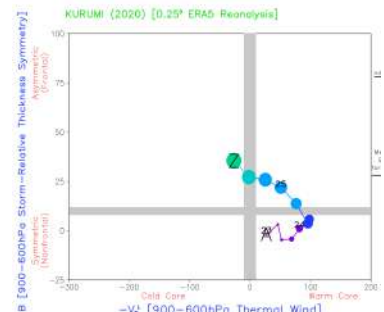
g) Iba



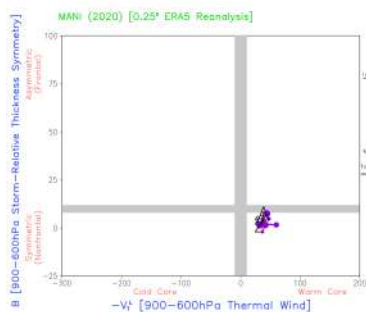
h) Jaguar



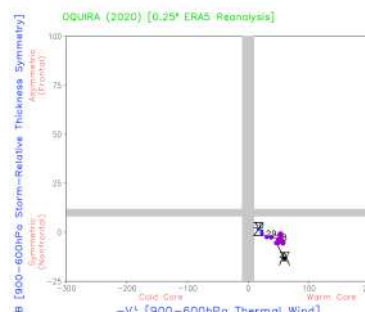
i) Kurumi



j) Mani



k) Oquira



l) Potira

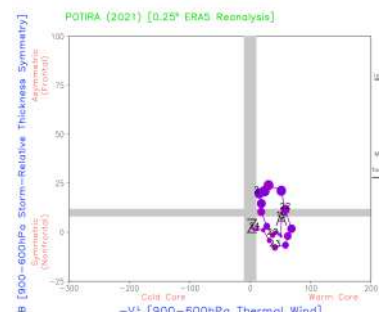
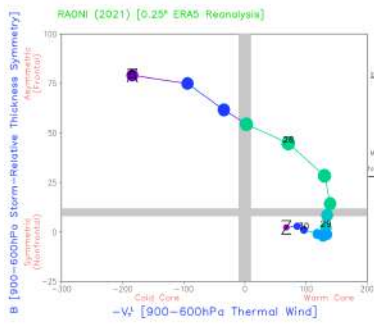
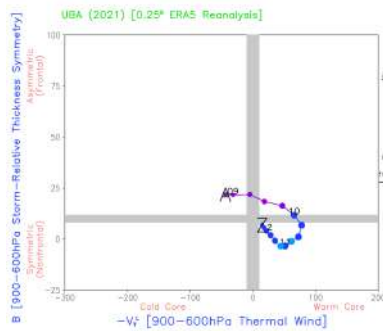


Figura 4. Continuação.

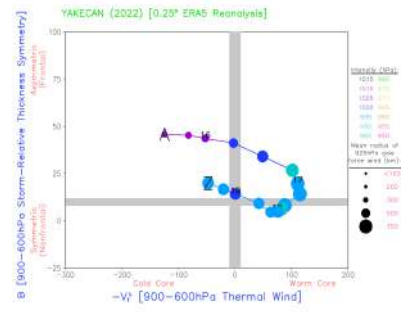
m) Raoni



n) Ubá



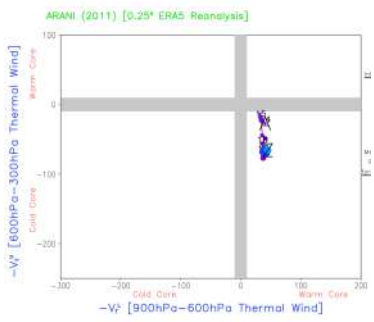
o) Yakecan



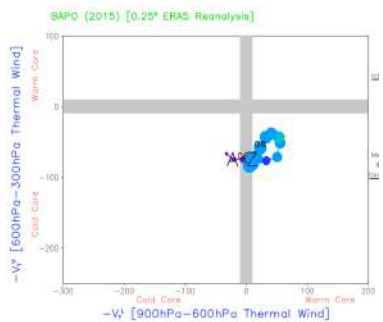
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5. Vento térmico entre 900 e 600 hPa X Vento térmico entre 600 e 300 hPa de todos os sistemas utilizando a reanálise ERA5, para os ciclones: a) Arani, b) Bapo, c) Cari, d) Deni, e) Eçaí, f) Guará, g) Iba, h) Jaguar, i) Kurumi, j) Mani, k) Oquira, l) Potira, m) Raoni, n) Ubá, o) Yakecan.

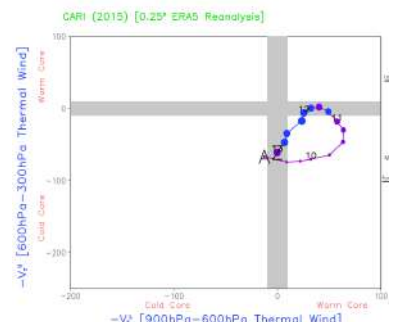
a) Arani



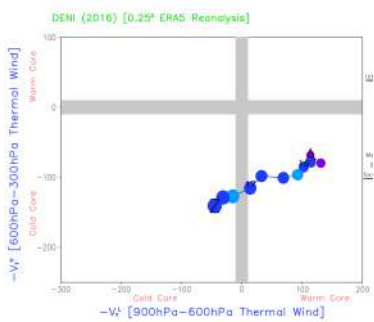
b) Bapo



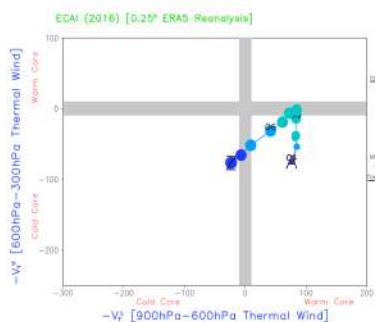
c) Cari



d) Deni



e) Eçaí



f) Guará

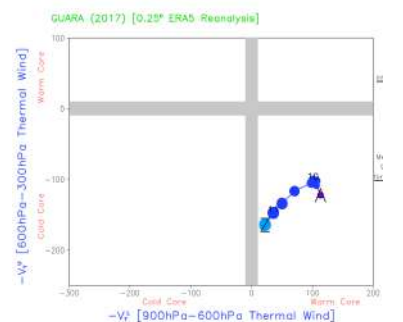
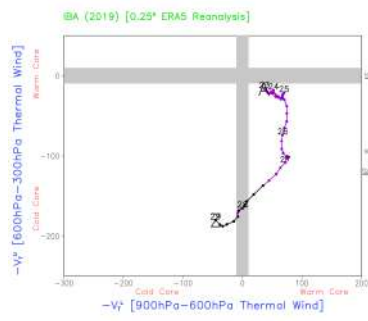
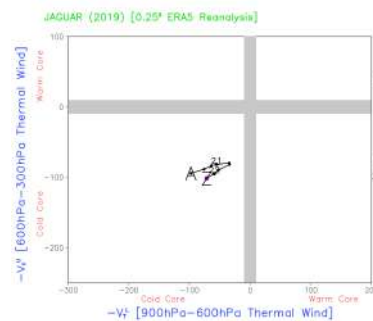


Figura 5. Continuação.

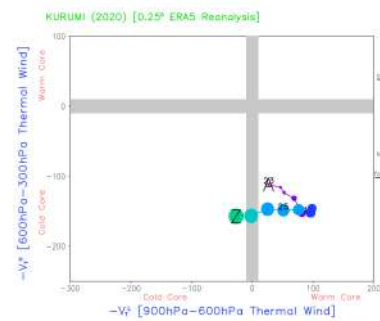
g) Iba



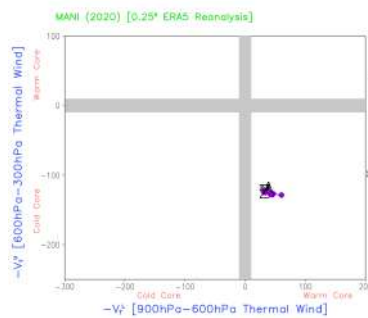
h) Jaguar



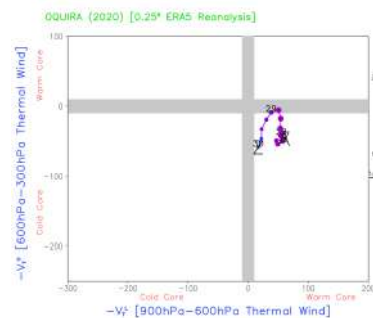
i) Kurumi



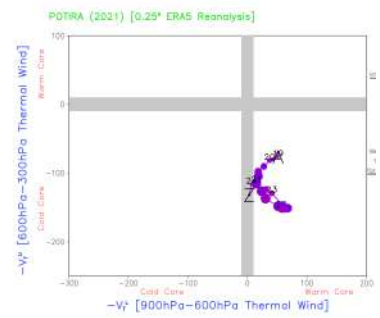
j) Mani



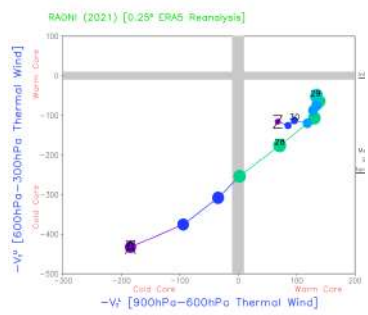
k) Oquira



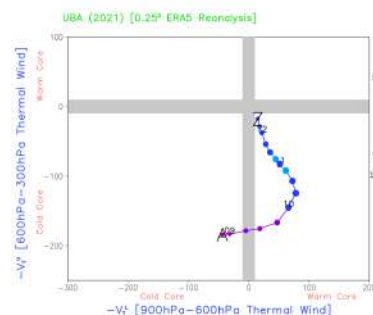
l) Potira



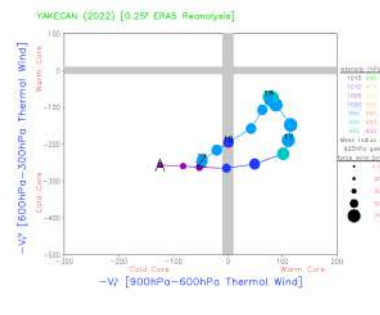
m) Raoni



n) Ubá

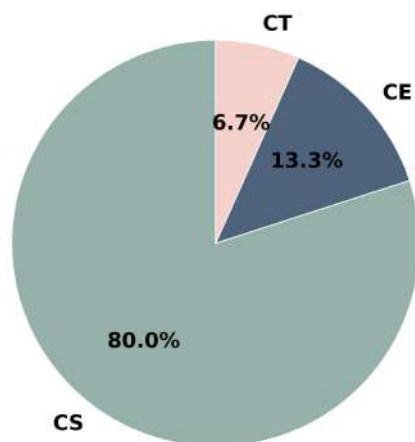


o) Yakecan



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 6. Porcentagem de tempestades registradas que atingiram a categoria subtropical, subdividida com relação à gênese do sistema.



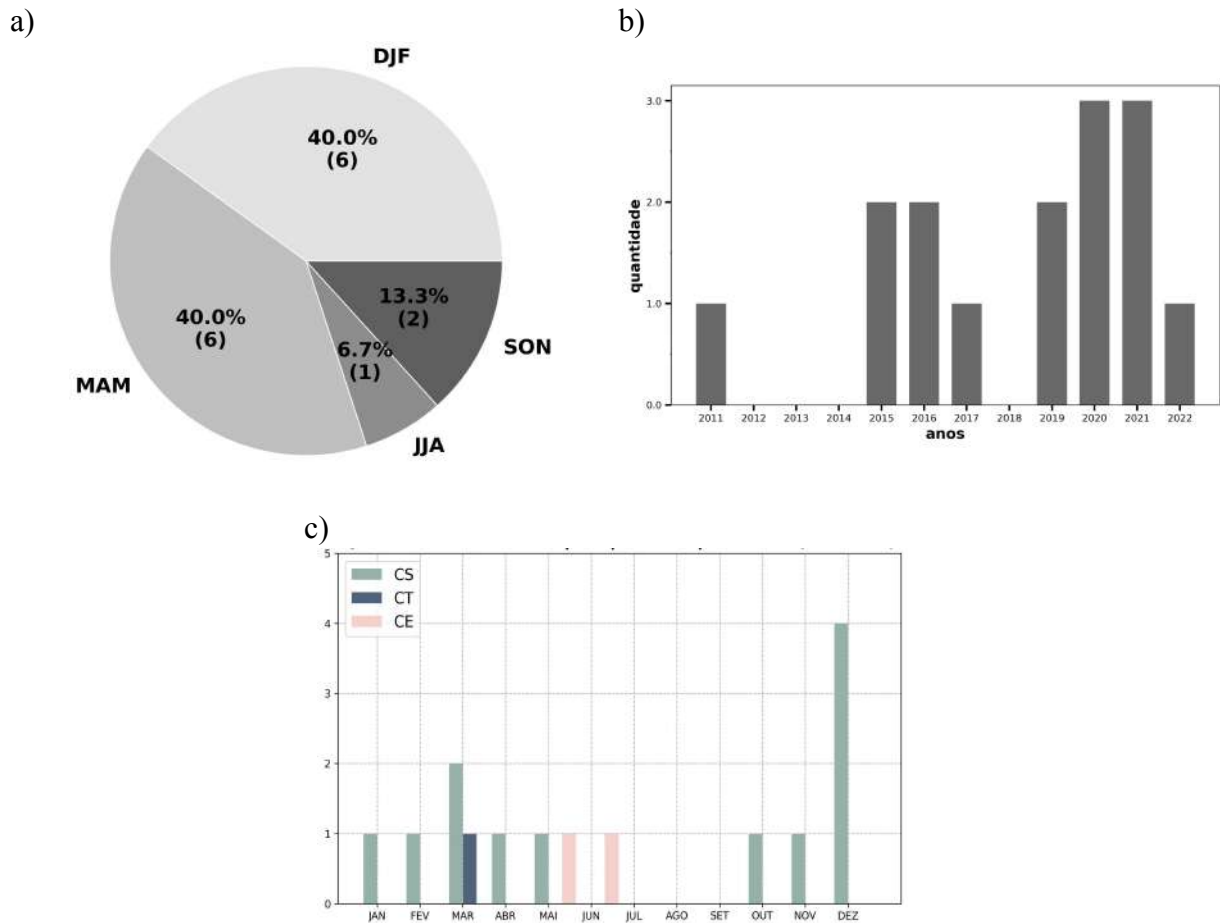
Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 Variabilidade Mensal e Sazonal

Dos 15 casos registrados, 40% ocorreram no verão e 40% no outono do Hemisfério Sul, compreendidos entre os meses de dezembro a fevereiro e de março a maio, respectivamente. Isso demonstra que os eventos registrados no período entre os anos de 2011 a 2022 concordam com a climatologia apresentada por Gozzo *et al.* (2014) e discordam da apresentada por Evans e Braun (2012) para essa região. Com relação aos demais CSs, cerca de 13,3% ocorreram na primavera, entre setembro e novembro, enquanto os restantes 6,7% ocorreram no inverno, de junho a agosto (Figura 7a).

Através da distribuição anual dos eventos (Figura 7b), observou-se que mais tempestades foram registradas com características subtropicais a partir da metade da década anterior (Figura 7b), com os anos de 2020 e 2021 apresentando 3 eventos cada. A distribuição mensal, por sua vez, demonstra que os ciclones com ciclogênese do tipo CE e CT ocorreram entre as estações de outono e inverno (Figura 7c). Este fato pode estar relacionado a fluxos superficiais mais intensos e cisalhamento vertical do vento mais fraco nestas épocas do ano (Gozzo *et al.*, 2014), o que pode justificar a ocorrência de episódios mais intensos e a maior organização das tempestades.

Figura 7. a) Distribuição sazonal de tempestades que atingiram a classificação subtropical registradas pela Marinha do Brasil. b) Distribuição anual de tempestades que atingiram a classificação subtropical. c) Distribuição mensal das tempestades de acordo com a gênese. Todas elaboradas dentro do período entre 2011 e 2022.



Fonte: Elaborada pelo autor

4.3 Trajetória dos Ciclones

Os registros do deslocamento de tempestades são informações cruciais para o estudo de suas causas e efeitos. Dessa forma, neste tópico, apresenta-se como as tempestades se deslocaram. Além disso, avalia-se o desempenho da ERA5 na representação dos sistemas reportados pela MB, de acordo com a gênese.

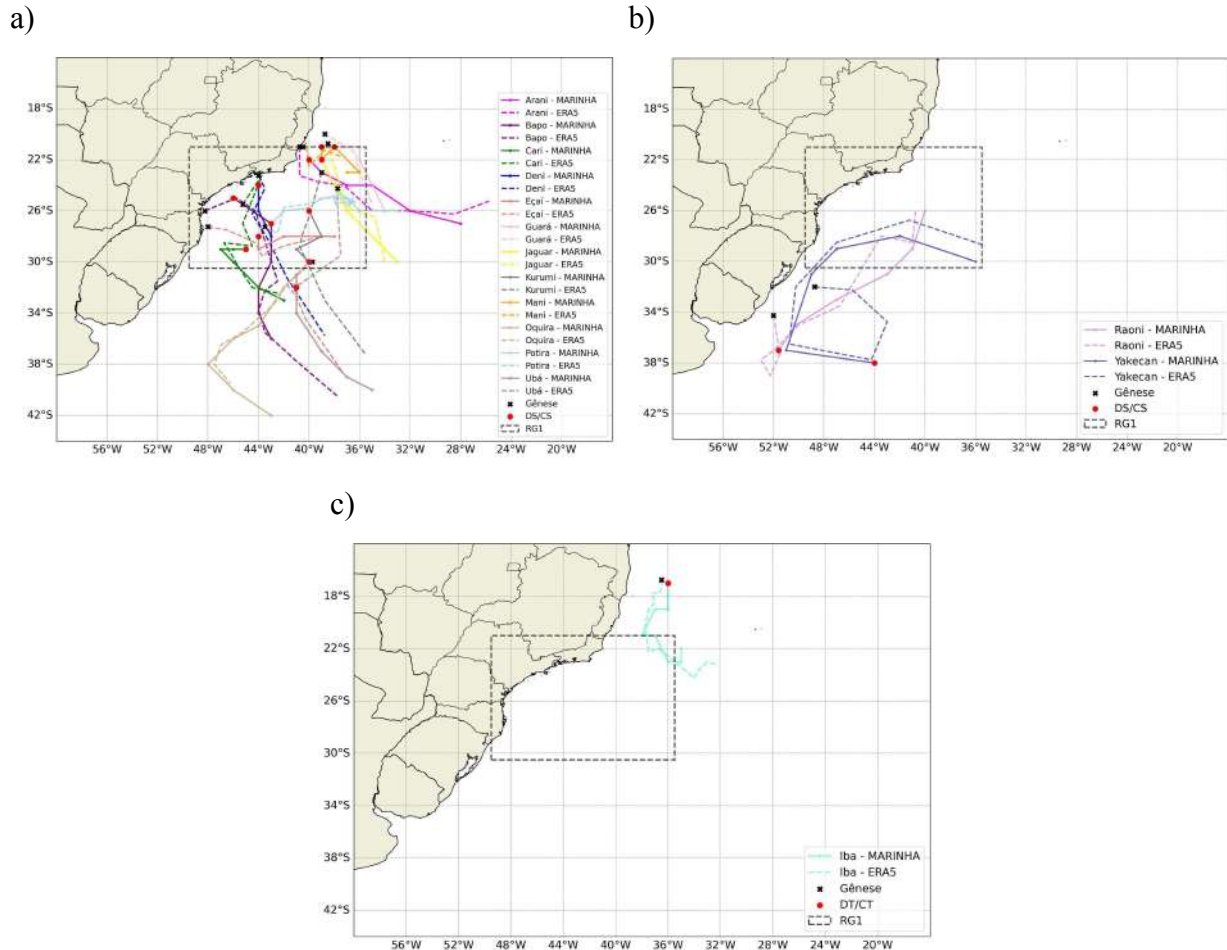
A partir da Figura 8a e 8c, observa-se que os ciclones gerados a partir de CS e CT se deslocam predominantemente para Sudeste, com exceção de Oquira, que se deslocou para Sudoeste de seu local de formação, e Eçaí e Potira, que se deslocaram para leste (Figura 8a). A tempestade Iba, que apresentou ciclogênese do tipo CT, foi a tempestade que se formou em

latitude mais baixa com relação às demais (Figura 8b). Seu local de formação vai de encontro ao exposto por Andreлина e Reboita (2021) que afirmam que a costa entre o estado da Bahia e a Região Sudeste possui potencial para a gênese de ciclones com núcleo quente.

Enquanto isso, os ciclones originados a partir de CE, tiveram deslocamento inverso aos ciclones inicialmente quentes (Figura 8c). Ambas as tempestades se formaram em latitudes mais altas e tiveram trajetória predominante para nordeste. O ciclone Yakecan apresentou trajetória que chamou atenção da mídia e da comunidade científica por apresentar deslocamento para oeste, se aproximando do litoral do Rio Grande do Sul ao longo do seu ciclo de vida.

A partir do exposto, observa-se que as trajetórias das tempestades não dependem, por exemplo, do período do ano em que se formam e sim do seu tipo de ciclogênese. Além disso, conclui-se que a reanálise apresentou um desempenho satisfatório na representação da trajetória dos eventos. Dessa forma, pode-se afirmar que os diagramas de fase elaborados para as tempestades foram gerados a partir de pontos que seguiram de forma eficiente o centro de baixa pressão dos eventos, corroborando os resultados encontrados até então.

Figura 8. Uma comparação da trajetória observada das tempestades com a trajetória estimada pela reanálise ERA5. a) Trajetória das tempestades com ciclogênese subtropical, b) Trajetória das tempestades com ciclogênese extratropical, c) Trajetória das tempestades com ciclogênese tropical.



Fonte: Elaborada pelo autor

4.4 Precipitação

A estimativa de precipitação derivada de produtos de satélites ambientais, CMORPH, é utilizada como referência para a análise da precipitação ao longo do ciclo de vida dos eventos estudados. Para verificar a forma em que o produto “visualiza” a precipitação, avalia-se o produto sobrepondo-o ao padrão de nebulosidade associado aos eventos, que é identificado através da temperatura de brilho próxima ao canal 11 μm do GRIDSAT B1.

Na Figura 9, apresenta-se essa sobreposição para um horário pós classificação como DS/CS ou DT/CT de cada uma das tempestades analisadas. Nessa figura, o centro de baixa

pressão é determinado por uma letra “x” da cor azul escuro, cujas coordenadas foram obtidas a partir dos relatórios pós evento da Marinha do Brasil.

Quanto ao padrão de nebulosidade observa-se que, após a classificação, nos casos com ciclogênese CS (Figura 9a–f, 9h–l e 9n), a nebulosidade se concentrou de forma mais intensa a leste e nordeste da maioria das tempestades. O CMORPH representa bem esse padrão para os sistemas, com valores maiores de precipitação nas regiões de nebulosidade com maior desenvolvimento vertical e topos mais frios.

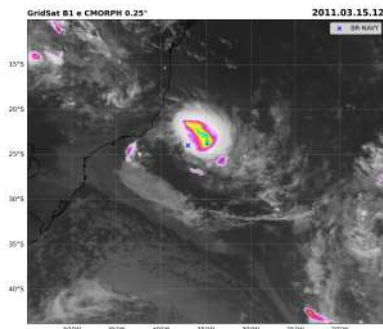
Os casos formados a partir de CE (Figura 9m e 9o) não apresentavam mais o padrão de nebulosidade típicas de ciclones extratropicais clássicos, o que era esperado, e apresentam pouca nebulosidade quando comparados aos ciclones subtropicais derivados de CS. Também nesses dois casos, o CMORPH representou essa característica, computando valores baixos de precipitação para os horários analisados.

A tempestade derivada de CT (Figura 9g), após sua classificação, apresenta padrão de nuvens esperado para um ciclone moderadamente quente e com características tropicais, apresentando simetria e precipitação mais intensa próximo ao centro de baixa pressão. O CMORPH representou essa simetria da precipitação junto às bandas de nebulosidade, apresentando valores mais intensos próximo ao centro do ciclone.

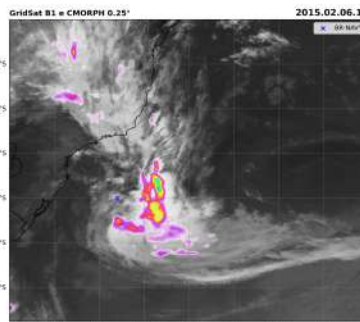
Consequentemente, conclui-se que o produto de estimativa de precipitação pode ser utilizado para avaliação da precipitação da reanálise ERA5 para esses eventos. O produto é capaz de identificar os locais onde a precipitação é mais intensa de modo condizente com as classificações adotadas.

Figura 9. Temperatura de brilho próxima a 11 μm ($^{\circ}\text{C}$) do GRIDSat , para os ciclones: a) Arani, b) Bapo, c) Cari, d) Deni, e) Eçaí, f) Guará, g) Iba, h) Jaguar, i) Kurumi, j) Mani, k) Oqira, l) Potira, m) Raoni, n) Ub, o) Yakecan.

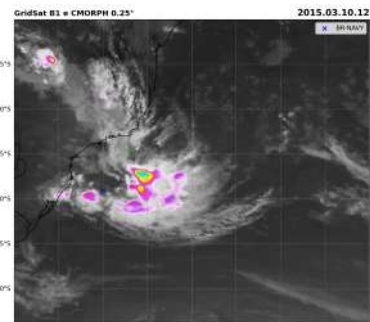
a) Arani



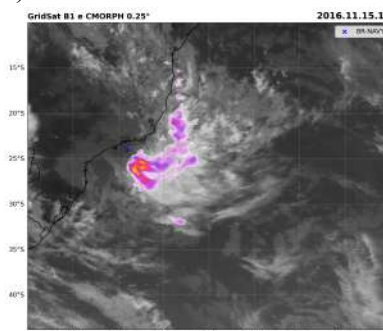
b) Bapo



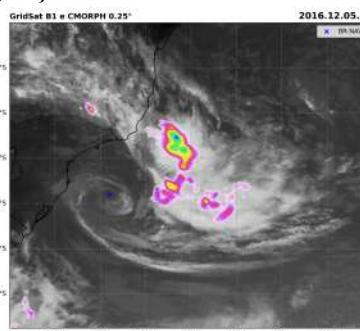
c) Cari



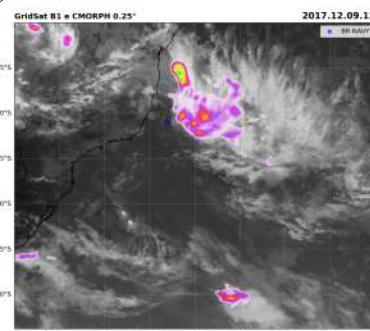
d) Deni



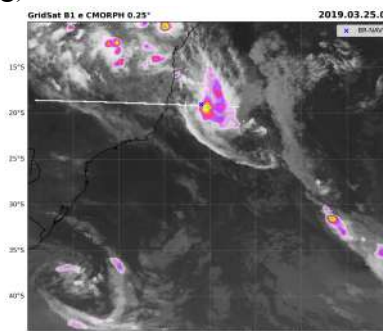
e) Eçaí



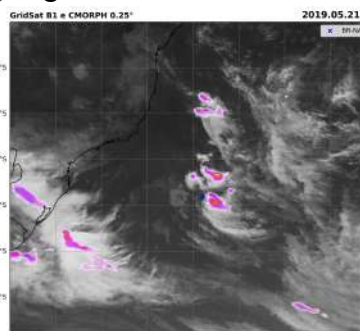
f) Guar



g) Iba



h) Jaguar



i) Kurumi

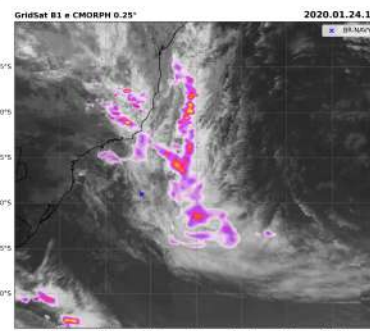
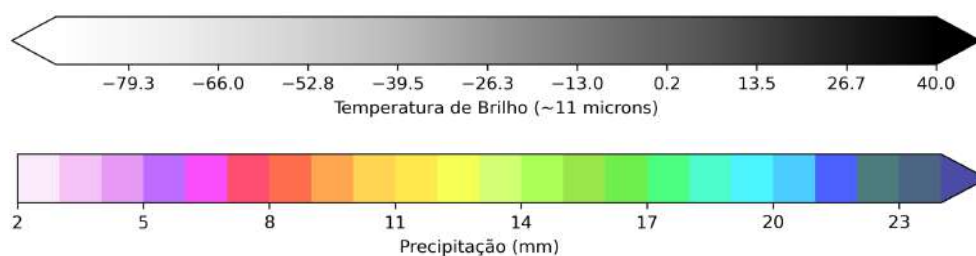
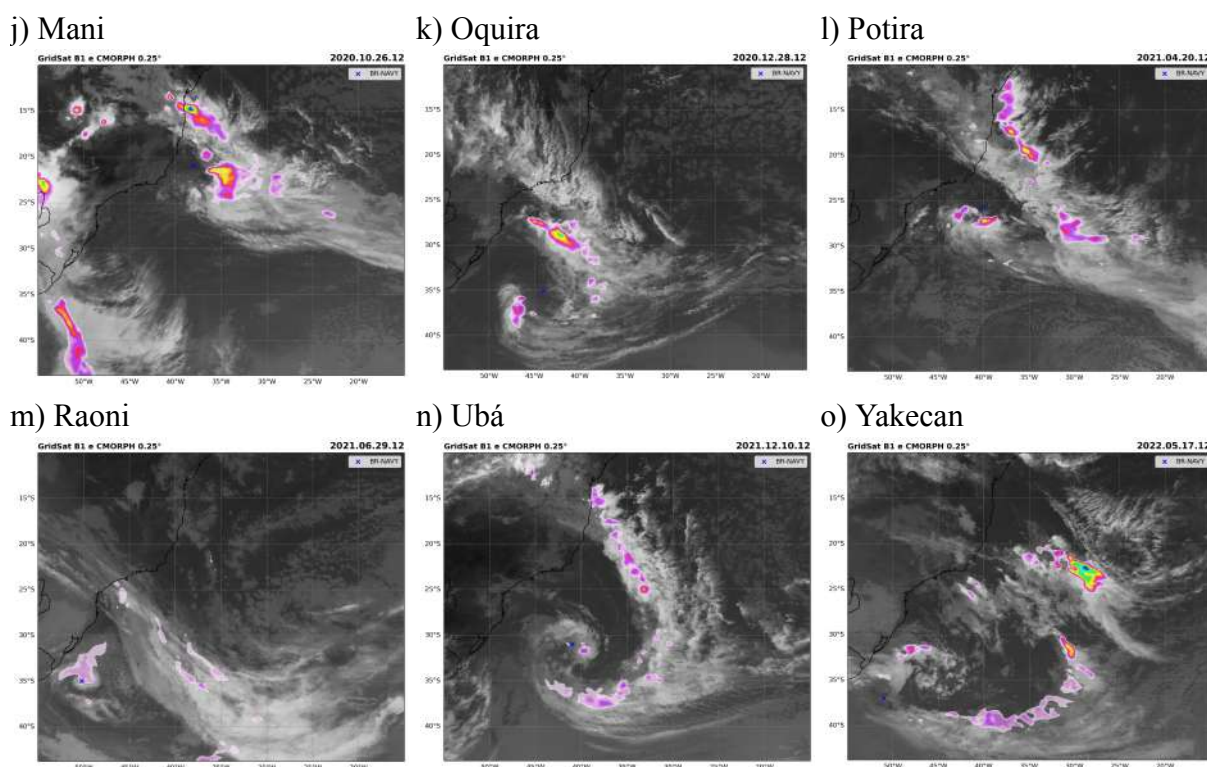


Figura 9. Continuação.



Fonte: Elaborada pelo autor

4.4.1 ERA5 versus CMORPH

Nesta subseção apresenta-se os acumulados de precipitação ao longo do ciclo de vida das tempestades desde o momento da ciclogênese até o momento de ciclólise, para as duas bases de dados. Além disso, na Tabela 3, apresentam-se os acumulados máximos de precipitação para cada tempestade (mm) a partir do CMORPH e da ERA5, o viés entre esses valores, a duração dos eventos (h) e uma taxa de precipitação a partir dos acumulados máximos do CMORPH (mm/h).

A comparação com as estimativas de precipitação do CMORPH demonstra que a ERA5 representa satisfatoriamente as regiões com maiores acumulados de precipitação para a maioria dos eventos. No entanto, apresenta desvios negativos na intensidade dos acumulados,

como em Arani (Figura 10a), Bapo (Figura 10b), Iba (Figura 10g), Deni (Figura 10d), Eçaí (Figura 10e) e Oquira (Figura 10k) e positivos nos casos Jaguar (Figura 10h) e Mani (Figura 10j).

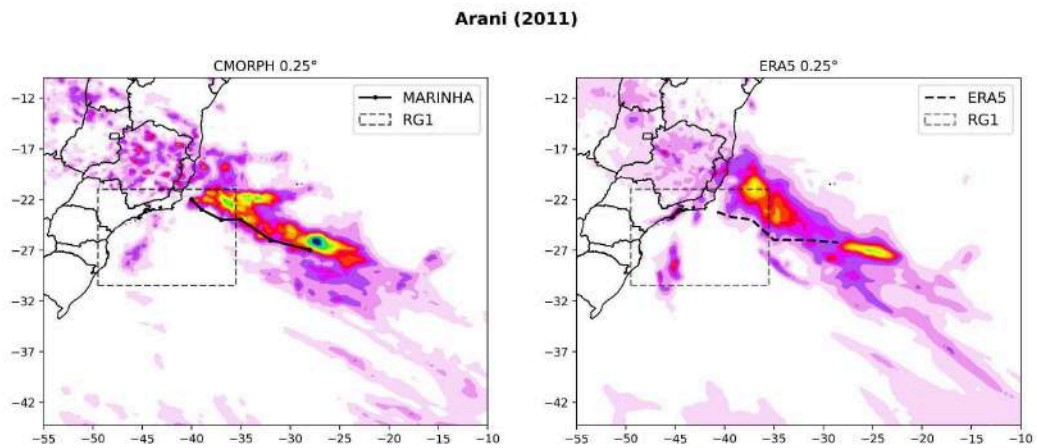
A tempestade Iba (Figura 10g), derivada de CT, apresentou o maior valor de acumulado máximo de precipitação, com relação aos demais eventos, chegando a um valor de aproximadamente 587 mm. Enquanto isso, as tempestades Raoni e Yakecan (Figura 10m e 10o, respectivamente), derivadas de CE, apresentaram os menores acumulados máximos, com 141,1 e 119,5 mm respectivamente. Nestes três casos com ciclogênese não subtropical, observa-se que a reanálise tem melhor desempenho na reprodução da intensidade dos acumulados das tempestades CE em comparação a tempestade CT (Iba), para a qual apresenta viés de aproximadamente -250 mm. Isso demonstra a dificuldade da reanálise em reproduzir a precipitação observada durante esse evento raro e atípico para essa região.

Através da Tabela 3, observa-se que as tempestades derivadas de núcleos quentes em baixos níveis (CS e CT) apresentaram taxas de precipitação mais elevadas do que as que se desenvolveram a partir de um núcleo frio (CE). Além disso, observa-se que as três maiores taxas de precipitação estão associadas a ciclones CS (Guará, Oquira e Mani). Os acumulados obtidos para os três casos são consideravelmente inferiores ao acumulado da tempestade Iba, no entanto, o período de atuação dessas tempestades foi menor, acarretando no aumento da taxa e, conseqüentemente, da sua severidade no que diz respeito à precipitação.

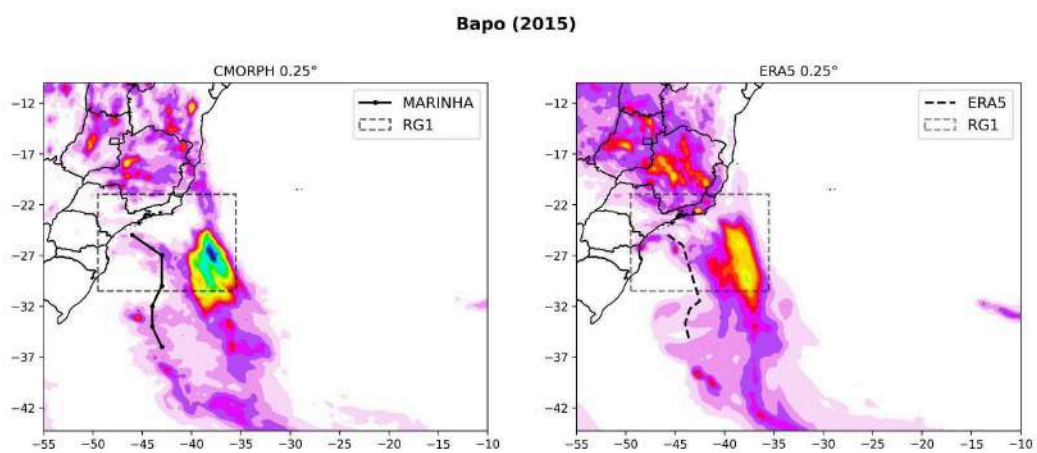
Através dos acumulados utilizando o CMORPH, observou-se que a precipitação próxima a área de atuação do ciclone está em fase com uma faixa de precipitação continental nos casos Bapo, Cari, Eçaí, Guará, Kurumi, Mani e Ubá, o que dá indícios da associação dessas tempestades com a ZCAS.

Figura 10. Comparação da precipitação acumulada (mm) durante o ciclo de vida das tempestades estudadas através do CMORPH e da reanálise ERA5 para os ciclones: a) Arani, b) Bapo, c) Cari, d) Deni, e) Eçaí, f) Guará, g) Iba, h) Jaguar, i) Kurumi, j) Mani, k) Oquira, l) Potira, m) Raoni, n) Ubá, o) Yakecan.

a)



b)



c)

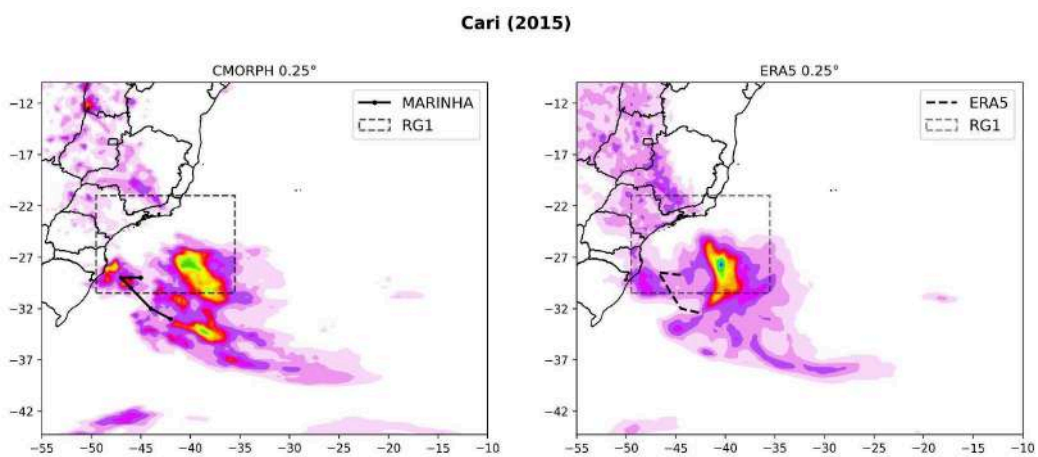
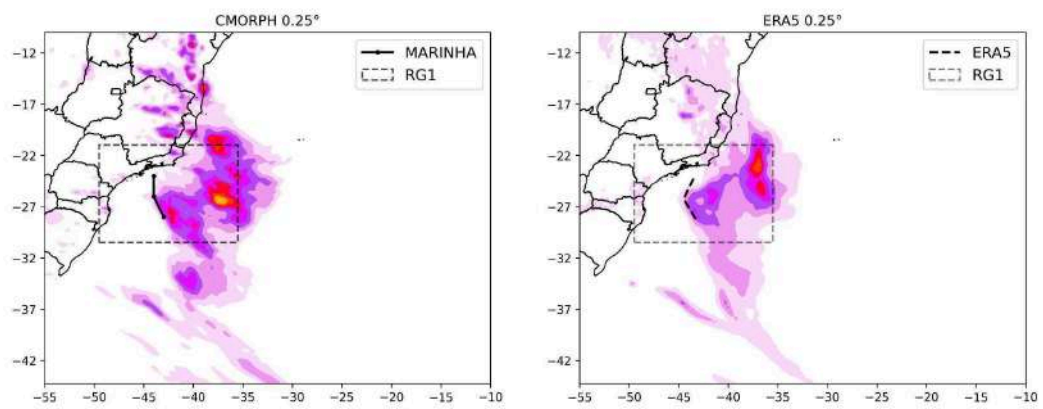


Figura 10. Continuação.

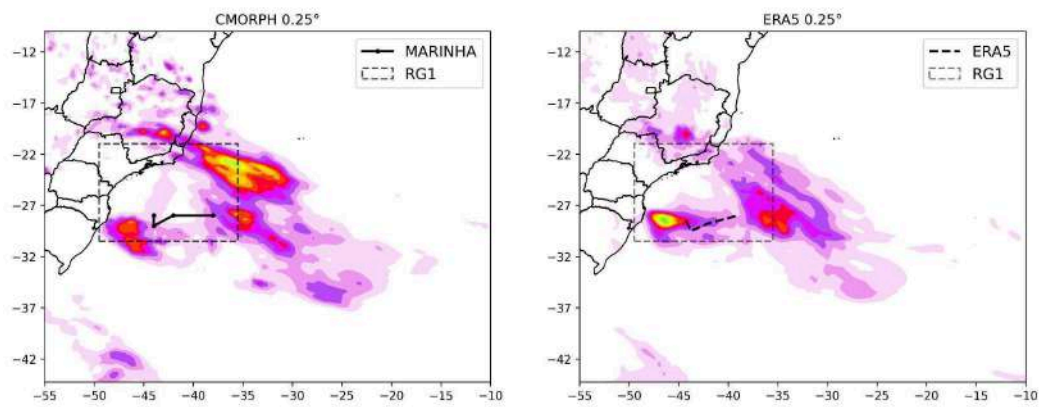
d)

Deni (2016)



e)

Eçai (2016)



f)

Guará (2017)

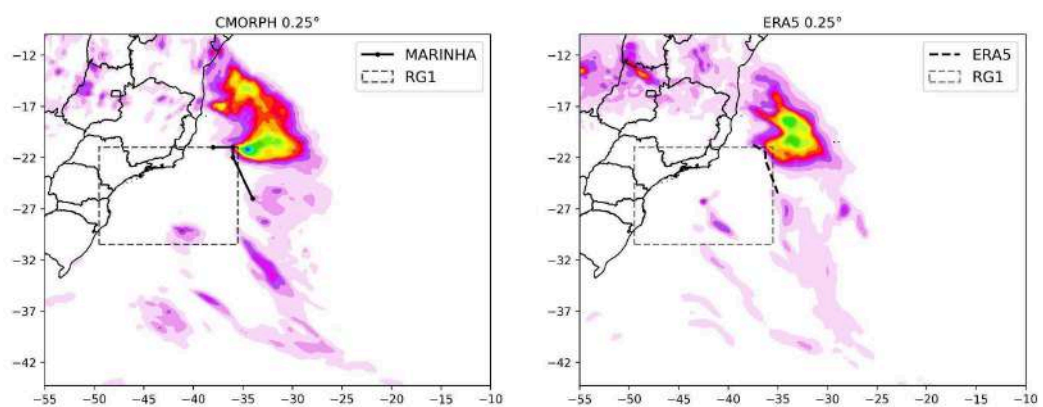
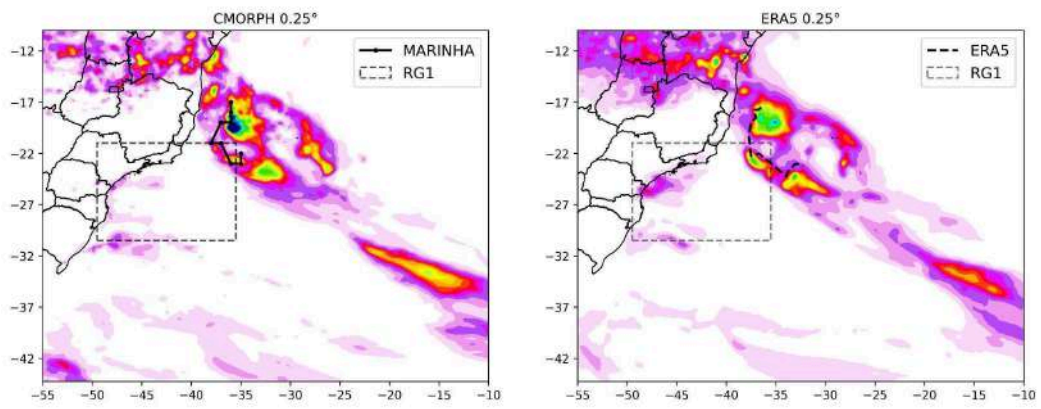


Figura 10. Continuação.

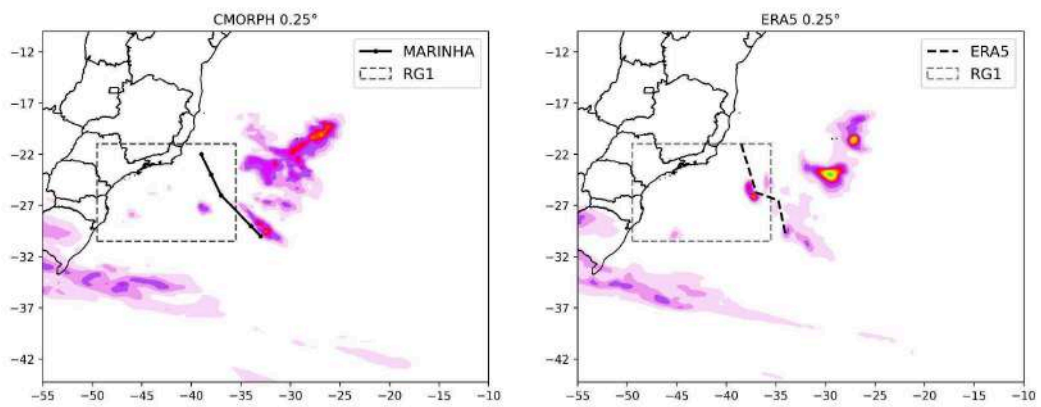
g)

Iba (2019)



h)

Jaguar (2019)



i)

Kurumi (2020)

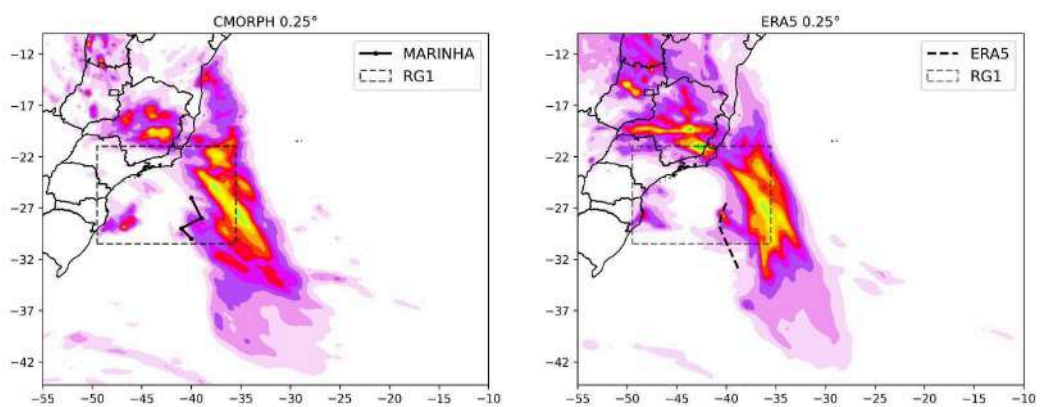
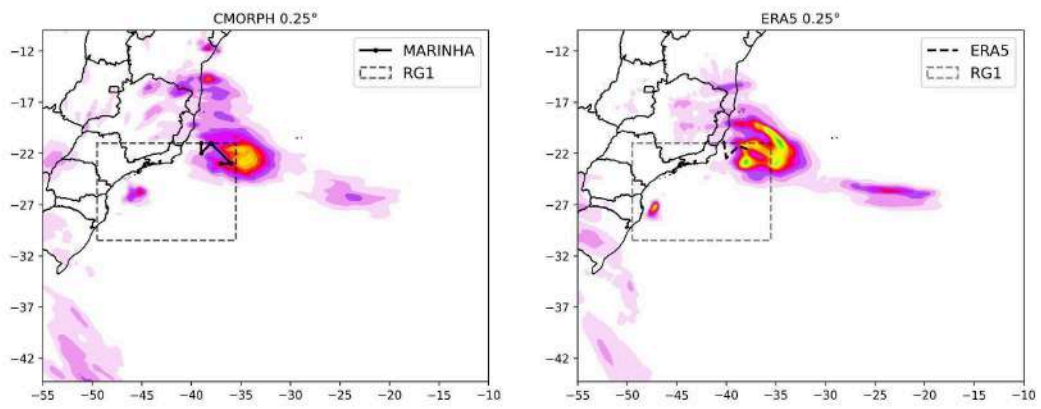


Figura 10. Continuação.

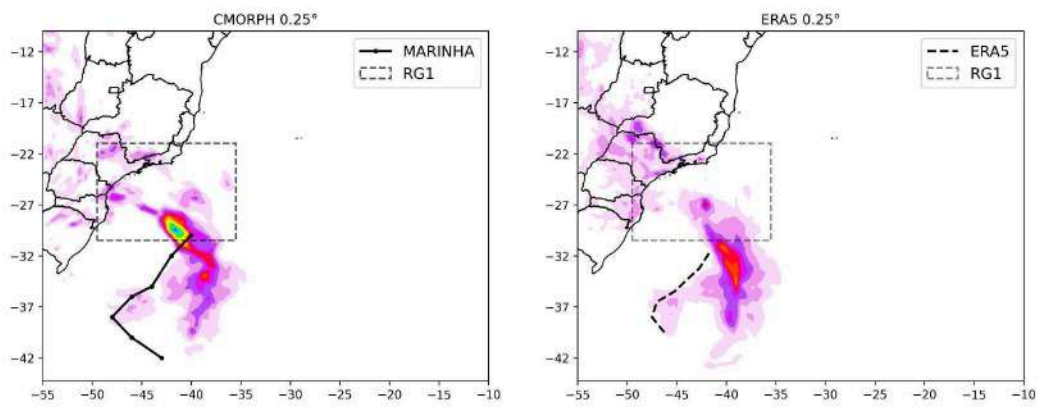
j)

Mani (2020)



k)

Oquira (2020)



l)

Potira (2021)

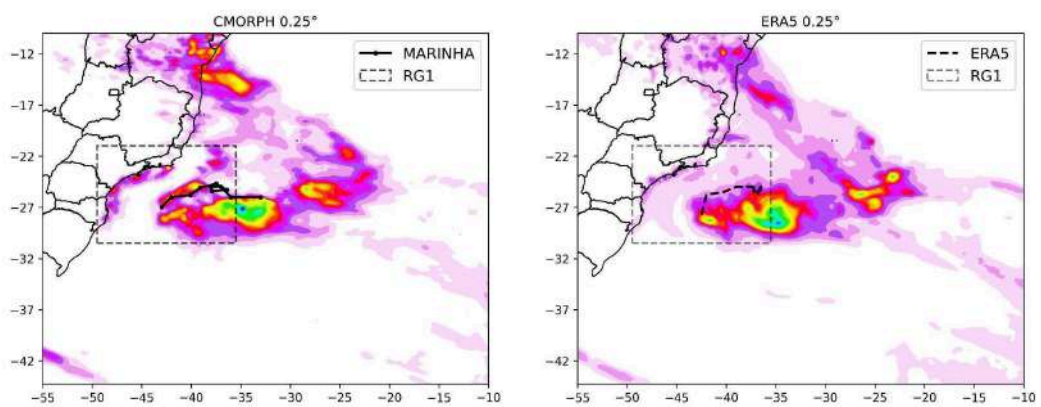
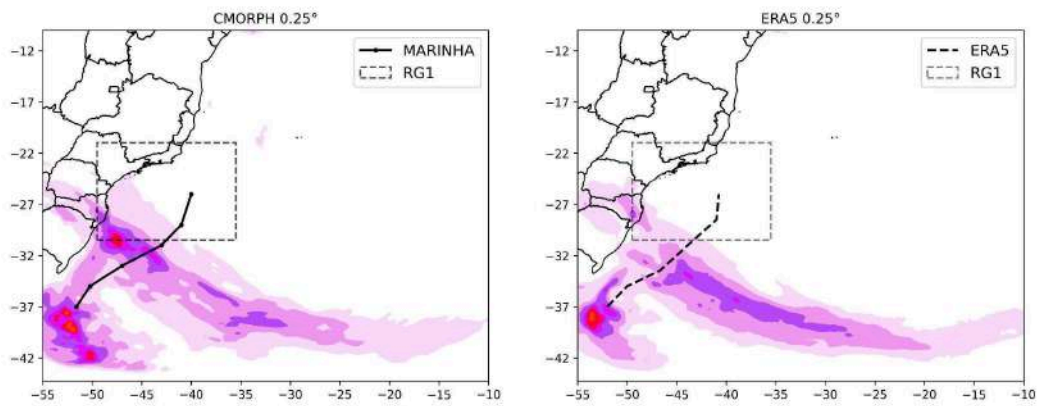


Figura 10. Continuação.

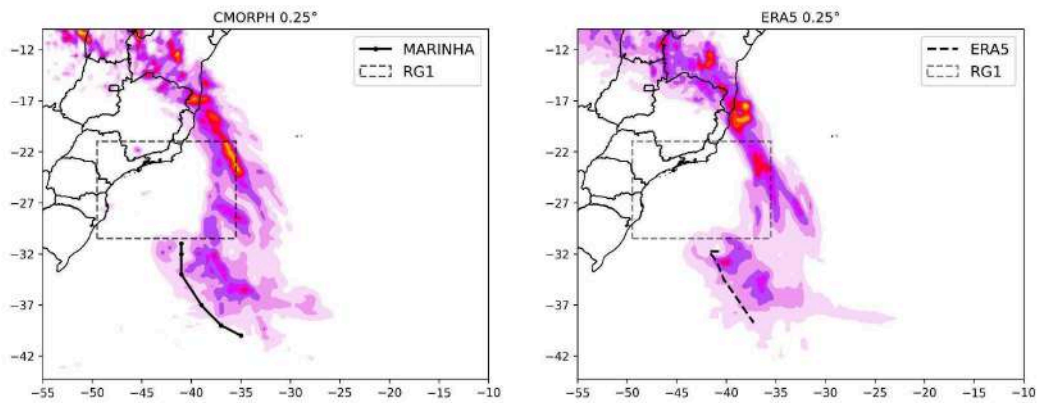
m)

Raoni (2021)



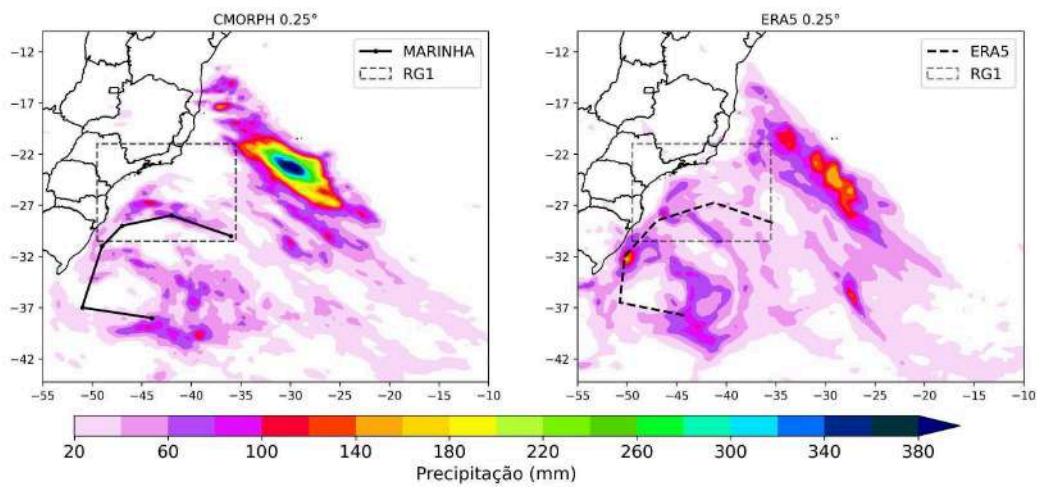
n)

Ubá (2021)



o)

Yakecan (2022)



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 3. Precipitação máxima obtida através do CMORPH e da ERA5, duração dos eventos, viés, taxa de precipitação por hora e tipo de ciclogênese associada às tempestades.

Ciclones	CMORPH (mm)	ERA5 (mm)	Duração ERA5 (h)	Viés (mm)	Taxa de Precip. CMORPH (mm/h)	Ciclogênese
Arani	391	231,5	90	-159,5	4,3	CS
Bapo	372,1	211,5	102	-160,6	3,6	CS
Cari	271,5	350,8	90	79,3	3,0	CS
Deni	232,4	167,5	60	-64,9	3,9	CS
Eçaí	222,8	226,3	66	3,5	3,4	CS
Guará	350	277,3	48	-72,7	7,3	CS
Iba	586,9	335,8	144	-251,1	4,1	CT
Jaguar	152,3	251,7	48	99,4	3,2	CS
Kurumi	224	215,1	66	-8,9	3,4	CS
Mani	183,3	258,2	42	74,9	4,4	CS
Oquira	348,3	149,9	72	-198,4	4,8	CS
Potira	362,6	334	120	-28,6	3,0	CS
Raoni	141,1	124,7	72	-16,4	2,0	CE
Ubá	151,2	182,2	72	31	2,1	CS
Yakecan	119,5	152	96	32,5	1,2	CE

Fonte: Elaborada pelo autor

4.5 Ocorrência de ZCAS em Associação a Eventos Ciclônicos

Neste tópico apresenta-se o levantamento dos registros de ZCAS feito pela Marinha do Brasil para o período de 2011 a 2022 e uma avaliação da concomitância destes eventos com os ciclones estudados.

Através dos registros observou-se que, assim como os sistemas ciclônicos, os eventos de ZCAS ocorreram predominantemente nos meses de verão, apresentando 46 eventos, concordando com a climatologia. Nos meses de outono e primavera, a ZCAS apresentou porcentagem similar e, os eventos foram registrados principalmente nos meses de março e outubro (Figura 11b). Neste período, cada estação registrou 12 e 14 eventos de ZCAS, respectivamente. Enquanto isso, no inverno não houve registro de ZCAS no período estudado.

Ao todo foram registrados 70 eventos de ZCAS e, os anos de 2018 e 2021 foram os que registraram a maior quantidade desses eventos, cada ano com 9 registros. Em contraponto, os anos de 2014 e 2015 foram os anos que apresentaram a menor quantidade de registros. Além disso, assim como pontuado através da distribuição anual de eventos ciclônicos, observou-se que os registros de ZCAS também aumentaram a partir da metade da década anterior (Figura 11c).

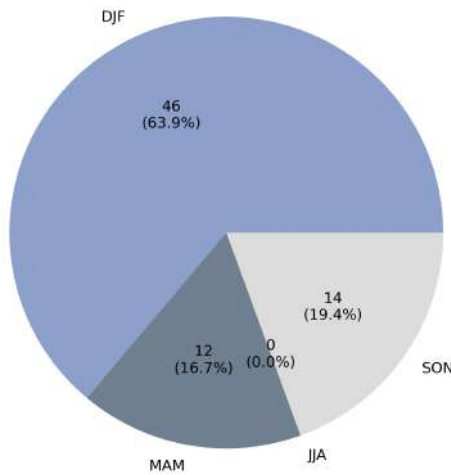
A partir das datas de registro dos eventos de ZCAS e do período e atuação das tempestades, foi possível identificar quais ciclones ocorreram em concomitância a um evento de ZCAS. A partir da relação exposta na Tabela 3 observou-se que dos 70 eventos registrados de ZCAS, 9,7% deles se associaram a um dos ciclones estudados neste trabalho. Além disso, após a definição do tipo de ciclogênese de cada ciclone, pôde-se observar que apenas uma parcela dos ciclones que se desenvolveram a partir de uma ciclogênese subtropical tiveram concomitância a eventos de ZCAS. Dos 12 ciclones com ciclogênese subtropical, 58,3% (7 casos) se associaram a ZCAS em algum momento do seu ciclo de vida. Enquanto isso, os ciclones que se originaram de ciclones extratropicais e depressão tropicais, não ocorreram no mesmo período de existência da zona de convergência.

Com relação a influência dos eventos de ZCAS na precipitação acumulada associada às tempestades, obtém-se uma média de 254 mm entre as tempestades com ZCAS e 292 mm entre as tempestades sem ocorrência de ZCAS. Embora a média da precipitação máxima seja maior nas tempestades sem ZCAS, a distribuição mais longa da chuva (90 h em média) com uma taxa média menor (3 mm/h) implica que o impacto pode ser menos severo do que o cenário com ZCAS, onde a taxa é de em média 4 mm/h.

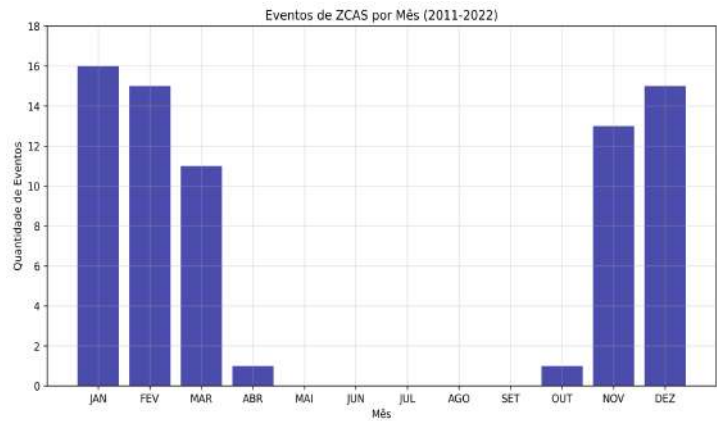
As datas e duração dos ciclones que se associaram a um evento de ZCAS estão sintetizadas na Tabela 4. As tempestades Bapo, Cari, Kurumi e Mani tiveram ciclogênese antes da classificação da ZCAS nas cartas sinóticas. Por outro lado, Eçaí, Guará e Ubá tiveram ciclogênese após a classificação da ZCAS. Na maioria dos casos, o evento de ZCAS se dispersa após a ciclólise das tempestades, o que aponta para uma possível relação entre o ciclone e a manutenção da ZCAS, o que corrobora o exposto em Silva *et al.* (2019) que chamaram atenção para a importância dos ciclones na organização do transporte de umidade necessário para a ZCAS.

Figura 11. a) Distribuição sazonal da ocorrência de ZCAS, b) Distribuição mensal da ocorrência de ZCAS, c) Distribuição anual da ocorrência de ZCAS. Todos os gráficos foram gerados utilizando os registros disponíveis para o período entre 2011 e 2022 com base nos dados disponibilizados pela Marinha do Brasil.

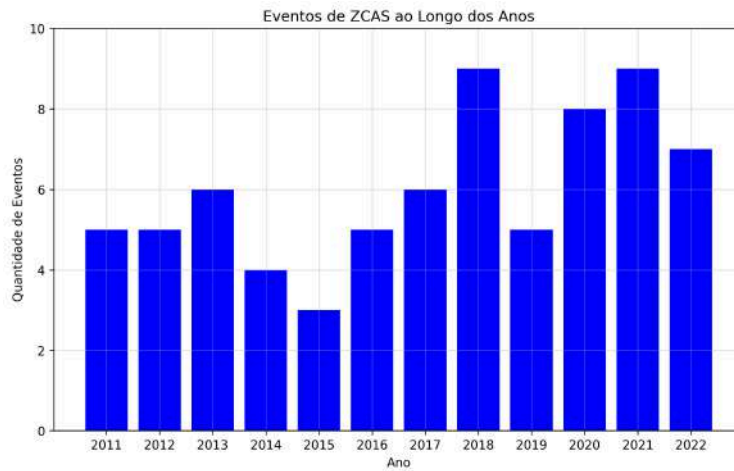
a)



b)



c)



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 4. Datas e duração dos ciclones que se associaram a ZCAS e datas e duração do evento de ZCAS.

Ciclone	Data de ocorrência dos ciclones	Duração dos ciclones (h)	Data de ocorrência dos eventos de ZCAS	Duração do evento de ZCAS (h)
Bapo	06Z05022015	102	00Z06022015	72
	06Z09022015		00Z09022015	
Cari	06Z09032015	90	12Z10032015	120
	00Z13032015		12Z15032015	
Eçaí	00Z04122016	66	12Z05122016	36
	18Z06122016		00Z07122016	
Guará	06Z09122017	48	12Z08122017	180
	06Z11122017		00Z16122017	
Kurumi	00Z23012020	66	12Z22012020	144
	18Z25012020		12Z28012020	
Mani	06Z25102020	42	12Z26102020	48
	00Z27102020		00Z29102020	
Ubá	18Z08122021	72	12Z07122021	84
	12Z12122021		00Z11122021	

4.5.1 Análise do Padrão ZCAS Através do Vetor Fluxo de Umidade

Através das linhas de corrente tangentes ao vetor fluxo médio de umidade integrado verticalmente (**FU**) (Figura 12) é possível observar padrões regionais associados ao transporte de umidade a partir da orientação do vetor na direção da região de atuação das tempestades estudadas. Nesta subseção, analisa-se quais são essas regiões para os diferentes tipos de ciclogênese. Além disso, verifica-se a assinatura do padrão da ZCAS, para os casos onde houve registro desse sistema.

Para os casos de ciclogênese extratropical, CE (Figura 12m e 12o), observou-se que a circulação associada ao **FU** não corresponde ao padrão esperado de ZCAS e está deslocada para as latitudes mais altas, na configuração típica de ciclones extratropicais. Nestes dois casos não houve associação com ZCAS e ambos os sistemas apresentaram as menores taxas de precipitação ao longo do seu ciclo de vida. Já no período de atuação da tempestade Iba (ciclogênese CT), observou-se **FU** direcionado para a região de baixa pressão com uma orientação média ciclônica no oceano, com a atuação da circulação anti-horária da ASAS (Figura 12g). Neste caso também não houve registro de ZCAS, como explicitado anteriormente, no entanto, este foi o sistema com maior acumulado de precipitação ao longo do seu período de atuação, possivelmente devido a sua gênese tropical.

Nos casos com ciclogênese subtropical e com registro de ZCAS (Figura 12b 12c 12e 12f 12i e 12n), observa-se que as linhas de corrente estão em sua maior parte orientadas diagonalmente da região amazônica para a região de atuação das tempestades. Nos casos

combinados (CSs e ZCAS), é possível observar que paralelamente às linhas de corrente há acumulados de precipitação desde a Região Amazônica até o Sudeste Brasileiro, típico da atuação da ZCAS.

Nos demais eventos de CS e sem ZCAS, observou-se que em alguns casos, como em Arani e Oqira (Figura 12a e 12k), a presença de um padrão semelhante ao observado nas tempestades com ZCAS. Estes dois sistemas, mesmo sem a atuação da ZCAS, apresentaram acumulados de precipitação elevados ao longo de seu ciclo de vida, indicando possíveis mecanismos alternativos de transporte de umidade que foram subestimados pela ERA5.

Dessa forma, observa-se que a análise do fluxo médio de umidade verticalmente integrado revela padrões distintos de circulação nas regiões afetadas por tempestades com diferentes tipos de ciclogênese.

Figura 12. Linhas de corrente (linhas com setas) tangentes ao vetor fluxo médio de umidade verticalmente integrado (FU) ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) computado a partir da ERA5 ao longo do ciclo de vida das tempestades a) Arani, b) Bapo, c) Cari, d) Deni, e) Eçaí, f) Guará, g) Iba, h) Jaguar, i) Kurumi, j) Mani, k) Oquira, l) Potira, m) Raoni, n) Ubá, o) Yakecan. Áreas sombreadas (valores indicados na barra de cores) indicam a precipitação acumulada (mm) no mesmo período de FU.

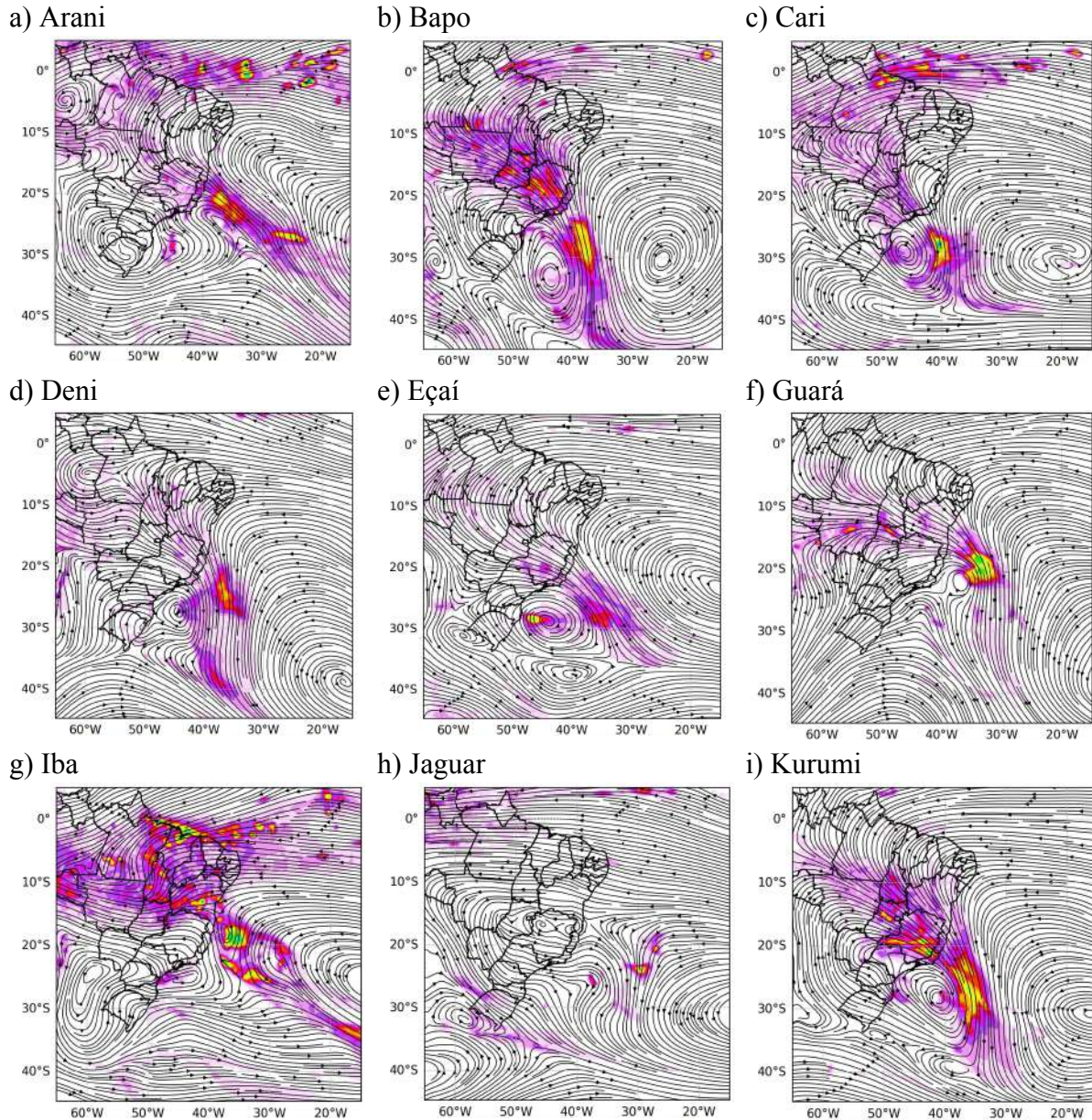
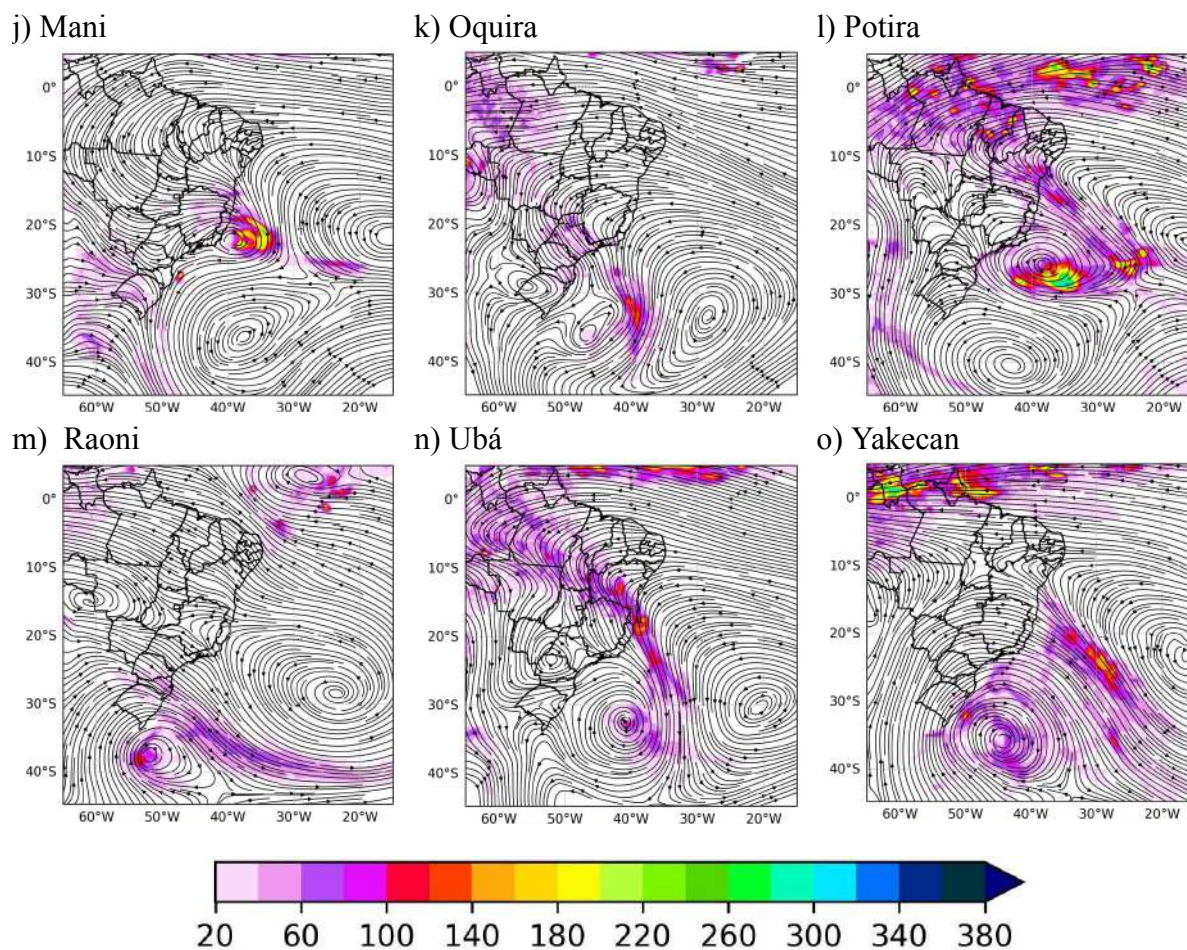


Figura 12. Continuação.



Fonte: Elaborada pelo autor

4.6 ENOS

Para análise do sinal do ENOS no período de interesse, foram utilizados os valores do índice ONI. Valores de ONI acima de $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ são associados à fase quente (El Niño) e abaixo de $-0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ à fase fria (La Niña). O intervalo compreendido entre esses dois limiares é considerado período neutro.

A partir dos valores computados para o ONI (Figura 13), observou-se que, entre 2011 e 2022 foram registrados dois eventos de El Niño, entre o fim de 2014 e meados de 2016, e entre o fim de 2018 até meados de 2019. Comparando com as datas de ocorrência dos ciclones subtropicais, observa-se que nos dois eventos de El Niño houve a formação de 4 das 15 tempestades estudadas, Bapo (2015), Cari (2016), Iba e Jaguar (2019). Nestes dois episódios quentes também se observou redução dos registros de ZCAS. Este fato pode estar associado à influência da fase positiva do ENOS no padrão atmosférico necessário para a

formação da ZCAS (Marengo *et al.*, 2004; Da Silva e Ambrizzi, 2010 Bruick *et al.*, 2019). Além disso, observou-se que dois dos 4 ciclones registrados sob estas condições tiveram concomitância com um evento de ZCAS, o que evidencia que a fase positiva não impede a ocorrência, mas pode diminuir a frequência.

Com relação a La Niña, foram observados 4 episódios. O primeiro deles começou em meados de 2010 e se estendeu até o início de 2012, o segundo durou desde meados de 2016 até o início de 2017, o terceiro durou desde meados de 2017 até o início de 2018 e o quarto durou desde meados de 2020 até o início de 2023. Neste período foram registrados 10 ciclones subtropicais (Arani, Deni, Eçaí, Guará, Mani, Oquira, Potira, Raoni, Ubá e Yakecan), incluindo os 2 eventos com ciclogênese fria (CE). Nos dois episódios de La Niña mais recentes, observou-se que a quantidade de eventos de ZCAS foi acima da média da década (6 eventos por ano). Das tempestades registradas durante estes episódios, a maioria se desenvolveu a partir de ciclogênese subtropical e 40% delas ocorreu simultaneamente a um evento de ZCAS.

Neste trabalho, considerou-se como períodos neutros os intervalos de tempo com pelo menos 3 valores consecutivos entre $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com isso foram observados 5 períodos neutros ao longo dos anos avaliados, onde apenas um ciclone subtropical foi registrado. A tempestade em questão foi a Kurumi, que ocorreu em concomitância com um evento de ZCAS.

Dessa forma, calculando-se uma taxa de eventos ciclônicos por fases quente, fria e neutra, descritas na Tabela 4, observa-se que os períodos de La Niña apresentaram maior taxa de formação de ciclones subtropicais próximos a costa brasileira e que a maioria deles se desenvolveu a partir de ciclogênese subtropical.

Tabela 5. Taxa de ocorrência de ciclones por episódio de ENOS positivo, negativo e neutro.

Padrão	Taxa de ciclones por padrão
El Niño	2,0
La Niña	2,5
Neutro	0,2

Fonte: Elaborada pelo autor

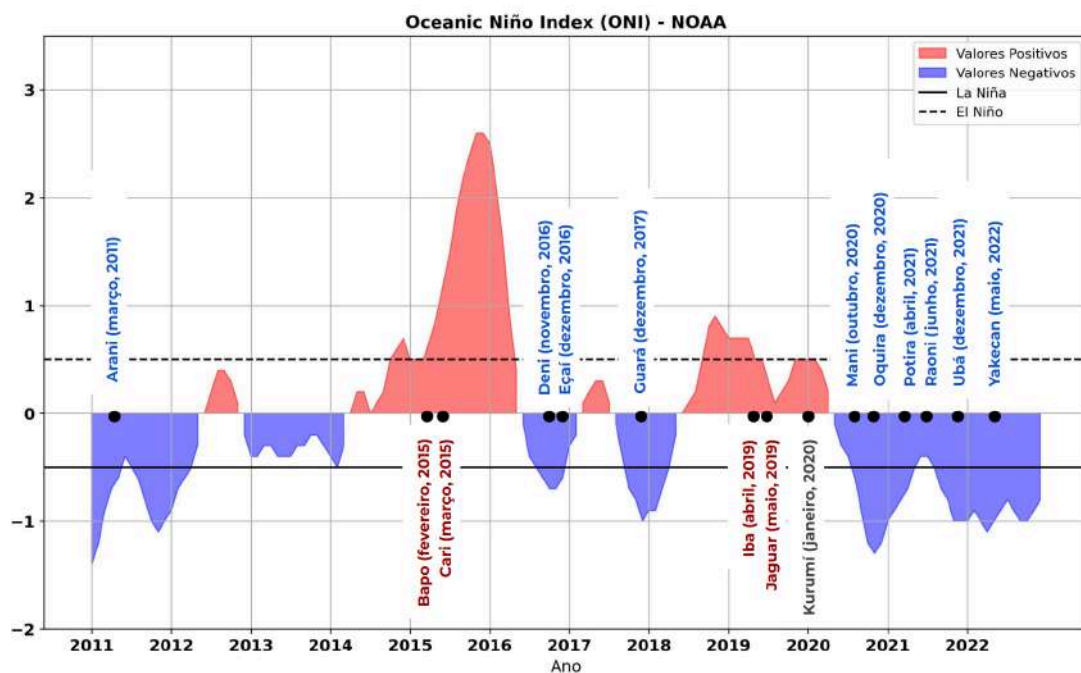
Uma síntese dos principais resultados discutidos neste trabalho, envolvendo a ciclogênese, a presença de ZCAS e as fases ativas do ENOS, são apresentados a seguir através da Tabela 6 e Figura 13.

Tabela 6. Síntese dos principais resultados.

Evento	Ano	Mês	Período de Ocorrência	(h)	Ciclogênese ZCAS	
Arani	2011	Março	00Z14032011 - 18Z17032011	90	CS	Não
Bapo	2015	Fevereiro	06Z05022015 - 06Z09022015	96	CS	Sim
Cari	2015	Março	06Z09032015 - 00Z13032015	90	CS	Sim
Deni	2016	Novembro	06Z15112016 - 18Z17112016	60	CS	Não
Eçaí	2016	Dezembro	00Z04122016 - 18Z06122016	66	CS	Sim
Guará	2017	Dezembro	06Z09122017 - 06Z11122017	48	CS	Sim
Iba	2019	Abril	00Z23032019 - 00Z29032019	144	CT	Não
Jaguar	2019	Maio	06Z22052019 - 06Z22052019	48	CS	Não
Kurumi	2020	Janeiro	00Z23012020 - 18Z25012020	66	CS	Sim
Mani	2020	Outubro	06Z25102020 - 00Z27102020	42	CS	Sim
Oquira	2020	Dezembro	00Z27122020 - 00Z30122020	72	CS	Não
Potira	2021	Abril	00Z19042021 - 06Z24042021	126	CS	Não
Raoni	2021	Junho	00Z27062021 - 12Z30062021	84	CE	Não
Ubá	2021	Dezembro	18Z08122021 - 12Z12122021	84	CS	Sim
Yakecan	2022	Maio	12Z15052022 - 12Z19052022	96	CE	Não

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 13. Índice ONI (°C) e ocorrência de tempestades que chegaram a uma fase subtropical ao longo do período de 2011 a 2022.



Fonte: Elaborada pelo autor

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados da análise dos eventos na região em estudo, é evidente que a compreensão dos padrões meteorológicos requer uma abordagem que leve em consideração não apenas as características individuais das tempestades, mas também a informação do ambiente de formação e sazonal.

Demonstrou-se que a reanálise ERA5 é uma ferramenta robusta na reconstrução do ciclo de vida dos ciclones, fornecendo uma representação geralmente precisa dos eventos no que diz respeito à identificação das características de formação, desenvolvimento e trajetória. No entanto, discrepâncias, como a incapacidade de reproduzir completamente o ciclo de vida da tempestade subtropical Jaguar, indicam a necessidade contínua de refinamento e validação dos modelos atmosféricos, bem como dos sistemas de assimilação dos dados atmosféricos e de superfície.

Ao examinar a distribuição temporal dos eventos, é possível verificar a independência da trajetória das tempestades em relação à estação do ano, o que sugere que o tipo de ciclogênese desempenha um papel mais significativo na determinação do comportamento das tempestades do que os fatores sazonais.

A análise da relação entre as tempestades e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) revela uma interação complexa entre os sistemas ciclônicos e os padrões de precipitação regional. A associação entre a formação de ciclones subtropicais e a presença da ZCAS indica uma influência mútua entre esses fenômenos, destacando a importância de considerar não apenas as características individuais das tempestades, mas o ambiente em que se desenvolvem de forma mais ampla. Observou-se que apenas ciclones com ciclogênese subtropical estavam relacionados à ZCAS. Além disso, a análise dos totais máximos de precipitação entre eventos com e sem ZCAS revelou que, embora os eventos com ZCAS apresentem em média máximos de precipitação ligeiramente menores, eles mostram uma distribuição mais concentrada e uma taxa média de precipitação mais elevada, sugerindo um impacto potencialmente mais severo.

A investigação das taxas de precipitação associadas aos diferentes tipos de ciclogênese fornece uma visão sobre os mecanismos subjacentes à intensificação das tempestades. A observação de taxas de precipitação mais elevadas em tempestades derivadas de núcleos quentes em baixos níveis (CS e CT) sugere uma relação entre a temperatura do oceano e a intensidade das tempestades. Além disso, a identificação de padrões distintos de transporte de umidade em diferentes tipos de ciclogênese destaca a complexidade dos

processos atmosféricos envolvidos na formação e evolução das tempestades que podem atingir a mesma classificação geral.

Os relatórios pós-evento da MB forneceram um panorama da ocorrência de ciclones com características subtropicais na SOAS. Notou-se através deles um aumento da ocorrência dos eventos a partir da segunda década, em concomitância com períodos neutros do ENSO e a diminuição da ocorrência de ZCAS.

Ressalta-se que ausência de dados em áreas oceânicas prejudica esse tipo de estudo, o qual se beneficiaria do emprego de técnicas de redução de escala através do uso de modelos de área limitada, ou seja, *downscaling* dinâmico que incorporem a assimilação de dados auxiliares, como as estimativas de precipitação derivada de produtos de satélites ambientais.

Os resultados desta pesquisa ressaltam a importância de uma abordagem integrada que leve em conta dados observacionais *in situ* (quando possível) e de sensoriamento remoto, e modelos numéricos para o estudo dos sistemas meteorológicos em regiões específicas do continente e do oceano.

Uma compreensão desse tipo de evento também requer uma análise abrangente que leve em consideração não apenas características individuais, mas também a variabilidade dos modos climáticos atuantes, bem como interações com outros fenômenos meteorológicos.

6. REFERÊNCIAS

ANDRELINA, Bruna; REBOITA, Michelle Simões. Climatologia do Índice do Potencial de Gênese de Ciclones Tropicais nos Oceanos Adjacentes à América do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021.

BENTLEY, Alicia M.; METZ, Nicholas D. Tropical Transition of an Unnamed, High-Latitude, Tropical Cyclone over the Eastern North Pacific. **Monthly Weather Review**, v. 144, n. 2, p. 713–736, 2016.

BRUICK, Zachary S.; RASMUSSEN, Kristen L.; ROWE, Angela K.; *et al.* Characteristics of Intense Convection in Subtropical South America as Influenced by El Niño–Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 147, n. 6, p. 1947–1966, 2019.

CARDOSO, Andressa A.; DA ROCHA, Rosmeri P.; CRESPO, Natália M. Synoptic Climatology of Subtropical Cyclone Impacts on Near-Surface Winds Over the South Atlantic Basin. **Earth and Space Science**, v. 9, n. 11, 2022.

CORREIA, Fellipe Romão Sousa; DE QUEIROZ, Felipe Garcez; AMARO, Pamella Sampaio Nascimento. Aspectos gerais dos ciclones tropicais e subtropicais ocorridos na METAREA V entre 2011 e 2022. **Anais Hidrográficos**, v. 79, n. 1, p. 133–154, 2023.

COSTA, Nathália Helena Teixeira; NUNES, André Becker. Synoptic comparison between two cases of subtropical cyclones in the South coast of Brazil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 7, p. 175–183, 2021.

DA ROCHA, Rosmeri Porfírio; REBOITA, Michelle Simões; GOZZO, Luiz Felipe; DUTRA, Livia Márcia Mosso; DE JESUS, Eduardo Marcos. Subtropical cyclones over the oceanic basins: a review. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1436, n. 1, p. 138–156, 2019.

DE JESUS, Eduardo Marcos; DA ROCHA, Rosmeri Porfírio; CRESPO, Natália Machado; *et al.* Future climate trends of subtropical cyclones in the South Atlantic basin in an ensemble of global and regional projections. **Climate Dynamics**, v. 58, n. 3–4, p. 1221–1236, 2021.

DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; *et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553–597, 2011.

DINES, J. S. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. By J. Bjerknes and H. Solberg. Kristiania, Geophysisks Publikationer, 3, 1922, No. 1. Pp. 18. 4°. Price 2 kr. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 49, n. 206, p. 140–141, 1923.

EVANS, Jenni L.; BRAUN, Aviva. A Climatology of Subtropical Cyclones in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v. 25, n. 21, p. 7328–7340, 2012.

EVANS, Jenni L.; GUISHARD, Mark P. Atlantic Subtropical Storms. Part I: Diagnostic Criteria and Composite Analysis. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 7, p. 2065–2080, 2009.

FURG, SiMCosta -. **SiMCosta**. Disponível em: <<https://simcosta.furg.br/>>. Acesso em: 13 May 2024.

GAN, Manoel Alonso; RAO, Vadlamudi Brahmananda. Surface Cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293–1302, 1991.

GOZZO, L. F.; DA ROCHA, R. P.; GIMENO, L.; *et al.* Climatology and numerical case study of moisture sources associated with subtropical cyclogenesis over the southwestern Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 11, p. 5636–5653, 2017.

GOZZO, Luiz Felipe; DA ROCHA, Rosmeri P.; REBOITA, Michelle S.; *et al.* Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic: Climatological Aspects and Case Study. **Journal of Climate**, v. 27, n. 22, p. 8543–8562, 2014.

GRAY, William M. GLOBAL VIEW OF THE ORIGIN OF TROPICAL DISTURBANCES AND STORMS. **Monthly Weather Review**, v. 96, n. 10, p. 669–700, 1968.

GUISHARD, Mark P.; EVANS, Jenni L.; HART, Robert E. Atlantic Subtropical Storms. Part II: Climatology. **Journal of Climate**, v. 22, n. 13, p. 3574–3594, 2009.

HART, Robert E. A Cyclone Phase Space Derived from Thermal Wind and Thermal Asymmetry. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 4, p. 585–616, 2003.

HERSBACH, Hans; BELL, Bill; BERRISFORD, Paul; *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; *et al.* The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 3, p. 437–472, 1996.

KNAPP, Kenneth R.; ANSARI, Steve; BAIN, Caroline L.; *et al.* Globally Gridded Satellite Observations for Climate Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 92, n. 7, p. 893–907, 2011.

MARENGO, Jose A.; SOARES, Wagner R.; SAULO, Celeste; *et al.* Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP–NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, p. 2261–2280, 2004.

MCTAGGART-COWAN, Ron; BOSART, Lance F.; DAVIS, Christopher A.; *et al.* Analysis of Hurricane Catarina (2004). **Monthly Weather Review**, v. 134, n. 11, p. 3029–3053, 2006.

MOKHOV, I. I.; MAKAROVA, M. E.; POROSHENKO, A. G. Tropical Cyclones and Their Transformation into Extratropical: Estimates of the Half-Century Trends. **Doklady Earth Sciences**, v. 493, n. 1, p. 552–557, 2020.

NUNES, Ana M. B. Satellite-enhanced dynamical downscaling for the analysis of extreme events. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 121, n. 18, 2016.

PEZZA, Alexandre Bernardes; SIMMONDS, Ian. The first South Atlantic hurricane: Unprecedented blocking, low shear and climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 15, 2005.

RAMAGE, C. S. HURRICANE DEVELOPMENT. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 16, n. 3, p. 227–237, 1959.

REBOITA, M. S.; CRESPO, N. M.; DUTRA, L. M. M.; *et al.* Iba: The First Pure Tropical Cyclogenesis Over the Western South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 126, n. 1, 2021.

REBOITA, Michelle; DA ROCHA, Rosmeri; OLIVEIRA, Débora. Key Features and Adverse Weather of the Named Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic Ocean. **Atmosphere**, v. 10, n. 1, p. 6, 2018.

REBOITA, Michelle Simões; DA ROCHA, Rosmeri Porfírio; AMBRIZZI, Tércio; *et al.* South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). **Climate Dynamics**, v. 35, n. 7–8, p. 1331–1347, 2009.

REBOITA, Michelle Simões; GOZZO, Luiz Felipe; CRESPO, Natália Machado; *et al.* From a Shapiro–Keyser extratropical cyclone to the subtropical cyclone Raoni: An unusual winter synoptic situation over the South Atlantic Ocean. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 148, n. 747, p. 2991–3009, 2022.

REBOITA, Michelle Simões; MARRAFON, Vitor Hugo. Ciclones extratropicais. **Terrae Didática**, v. 17, p. e021032, 2021.

RIBEIRO, João Gabriel Martins; PAZ, Gabriel Teodoro da; REBOITA, Michelle Simões; *et al.* Análise do Índice do Potencial de Gênese em Ciclones Subtropicais na Costa do Brasil.

Revista Brasileira de Geografia Física, v. 16, n. 5, p. 2832–2857, 2023.

RIEHL, Herbert. ON THE FORMATION OF TYPHOONS. **Journal of Meteorology**, v. 5, n. 6, p. 247–265, 1948.

SHAPIRO, M. A.; KEYSER, D. **Fronts, jet streams, and the tropopause**. Disponível em: <<https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/32472>>.

SILVA, Gyrlene Aparecida Mendes da; AMBRIZZI, T. Summertime moisture transport over Southeastern South America and extratropical cyclones behavior during inter-El Niño events. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, n. 3–4, p. 303–310, 2009.

SILVA, João Pedro Rodrigues; REBOITA, Michelle Simões; ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL EM CAMPOS ATMOSFÉRICOS RECENTES. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

SINCLAIR, Mark R. A Climatology of Cyclogenesis for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 6, p. 1601–1619, 1995.

TRENBERTH, Kevin E. The Definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 12, p. 2771–2777, 1997.

XIE, Pingping; JOYCE, Robert; WU, Shaorong; *et al.* Reprocessed, Bias-Corrected CMORPH Global High-Resolution Precipitation Estimates from 1998. **Journal of Hydrometeorology**, v. 18, n. 6, p. 1617–1641, 2017.

Dados PNBOIA. Centro de Hidrografia da Marinha. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia-mapa>>. Acesso em: 13 May 2024.

MONITORAMENTO DE CICLONES SUBTROPICAIS/TROPICAIS NA METAREA V. Centro de Hidrografia da Marinha. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-monitoramento-de-ciclones>>. Acesso em: 13 May 2024.

NORMAM-701/DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/node/264>>. Acesso em: 13 May 2024.