Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE CICLONES SOBRE O OCEANO ATLÂNTICO SUL EM PROJEÇÕES COM O RegCM4 E MCGs

Classification of the cyclone types over the South Atlantic Ocean in projections with RegCM4 and GCMs

Clasificación de los tipos de ciclones sobre el Océano Atlántico Sur en proyecciones con RegCM4 y GCMs

Vitor Hugo Marrafon
Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
vitorhmarrafon@gmail.com

Michelle Simões Reboita
Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
reboita@unifei.edu.br

Rosmeri Porfírio da Rocha
Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo (USP)
rosmerir@model.iag.usp.br

Eduardo Marcos de Jesus
Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo (USP)
dumarcoss@gmail.com

Resumo: Este estudo tem como objetivo classificar os tipos de ciclones sobre o oceano Atlântico Sul em três projeções do *Regional Climate Model* (RegCM4), bem como nos modelos globais (MCGs) que forneceram as condições de fronteira para o regional, e identificar sistemas que fazem transição para tropical (TT). O cenário climático utilizado é o RCP8.5. A classificação dos tipos de ciclones envolve a utilização de três algoritmos: o primeiro para identificar e rastrear os ciclones no oceano Atlântico Sul com base na vorticidade relativa em 925 hPa; o segundo para fornecer as características térmicas dos ciclones através da metodologia do *Cyclone Phase Space* e o terceiro para separar os ciclones com base em suas características térmicas. Considerando o período de 2020-2050 (2051-2080), o *ensemble* dos MCGs e do RegCM4 projetam ligeira redução (aumento) na frequência de ciclones tropicais quando comparados ao clima presente (1979-2005). Para os ciclones extratropicais é projetada tendência de diminuição da frequência. Uma das hipóteses iniciais do estudo era que num cenário de aquecimento, haveria um incremento no número de TT, entretanto os resultados obtidos não indicam mudança na frequência desses

sistemas já que tanto no clima presente quanto futuro o número de transições é de ~2,8 sistemas por década em ambos os *ensembles*.
Palavras-chave: Transição tropical. Ciclones tropicais. Ciclones extratropicais. Mudanças climáticas.

Abstract: This study aims to classify the types of cyclones in the South Atlantic Ocean in three projections of the Regional Climate Model (RegCM4), as well as of the global models (GCMs) that provide the boundary conditions for the regional, and to identify systems that transition to tropical (TT). The climatic scenario used is RCP8.5. Classification of cyclone types uses three algorithms: the first to identify and track cyclones in the South Atlantic Ocean based on relative vorticity at 925 hPa; the second to provide thermal characteristics of cyclones through the Cyclone Phase Space methodology and the third to separate cyclones based on their thermal characteristics. Considering the period 2020-2050 (2051-2080), the GCMs and RegCM4 ensembles project a slight reduction (increase) in the frequency of tropical cyclones when compared to the present climate (1979-2005). For extratropical cyclones, there is a negative trend in their frequency. One of the initial hypotheses of this study was that in a warming scenario, there would be an increase in the number of TT, however the results obtained do not indicate a change in their frequency since in present and future climates the number of transitions is ~ 2.8 systems per decade in both ensemble.
Keywords: Tropical transition. Tropical cyclones. Extratropical cyclones. Climate change.

Resumen: Este estudio tiene como objetivo clasificar los tipos de ciclones sobre el Océano Atlántico Sur en tres proyecciones del Modelo Climático Regional (RegCM4), así como en los modelos globales (GCM) que proporcionaron las condiciones de contorno para el regional, e identificar sistemas que transición a tropical (TT). El escenario climático utilizado es RCP8.5. La clasificación de los tipos de ciclones implica el uso de tres algoritmos: el primero para identificar y rastrear ciclones en el Océano Atlántico Sur en función de la vorticidad relativa a 925 hPa; el segundo para proporcionar las características térmicas de los ciclones a través de la metodología Cyclone Phase Space y el tercero para separar los ciclones en función de sus características térmicas. Considerando el período 2020-2050 (2051-2080), el conjunto de MCG y RegCM4 proyectan una ligera reducción (aumento) en la frecuencia de ciclones tropicales en comparación con el clima actual (1979-2005). Para los ciclones extratropicales, se proyecta una tendencia de frecuencia decreciente. Una de las hipótesis iniciales del estudio fue que en un escenario de calentamiento habría un aumento en el número de TT, sin embargo los resultados obtenidos no indican un cambio en la frecuencia de estos sistemas ya que tanto en el clima presente como en el futuro la el número de transiciones es ~2.8 sistemas por década en ambos conjuntos.
Palabras clave: Transición tropical. Ciclones tropicales. ciclones extratropicales. Cambios climáticos.

Submetido em: 24/04/2021
Aceito para publicação em: 20/01/2022
Publicado em: 16/02/2022

1. INTRODUÇÃO

O oceano Atlântico Sul apresenta condições climatológicas propícias à gênese de ciclones extratropicais (Gan e Rao, 1991; Reboita et al., 2010, 2012; 2015; 2018a; de Jesus et al., 2021a), subtropicais (Gozzo et al., 2014, 2017; Reboita et al., 2018a) e, em raras ocasiões, de ciclones tropicais (Pezza e Simmonds, 2005; McTaggart-Cowan et al., 2006; Lauton et al., 2021; Reboita et al., 2021). Entretanto, esses tipos de ciclones não necessariamente mantêm as mesmas características desde a gênese até o decaimento. Por exemplo, um ciclone pode se formar como ciclone extratropical, passar por um estágio intermediário de subtropical ou híbrido e se transformar em tropical (processo chamado de transição tropical - TT). Por isso, a atmosfera é considerada um *continuum* (Hart, 2003). A TT foi o que originou o primeiro ciclone tropical desde o início da era-satelital, chamado de Catarina, registrado no Atlântico Sul em 2004 (Pezza e Simmonds, 2005; McTaggart-Cowan et al., 2006). Já o ciclone tropical Iba, ocorrido em 2019, teve gênese tropical pura e decaimento como sistema extratropical (Reboita et al., 2021).

De maneira breve, os ciclones extratropicais possuem gênese associada a gradientes horizontais de temperatura em superfície (região de baroclinia) e à divergência de massa a jusante de cavados em médios e altos níveis da atmosfera (Gan e Rao, 1991; Reboita et al., 2012; Catto et al., 2019). No oceano Atlântico Sul, Reboita et al. (2018a), utilizando 5 diferentes reanálises e um algoritmo baseado na vorticidade relativa em 925 hPa, mostram que a frequência média anual de ciclones extratropicais é de ~225 sistemas/ano, sendo o inverno a estação mais ciclogenética. Com relação aos ciclones tropicais, esses têm gênese, preferencialmente, entre as latitudes de 5° a 20°, em ambos os hemisférios, e são associados à transferência de fluxos de calor latente e sensível do oceano para a atmosfera e posterior liberação de calor latente por condensação (Gray, 1968; Emanuel, 1991). Esses sistemas causam *momentum* sobre o oceano gerando *upwelling* e mistura, levando à redução da temperatura da superfície do mar (TSM) por onde passam (Jullien et al., 2012). Os ciclones tropicais são sistemas não-frontais e com núcleo quente, o que os difere dos ciclones extratropicais. O núcleo quente é verticalmente alinhado, profundo (estende-se da superfície até a tropopausa) e mais quente nas camadas superiores da troposfera (Emanuel, 2003). A grande extensão vertical do núcleo quente é a chave da sustentação do ciclone tropical pelos fluxos de calor latente intensos da superfície do oceano, segundo a teoria *Wind Induced Surface Heat Exchange* (WISHE – Emanuel, 1987). Desde o início da era satelital foram registrados dois ciclones tropicais no oceano Atlântico Sul: o Catarina em 2004, que foi o produto de uma TT, e o Iba em 2019, que nasceu como ciclone tropical puro (Reboita et al., 2021). Uma maneira de verificar se as condições ambientais são propícias à gênese de sistemas tropicais é através do índice de potencial de gênese de ciclones tropicais. Camargo et al. (2014) mostram que a reanálise do NCEP indica condições de

gênese na costa sudeste do Brasil e que em projeções futuras também há condições para a formação desses sistemas (Camargo, 2013; Camargo et al., 2014). Recentemente, Andrelina e Reboita (2021) computaram a climatologia mensal do índice do potencial de gênese nos oceanos ao redor da América do Sul usando a reanálise ERA5 e mostraram potencial mais acentuado entre janeiro e abril na costa sudeste do Brasil. Os autores chamam a atenção que a existência de potencial de gênese não implica obrigatoriamente que haverá desenvolvimento de ciclones tropicais.

Os ciclones subtropicais podem ter gênese como subtropical ou ser a fase de transição de sistemas extratropicais para tropicais ou vice-versa ou simplesmente a fase em que tropicais ou extratropicais podem decair. Em geral, os ciclones subtropicais possuem núcleo frio em altos níveis, como os ciclones extratropicais e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs, também conhecidos por *cutoff lows*), e quente em baixos níveis, como os ciclones tropicais, o que lhes confere também o nome de sistemas híbridos. Os ciclones subtropicais que se originam no oceano Atlântico Sul possuem gênese associada, principalmente, à divergência de massa a jusante de um cavado de pequena amplitude ou VCAN em níveis médios e altos da atmosfera, fraco cisalhamento vertical do vento e a convergência de fluxos de umidade em baixos níveis da atmosfera (Gozzo et al., 2014, 2017; Reboita et al., 2019a; da Rocha et al., 2019). Gozzo et al. (2014) e de Jesus et al. (2021b) mostram que a região do Atlântico Sul, próxima à costa da região sul/sudeste do Brasil, é o local preferencial de gênese dos ciclones subtropicais. Além disso, Gozzo et al. (2014) indicam que a frequência média anual de ciclones subtropicais é de ~7,2 sistemas/ano e que o verão é a estação com maior ocorrência desses sistemas no Atlântico Sul.

Com relação à TT, Davis e Bosart (2004) descrevem os mecanismos desse processo através de dois paradigmas: um em que o precursor do ciclone tropical é um ciclone extratropical fraco (TT fraca) e outro que é forte (TT forte). A distinção deve-se ao fato de que o ciclone extratropical forte é capaz de induzir trocas mar-ar, como descrito na teoria WISHE (troca de calor na superfície induzida pelo vento; Emanuel, 1987), enquanto que o ciclone extratropical fraco é apenas um agente organizador de convecção. No caso do ciclone extratropical forte, além da indução dos fluxos turbulentos mar-ar, há redução do cisalhamento vertical do vento através de processos diabáticos. A redução do cisalhamento ocorre tanto pelo escoamento divergente em altos níveis devido à convecção quanto pela redistribuição da vorticidade potencial (VP). Ambos tendem a homogeneizar os gradientes horizontais de VP acima do centro do ciclone. Do ponto de vista sinótico, a TT ocorre à medida que os ciclones se deslocam de um ambiente baroclínico para outro barotrópico. Uma dessas transições ocorreu na formação do Catarina (McTaggart-Cowan et al., 2006). Esse sistema tropical se desenvolveu a partir de um ciclone extratropical pré-existente numa região onde um bloqueio do tipo dipolo contribuiu para reduzir o cisalhamento vertical do vento e a TSM estava mais quente do

que o normal. A TT é frequente na bacia do Atlântico Norte onde, de acordo com McTaggart-Cowan et al. (2008), 28% dos furacões registrados provêm de TT. Já na bacia do Atlântico Sul, McTaggart-Cowan et al. (2013) destacam que há condições ambientais propícias tanto para a TT classificada como fraca quanto para forte. Além disso, os autores mostram, através de dados observados, a ocorrência de dois casos de TT forte próximos à costa sul/sudeste do Brasil. Provavelmente, um é o caso Catarina.

Vários estudos mencionam que a convecção profunda é o prelúdio da formação dos ciclones tropicais; porém no oeste do Pacífico Norte, os ciclones podem ocorrer sem essa forçante como principal mecanismo de gênese (Chang et al., 2017). Nessa bacia oceânica, o desenvolvimento dos ciclones tropicais tem como precursor a influência de uma forçante em altos níveis (Chang et al., 2017). Vários dias antes da formação do ciclone tropical, um máximo de VP aparece na troposfera superior e, posteriormente, se redistribui para baixos-médios níveis e, posteriormente, ao se associar à convecção profunda pode originar um evento de transição tropical. Nesse contexto, Chang et al. (2019) descreveram um caso de TT no oeste do Pacífico Norte. O ciclone extratropical teve suporte da intrusão de VP da estratosfera. Posteriormente, o cavado de VP na alta troposfera favoreceu a formação de uma *cutoff low* - processo que pode ser decorrente da quebra da onda de Rossby (Portmann et al., 2021). Essa transição é suportada pela liberação de calor latente via convecção profunda; como a *cutoff low* possui centro frio, gera instabilidade na coluna atmosférica. Em baixos níveis, a intensificação da vorticidade está associada com a convergência do fluxo de umidade. Já a convergência do fluxo de umidade favorece a convecção profunda. O acúmulo subsequente de calor latente redistribui a VP na troposfera e conduz à formação do ciclone tropical. O processo descrito é basicamente o apresentado por Davis e Bosart (2006) e que também é destacado na revisão de Martius e Rivière (2016). Bentley e Metz (2016) descreveram um caso incomum de TT no leste do oceano Pacífico Norte. O ciclone extratropical se desenvolveu corrente abaixo de um cavado na alta troposfera e apresentou seclusão quente (Shapiro e Keyser, 1990). A partir do aprisionamento de ar quente no centro do ciclone e o aquecimento adicional via calor sensível na direção mar-ar, o ciclone evoluiu para um sistema tropical.

Para se definir se um ciclone é do tipo extratropical, subtropical ou tropical, bem como se possui transições ao longo do ciclo de vida, pode-se utilizar a metodologia do espaço de fase dos ciclones (*Cyclone Phase Spac*e – CPS) de Hart (2003). O CPS utiliza três parâmetros para descrever a estrutura dinâmica e termodinâmica dos ciclones (Hart, 2003): a espessura da camada 600-900 hPa e o vento térmico na baixa troposfera (600-900 hPa) e na alta troposfera (300-600 hPa). A metodologia do CPS tem sido aplicada tanto para estudos de caso (Dias Pinto et al., 2013; Dutra et al., 2017; Gozzo

et al., 2017; Reboita et al., 2019b; 2021) quanto para climatologias no Atlântico Sul (Evans e Braun, 2012; Gozzo et al., 2014; de Jesus et al., 2021b).

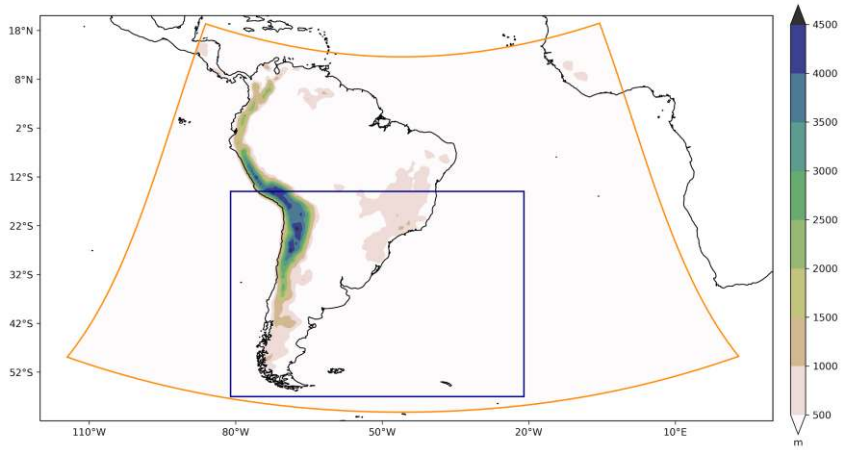
Diante do exposto, o objetivo deste estudo é classificar os tipos de ciclones no oceano Atlântico Sul em três projeções climáticas do *Regional Climate Model version 4 (RegCM4)* e nos modelos do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5) que forneceram as condições de fronteira ao modelo regional, a fim de descrever a climatologia dos ciclones que nascem como tropicais e daqueles com transição tropical no oceano Atlântico Sul no clima presente e futuro.

2. METODOLOGIA

2.1. Dados

Os dados utilizados neste estudo são projeções climáticas de modelos globais do CMIP5 e do modelo regional RegCM4 e a reanálise ERA-Interim (Dee et al., 2011) do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Os modelos globais utilizados são HadGEM2-ES (Collins et al. 2011), MPI-ESM-MR (Giorgetta et al. 2013) e GFDL-ESM2M (Dunne et al. 2012). Esses modelos também dirigiram o RegCM4, que foi integrado com 50 km de resolução horizontal, no domínio da América do Sul, sugerido pelo *Coordinated Regional Downscaling Experiment* (CORDEX) **(Figura 1)**, e no período de 1979 a 2080. O cenário climático considerado é o *Representative Concentration Pathaway* 8.5 (RCP8.5; Van Vuuren et al., 2011). Detalhes dessas projeções podem ser encontrados, por exemplo, em Reboita et al. (2018b). No presente estudo são analisados três *timeslices*: 1979-2005, 2020-2050 e 2051-2080.

Figura 1 - Domínio e topografia (metros; sombreado) de simulação do RegCM4 (linha laranja) e área utilizada no rastreamento dos ciclones (linha azul, 15-57°S; 81°-21W).



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

2.2. Classificação dos Tipos de Ciclones

A classificação dos tipos de ciclones envolve a utilização de três algoritmos: (1) algoritmo de identificação e rastreamento dos ciclones, (2) algoritmo para determinar a estrutura térmica dos ciclones com base na metodologia do CPS e (3) algoritmo para a classificação dos ciclones. O terceiro algoritmo foi desenvolvido para esse estudo com base nos critérios de Jesus et al. (2021b). Na sequência são apresentados detalhes dos três algoritmos.

a. **Rastreamento dos Ciclones:** A base de dados de ciclones utilizada no estudo é a de de Jesus et al. (2021a). Esses autores utilizaram o algoritmo de *tracking* de ciclones de Reboita et al. (2010) nos dados da ERA-Interim e nas projeções climáticas simuladas pelos modelos globais e suas regionalizações a partir do *downscaling* dinâmico com o RegCM4, com todas as fontes de dados em uma frequência temporal de 6 horas. O algoritmo identifica os ciclones com base na técnica do vizinho mais próximo, isto é, um ponto de grade é candidato a ser um ciclone se possui vorticidade relativa ciclônica menor do que os pontos vizinhos. No algoritmo foi utilizada a vorticidade relativa em 925 hPa. Embora a área de rastreamento dos sistemas inclua parte do oceano Pacífico **(Figura 1)**, nas climatologias foram considerados apenas os ciclones que tiveram gênese sobre o oceano Atlântico. Além disso, apenas os ciclones que apresentaram vorticidade menor ou igual a $1{,}5x10^{-5}$ s^{-1} e tempo de vida de maior ou igual a 24 horas foram considerados no estudo.

b. Estrutura Térmica dos Ciclones: Uma vez obtida a base de dados das trajetórias dos ciclones, o próximo passo é descrever a evolução da estrutura térmica desses sistemas. Portanto, a metodologia do CPS foi aplicada aos ciclones no Atlântico Sul identificados no rastreamento.

O algoritmo do CPS, desenvolvido por Hart (2003), requer duas informações de entrada: um arquivo com a trajetória do ciclone (latitude e longitude em cada horário sinótico), que foi obtido com o algoritmo de Reboita et al. (2010), e o campo de altura geopotencial em níveis verticais nos horários sinóticos ao longo do ciclo de vida dos ciclones. Se é de interesse mostrar a intensidade do vento no diagrama de resultado, o usuário também tem que fornecer as componentes zonal e meridional do vento no nível de 925 hPa.

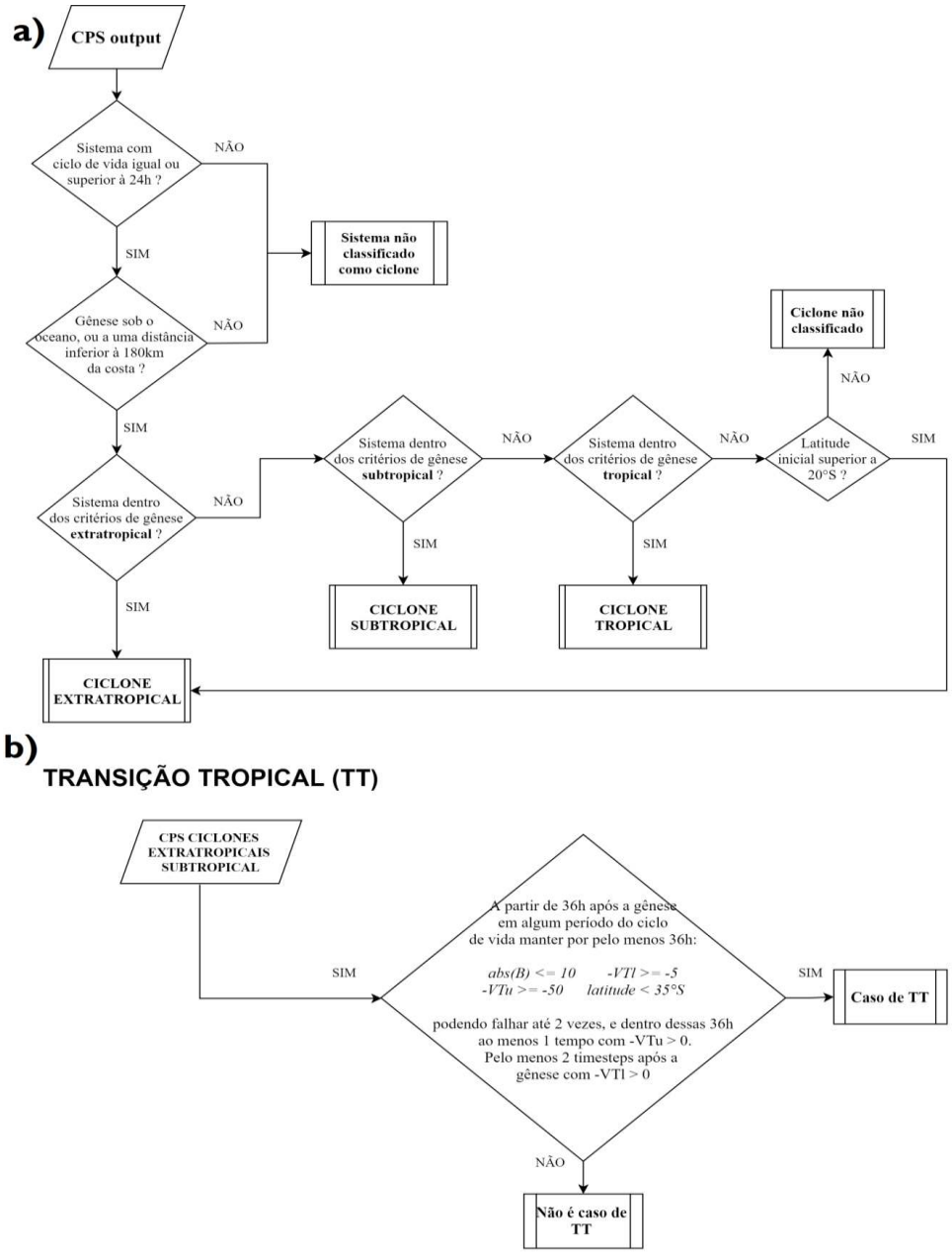
O CPS calcula três parâmetros: simetria térmica (B), vento térmico em baixos níveis da atmosfera ($-V_T^L$) e vento térmico em altos níveis ($-V_T^U$). O cálculo desses parâmetros é apresentado em detalhes em Hart (2003) e da Rocha et al. (2018). De forma breve, o parâmetro B é obtido calculando-se a média da diferença de altura geopotencial entre 600 e 900 hPa, em um raio de 500 km a partir do centro do ciclone, entre os lados direito e esquerdo do sistema, que é definido com base no sentido de deslocamento. B < 10 m indica que não há diferenças na espessura da camada entre ambos os lados do ciclone, situação que indica gradientes horizontais de temperatura fracos ou ausentes, o que é característico dos ciclones tropicais. Já B > 10 m indicam que o sistema está em um

ambiente baroclínico, que é característico de ciclones extratropicais. O vento térmico (diferença vetorial do vento geostrófico entre dois níveis de pressão) é estimado através da perturbação da altura geopotencial do ciclone (ΔZ), entre as camadas 600-900 hPa ($-V_T^L$) e 300-600 hPa ($-V_T^U$). Em outras palavras, é calculado o gradiente da altura geopotencial dentro de um raio de 500 km entre as camadas de 900, 600 e 300 hPa e feita diferença entre o nível mais afastado da superfície e o mais próximo. A estrutura vertical do ciclone (núcleo frio *versus* quente) é definida pela derivada de ΔZ, aplicada para duas camadas troposféricas (Hart, 2003). Nos ciclones tropicais, como o vento é mais intenso próximo à superfície e tende a enfraquecer com a altura no centro do ciclone (raio de 500 km), $-V_T^L$ e $-V_T^U$ devem ser maiores do que zero indicando a estrutura de um sistema tropical. Como os ciclones extratropicais estão associados a gradientes horizontais de temperatura em superfície, isso implica em ventos que aumentam de intensidade com o aumento da altura na atmosfera. Dessa forma, $-V_T^L$ e $-V_T^U$ devem ser menores do que zero indicando a presença de um sistema extratropical.

Na descrição geral da teoria do CPS é dito que os ciclones tropicais devem apresentar $-V_T^U > 0$, mas isso é apenas uma forma de simplificar a explicação, pois a atmosfera não possui limiares rígidos. Por exemplo, um ciclone tropical com núcleo raso não mostra exatamente $-V_T^U > 0$, mas valores que podem estar entre -50 e 0, como é caso de vários ciclones tropicais mostrados por Hart em seu *website* (http://moe.met.fsu.edu/cyclonephase/archive/index.html) e também como o ciclone Iba documentado por Reboita et al. (2021). O CPS fornece um arquivo para cada ciclone com os três parâmetros a cada passo de tempo do ciclone. Essas saídas são utilizadas como entrada no algoritmo de classificação dos ciclones.

c. Classificação dos Tipos de Ciclones: A partir da saída do CPS é feita a separação dos tipos de ciclones desejados. O algoritmo utilizado aqui, desenvolvido em linguagem Python, classifica os ciclones nos seus diferentes tipos e realiza a identificação dos casos de TT. Esse é o diferencial em relação ao algoritmo de de Jesus et al. (2021b), que só implementaram a classificação dos ciclones subtropicais. Para facilitar o entendimento da metodologia, é apresentado na **Figura 2** um fluxograma das etapas envolvidas na classificação dos ciclones. A classificação dos tipos de ciclones foca na fase inicial de vida desses sistemas e em sistemas com gênese no oceano (ou até 180 km dentro do continente). Para isso, é utilizada uma máscara com resolução horizontal de 1 km disponível através da biblioteca pública do Python *global_land_mask* (https://pypi.org/project/global-land-mask/). Há critérios específicos para cada tipo de ciclone (detalhes abaixo). Então, primeiro o algoritmo identifica os extratropicais, depois os subtropicais e tropicais. Por fim, uma reavaliação é feita nos extratropicais e subtropicais para identificação de TT.

Figura 2 - Fluxogramas **(a)** mostrando as etapas para a classificação dos tipos de ciclones e **(b)** das transições tropicais.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Ciclone extratropical: um ciclone será classificado como extratropical se: (1) tiver gênese a sul de 20°S e (2) nas primeiras 36 horas do ciclo de vida (7 passos de tempo) apresentar B > 25 m para garantir a presença de gradiente horizontal de temperatura, $-V_T^L$ <-50 0 e $-V_T^U$ < -80. Nesses critérios há uma flexibilização que pode ocorrer em até 2 passos de tempo durante as 36 horas iniciais, os limiares da flexibilização são 20 m para o B, $-V_T^L$ < -30 e $-V_T^U$ < -60. Além disso, dentro dos 7 primeiros tempos é permitida uma falha dos critérios apresentados, tanto para limiares padrões, quanto para as flexibilizações.

Ciclone subtropical: um ciclone será classificado como subtropical se (1) tiver gênese a norte de 40°S e (2) durante as suas primeiras 36 horas (7 passos de tempo) apresentar -25 ≤ B ≤ 25 m, $-V_T^L$ ≥ -50 e $-V_T^U$ ≤ -10. Entretanto, esses limiares não precisam ocorrer em todos os 7 passos de tempo. de Jesus et al. (2021b) após vários testes de sensibilidade para reproduzir objetivamente a climatologia de ciclones subtropicais de Gozzo et al. (2014) (que se basearam não só nos parâmetros do CPS, mas também na configuração de diferentes campos atmosféricos), mostram que é necessária a utilização de limiares mais flexíveis e que variam por estação do ano **(Tabela 1)**: verão e outono e inverno e primavera, pois os ciclones apresentam características mais similares dos parâmetros do CPS entre tais estações do ano. Assim, é permitido que dentro dos 7 passos de tempo, haja flexibilização em 2 tempos (consecutivos ou não), isto é, que ocorram valores entre os limiares mostrados na **Tabela 1**, com exceção do $-V_T^L$ para o verão e outono, que pode ser flexibilizado em até 3 tempos.

Ciclone tropical: um ciclone será classificado como tropical se (1) tiver gênese da região tropical até 40° S e (2) durante as suas primeiras 24 horas (5 passos de tempo) deve apresentar -10 < B < 10 metros para garantir a ausência de gradiente horizontal de temperatura, $-V_T^L$ > 0 e $-V_T^U$ > -50. Um critério adicional é que dentro dos 5 primeiros passos de tempo pelo menos um tem que ter $-V_T^U$ > 0. Os ciclones tropicais de núcleo médio/raso embora tenham $-V_T^U$ < 0, nos primeiros passos de tempo sempre mostram valor positivo próximo de zero. Isso também ajuda a diferenciar casos de subtropicais e tropicais.

Transição tropical: os ciclones que foram classificados com gênese na categoria de extratropical e subtropical são reavaliados. Após o período de 36 h a partir da gênese (isto é, a partir do *timestep* 8) é verificado se: em algum momento do ciclo de vida o ciclone mantém nas próximas 36 h valor de -10 < B < 10 m, $-V_T^L$ > -5 e $-V_T^U$ > -50 em latitude menor do que 35°S, sendo permitida até 2 falhas (flexibilização) para os critérios do CPS. Os sistemas que satisfazem esses critérios são classificados como casos de TT.

Tabela 1 - Limiares de flexibilização para a classificação de ciclones subtropicais.

Verão e Outono	Inverno e Primavera
-50 <B < 50	*-35 <B < 35*
V_T^L *< -127,5*	V_T^L *< -75*
V_T^U *> 17,5*	V_T^U *> 11*

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

2.3. Análises

O estudo apresenta inicialmente a validação do algoritmo de classificação automática para os sistemas híbridos, considerando a detecção automática desenvolvida por de Jesus et al. (2021b) e a detecção manual de Gozzo et al (2014). Para tanto, são considerados os indicadores estatísticos raiz do erro quadrático médio (RMSE, em inglês) e correlação de Pearson (r).

Em seguida, é considerado o *ensemble* dos ciclones classificados pelo MCGs e RegCM4 para as análises do ciclo anual e a tendência, nos períodos: 1979-2005, 2020-2050 e 2051-2080. A significância estatística da tendência foi calculada por período de análise utilizando o teste não paramétrico de Mann Kendall modificado por Yue e Wang (2004) considerando o nível de confiança de 90%. Para a aplicação do teste foi utilizada uma biblioteca pública em Python que engloba diversas variantes do teste não paramétrico de Mann Kendall. Também é apresentada uma breve descrição da primeira TT documentada no Atlântico Sul (caso do furacão Catarina, em março de 2004), com base no CPS proveniente da ERA-Interim. Para os MCGs e RegCM, em cada período, são apresentadas as coordenadas de cada TT e a variabilidade de cada parâmetro do CPS no período de 18 h antes a 18 h após a ocorrência da TT.

3. RESULTADOS

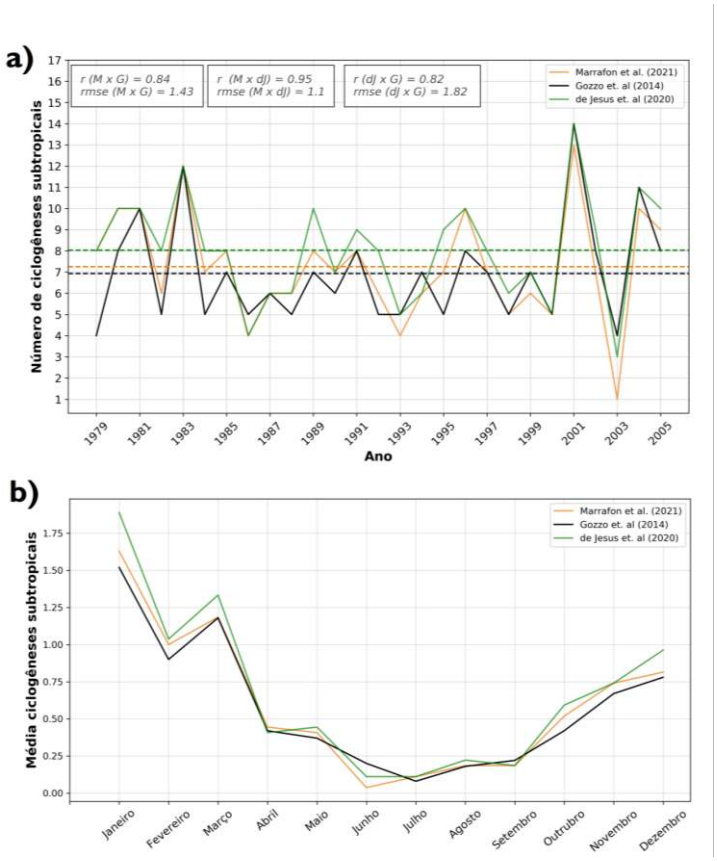
3.1. Validação do Algoritmo de Classificação dos Tipos de Ciclones

Antes da aplicação do algoritmo para a classificação dos tipos de ciclones, assim como de Jesus et al. (2021b), o algoritmo construído é validado através de comparação com a climatologia de ciclones subtropicais de Gozzo et al. (2014) que utiliza a reanálise ERA-Interim com o domínio de *tracking* dos ciclones restrito a 50ºS-10ºS.

A **Figura 3a** mostra a série temporal da frequência anual de ciclones subtropicais nos três estudos (Gozzo et al., 2014; de Jesus et al., 2021b e o presente estudo), enquanto a **Figura 3b** mostra o ciclo anual. Embora, os algoritmos de de Jesus et al. (2021b) e o usado aqui utilizem os mesmos critérios para os sistemas subtropicais, diferenças entre os resultados podem ocorrer devido à: (a) resolução horizontal da máscara oceano/continente utilizada (os autores utilizaram resolução de 0,125º enquanto aqui a resolução foi de 0,01º) e (b) pré-processamento da classificação (os autores distribuem os ciclones em uma grade com resolução de 0,125° antes da classificação dos sistemas, enquanto neste estudo são consideradas as coordenadas provenientes do *tracking*).

Na **Figura 3a** é obtida correlação de 0,84 e erro médio quadrático de 1,43 entre o resultado do presente estudo com o de Gozzo et al. (2014), enquanto de Jesus et al. (2021b) obtém 0,82 e 1,82 respectivamente. O ciclo anual também é bem reproduzido com a maior frequência de ciclones subtropicais no verão e menor no inverno **(Figura 3b)**. Uma vez que o algoritmo desenvolvido para o presente estudo apresenta ótima performance na classificação dos ciclones subtropicais, esse é empregado para a classificação de todos os tipos de ciclones com base nos critérios descritos na **seção 2.2.3**.

Figura 3 - (a) Frequência anual e **(b)** ciclo anual de ciclones subtropicais no oceano Atlântico Sul entre 1979 e 2005 obtida por Gozzo et al. (2014, linha preta), de Jesus et al. (2021b, linha verde) e neste estudo (linha laranja).

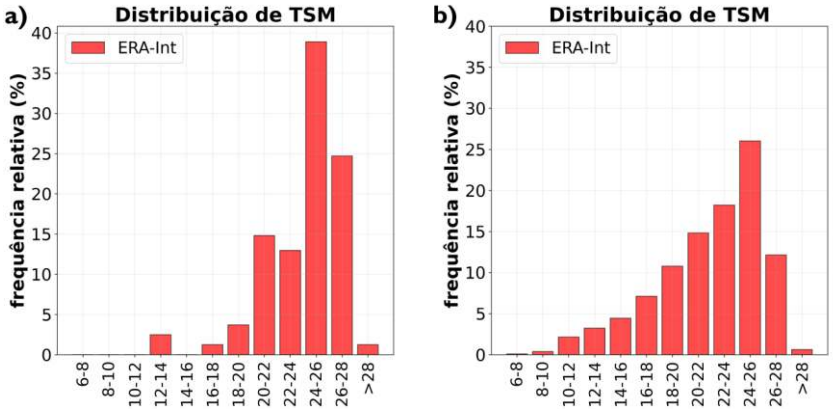


Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Como os resultados do trabalho não enfocarão as projeções dos ciclones subtropicais, aqui é apresentada somente uma informação adicional sobre esses sistemas no Atlântico Sul para comparação com Evans e Braun (2012). Tais autores mostraram que a gênese de ciclones subtropicais ocorre preferencialmente em regiões com TSM entre 19-20ºC. Porém, comparando-se a climatologia da TSM (Andrelina e Reboita, 2021) com a

localização dos ciclones identificados por Gozzo et al. (2014), percebe-se que a TSM é mais quente do que a apresentada por Evans e Braun (2012). Então, a distribuição de frequência da TSM no momento da gênese e ao longo do ciclo de vida dos ciclones subtropicais foi calculada, com base na reanálise ERA-Interim, no período de 1979 a 2005.

Figura 4 - Distribuição de frequência dos ciclones subtropicais identificados na ERA-Interim entre 1979 e 2005 com base na TSM (°C) registrada **(a)** na gênese desses sistemas e **(b)** ao longo de todo o ciclo de vida.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

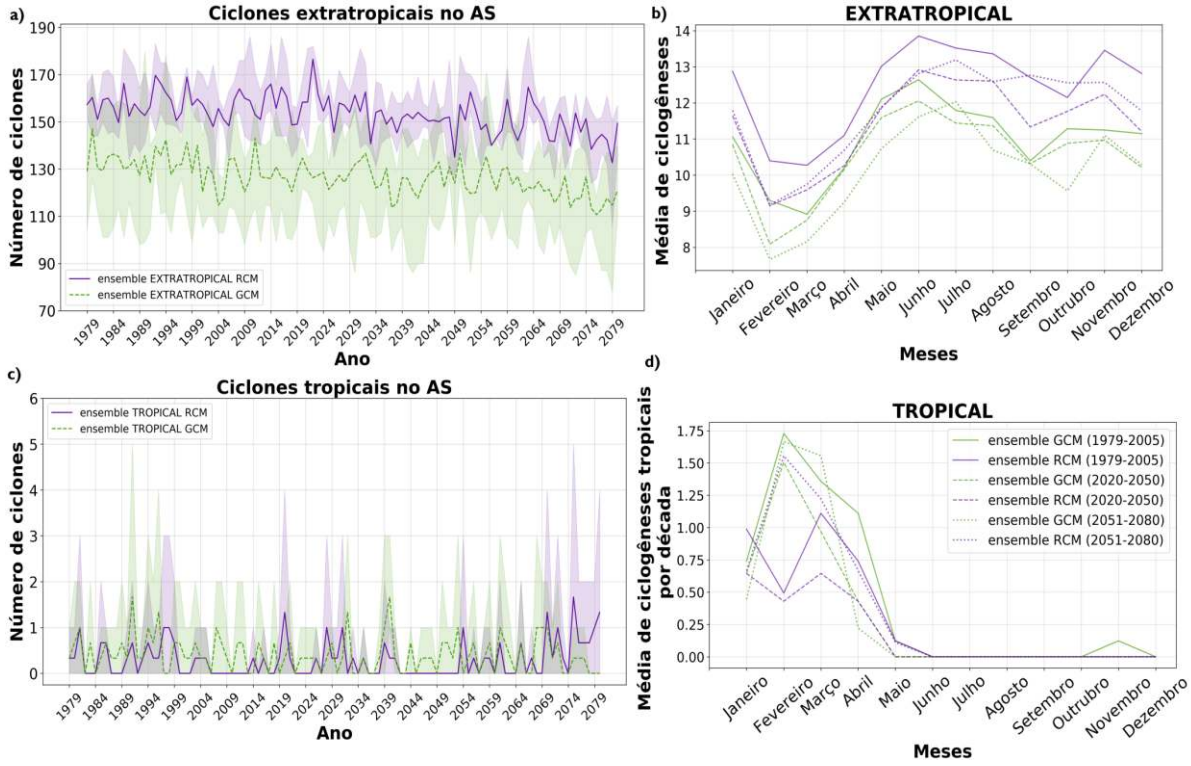
A **Figura 4a** mostra que há maior frequência de gênese entre 24-26°C que é acima dos 19-20°C mostrado por Evans e Braun (2012). Considerando todo o ciclo de vida dos ciclones subtropicais **(Figura 4b)**, também há maior ocorrência de sistemas sobre TSMs de 24-26°C. A diferença em relação à Evans e Braun (2012) é que esses autores incluem sistemas mais a sul do que as demais climatologias. Isso sugere a possível inclusão na climatologia de sistemas que não sejam subtropicais.

3.2. Climatologia dos Ciclones Extratropicais, Tropicais e de TT

Nessa seção, a frequência anual e o ciclo anual dos ciclones tropicais e das TT são apresentados para o clima presente e futuro. Além disso, é incluída a climatologia dos sistemas extratropicais. Os resultados para os ciclones subtropicais não são apresentados uma vez que há uma análise detalhada desses sistemas em de Jesus et al. (2021b). Além disso, de Jesus et al. (2021a-b) mostram que o RegCM4 tem habilidade em reproduzir a climatologia dos ciclones no clima presente, por isso (e por motivos de brevidade) aqui não serão mostradas as validações dos modelos com a reanálise.

A **Figura 5a** mostra a frequência anual dos ciclones extratropicais enquanto a **Figura 5b**, o ciclo anual. O RegCM4 simula maior frequência de ciclones extratropicais do que o *ensemble* dos MCGs, o que pode estar relacionado a uma resolução horizontal mais refinada após a regionalização (*ensemble* RegCM4), entretanto, ambos mostram tendência negativa de ocorrência desses sistemas até 2080, como apresentado na **Tabela 2**. O padrão do ciclo anual dos ciclones extratropicais segue a literatura, com a maior frequência no inverno (Gan; Rao, 1991; Reboita et al., 2015, 2018a). A média mensal dos ciclones no clima presente mostrada na **Figura 5b** é menor do que a média de ~19 sistemas/mês em Reboita et al. (2018a) e das análises mensais apresentadas em www.grec.iag.usp.br, devido à diferença no tamanho das regiões analisadas. O ciclo anual dos ciclones nos *ensembles* também deixa claro a diminuição da frequência desses sistemas no clima futuro, o que concorda, por exemplo, com Reboita et al. (2020).

Figura 5 - Frequência anual e o ciclo anual dos ciclones **(a,b)** extratropicais e **(c,d)** tropicais no clima presente (1979-2005) e futuro (2020-2050 e 2051-2080). As regiões sombreadas em **(a,c)** indicam o intervalo entre a máxima e mínima frequência anual encontrada em cada membro dos modelos.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Considerando os ciclones tropicais **(Figura 5c-d)**, ou seja, sistemas que têm gênese nessa categoria, os modelos simulam a ocorrência de pelo menos um ciclone por ano no

Atlântico Sul no clima presente. Isso é uma deficiência dos modelos visto que no Atlântico Sul desde a era satelital até 2005 só há o registro do furacão Catarina em 2004, e que foi um evento de TT (mais detalhes na próxima seção). Yanase et al. (2014) também não mostram essa frequência de ciclones tropicais no Atlântico Sul no período de 1981 a 2011 em dados de reanálise. Por outro lado, Hodges et al. (2017), ao compararem 6 reanálises com dados observados (IBTrACS) entre 1979 e 2012, mostraram a ocorrência de um ciclone tropical por ano no oceano Atlântico Sul nos dados do IBTrACS, enquanto ~7 sistemas por ano em cada reanálise. Reboita et al. (2021) sugeriram que os critérios usados por Hodges et al. (2017) identificaram ciclones subtropicais em vez de tropicais nas reanálises, já que o número obtido é similar ao da climatologia de subtropicais de Gozzo et al. (2014). Já com relação aos modelos utilizados no presente estudo, a superestimativa na frequência pode ser decorrente das incertezas associada à modelagem numérica do clima, que envolve, por exemplo, a questão de parametrizações físicas utilizadas pelos modelos. Entretanto, uma análise detalhada do viés obtido na frequência dos ciclones tropicais carece de mais estudos.

O ciclo anual dos ciclones tropicais mostra maior frequência entre os meses de janeiro a abril, período em que as águas do Atlântico Sul estão mais aquecidas e que há maior potencial de gênese de ciclones tropicais na costa brasileira conforme mostrado por Andrelina e Reboita (2021). Entretanto, há uma diferença entre os *ensembles* no clima presente: enquanto o *ensemble* dos MCGs mostra maior ocorrência de ciclones tropicais no mês de fevereiro, o RegCM4 mostra em março. Por outro lado, ambos concordam que a maior frequência desses sistemas no clima futuro é no mês de fevereiro. Em termos de clima futuro, os *timeslices* mostram algumas diferenças. No período de 2020-2050 é projetado redução da frequência dos ciclones tropicais, comparado ao presente, em ambos os *ensembles,* sendo projetada uma redução de 37,8% para o RegCM e 31,6% para o MCGs, enquanto no período de 2051-2080 é projetado aumento da frequência desses sistemas em 22,1% para o *ensemble* RegCM quando comparado ao presente, em contrapartida para o mesmo período no *ensemble* MCGs é encontrada uma redução de 25%.

Tabela 2 - Tendência da frequência de ciclones extratropicais e tropicais por década calculada com o teste não paramétrico de Man-Kendall. Tendências com significância estatística ao nível de 90% são destacadas em negrito.

Período	MCGs		RegCM4	
	Extratropical	Tropical	Extratropical	Tropical
1979-2005	**-2,9**	0	**-1,1**	0
2020-2050	-0,5	0	**-3,3**	-0,03
2051-2080	**-4,4**	-0,04	**-3,5**	**0,24**

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Como os ciclones são classificados pelas características da estrutura térmica obtidas dentro das primeiras 36 horas de vida, isso significa que eles podem evoluir para outra fase ao longo do ciclo de vida. Assim, uma nova avaliação foi realizada, após as primeiras 36 h, a fim de identificar as TT. Uma hipótese inicial era de que o número de TT seria grande no clima futuro, excedendo muito ao número de ciclones tropicais em decorrência das condições oceânicas mais quentes no clima futuro (Franco et al., 2020). Entretanto, os resultados não indicam isso. Pelo contrário, há um pequeno número desses eventos em cada projeção como é mostrado na **Tabela 3** e na **Figura 6**.

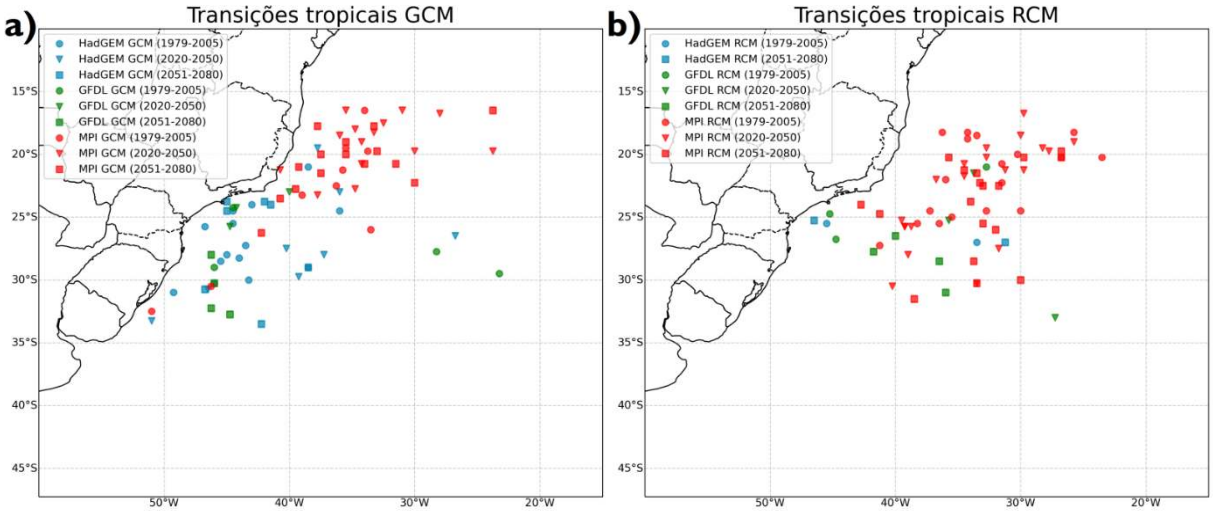
Tabela 3 - Número médio de ocorrência de TT por década para cada modelo de projeção numérica no clima presente e períodos futuros.

	Período	HadGEM-ESM2	GFDL	MPI	*Ensemble*
GCM	1979-2005	5,2	1,5	3,3	3,3
	2020-2050	2,6	0,9	4,5	2,7
	2051-2080	2,3	1,3	5	2,9
RCM	1979-2005	0,7	1,1	6,7	2,9
	2020-2050	0	1	6,5	2,5
	2051-2080	0,6	1,3	6	2,6

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

O número de TT e de sua distribuição espacial é bem variável em cada membro dos *ensembles*, mas em termos de valor médio, tanto no clima presente quanto futuro, nos MCGs e no RegCM4 há ~2,8 sistemas por década, considerando o período estudado. Portanto, o número de TT é muito menor do que dos ciclones tropicais **(Figura 5)**.

Figura 6 - Localização das TT em cada projeção climática dos **(a)** MCGs e do **(b)** RegCM4.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

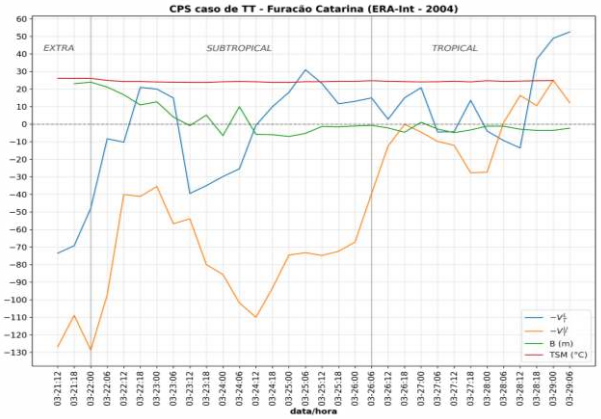
Uma característica que se destaca na **Figura 6** é que há maior frequência de TT próximo à costa do Brasil nos MCGs do que no RegCM4, em que os sistemas aparecem afastados da costa. Embora um estudo adicional é necessário ser realizado para compreender a dinâmica associada à distribuição espacial dos casos de TT nos MCGs e RegCM4 **(Figura 6)**, sugere-se que os eventos de TT possam ser a evolução de ciclones subtropicais, pois a distribuição espacial mostrada na **Figura 6** se assemelha a das mudanças projetadas na climatologia dos ciclones subtropicais em de Jesus et al. (2021b). Esses autores mostram que no final do século é projetado menor número de ciclones subtropicais no RegCM4 do que nos MCGs próximo à costa.

3.3. Características das Transições Tropicais

A fim de ilustrar/caracterizar um episódio de TT, inicia-se com a descrição da TT do evento Catarina, identificado na reanálise ERA-Interim, mas não reproduzido pelas simulações climáticas. Na sequência são mostrados os valores médios dos parâmetros do CPS para os casos de TT indicados na **Tabela 3**.

O resultado do CPS para o caso da TT que resultou no furacão Catarina é apresentado na **Figura 7**, juntamente com a TSM obtida através da reanálise ERA-Interim.

Figura 7 - Parâmetros do CPS e TSM ao longo do ciclo de vida do ciclone Catarina ocorrido em março de 2004, de acordo com reanálise ERA-Interim**.** Os estágios do ciclo de vida são indicados na figura.



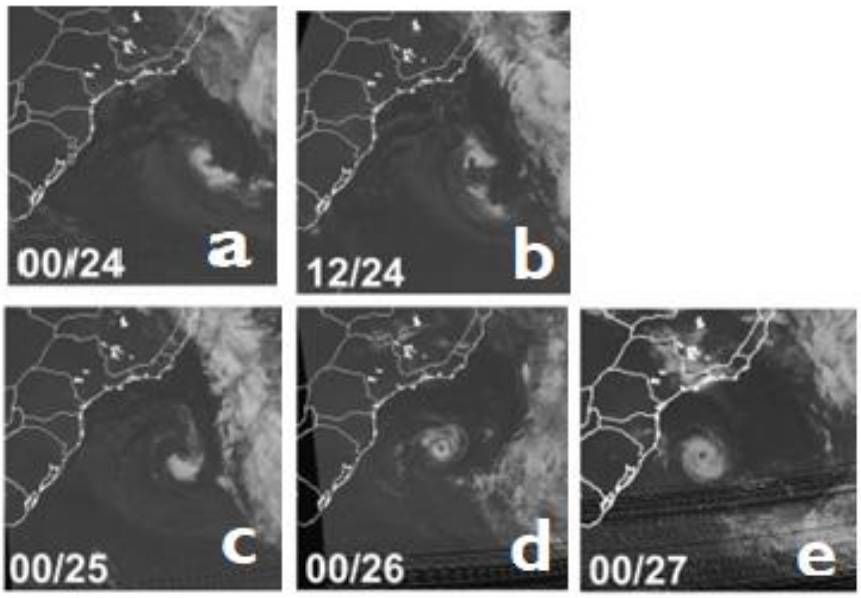
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

O algoritmo de rastreamento de ciclones identifica o início do sistema no dia 21 de março às 1200 UTC como um sistema em fase extratropical, já que $-V_T^L$ e $-V_T^U$ são < -50 e B > 25 m; nesse momento a TSM é de 26,1°C. Essa característica segue até o dia 21 de março às 1800 UTC. A partir das 0000 UTC do dia 22 de março, o sistema adquire características subtropicais, uma vez que o parâmetro $-V_T^L$ começa apresentar valores superiores (tendendo ao positivo) a -50 e B apresenta um valor de 23,92 m. Ao longo do ciclo de vida, o parâmetro $-V_T^U$ tende a valores positivos, de forma que no dia 26 às 0600 UTC tem valor acima de -50 (-39,6) enquanto $-V_T^L$ apresenta valor de 14,96 e B é -0,69 caracterizando a TT, a partir daí, o ciclone decai como sistema tropical. Na TT do Catarina a TSM é de 24,8 ºC **(Figura 7)**, valor similar ao obtido por McTaggart-Cowan et al. (2006) a partir de dados de análise do *Global Forecast System* (GFS) com espaçamento de grade de 1° provenientes do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP).

Com relação às fases do sistema, McTaggart-Cowan et al. (2006) fizeram a classificação a partir da análise da pressão, intensidade do vento, TSM, cisalhamento vertical do vento, função de corrente e imagens de satélite no canal infravermelho **(Figura 8)**. Segundo os autores, o início fase híbrida é a partir do dia 24 de março às 0000 UTC e a TT no dia 25 às 0000 UTC. Quando comparado ao algoritmo de classificação utilizado neste estudo, McTaggart-Cowan et al. (2006) apresentam um início tardio para a fase híbrida e um adiantamento da TT, já que o resultado do CPS mostra que no dia 22 às 18 UTC o sistema já apresentava $-V_T^L > 0$ e B ~ 10 m caracterizando um sistema de núcleo quente com baixa assimetria, e uma fase subtropical de acordo com os limiares propostos por Gozzo et al.

(2014). Com relação à TT, McTaggart-Cowan et al. (2006) apresentam o início da fase tropical (25 de março às 0000 UTC), quando a nebulosidade começa a se organizar ao redor do centro do sistema mostrando bandas espiraladas **(Figura 8)**, traços característicos da nebulosidade de ciclones tropicais (Reboita et al., 2017); entretanto o olho do sistema começa a se organizar apenas no dia 26 às 0000 UTC, que é próximo ao início da fase tropical apresentada pelos parâmetros do CPS com início no dia 26 às 0600 UTC.

Figura 8 - Imagens de satélite no canal infravermelho durante a TT do Catarina. Os tempos sinóticos são indicados em cada painel com a hora seguida pelo número do dia em março de 2004. Adaptado de McTaggart-Cowan et al. (2006).

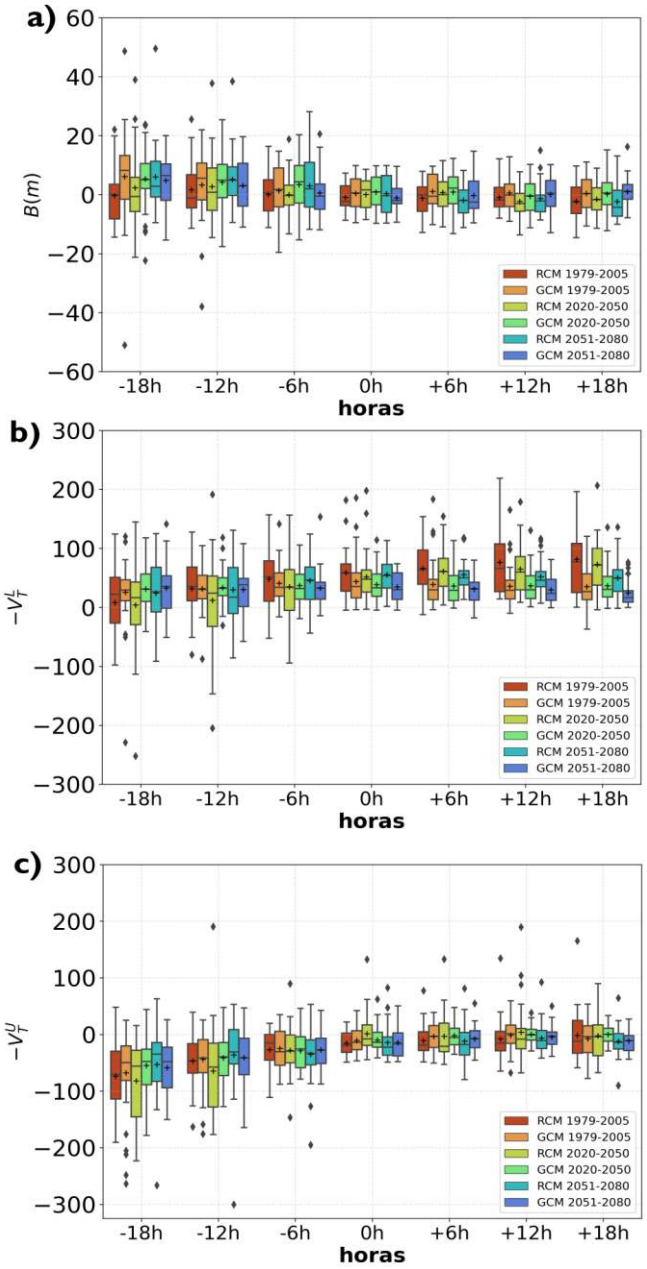


Fonte: Adaptado de Mctaggart-Cowan et al. (2006).

Na **Figura 9** é mostrada a evolução temporal dos parâmetros do CPS desde 18 horas antes (-18 h) da TT (0 h) até 18 horas após (+18h) através de *boxplots*. Os *boxplots* consideram os parâmetros do CPS de todos os casos identificados por *timeslice* para o RegCM4 e MCGs. Considerando o parâmetro B **(Figura 9a)**, 18 h antes da TT os ciclones já mostram valores médios menores do que 10 m, porém com *outliers* em módulo acima de 50 m; os valores médios de B tendem a diminuir até o momento da TT (0 h). Com relação à variância, os maiores valores são obtidos antes da TT, com maior número de ocorrências por volta de 10 m, mas a partir da TT a variância reduz e a maior parte dos valores são distribuídos em torno de 0 m. Em termos de clima futuro, a média do B tem um ligeiro

aumento no futuro comparado ao presente no período prévio à TT no RegCM4 enquanto o *ensemble* dos MCGs mostra sinal oposto, isto é, B mais simétrico no futuro.

Figura 9 - Evolução temporal da média dos parâmetros do CPS desde 18 horas antes (-18 h) da transição tropical (0 h) até 18 horas após (+18h): (a) parâmetro B, (b) parâmetro $-V_T^L$ e (c) parâmetro $-V_T^U$.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

O parâmetro $-V_T^L$ **(Figura 9b)**, em ambos os *ensembles,* indica aumento do valor médio em direção a valores positivos desde -18 h a +18 h, o que significa que os ciclones estão adquirindo/intensificando o núcleo quente em baixos níveis da atmosfera. A maior

variabilidade para o $-V_T^L$é obtida no *ensemble* do RegCM4, com destaque para o período presente, que após a TT mantém a variância semelhante aos tempos que antecedem à transição. Em termos de clima futuro, ambos *ensembles* projetam uma diminuição para a variância e o valor médio de $-V_T^L$, principalmente, no período de 2051-2080. Por fim, o parâmetro $-V_T^U$ **(Figura 9c)** mostra que os ciclones no RegCM4 antes da TT possuem núcleo frio bem mais configurado (valores mais negativos de $-V_T^U$) do que no MCGs. Por outro lado, a partir da TT ambos *ensembles* e todos os *timeslices* mostram valores em média próximos a zero.

Lembra-se aqui, que um ciclone tropical, não necessariamente precisa ter $-V_T^U$ positivo, como mostrado nos casos apresentados em http://moe.met.fsu.edu/cyclonephase/. Vale ressaltar que a TT só é caracterizada quando todos os 3 parâmetros são satisfeitos. Entretanto, em horários prévios à TT, os parâmetros podem apresentar valores excedendo algum dos limiares, o que afeta a média desses, principalmente antes da TT, onde as maiores variâncias são encontradas em todos os parâmetros e períodos avaliados (isto é, antes da TT em média os parâmetros podem apresentar valores que satisfaçam os critérios de TT). Uma síntese da Figura 9 é que os ciclones no RegCM4, em geral, possuem os parâmetros do CPS com maior variância quando comparados aos MCGs. Isso é um resultado interessante, pois quando uma análise similar é realizada só para o caso dos ciclones subtropicais, a variância entre o RegCM4 e os MCGs é mais similar (de Jesus et al., 2021b).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse é um dos primeiros estudos que classifica os diferentes tipos de ciclones no oceano Atlântico Sul em projeções climáticas e, com certeza, o primeiro que foca nas TT. Foram analisadas as projeções do RegCM4 e de três MCGs que forneceram as condições de fronteira ao modelo regional. Os períodos de análise foram 1970-2005, 2020-2050 e 2051-2080 e para o cenário RCP8.5. Para a realização do estudo foram empregados três algoritmos: identificação e rastreamento dos ciclones, estrutura térmica dos ciclones e classificação dos tipos de ciclones. Esse terceiro foi implementado no presente estudo e validado com a climatologia de ciclones subtropicais de Gozzo et al. (2014). Os resultados desse autor foram reproduzidos e, portanto, o algoritmo pode ser aplicado ao propósito do

estudo. Como a climatologia de ciclones subtropicais nas projeções utilizadas no presente estudo é apresentada em de Jesus et al. (2021b), aqui esses sistemas não foram incluídos. Em termos de ciclones extratropicais, tropicais e TT, os principais resultados obtidos foram:

(1) os *ensembles* mostram redução na frequência dos ciclones extratropicais no clima futuro sendo maior no período 2051-2080;

(2) os *ensembles* projetam para 2020-2050 redução na frequência dos ciclones tropicais comparado ao presente e aumento no período de 2051-2080;

(3) o *ensemble* dos MCGs apresenta um maior número de TT próximo a costa do Brasil;

(4) ambos *ensembles* apresentam menor frequência de TT do que de sistemas com gênese tropical e

(5) a maior variabilidade entre os parâmetros do CPS é obtida nas horas que antecedem a TT.

Por fim, recomenda-se que a metodologia usada no presente estudo seja aplicada a modelos de alta resolução do projeto CMIP6 a fim de dar suporte aos resultados obtidos aqui.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao ICTP, CMIP e ECMWF pelos dados utilizados no estudo e ao CNPq, CAPES (código 001), FAPEMIG e Petrobras pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

ANDRELINA, B.; REBOITA, M.S. Climatology of the Tropical Cyclone Genesis Potential Index in the Oceans Adjacent to South America. **Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ**, v. 44, p. 39515, 2021.

BENTLEY, A. M.; METZ, N. 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.

CAMARGO, S. J. Global and regional aspects of tropical cyclone activity in the CMIP5 models. **Journal of Climate**, v. 26, n.24, p. 9880-9902, 2013.

CAMARGO, S. J. et al. Testing the performance of tropical cyclone genesis indices in future climates using the HiRAM model. **Journal of Climate**, p. 27, v. 24, p. 9171-9196, 2014.

CATTO, J. L. et al. The future of midlatitude cyclones. **Current Climate Change Reports**, v. 5, n. 4, p. 407-420, 2019.

CHANG, M. et al. The tropical transition in the western North Pacific: the case of tropical cyclone Peipah (2007). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 10, p. 5151-5165, 2019.

CHANG, M. et al. Multiday evolution of convective bursts during western North Pacific tropical cyclone development and nondevelopment using geostationary satellite measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 3, p. 1635-1649, 2017.

COLLINS, W. J. et al. Development and evaluation of an Earth-System model–HadGEM2**.** **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 1051-1075, 2011.

DA ROCHA, R. P. et al. Subtropical cyclones over the oceanic basins: a review. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1436, n. 1, p. 138-156, 2019.

DAVIS, C. A.; BOSART, L. F. The formation of hurricane Humberto (2001): The importance of extra-tropical precursors. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: **A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography**, v. 132, n. 619, p. 2055-2085, 2006.

DAVIS, C. A.; BOSART, L. F. The TT problem: Forecasting the tropical transition of cyclones. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 85, n. 11, p. 1657-1662, 2004.

DE JESUS, E. M. et al. Multi-model climate projections of the main cyclogenesis hot-spots and associated winds over the eastern coast of South America. **Climate Dynamics**, v. 56, p.537-557, 2021a.

DE JESUS, E. M. et al. Future climate trends of subtropical cyclones in the South Atlantic basin in an ensemble of global and regional projections. **Climate Dynamics**, 2021b.

DEE, D. P. 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.

DIAS PINTO, J. R., REBOITA, M. S., DA ROCHA, R. P. Synoptic and dynamical analysis of subtropical cyclone Anita (2010) and its potential for tropical transition over the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 19, p. 10-870, 2013.

DUNNE, J. P. et al. GFDL's ESM2 global coupled climate–carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. **Journal of climate**, v. 25, n. 19, p. 6646-6665, 2012.

DUTRA, L. M. M. et al. Structure and evolution of subtropical cyclone Anita as evaluated by heat and vorticity budgets. Quarterly **Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 143, n. 704, p. 1539-1553, 2017.

EMANUEL, K. A. The dependence of hurricane intensity on climate. **Nature**, v. 326, n. 6112, p. 483-485, 1987.

EMANUEL, K.A. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 48, n. 21, p. 2313-2329, 1991.

EMANUEL, K.A. Tropical cyclones. **Annual review of earth and planetary sciences**, v. 31, n. 1, p. 75-104, 2003.

EVANS, J. L.; BRAUN, A. A climatology of subtropical cyclones in the South Atlantic. **Journal of Climate**, v. 25, n. 21, p. 7328-7340, 2012.

FRANCO, B. C. et al. Climate change impacts on the atmospheric circulation, ocean, and fisheries in the southwest South Atlantic Ocean: a review. **Climatic Change**, v. 162, n. 4, p. 2359-2377, 2020.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293-1302, 1991.

GIORGETTA, M. A. et al. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 5, n. 3, p. 572-597, 2013.

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

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

GRAY, W. M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. **Atmospheric Sciences Papers,** v. 114,112p, 1968.

HART, R. E. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 4, p. 585-616, 2003.

HODGES, K.; COBB, A.; VIDALE, P. L. How well are tropical cyclones represented in reanalysis datasets?. **Journal of Climate**, v. 30, n. 14, p. 5243-5264, 2017.

JULLIEN, S. et al. Impact of tropical cyclones on the heat budget of the South Pacific Ocean. **Journal of physical oceanography**, v. 42, n. 11, p. 1882-1906, 2012.

LAUTON, G. et al. Metocean modulators of the first recorded South Atlantic Hurricane: Catarina. **Geophysical Research Letters**, [S.I.], 2021.

MARTIUS, O.; RIVIÈRE, G. Rossby wave breaking: Climatology, interaction with low-frequency climate variability, and links to extreme weather events. In LI, J. SWINBANK, R.; GROTJAHN, R.; VOLKERT, H. (Eds.), **Dynamics and Predictability of Large-Scale, High-Impact Weather and Climate Events** (Special Publications of the International Union of Geodesy and Geophysics, pp. 69-78). Cambridge: Cambridge University Press.

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

MCTAGGART-COWAN, R. et al. Climatology of tropical cyclogenesis in the North Atlantic (1948–2004). **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 4, p. 1284-1304, 2008.

MCTAGGART-COWAN, R. et al. A global climatology of baroclinically influenced tropical cyclogenesis. **Monthly Weather Review**, v. 141, n. 6, p. 1963-1989, 2013.

PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I. The first South Atlantic hurricane: unprecedented blocking, low shear and climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 15, 2005.

PORTMANN, R.; SPRENGER, M.; WERNLI, H. The three-dimensional life cycles of potential vorticity cutoffs: A global and selected regional climatologies in ERA-Interim (1979–2018). **Weather and Climate Dynamics**, v. 2, n. 2, p. 507-534, 2021.

REBOITA, M. S.; AMARO, T. R.; DE SOUZA, M. R. Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. **Climate Dynamics**, v. 51, n. 1, p. 187-205, 2018b.

REBOITA, M. S. et al. Iba: the first pure tropical cyclogenesis over the western South Atlantic Ocean**. Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 126, e2020JD033431, 2021.

REBOITA, M. S. et al. Trend and teleconnection patterns in the climatology of extratropical cyclones over the Southern Hemisphere. **Climate Dynamics**, v. 45, n. 7-8, p. 1929-1944, 2015.

REBOITA, M. S. et al. South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). **Climate Dynamics**, v. 35, n. 7-8, p. 1331-1347, 2010.

REBOITA, M. S. et al. Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean: HadGEM2-ES and RegCM4 projections. International **Journal of Climatology**, v. 38, n. 6, p. 2866-2879, 2018a.

REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; OLIVEIRA, D. M. D. Key features and adverse weather of the named subtropical cyclones over the Southwestern South Atlantic Ocean. **Atmosphere**, v. 10(1), n. 6, 2019b.

REBOITA, M. S. et al. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I-Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 171-186, 2017.

REBOITA, M. S. et al. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. **TerraE Didática**, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

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

REBOITA, M. S. et al. Future Changes in the Wintertime Cyclonic Activity over the CORDEX-CORE Southern Hemisphere domains in a Multi-Model Approach. **Climate Dynamics**, v. 20, p. 1-17, 2020.

SHAPIRO, M. A.; KEYSER, D. A. Fronts, jet streams, and the tropopause. **NOAA Tech. Memo. ERL-WPL-182**, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Wave Propagation Laboratory, 75 pp. 1990.

VAN VUUREN, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview**. Climatic change**, v. 109, n. 1, p. 5-31, 2011.

YANASE, W. et al. Parameter spaces of environmental fields responsible for cyclone development from tropics to extratropics. **Journal of Climate**, v. 27, p. 652– 671, 2014.

YUE, S. et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. **Hydrological processes**, v. 16, n. 9, p. 1807-1829, 2002.