

EVENTOS METEOROLÓGICOS ASSOCIADOS AO CICLONE EXPLOSIVO OCORRIDO EM JUNHO DE 2020 E IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS NO ESTADO DE SANTA CATARINA

Leandro Fortunato Faria¹ 

Michelle Simões Reboita² 

Destaques:

- Em 2020 foi registrado um ciclone extratropical com gênese entre o Rio Grande do Sul e Uruguai;
- Com taxa de aprofundamento de 36 hPa em 24 horas, isso lhe conferiu o status de ciclone explosivo;
- O ciclone propiciou o desenvolvimento de outros sistemas causadores de danos em Santa Catarina;
- O ciclone teve como gênese um cavado em médios/altos níveis, padrão desse tipo de sistema;
- O ramo frontal frio do sistema atuou sobre o estado de Santa Catarina.

Resumo: Os ciclones extratropicais são um dos sistemas atmosféricos que mais causam mudanças no tempo das regiões onde atuam. Em algumas situações, esses sistemas apresentam uma taxa de aprofundamento de ~24 hPa/24h conferindo-lhes o status de ciclones explosivos. Entre junho e julho de 2020 um ciclone atingiu esse status de explosivo. Diante desse contexto, o objetivo do estudo é descrever o ciclo de vida do ciclone extratropical e os sistemas atmosféricos associados a ele, os quais causaram muitos danos ambientais, materiais e, até mesmo, óbito de pelo menos 12 pessoas no Estado de Santa Catarina (SC). Para descrever a configuração do ciclone utilizaram-se dados de reanálise, enquanto para a descrição dos impactos no Estado de SC foram usadas notícias publicadas pela mídia e dados fornecidos pela defesa civil do Estado. Entre os resultados destacam-se que o ciclone teve gênese associada a um cavado em níveis médios/altos da atmosfera com uma taxa de aprofundamento de 36 hPa em 24 horas, concedendo-lhe a característica de ciclone explosivo. O ramo frontal frio desse sistema, que tinha seu centro sobre o oceano, atuou sobre SC ajudando na formação de outros sistemas meteorológicos causadores de danos na região.

Palavras-chave: Frente fria; Ventos fortes; Desastres; Ciclone extratropical explosivo; Sistemas atmosféricos.

¹ Mestrando em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). E-mail: fariale8@gmail.com.

² Doutora em Meteorologia pela Universidade de São Paulo (USP). Docente do Instituto de Recursos Naturais (IRN) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). E-mail: reboita@unifei.edu.br.

METEOROLOGICAL EVENTS ASSOCIATED WITH THE EXPLOSIVE CYCLONE OCCURRED IN JUNE 2020 AND THEIR IMPACTS IN THE STATE OF SANTA CATARINA

Abstract: Extratropical cyclones are one of the atmospheric systems that cause the most changes in the weather of the regions where they act. In some situations, these systems have a penetration rate of ~ 24 hPa/24 h, giving them the status of explosive cyclones. Between June and July 2020, one such cyclone appeared between Rio Grande do Sul and Uruguay and rapidly moved to the ocean. Given this context, this study describes the life cycle of the extratropical cyclone and the atmospheric systems associated with it, which caused much environmental and material damage, and the death of at least 12 people in the state of Santa Catarina. Reanalysis data were used to describe the cyclone configuration, while media news and data provided by the state's civil defense were used to describe its impacts. Results showed that the cyclone originated at medium/high levels of the atmosphere and reached a penetration rate of 36 hPa in 24 hours, giving it the characteristic of an explosive cyclone. The cold frontal branch of this system, which had its center over the ocean, acted over Santa Catarina helping to form other damaging meteorological systems in the region.

Keywords: Cold front; Strong winds; disasters; Explosive extratropical cyclone; Atmospheric systems.

EVENTOS METEOROLÓGICOS ASOCIADOS AL CICLÓN EXPLOSIVO OCURRIDO EN JUNIO DE 2020 E IMPACTOS EN EL ESTADO DE SANTA CATARINA

Resumen: Los ciclones extratropicales son uno de los sistemas atmosféricos que más provocan cambios en el clima de las regiones donde se llevan a cabo. En algunas situaciones, estos sistemas tienen una tasa de penetración de ~ 24 hPa/24h, lo que les otorga el estatus de ciclones explosivos. Entre junio y julio de 2020 un ciclón alcanzó este estado explosivo. En ese contexto, el objetivo de este estudio es describir el ciclo de vida del ciclón extratropical y los sistemas atmosféricos asociados a él, que causó muchos daños ambientales y materiales, incluso la muerte de al menos 12 personas en el estado de Santa Catarina (SC, Brasil). Los datos del reanálisis se utilizaron para describir la configuración del ciclón, mientras que las noticias publicadas por los medios de comunicación y los datos proporcionados por la defensa civil de ese estado se utilizaron para describir los impactos en el estado de SC. Entre los resultados, se destaca que el ciclón tuvo su génesis asociada a una vaguada en niveles medios/altos de la atmósfera con una tasa de profundización de 36 hPa en 24 horas, característica que le convierte en un ciclón explosivo. La rama frontal fría de este sistema, que tenía su centro sobre el océano, actuó sobre SC ayudando a formar otros sistemas meteorológicos dañinos en la región.

Palabras clave: Frente fría; Vientos fuertes; desastres; Ciclón extratropical explosivo; Sistemas atmosféricos.

INTRODUÇÃO

Os ciclones extratropicais são sistemas atmosféricos de escala sinótica, isto é, possuem diâmetro médio de 3000 km e duração média de cerca de 3 dias (REBOITA *et al.*, 2017 a, b). O setor oeste do Atlântico Sul, próximo à costa leste da América do Sul, é conhecido como uma região favorável à gênese desses

ciclones (GAN; RAO, 1991; HOSKINS; HODGES, 2005; MENDES *et al.*, 2007; NECCO 1982, a, b; REBOITA *et al.*, 2005a; SELUCHI, 1995; SINCLAIR, 1994, 1995, 1996, 1997; STRETEN; TROUP, 1973; TALJAARD, 1967; VERA *et al.*, 2002).

A formação dos ciclones extratropicais ocorre associada a intensos gradientes térmicos em superfície e/ou pela atuação de ondas, que se deslocam de oeste para leste, em níveis médios e altos da atmosfera (REBOITA *et al.*, 2017 a,b). Os ciclones extratropicais afetam o tempo das regiões onde atuam devido à formação de nuvens, precipitação, ventos fortes e bruscas mudanças na temperatura. Sobre o oceano, a troca de momento ar-mar é responsável pela agitação marítima que pode levar à ocorrência de pistas de vento e ondas com grande amplitude, que provocam transtornos à navegação, operações em plataformas de petróleo e destruição de áreas costeiras (DA ROCHA *et al.*, 2004; GRAMCIANINOV *et al.*, 2020; REBOITA, 2008; REBOITA; MARRAFON, 2021). Por outro lado, os ciclones desempenham papel central na manutenção do clima global, pois transportam calor, umidade e momento na atmosfera (PEIXOTO; OORT, 1992).

A queda de pressão no centro dos ciclones, que indica o aprofundamento desses sistemas (ou ainda uma medida da intensidade), em alguns casos, pode exceder a ~24 hPa/24 h o que os caracteriza como Ciclones Extratropicais Explosivos - CEX. Porém, como essa taxa de aprofundamento é influenciada pela latitude, Sanders e Gyakum (1980) a adaptaram para ser aplicada a ciclones formados em qualquer banda de latitude (φ) e a equação é chamada de número de Bergeron (NB):

$$NB = \frac{\Delta p}{24hPa} \frac{\text{sen}(60^\circ)}{\text{sen}(\varphi)\sqrt{1}} \quad (1)$$

Onde Δp é a variação da pressão central do ciclone em 24 h. Quando NB excede a uma unidade [1 “Bergeron”, de acordo com a terminologia de Sanders e Gyakum (1980)], o sistema tem desenvolvimento que é chamado de explosivo ou “bomba”. Sanders (1986) ainda classifica os ciclones explosivos de acordo

com a intensidade, em CEXs “fracos - fr” ($1,0 \leq \text{Bergeron} \leq 1,2$), “moderados - md” ($1,3 \leq \text{Bergeron} \leq 1,8$) e “fortes - fo” ($\text{Bergeron} > 1,8$).

O processo que leva ao desenvolvimento dos CEXs até hoje é objeto de estudo (REBOITA *et al.*, 2021). Alguns autores sugerem que a transferência de fluxos turbulentos de calor latente e sensível, do oceano para a atmosfera, no lado quente do ciclone extratropical contribui para aumentar os contrastes de temperatura no sistema, auxiliando a sua intensificação (MCMURDIE; HOUZE, 2005; NUSS; ANTHES, 1987; REBOITA *et al.*, 2017; ROGERS; BOSART, 1991; SANDERS; GYAKUM, 1980; STULL, 2017; UCCELLINI, 1990; WASH *et al.*, 1992). Além disso, há também a influência da liberação de calor latente por condensação nas nuvens que também pode contribuir para intensificar os movimentos ascendentes e a rápida redução da pressão em superfície (STULL, 2017).

Considerando um ciclone explosivo ocorrido em 1999, Piva *et al.* (2008, 2011) mostraram que os fluxos de calor latente e sensível no oceano Atlântico Sul, próximos à costa do Sul do Brasil e Uruguai, tiveram influência decisiva na intensidade desse sistema. Gozzo e da Rocha (2013) investigaram os efeitos dos fluxos de calor latente e sensível em dois ciclones através de simulações numéricas com o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF). Dentre os resultados foi encontrado que a influência dos fluxos turbulentos dependia do mecanismo de formação dos ciclones. O ciclone que teve forçante dinâmica menos intensa em altos níveis apresentou maiores variações na trajetória e tempo de vida no experimento numérico em que os fluxos foram desligados no modelo. Por outro lado, o ciclone que esteve sob forçante dinâmica intensa, mostrou-se menos dependente dos processos de superfície para o seu deslocamento. Na ausência dos fluxos turbulentos, os ciclones desenvolvem uma frente quente mais fraca com consequente redução do aquecimento diabático devido à precipitação em escala de grade. Já em um estudo climatológico, Reboita *et al.* (2012) mostraram que a frequência de ciclones extratropicais no oceano Atlântico Sul reduz em cerca de 25% quando os fluxos são desligados do modelo RegCM, pois a ausência de fluxos próximos à superfície aumenta a estabilidade estática da atmosfera e diminui a disponibilidade de umidade, que são condições desfavoráveis aos ciclones.

A rápida intensificação dos ciclones extratropicais é observada sobre o oceano, adjacente às correntes quentes e próxima a intensos gradientes horizontais de Temperatura da Superfície do Mar - TSM (REBOITA *et al.*, 2021; SANDERS; GYAKUM, 1980). A costa leste da América do Sul, até cerca da latitude do Uruguai, é cenário de atuação da corrente oceânica quente do Brasil, o que pode auxiliar na transferência de fluxos turbulentos mar-ar e influenciar os ciclones. Recordar-se aqui que o contraste de temperatura entre a superfície oceânica e o ar adjacente impacta as trocas de calor latente e sensível; a atmosfera recebe esses fluxos, quando o ar adjacente é mais frio do que a TSM (NEIMAN; SHAPIRO, 1993). Esta troca é mais intensa no inverno, estação em que o oceano se encontra relativamente aquecido em comparação com o ar adjacente. Assim, diferentes estudos mostram que na climatologia de ciclones explosivos, em geral, os sistemas são mais frequentes no inverno, como em Black *et al.* (2010) em um estudo para o Sudoeste do Pacífico e em Reboita *et al.* (2021) para três domínios no Hemisfério Sul, sendo eles na África, na Austrália e na América do Sul.

Um ciclone extratropical não consiste apenas de um centro de baixa pressão, também tem sistemas frontais associados a ele. Além disso, embebido nessas configurações, encontram-se os sistemas de mesoescala, que têm duração inferior a 24 h, como os sistemas convectivos de mesoescala (aglomerados de nuvens, que podem apresentar formato circular ou em linha). Portanto, um ciclone pode ser um ambiente favorável a essas estruturas de dimensões mais reduzidas, porém mais intensas em termos de precipitação e ventos (BORSATO; MASSOQUIM, 2019; CAVALCANTI, 2012).

Entre os dias 30 de junho e 2 de julho de 2020 foi registrado um ciclone extratropical, no sudoeste do oceano Atlântico Sul, que atingiu o status de explosivo. Associado a esse ciclone, outros sistemas atmosféricos se desenvolveram sobre o Estado de Santa Catarina (SC) causando muitos danos ambientais e sociais. Porém, houve um grande equívoco por parte da mídia que persiste até hoje; passando a ideia de que o centro do ciclone foi a causa direta dos impactos socioambientais em SC (como se o centro do sistema estivesse sobre o Estado). Na realidade foram os sistemas que se desenvolveram

associados ao ramo frio do ciclone que causaram o tempo adverso. Diante do exposto, os objetivos deste estudo são:

- a) descrever a configuração sinótica do ciclone e destacar a posição da frente fria bem como dos sistemas de mesoescala associados que geraram mau tempo em SC e;
- b) descrever os impactos socioambientais registrados, através da revisão de notícias publicadas na mídia e de dados da defesa civil deste Estado.

METODOLOGIA

Dados

Foram utilizados dados sinóticos dos horários (0000, 0600, 1200 e 1800 Z) da reanálise ERA-5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF; HERSBACH *et al.*, 2019), entre 29 de junho a 02 de julho de 2020. A ERA-5 possui resolução horizontal de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. As variáveis utilizadas foram: pressão reduzida ao nível médio do mar - PNMM e em superfície (sem redução), componentes meridional e zonal do vento em 250 hPa e a 10 m, altura geopotencial em 500 hPa, temperatura da superfície do mar - TSM, fluxos de calor latente e sensível e temperatura do ar a 2 m e a 850 hPa. Para a TSM também se obteve uma série temporal do período de 1979 a 2020 para cálculo de anomalias da reanálise ERA5.

Para a precipitação foram utilizados dados de acumulados horários da análise do *Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM* (IMERG) com resolução temporal de 30 minutos e horizontal de $0,1^\circ$ graus (HUFFMAN *et al.*, 2015 a, b, c). Para caracterização da nebulosidade e para obtenção de um proxy da convecção, foram obtidos os dados de temperatura de brilho do canal do infravermelho do *National Centers for Environmental Information - NCEI*, do *National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA*, com resolução horizontal de $0,07^\circ \times 0,07^\circ$ e temporal de 6 horas (KEYSER, 2010). Imagens do radar meteorológico do Morro da Igreja pertencente a Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica - REDEMET, com raio de cobertura de até 400 km e localizado na divisa entre os

municípios catarinenses de Bom Jardim da Serra, Orleans e Urubici Morro da Igreja (SC) também foram consideradas.

ANÁLISES

Campos Atmosféricos

A partir das variáveis descritas, foram geradas imagens com diferentes campos atmosféricos para auxiliar na descrição da evolução do ciclone e dos sistemas associados a ele. Com os dados de PNMM são traçadas as isóbaras (linhas de mesma pressão), com intervalos de 3 hPa. O ciclone aparece nesse campo como linhas concêntricas com menor valor no centro. Assim, é possível registrar as coordenadas geográficas (latitude, longitude) do ponto de menor pressão a cada passo de tempo (no caso, a cada 6 horas), o que permite representar a trajetória do sistema e a evolução temporal da PNMM. Com a informação obtida, também se pode calcular o NB, equação (1), para definir se o sistema possui o status de ciclone extratropical explosivo e, em caso positivo, definir a intensidade, segundo a metodologia de Sanders (1986).

A ciclogênese (primeiro tempo de vida do ciclone) é definida quando aparece a primeira isóbara fechada no campo da PNMM, enquanto o decaimento começa após a fase de máxima intensificação do ciclone que é chamada de oclusão (maturidade). Na fase de oclusão, o ciclone em superfície encontra-se no lado sul da corrente de jato polar e sem inclinação vertical, isto é, se representada a sua vorticidade relativa (giro do ciclone) aparecerá um tubo estendido na vertical conectando o ciclone em superfície com o centro da onda em níveis mais elevados (ROCHA *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2018).

No caso em estudo, a evolução temporal da estrutura do ciclone será analisada desde 24 horas antes da gênese (o que será chamada de pré-ciclogênese) até a fase inicial de decaimento. Essa metodologia tem sido empregada em diferentes estudos como em Abreu *et al.* (2018), Reboita *et al.* (2017), e Souza e Reboita (2020).

A análise do ciclo de vida do ciclone também será avaliada através dos campos das variáveis atmosféricas mencionadas na seção 2.1, plotados a cada 6 horas. Através do campo de temperatura de brilho será possível identificar as

estruturas de mesoescala embebidas no ambiente do ciclone extratropical. Para o leitor, que necessite de conhecimento adicional sobre a análise de campos sinóticos, recomenda-se os estudos de Capucin *et al.* (2015, 2020).

Processos Físicos

A fim de compreender os processos que levam à rápida intensificação do ciclone foram avaliadas algumas variáveis ao longo do ciclo de vida do sistema: precipitação, que é um *proxy* para os processos diabáticos ocorridos no sistema, pois quanto maior o volume de chuva, maior deve ser a energia liberada no processo de liberação de calor latente por condensação nas nuvens; vento a 10 metros de altura e gradientes verticais de temperatura (diferença entre a TSM, T_{mar} , e a temperatura do ar a 2 metros, T_{ar}) e umidade específica (diferença entre a umidade específica de saturação no oceano, q_{mar} , e a umidade específica a 2 metros, q_{ar}), pois são variáveis que contribuem para a ocorrência dos fluxos turbulentos de calor sensível (CS) e latente (CL), conforme mostrado nas equações 2 e 3:

$$CS = \rho_a C_P C_H U (T_{mar} - T_{ar}) \quad (2)$$

$$CL = \rho_a L_v C_E U (q_{mar} - q_{ar}) \quad (3)$$

Onde ρ_a é a densidade do ar, C_P é a capacidade específica do ar, C_E e C_H são coeficientes de troca turbulenta, U é a intensidade do vento a 10 m de altura, L_v é o calor latente de vaporização, T_{mar} e T_{ar} são as temperaturas da superfície do mar (TSM) e do ar a 2 metros de altura, q_{mar} e q_{ar} correspondem à umidade específica de saturação ao nível do mar e a umidade específica a 2 m de altura.

Para obtenção de q_{mar} é necessário calcular a pressão de saturação do vapor (e^*) enquanto para o q_{ar} , a pressão parcial do vapor (e), conforme:

$$e^* = 6.11 \exp(17.3 T_{mar} / T_{mar} + 237,3) \quad (4)$$

$$e = 6.11 \exp(17.3 T_{ar} / T_{ar} + 237,3) \quad (5)$$

Onde T_{mar} e T_{ar} são dadas em °C e e^* e e em hPa. A partir das equações (4) e (5) é possível obter a q_{mar} e q_{ar} :

$$q_{mar} \approx 0.622 (e^*/P) \quad (6)$$

$$q_{ar} \approx 0.622 (e/P) \quad (7)$$

Onde e^* é a pressão de vapor de saturação em g kg⁻¹ e P a pressão em superfície (hPa).

Impactos Socioambientais em Santa Catarina

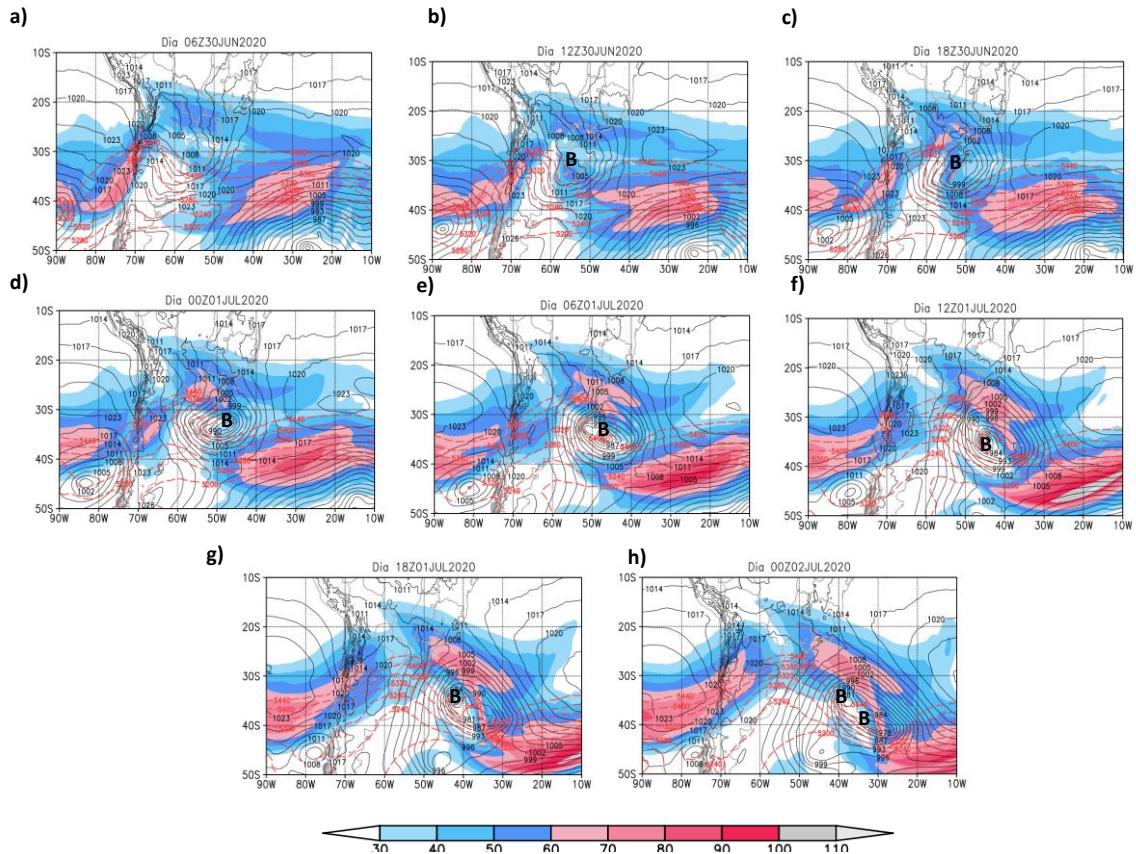
Para a descrição dos impactos socioambientais registrados em SC, são utilizadas notícias publicadas na mídia e informações coletadas em estações da rede de monitoramento da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina - EPAGRI, a qual é vinculada à defesa civil do Estado de SC.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização do Ciclone

A gênese do ciclone ocorre quando aparece a primeira isóbara fechada. Isso foi registrado no dia 30 de junho de 2020 às 1200 Z entre o Rio Grande do Sul, Uruguai e oceano Atlântico Sul, com a isóbara de 1005 hPa (Figura 1a). Após a gênese, o ciclone se desloca para sudeste e atinge a sua máxima intensidade (fase de oclusão), com pressão central de 969 hPa, no dia 01 de julho de 2020 às 1200 Z (Figura 1b). Comparando-se os estágios do ciclone até o de oclusão, nota-se que a oclusão é caracterizada pelo centro do sistema em superfície se localizar a sul do jato polar em 250 hPa (Figura 1g). O período a partir das 0000 Z do dia 02 de julho de 2020 será considerado de decaimento do ciclone, uma vez que o sistema tende a se fragmentar em dois núcleos de baixa pressão (Figura 1h).

Figura 1 – Carta sinótica do dia 30 de junho às 0600 Z ao dia 02 de julho às 0000 Z. PNMM em linhas pretas com intervalos de 3 hPa, espessura da camada entre 500 e 1000 hPa (m_{gp}, linhas vermelhas tracejadas) e intensidade do vento em 250 hPa superior a 30 m/s (colorido). A letra B indica a posição do centro do ciclone.



A partir do registro das coordenadas geográficas da isóbara central do ciclone (Figura 1) ao longo do tempo é possível definir a evolução e trajetória do ciclone (Tabela 2 e Figura 2).

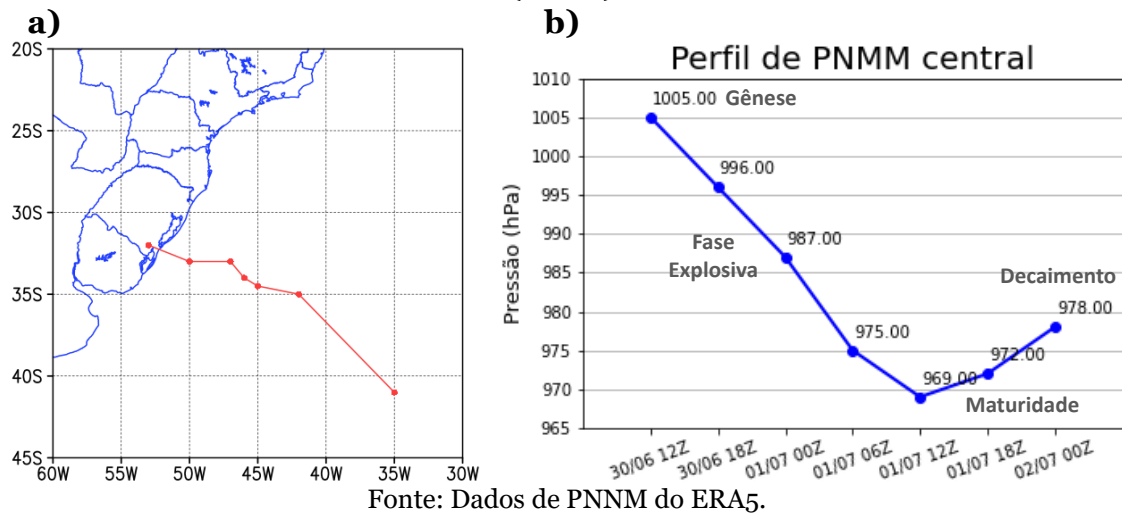
Tabela 1 – Ciclo de vida do ciclone: registro das informações a cada 6 horas. Onde LAT é a latitude, LON é a longitude, P é a pressão no centro do ciclone, NB é o número de Bergeron e I a intensidade seguindo a metodologia de Sanders (1986). O número de Bergeron foi calculado através da Eq. 1. As datas de gênese, fase explosiva, maturidade e decaimento estão em *itálico*, respectivamente.

DATA	HORA	LAT	LON	P	NB	I
<i>GÊNESE 30/06</i>	1200 Z	32°S	56°O	1005 hPa	-	-
30/06	1800 Z	30°S	50°O	996 hPa	-	-
<i>FASE EXPLOSIVA 01/07</i>	0000 Z	33°S	47°O	987 hPa	1,3398	mo
01/07	0600 Z	34°S	47°O	975 hPa	1,9876	fo
<i>MATURIDADE 01/07</i>	1200 Z	34°S	45°O	969 hPa	1,8385	fo
01/07	1800 Z	35°S	42°O	972 hPa	0,9680	-
<i>DECAIMENTO 02/07</i>	0000 Z	38°S	35°O	978 hPa	-0,1885	-

Fonte: Dados de PNNM do ERA5.

A Tabela 1 mostra as fases do ciclone e o NB. Através dela é indicado que o ciclone se torna explosivo 12 horas após a gênese, isto é, às 0000 Z do dia 01 de julho de 2020, quando o NB atinge 1,3398, o que indica um ciclone extratropical explosivo com intensidade “moderada”, seguindo a classificação de Sanders (1986). Além disso, em menos de 24 horas, o ciclone adquire intensidade “forte” às 0600 Z do dia 01 de julho de 2020. A evolução da pressão central e das fases do ciclone também é apresentada na figura 2b. Nota-se que o sistema atinge a menor pressão, isto é, maior profundidade às 1200 Z do dia 01 de julho de 2020 (fase de maturidade) e a partir daí começa a enfraquecer.

Figura 2 – (a) Trajetória Os pontos vermelhos são toda a trajetória do ciclone marcadas a cada 6 horas, e (b) evolução da PNMM (hPa) no centro do ciclone (eixo y) entre às 1200Z do dia 30 de junho às 0000Z do dia 02 de julho de 2020 (eixo x).



Processos físicos

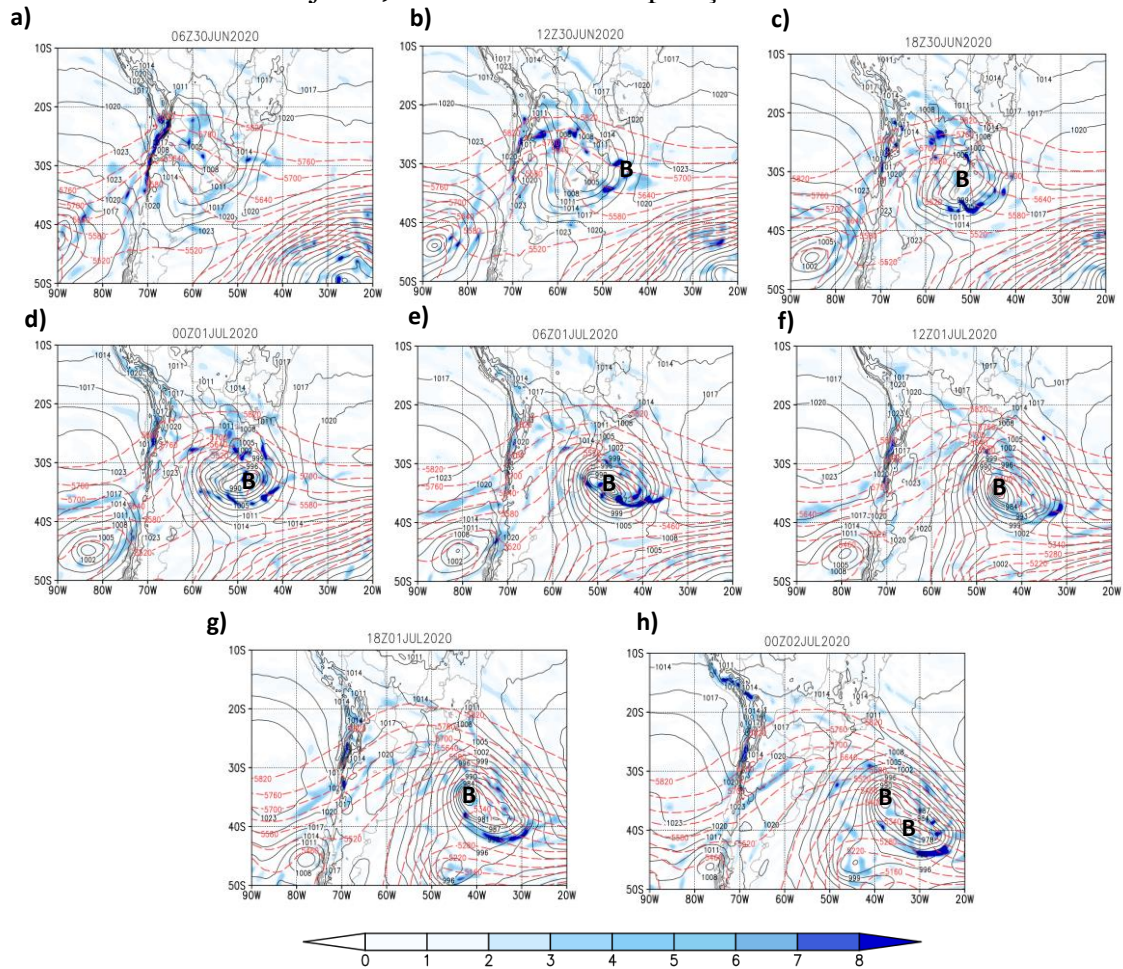
Processo de formação

O ambiente sinótico prévio à gênese do ciclone extratropical é caracterizado pela presença de uma região de baixa pressão entre 20° e 30° S, próximo ao norte da Argentina (Figura 1a), o que está associado com a interação de um cavado em níveis médios e altos da atmosfera com a baixa termo orográfica em superfície com centro a cerca de 1005 hPa em 22° S e 63° O (Figura 3a). Além disso, há uma região com intenso gradiente horizontal de temperatura em superfície (também chamada de região baroclínica) sobre o sul do Rio Grande do Sul, representada pela proximidade das linhas de espessura 500/1000 hPa (Figura 1a).

A ciclogênese é explicada pela interação da divergência em 250 hPa a leste do eixo do cavado nesse mesmo nível (figura não mostrada) e em 500 hPa (Figura 3b), próximo a 30° S, juntamente com a região de baroclinia em baixos níveis no extremo sul do Brasil (Figura 1b, 1c). A divergência de massa em médios e altos níveis da atmosfera gera movimentos ascendentes na atmosfera. Esses movimentos são importantes para a redução da pressão em superfície e, conseqüentemente, para a formação do ciclone. O processo de formação

descrito segue o padrão clássico da formação de ciclones na costa do Uruguai (por exemplo, GAN; REBOITA, 2017).

Figura 3 – Ciclo de vida do ciclone do dia 30 de junho às 0600 Z ao dia 02 de julho às 0000 Z. PNMM em linhas pretas com intervalos de 3 hPa, divergência em altos níveis ($\times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, colorido), e altura geopotencial (gpm) em 500 hPa (linhas vermelhas tracejadas). A letra B indica a posição do centro do ciclone.



Fonte: ERA5. Representação: Autores.

Processo de intensificação

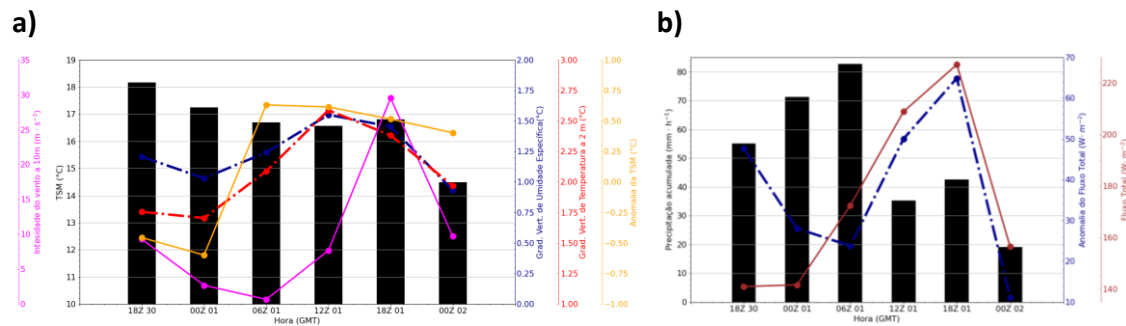
A teoria para definição de ciclone extratropical explosivo de Sanders e Gyakum (1980) avalia o aprofundamento do ciclone em períodos de 24 horas. Entretanto, a queda da pressão entre as 1200Z do dia 30 de junho e 0600 Z do dia 01 de julho, já conferiu ao ciclone o status de explosivo. Para descrever possíveis processos que contribuíram para o rápido aprofundamento do ciclone, foi definida uma área ao redor do centro do ciclone, isto é, 10 graus a partir do centro, e computada a média das variáveis: precipitação, intensidade do vento a

10 metros de altura, TSM, anomalia de TSM, fluxos de calor total (latente + sensível), gradiente vertical de temperatura calculado entre a TSM e a temperatura do ar a 2 m e gradiente vertical de umidade específica calculado entre a umidade específica de saturação na superfície oceânica e a umidade específica a 2 m de altura. Isso fornece uma caracterização do ambiente em que o ciclone se encontra ao decorrer do tempo. No primeiro tempo de vida, o ciclone está sobre o continente; logo, esse horário não foi mostrado nas figuras.

Nas primeiras 12 horas do ciclo de vida, o ciclone encontra-se sobre o oceano numa região com fluxos de calor total de cerca de 175 W m^{-2} , TSM de $\sim 18 \text{ }^\circ\text{C}$ e anomalia mensal de TSM (1979 a 2020) excedendo a $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ às 0600 Z do dia 01 de julho (Figura 4). O valor dos fluxos de calor total é muito similar ao climatológico mostrado em Andrelina e Reboita (2021). Pela análise da figura 4, o aprofundamento do ciclone nas primeiras 12 horas deve ter tido maior contribuição do processo de liberação de calor latente por condensação nas nuvens, já que os totais de precipitação, usados como um proxy da convecção – nuvens convectivas, são mais elevados nessas primeiras 12 horas. Nesse período não há um aumento expressivo da intensidade do vento a 10 m (que é importante para a geração dos fluxos de calor, equações 2 e 3) e nem dos gradientes verticais de umidade e temperatura (Figura 4). Por outro lado, a partir das 0600 Z do dia 01, a figura 4 sugere que os ventos e os fluxos que dão maior contribuição para o ciclone ter o status de explosivo.

Embora o rápido aprofundamento do ciclone, 12 horas após à gênese, possa estar relacionado com a intensificação dos fluxos de calor total, também se destaca a contribuição do aquecimento diabático da atmosfera na queda de pressão na superfície. Esse aquecimento pode ser inferido através da presença de precipitação (Figura 4b).

Figura 4 - (a) Intensidade do vento a 10 metros em m s^{-1} (linha magenta sólida), gradiente vertical de temperatura em $^{\circ}\text{C}$ (linha azul tracejada), gradiente vertical de umidade específica em $^{\circ}\text{C}$ (linha vermelha tracejada), anomalia da TSM em $^{\circ}\text{C}$ (linha laranja sólida), TSM em $^{\circ}\text{C}$ (barras); (b) fluxo de calor total em W m^{-2} (linha azul sólida), anomalia do fluxo de calor total em W m^{-2} (linha marrom) e acumulado horário de precipitação em mm h^{-1} (barras).



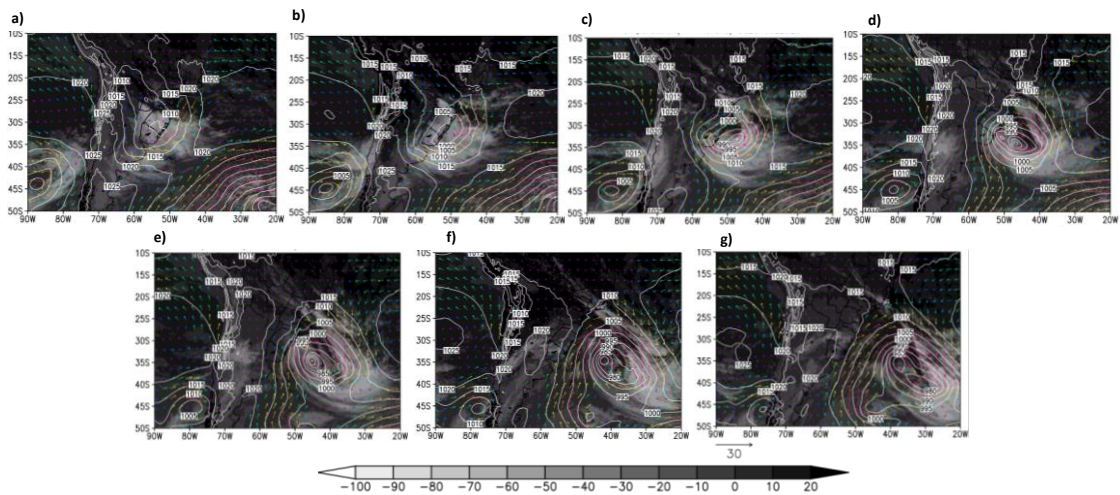
Fonte: ERA5. Representação: Autores.

Estudos como o de Piva *et al.* (2008) e o de Reboita *et al.* (2012) têm indicado a importância dos fluxos de calor latente e sensível para a intensificação dos ciclones, logo o papel dos fluxos de calor latente e sensível pode ser melhor avaliado através de experimentos com modelos numéricos. Isso é foco de um estudo futuro.

Sistemas de mesoescala

Outro proxy da presença de nuvens convectivas e, portanto, de processos diabáticos na coluna atmosférica, é a temperatura de brilho (TB). Pela cor esbranquiçada nas imagens dessa variável há uma área de bastante atividade convectiva, apresentada na Figura 5, a qual mostra a TB ao longo do ciclo de vida do ciclone, juntamente com os ventos a 10 m de altura e a PNMM. À medida que o ciclone se desenvolve, as frentes fria e quente se configuram de forma que às 1800 Z do dia 30 de junho a frente fria está sobre o Estado de Santa Catarina e o centro do ciclone no oceano.

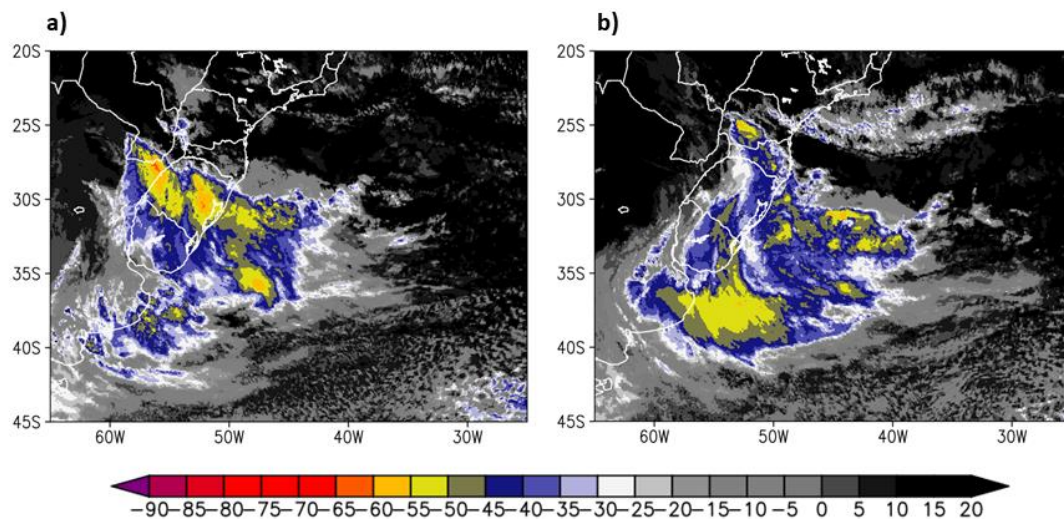
Figura 5 - Temperatura de brilho ($^{\circ}\text{C}$) em escala de cinza, ventos a 10 m de altura (m s^{-1}) em vetores e PNMM (hPa) em linhas brancas para todo o ciclo de vida do ciclone



Fonte: NCEI. Representação: Autores.

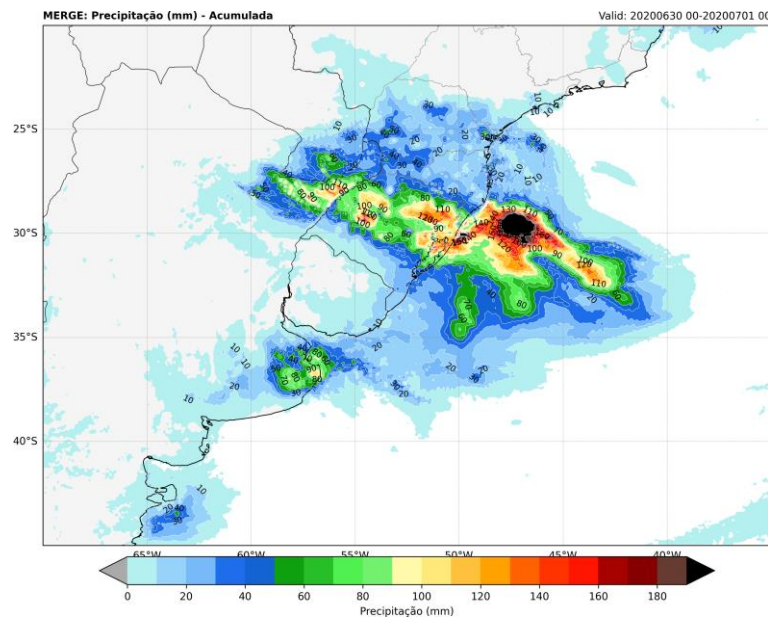
Como no dia 30 de junho foi quando foram registrados eventos meteorológicos em SC descritos na tabela 1, um destaque é feito para a temperatura de brilho dos horários das 1200 e 1800 Z desse dia (Figura 6). Às 1200 Z ainda não há nuvens com topos frios em SC, mas isso é registrado às 1800 Z, ao longo do ramo frontal frio sobre SC e Paraná. Sobre SC, a temperatura de brilho é de aproximadamente -60°C .

Figura 6 - Temperatura de brilho em colorido ($^{\circ}\text{C}$) para o dia 30 de junho às 1200 Z (a) e 1800 Z (b)



Fonte: NCEI. Representação: Autores

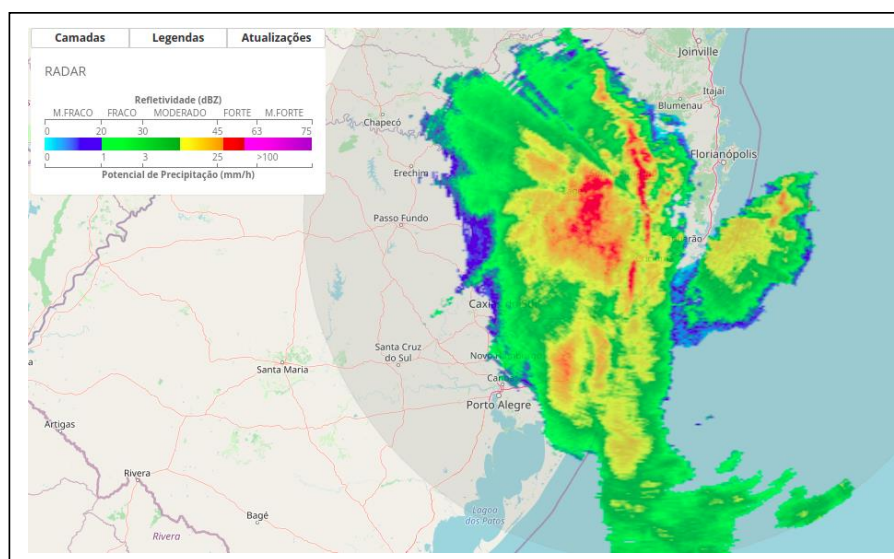
Figura 7 - Acumulado diário de precipitação das 0000 Z as 2300 Z (mm dia⁻¹, colorido) do dia 30 de junho



Fonte: GPM. Representação: Autores.

A precipitação acumulada para o dia 30 de junho se concentrou ao longo do ramo frontal frio, que ao decorrer desse dia atuou sobre a região central do Rio Grande do Sul (RS), sobre o Paraná e SC. A precipitação foi mais intensa sobre o estado do RS com valores próximos aos 80 mm dia⁻¹ (Figura 7).

Figura 8 - Imagem do radar localizado no Morro da Igreja em Santa Catarina, às 1800 Z do dia 30 de junho de 2020



Fonte: REDEMET, 2020.

A figura 6 foi extremamente útil para mostrar o ramo frontal frio sobre SC, mas sua resolução espacial não permite avaliar em detalhes os aglomerados de nuvens na região da frente fria, o que é possível com a figura 8. Nessa figura é apresentada uma imagem de radar das 1800 Z do dia 30 de junho de 2020. Nota-se a presença de uma banda alongada (adiante da frente fria e em cor vermelha). Essa banda é característica de sistemas de mesoescala chamados linhas de instabilidade - LI. As LI são bandas de precipitação que consistem basicamente em um conjunto de nuvens cumulonimbus (Cbs) de diversos tamanhos, que se organizam em linha ou em curva, e se deslocam de maneira uniforme mantendo certa identidade durante o seu tempo de vida, que varia entre poucas horas até um dia (SILVA DIAS, 1987). Mathias *et al.* (2017) afirmam que, independentemente da característica inicial, estão frequentemente associadas com ventos fortes, altos acumulados de precipitação. De fato, esse padrão atmosférico foi observado em SC.

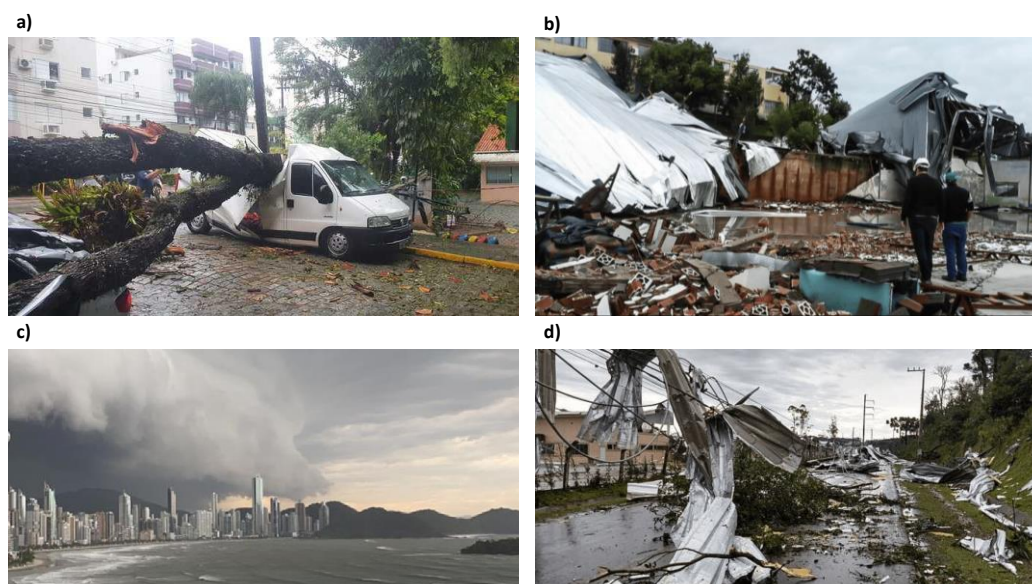
Condições meteorológicas observadas em superfície

No dia 30 de junho de 2020, a figura 7 mostrou acumulado diário de 80 mm dia⁻¹, já nas estações meteorológicas da Epagri/Ciram foi registrada precipitação de 124 mm, essa diferença é dada porque a precipitação estimada por satélite é suavizada, e assim a chuva não aparece em SC, porém em superfície os dados nas estações são realmente medidos. Foram registradas rajadas de vento de até 36,1 m s⁻¹ nas estações, já segundo a MetSul Meteorologia as rajadas de vento chegaram até 48,81 m s⁻¹, considerando que o ciclone explosivo de 2020 foi o pior evento meteorológicos (Figura 9) pós furacão Catarina, quando as rajadas de vento alcançaram valores próximos a 55,5 m s⁻¹.

A LI na perspectiva da população é vista na figura 9c, podendo ser facilmente confundida com uma frente fria ou com um ciclone que já havia sido informado pela defesa civil e pelos centros meteorológicos no dia anterior. Isso é algo que reforça a importância desse estudo, que tem como um dos objetivos descrever o que causou os estragos em SC no dia 30, pois de fato ocorreu engano da população e dos jornais que afirmaram que os danos causados em Santa Catarina foram diretamente relacionados com a passagem do ciclone.

Porém, como mostrado na figura 8, o ciclone influenciou indiretamente, pois quando seu centro de baixa pressão atuava sobre oceano, ao longo de seu ramo frontal frio a formação de um sistema de mesoescala com padrão similar a uma linha de instabilidade (LI) se formou sobre Santa Catarina, sendo este o responsável direto pelos danos causados no Estado.

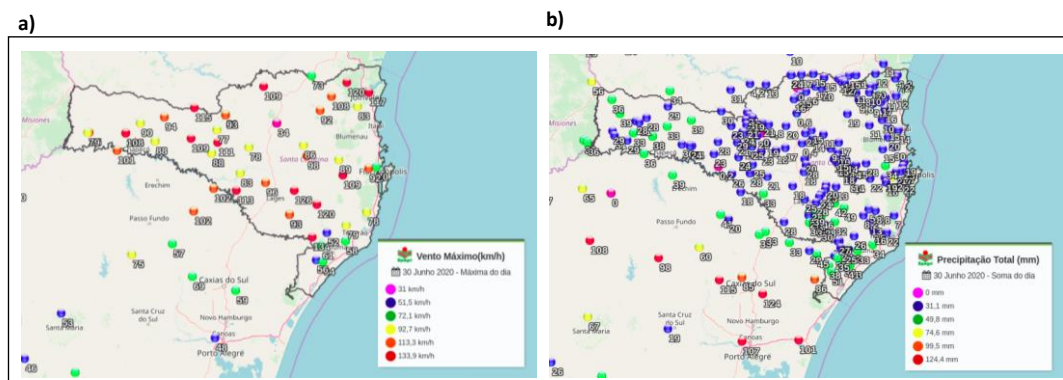
Figura 9 - Registros dos impactos socioambientais causados pelo sistema em Santa Catarina no dia 30 de junho de 2020. (a) Chapecó, (b) Santo Amaro do Imperatriz, (c) Florianópolis e (d) Tijucas



Fonte: Venceslau, 2020; G1, 2020.

Nas estações meteorológicas do Epagri/Ciram, apresentadas na figura 10, foram registrados ventos superiores a $36,1 \text{ m s}^{-1}$ (130 km h^{-1}) e acumulado diário de 40 mm , com destaque para o sul do Estado de SC, onde os ventos chegaram a $46,8 \text{ m s}^{-1}$ ($168,8 \text{ km h}^{-1}$) e para norte do estado do RS que teve acumulados diários de 124 mm no dia 30 de junho. Os dados medidos dessas estações estão associados aos sistemas de mesoescala já mencionados nesse estudo. Outro aspecto importante analisado pela Epagri/Ciram foram as descargas elétricas que acompanharam o ciclone que passou por Santa Catarina. A combinação de vento, chuva e descargas elétricas potencializou os estragos em diversas regiões do estado.

Figura 10 - Estações com dados de vento máximos (a, km h⁻¹) e precipitação acumulada (b, mm dia⁻¹) para o dia 30 de junho de 2020



Fonte: Epagri, 2020.

NOTÍCIAS DA MÍDIA E DADOS DA DEFESA CIVIL

Vários jornais do estado noticiaram a ocorrência do ciclone e dos sistemas atmosféricos associados a ele. A Tabela 2 sintetiza, cronologicamente, essas notícias, apresentando-as nos momentos antes, durante e depois da passagem do ciclone.

Quadro 1 - Notícias da mídia sobre o ciclone que afetou o estado de Santa Catarina durante todo seu período de atuação

NOTÍCIA	PUBLICAÇÃO (PERÍODO)	FONTE
Ciclone-bomba deve atingir o Litoral Norte do Rio Grande do Sul nesta terça-feira.	29/06/2020 22h46 (ANTES)	(a)
oFormação de ‘ciclone bomba’ e passagem de tempestades provocam ao menos 3 mortes em SC	30/06/2020 17h10 (DURANTE)	(b)
O que é o ‘ciclone bomba’ que está causando estragos no Sul do Brasil	30/06/2020 20h50 (DURANTE)	(c)
Reflexo de ‘ciclone bomba’, Santa Catarina tem previsão de rajadas de vento fortes nesta quarta-feira	01/07/2020 05h01 (DURANTE)	(d)
Chega a 12 mortes em Santa Catarina após passagem de ‘ciclone bomba’	04/07/2020 22h27 (DEPOIS)	(e)
Rede de monitoramento da Epagri registra vento recorde e auxilia na análise de tempestades em SC	10/06/2020 08h15 (DEPOIS)	(f)

Fontes: a – JDC, 2020; b – G1A, 2020; c – G1B, 2020; d – G1C, 2020; e - G1D, 2020; f - EPAGRI, 2020.

Por exemplo, na fase de pré-ciclogênese, no dia 29 de junho, o Jornal do Comércio do Rio Grande do Sul informou que um ciclone bomba poderia atingir o sul e o sudeste do Estado do RS, seguindo a informação dada pela MetSul Meteorologia, alertando para o risco de queda de energia e danos como destelhamentos e colapso de estruturas.

No dia 30 de junho às 17h10 (horário local), o portal do G1 (2020) mencionou a formação de um fenômeno conhecido como "ciclone bomba" que provocou estragos em Santa Catarina. Ainda relatou às 20h50 (horário local) a ocorrência de destelhamentos de imóveis e queda de árvores, segundo o corpo de bombeiros e a defesa civil do Estado de SC. Nesse mesmo dia, o sistema deixou 1,4 milhão de consumidores sem luz em SC, de acordo com as Centrais Elétricas de Santa Catarina (Celesc, 2020). Além disso, o cabo de fibra óptica da operadora Oi foi rompido, o que deixou clientes sem internet e telefone, segundo a concessionária de energia.

Em primeiro de julho o ciclone continuava causando impactos no Estado de SC, com a agitação do mar com ondas que chegavam a 4 metros de altura, baixas temperaturas causados pela passagem da massa de ar frio, e ressacas que poderiam causar alagamentos das regiões costeiras entre o litoral sul e de Florianópolis (G1, 2020). Dois dias depois da passagem do ciclone bomba, o Jornal Nacional (G1, 2020) informou que as mortes chegaram ao número de 12 pessoas, que 80% das construções sofreram algum tipo de dano, que um ginásio de esportes veio abaixo, e que cerca de 3 mil imóveis iriam precisar de recuperação. Sendo considerado o maior desastre com ventos pós furacão Catarina.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse artigo teve como objetivo descrever a configuração sinótica do ciclone ocorrido em 30 de junho de 2020 entre o Rio Grande do Sul e Uruguai, dos sistemas associados a ele e, descrever os impactos socioambientais causados no estado de Santa Catarina, através da revisão de notícias da mídia e de dados da defesa civil do estado.

Através dos dados de PNMM e a aplicação do método de Sanders e Gyakum (1980), que utiliza a equação de Bergeron, foi possível comprovar que o ciclone extratropical estudado, se tornou explosivo em poucas horas.

A gênese do ciclone foi associada com a presença de uma região baroclínica em superfície, isto é, quando há gradiente horizontal de temperatura, e pelo suporte da divergência de massa em médios e altos níveis da atmosfera associada a um cavado transiente. Essas características seguem o padrão clássico da formação de ciclones na costa do Rio Grande do Sul e Uruguai (Gan e Reboita, 2017).

O rápido aprofundamento do ciclone nas 12 primeiras horas do ciclo de vida parece estar associado mais à liberação de calor latente por condensação nas nuvens devido aos elevados volumes de chuva na região do ciclone, enquanto depois os fluxos de calor total que parecem dominar no processo da intensificação do sistema. O papel dos fluxos de calor latente e sensível podem ser melhor avaliados através de experimentos com modelos numéricos. Isso será abordado em um estudo futuro.

Vários jornais noticiaram a ocorrência do ciclone, mencionando que os estragos sobre o continente foram decorrentes da sua atuação direta. Entretanto, após a análise meteorológica, conclui-se que, os impactos em SC estiveram relacionados aos sistemas de mesoescala que se formaram associados ao ramo frio do ciclone, como a LI. Portanto, de fato, o ciclone favoreceu a formação desses sistemas, contudo, o CEX não foi o agente direto causador do mau tempo.

REFERÊNCIAS

ABREU, *et al.* Estudo do ciclo de vida de três ciclones extratropicais no Oceano Atlântico Sul. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 11, n.1, p. 251-275. 2018. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.1.p251-275>

ANDRELINA, B.; REBOITA, M. S. Climatologia do Índice do Potencial de Gênese de Ciclones Tropicais nos Oceanos Adjacentes à América do Sul. **Anuário Do Instituto De Geociências**, v. 44, p. 1982-3908. 2021. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_39515

BLACK, M. T.; PEZZA, A. B.; KREFT, P. An examination of Southwest Pacific explosive cyclones, 1989 to 2009. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 17., 2010. Canberra – Australia. **Anais [...]** Canberra – Australia, 2010. Disponível em:

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/11/1/012036/meta>.

Acesso em: 20 fev. 2023.

BORSATO, V. A.; MASSOQUIM, N. G. A climatologia dos complexos convectivos de mesoescala na região de Campo Mourão–PR. **Geoingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PGE/UEM)**, v. 11(2), p. 28-50. 2019. <https://doi.org/10.4025/geoinga.v11i2.49438>.

CAPUCIN, *et al.* Análise Sinótica de um Período Frio em Bauru-SP em julho de 2015. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 53-65, 2015.

http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_53_65

CAVALCANTI, I. F. A. Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: A review and case studies for the first decade of the 21st century, **Atmospheric Research**, v. 118, p. 27-40. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.012>

JDC. **Ciclone-bomba deve atingir Litoral Norte do Rio Grande do Sul nesta terça-feira**. Porto Alegre. 2020. Disponível em:

<https://www.jornaldocomercio.com>. Acesso em: 21 fev. 2023.

EPAGRI. **Rede de monitoramento da Epagri registra vento recorde e auxilia na análise de tempestades em SC**. Santa Catarina. 2020.

Disponível em: <https://www.epagri.sc.gov.br>. Acesso em: 21 fev. 2023.

G1a. **Formação de 'ciclone bomba' e passagem de tempestades provocam ao menos 3 mortes em SC**. Santa Catarina. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/>. Acesso em: 21 fev. 2023.

G1b. **O que é o 'ciclone bomba' que está causando estragos no Sul do Brasil**. Santa Catarina. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/>. Acesso em: 21 fev. 2023.

G1c. **Reflexo de 'ciclone bomba', Santa Catarina tem previsão de rajadas de vento fortes nesta quarta-feira**. Santa Catarina. 2020.

Disponível em: <https://g1.globo.com/sc>. Acesso em: 21 fev. 2023.

G1d. **Ciclone bomba é considerado o maior desastre com ventos da história de Santa Catarina**. Santa Catarina. 2020. Disponível em:

<https://g1.globo.com>. Acesso em: 21 fev. 2023.

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

<https://doi.org/10.1175/1520-0493>

GAN, M. A.; REBOITA, M. S. Cyclogenesis and Extra-tropical Cyclones Over Southeastern South America. **Manual of Synoptic Satellite Meteorology**. p. 280-309. 2017. Disponível em: <https://sites.google.com/site/cmsforsh/about?authuser=0>. Acesso em: 21 fev. 2023.

GOZZO, L. F.; DA ROCHA, R. P. Air–sea interaction processes influencing the development of a Shapiro–Keyser type cyclone over the subtropical South Atlantic Ocean. **Pure and Applied Geophysics**, v. 170, p. 917-934. 2013.

GRAMCIANINOV, *et al.* Extreme waves generated by cyclonic winds in the western portion of the South Atlantic Ocean. **Ocean Engineering**, v. 213, p. 107745. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107745>

HERSBACH, *et al.* The ERA5 Global Atmospheric Reanalysis at ECMWF as a comprehensive dataset for climate data homogenization, climate variability, trends and extremes. **Geophysical Research Abstracts**. v. 21. 2019. Disponível em: <https://web.p.ebscohost.com/>

HOSKINS, B. J.; K. I. HODGES. A New on Southern Hemisphere Storm Tracks. **Journal of Climate**, v. 18, p. 4108-4129. Out/2005.

HUFFMAN, *et al.* NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG). **Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)** v. 4, n. 26. 2015.

KEYSER, D. PREPBUFR processing at NCEP. National Centers for Environmental Prediction, **Environmental Modeling Center**, 2013. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov/thredds/catalog/>

MARRAFON, V. H.; REBOITA, M. S. Ciclones Extratropicais: o que são, climatologia e impactos no Brasil. **Terrae Didactica**, v. 17, n. 00, p. p. 21-32. 2021. <https://doi.org/10.20396/td.v17i00.8666028>

MCMURDIE L, HOUZE R. A. Weather systems. In: WALLACE, J.M; HOBBS, P.V. **Atmospheric sciences: an introductory survey**. 2ª ed. Londres, 2006. p 313–373.

MENDES, *et al.* On precursors of South American Cyclogenesis. **Tellus**, v. 59, p.114-121. 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2006.00215.x>

NECCO, G. V. Comportamiento de Vortices Ciclonicos En El Area Sudamerica Durante El FGGE: Ciclogenegis. **Meteorologica**, v. 13 (1), p. 7-19. 1982a.

NECCO, G. V., Comportamiento de Vortices Ciclonicos En El Area Sudamerica Durante El FGGE: Trayectorias y Desarrollos. **Meteorologica**, v. 13 (1), p. 21-34. 1982b.

- NEIMAN, P. J.; SHAPIRO, M. A. The life cycle of an extratropical marine cyclone. Part I: Frontal-cyclone evolution and thermodynamic air-sea interaction. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 8, p. 2153-2176, 1993. <https://doi.org/10.1175/1520-0493>
- NUSS, W. A.; ANTHES, R. A. A numerical investigation of low-level processes in rapid cyclogenesis. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 11, p. 2728-2743, 1987. <https://doi.org/10.1175/1520-0493>
- PIVA, E.D.; MOSCATI M.C.L.; GAN M.A. Papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície associado a um caso de ciclogênese na costa leste da América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 4, p.450-476, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862008000400006>
- PIVA, E.; GAN, M. A.; MOSCATI, M. C. L. The role of latent and sensible heat fluxes in an explosive cyclogenesis over South America. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 89(6), p. 1–27, 2011. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2011-604>
- REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Climatologia de Ciclones sobre o Atlântico Sul Utilizando Métodos Objetivos na Detecção destes Sistemas. In: IX CONGREGMET, 9., 2005, Buenos Aires - Argentina. **Congresso Argentino de Meteorologia**. Buenos Aires - Argentina. 2005. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001504372>. Acesso em: 21 fev. 2023.
- REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Evaluation of the Latent and Sensible Heat Fluxes Simulated by RegCM3 over South Atlantic from 1990 to 1994. **Clivar Exchanges**, v. 35, p. 58-60. 2005b.
- REBOITA, M.S.; MORAIS, M.A.; AMBRIZZI, T. Baixas Térmicas no Hemisfério Sul: Uma Análise Climatológica. In: IV Congresso Cubano de Meteorologia, 4., 2007, Havana - Cuba. **IV Congresso Cubano de Meteorologia**, 2007. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/247908>. Acesso em: 21 fev. 2023.
- REBOITA, M. S. **Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade**. 2008. 180f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas–IAG–USP, São Paulo, 2008.
- REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Dynamic and climatological features of cyclonic developments over southwestern South Atlantic Ocean, in: Veress, B., Szigethy, P. (Eds.), **Horizons in Earth Science Research**, Nova Science Publishers, Hauppauge, pp. 135-160. 2012. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002264693>. Acesso em: 21 fev. 2023.
- REBOITA, *et al.* Ciclones em superfície nas latitudes austrais: Parte I-revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 171-186. 2017. <https://doi.org/10.1590/0102-77863220010>

REBOITA, *et al.* Ciclones em superfície nas latitudes austrais: Parte II-estudo de caso. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 509-542. 2017. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324002>

REBOITA, *et al.* Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos. **Revista Brasileira De Meteorologia**, v. 32, p. 509-542. 2019. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324002>

REBOITA, *et al.* Future changes in winter explosive cyclones over the Southern Hemisphere domains from the CORDEX-CORE ensemble. **Climate Dynamics**, v. 57, n. 11, p. 3303-3322, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05867-w>

ROGERS, E.; BOSART, L. F. A diagnostic study of two intense oceanic cyclones. **Monthly weather review**, v. 119, n. 4, p. 965-996, 1991. <https://doi.org/10.1175/1520-0493>

SANDERS, F.; GYAKUM, J. R. Synoptic-dynamic climatology of the “bomb”. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 10, p. 1589-1606, 1980. <https://doi.org/10.1175/1520-0493>

SANDERS, F. Explosive cyclogenesis in the west-central North Atlantic Ocean, 1981–84. Part I: Composite structure and mean behavior. **Monthly weather review**, v. 114, n. 10, p. 1781-1794, 1986. <https://doi.org/10.1175/1520-04932>

SELUCHI, M. Diagnóstico Y Prognóstico de Situaciones Sinópticas Conducentes a Ciclogénesis sobre el Este de Sudamérica. **Geofísica International**, v. 34 (2), p. 171-186. 1995. Disponível em: <http://132.248.182.214/index.php/RGI/article/view/737>. Acesso em: 21 fev. 2023.

SILVA DIAS, P. L.; BONATTI, J. P.; KOUSKY, V. E. Diurnally forced tropical tropospheric circulation over South America. **Monthly Weather Review**, 115(8), 1465-1478. 1987. <https://doi.org/10.1175/1520-0493>

SILVA, B. A.; LEITE, R.R.M.; REBOITA, M.S. Tufões Haiyan e Haima: Características Durante a Formação, Maturação e Dissipação. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 41, p. 37-53. 2018. <http://dx.doi.org/10.11137/>

SILVA, *et al.* Características Anômalas Do Verão De 2019. **Revista Brasileira de Climatologia**, n. 16, v. 27. 2020. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.69492>

SINCLAIR, M. R. An Objective Cyclone Climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 2239-2256. 1994. <https://doi.org/10.1175/1520-0493>

SINCLAIR, M. R. A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 1601-1619. 1995.

<https://doi.org/10.1175/1520-0493>

SINCLAIR, M. R. Reply. **Monthly Weather Review**, v. 124, p. 2615-2618. 1996. <https://doi.org/10.1175/1520-0493>

SINCLAIR, M. R. Objective Identification of Cyclones and Their Circulation Intensity, and Climatology. **Weather and Forecasting**, v. 12, p. 595-612. 1997. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1997\)](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1997))

SOUZA, C.A.; REBOITA, M. S. Intensidade do vento de dois ciclones tropicais obtida por diferentes conjuntos de dados. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 13, n. 1, p. 067-075. 2020. Disponível em:

<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgefe/article/viewFile/242299/34791>.

Acesso em: 21 fev. 2023.

STRETEN, N. A.; A. J. TROUP. A synoptic climatology of satellite observed cloud vortices over the Southern Hemisphere. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 99, p. 56-72. 1973. <https://doi.org/10.1002/qj.49709941906>

STULL, R.; SIUTA, D.; WEST, G. WRF hub-height wind forecast sensitivity to PBL scheme, grid length, and initial condition choice in complex terrain. **Weather and Forecasting**, v. 32, n. 2, p. 493-509, 2017.

<https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0120.1>

TALJAARD, J. J. Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during IGY. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 6, p. 973-987. 1967.

<https://doi.org/10.1175/1520-0450>

UCCELLINI, L. W. Processes contributing to the rapid development of extratropical cyclones. **Extratropical cyclones: American Meteorological Society**, Boston, MA, 1990. p. 81-105. https://doi.org/10.1007/978-1-944970-33-8_6

VERA, C. S.; VIGLIAROLO, P. K.; BERBERY, E. H. Cold Season Synoptic-Scale Waves over Subtropical South America. **Monthly Weather Review**, v. 130, p. 684-699. 2002. <https://doi.org/10.1175/1520-0493>

WASH, *et al.* Study of explosive and nonexplosive cyclogenesis during FGGE. **Monthly Weather Review**, v. 120(1), p. 40-51. 1992.

[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992))

Recebido em 22 de março de 2022
Aceito em 05 de outubro de 2022