



ANÁLISE DE DOIS CICLONES EXTRATROPICAIS DE DESENVOLVIMENTO EXPLOSIVO NO ATLÂNTICO SUL UTILIZANDO O MODELO CONCEITUAL DE SHAPIRO-KEYSER

RESUMO

Os ciclones extratropicais de desenvolvimento explosivo ou ciclones “bomba” apresentam queda acentuada da pressão atmosférica à superfície, estando associados a ventos intensos e forte agitação marítima, que os tornam mais perigosos à navegação. A rápida evolução dos ciclones explosivos leva à “seclusão”, que é o aprisionamento do setor quente do ciclone em seu centro. Em alguns casos, os ciclones extratropicais marítimos intensos não ocluem de maneira clássica, como descrito pela Teoria da Frente Polar, e podem ser representados de maneira mais realista, por meio do modelo conceitual de Shapiro-Keyser. O presente trabalho se propõe a apresentar ferramentas para a análise de dois ciclones extratropicais intensos sobre a área marítima de responsabilidade do Brasil (METAREA V), sob a perspectiva do modelo

*Capitão-Tenente (T) Rodrigo de Souza Barreto Mathias*¹
*Capitão-Tenente (T) Alexandre Augusto Lopes Gadelha*²
*Primeiro-Tenente (T) Fellipe Romão Sousa Correia*³
*Primeiro-Tenente Victor Hugo Fonseca Milheiro Madeira*⁴

¹ Capitão-Tenente (T). Meteorologista e Mestre em Meteorologia pela UFRJ. Professor do Magistério Militar Naval no CIAARA.

² Capitão-Tenente (T). Meteorologista pela UFRJ. Encarregado da Seção de Assimilação de Dados do CHM.

³ Primeiro-Tenente (T). Meteorologista e Mestre em Meteorologia pela UFRJ. Ajudante da Seção de Previsão do CHM.

⁴ Primeiro-Tenente. Graduado em Ciências Navais pela Escola Naval. Aperfeiçoado no Curso de Hidrografia para Oficiais (CAHO). Ajudante da Divisão de Hidroceanografia do NHOFalteGaranha.



conceitual de Shapiro-Keyser, e sugerir a sua adoção nas análises sinóticas operacionais.

Palavras-chave: Ciclone Bomba; Shapiro-Keyser e Seclusão.

ABSTRACT

Extratropical cyclones with explosive development or “bomb” cyclones present a sharp drop in atmospheric pressure at the surface, being associated with intense winds and high sea waves, which make them more dangerous to navigation. The rapid evolution of explosive cyclones leads to “seclusion”, which is the trapping of the warm sector of the cyclone at its center. In some cases, intense extratropical maritime cyclones do not occlude in a classical way, as described by the Polar Front Theory, and can be represented more realistically through the Shapiro-Keyser conceptual model. The current paper proposes to present tools for the analysis of two intense extratropical cyclones over the maritime area of responsibility of Brazil (METAREA V), from the perspective of the conceptual model of Shapiro-Keyser, and to suggest its adoption in the operational synoptic analyzes.

Keywords: Bomb Cyclone; Shapiro-Keyser and Seclusion.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A atmosfera é caracterizada pela formação de fenômenos meteorológicos em diversas escalas de tempo e espaço de forma simultânea, que são responsáveis pela mudança das condições do tempo sobre a superfície da Terra.

Dentre os fenômenos da chamada escala sinótica, cuja abrangência é de centenas a milhares de quilômetros e a duração

é de alguns dias a semanas, os ciclones são um importante mecanismo de redistribuição energética na circulação geral da atmosfera. Eles podem ser classificados em três tipos básicos: tropicais, extratropicais e subtropicais.

Os ciclones tropicais possuem núcleo quente (parte central mais aquecida que a periferia), que se estende verticalmente por toda a troposfera. Eles também são caracterizados por simetria térmica, por se desenvolverem dentro de massas de ar homogêneas, quentes e úmidas. Esses ciclones obtêm sua energia dos oceanos, por meio da transferência de calor sensível da superfície do mar para a atmosfera, e, principalmente, pelo transporte de calor latente de evaporação que, posteriormente, é liberado no interior das nuvens. No processo de condensação, o calor latente é convertido em calor sensível e aquece as camadas superiores da atmosfera. O estágio mais intenso que um ciclone tropical pode atingir é chamado de furacão.

Os ciclones extratropicais ocorrem em ambos os hemisférios, normalmente, em latitudes superiores a 30°, possuindo núcleo frio profundo e assimetria térmica devido à interação entre massas de ar distintas, o que faz surgir um sistema frontal, com frentes fria, quente e oclusa. Além disso, o gradiente horizontal de temperatura é responsável pelo forte cisalhamento vertical do vento horizontal, ou seja, pela intensificação do vento com a altitude, que pode levar à formação de uma corrente de jato em altos níveis da troposfera.

Já os ciclones subtropicais, que são ciclones híbridos, apresentam características, tanto de ciclones extratropicais, quanto de tropicais. Eles geralmente ocorrem entre as latitudes de 20° a 40°, em ambos os hemisférios, e apresentam núcleo quente em baixos e médios níveis da troposfera (até 600 hPa ou 500 hPa) e núcleo frio em níveis superiores.

Dentre os ciclones extratropicais, alguns se formam de maneira rápida e



acentuada, se destacando dos demais pelo seu poder destrutivo. Sanders e Gyakum (1980) chamaram de ciclones de desenvolvimento explosivo ou ciclones “bomba” aqueles que apresentam queda da pressão atmosférica à superfície de, pelo menos, 24 hPa em 24 horas, tendo como referência a latitude de 60°. Devido ao violento processo de formação e ao forte gradiente de pressão que se estabelece na região do ciclone, ocorrem ventos intensos acompanhados de grande agitação marítima, que os tornam mais perigosos à navegação.

A formação dos ciclones extratropicais é explicada há um século pela Teoria da Frente Polar de Bjerknes e Solberg (1922), cuja representação gráfica é padronizada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e amplamente utilizada nas cartas sinóticas de todos os serviços meteorológicos do mundo. Entretanto, o desenvolvimento de ciclones explosivos possui algumas peculiaridades que não são contempladas pela Teoria da Frente Polar. Nesse sentido, o modelo conceitual de Shapiro e Keyser (1990) veio suprir essa lacuna e se tornou importante ferramenta na melhor representação de ciclones marítimos intensos.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é apresentar ferramentas para a análise de dois ciclones extratropicais intensos sobre a área marítima de responsabilidade do Brasil (METAREA V), sob a perspectiva do modelo conceitual de Shapiro e Keyser (1990), e propor a sua adoção nas análises operacionais dos serviços meteorológicos nacionais.

1.2 Teoria da Frente Polar e Ciclones Extratropicais no Atlântico Sul

O primeiro modelo que explicou, de forma satisfatória, o mecanismo de formação dos ciclones extratropicais, como consequência dos fortes gradientes horizontais de temperatura em superfície na região de

interação entre duas massas de ar distintas, foi apresentado por Bjerknes (1919) e aperfeiçoado por Bjerknes e Solberg (1922), por meio da Teoria da Frente Polar (SCHULTZ et al., 2019).

Segundo Bjerknes e Solberg (1922), os ciclones extratropicais se desenvolvem no encontro entre duas massas de ar com propriedades térmicas distintas, sendo separadas por uma superfície limitante bem nítida ao longo do sistema meteorológico. Essa região de separação das duas massas de ar estende-se verticalmente ao longo da troposfera, inclinando-se para o lado frio.

No esquema apresentado por Bjerknes e Solberg (1922) (Figura 1), o ciclone se forma como uma pequena onda que surge ao longo de uma frente em superfície (Figuras 1a e 1b). A partir do vértice da perturbação inicial da frente, há o aprofundamento da pressão com a formação de isóbaras quase circulares, intensificando a circulação ciclônica (Figuras 1c e 1d). No Hemisfério Sul, os ventos de oeste transformam-se em ventos de noroeste, empurrando a porção leste da frente em direção a sul/sudeste, formando o ramo quente do sistema frontal. De igual modo, a extremidade oeste da onda movimenta-se para norte/nordeste na forma de uma frente fria, como representado na Figura 1c.

Durante a fase de desenvolvimento do ciclone, a amplitude da onda aumenta. Simultaneamente, a região de ar quente (setor quente do ciclone) vai se estreitando lateralmente, conforme pode-se notar na Figura 1d. No processo de elevação do setor quente do ciclone, à medida que o ar frio o contorna, nota-se a permanência de pequena área com ar quente no centro do ciclone (Figura 1e). Esse fenômeno foi designado por Bjerknes e Solberg (1922) como “seclusão”.

Como o ar frio é mais denso que o ar quente, a frente fria se propaga mais rapidamente que a frente quente ao redor do centro do ciclone. Dessa forma, em

determinado momento, a frente fria alcança a frente quente, iniciando o processo de oclusão, que pode ser observado nas Figuras 1e e 1f. As Figuras 1g e 1h representam o estágio de dissipação do ciclone, quando ele se torna um vórtice simétrico, frio e sem contrastes de temperatura.

Do ponto de vista climatológico, o setor oeste do Oceano Atlântico Sul, próximo à costa leste da América do Sul, apresenta-se como uma região favorável à formação de ciclones extratropicais (MENDES et al., 2007). Gan e Rao (1991) (Figura 2), por meio

de análise de 14.600 cartas sinóticas, identificaram dois máximos de densidade ciclogênética: a costa Sul da Argentina e a desembocadura do Rio da Prata, entre a Argentina e o Uruguai. Já Reboita (2008) (Figura 3) identificou, além das duas áreas encontradas anteriormente, uma terceira região de máximo de ciclogênese: a costa Sul/Sudeste do Brasil. Como o seu trabalho utilizou maior período de dados e uma metodologia mais refinada e objetiva, foi possível a detecção de ciclones menos intensos sobre o Sul/Sudeste do Brasil, que não foram observados por Gan e Rao (1991).

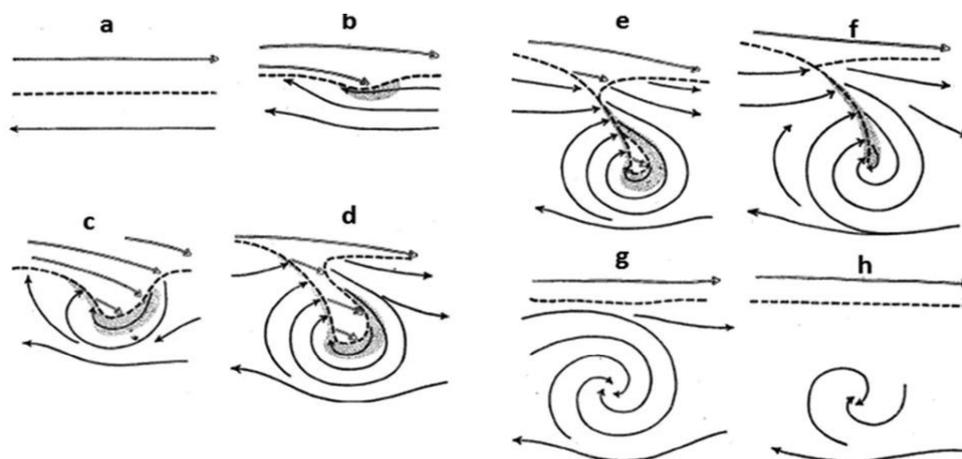


Figura 1. Ciclo de vida de um Ciclone Extratropical. Fonte: Bjerknes e Solberg (1922). Adaptado por Reboita (2017)

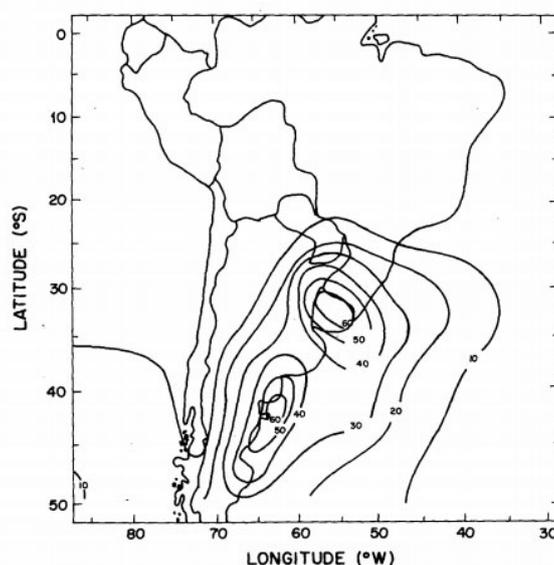


Figura 2. Frequências de ocorrência de ciclogêneses no período de 1979 a 1988. Fonte: Gan e Rao (1991)

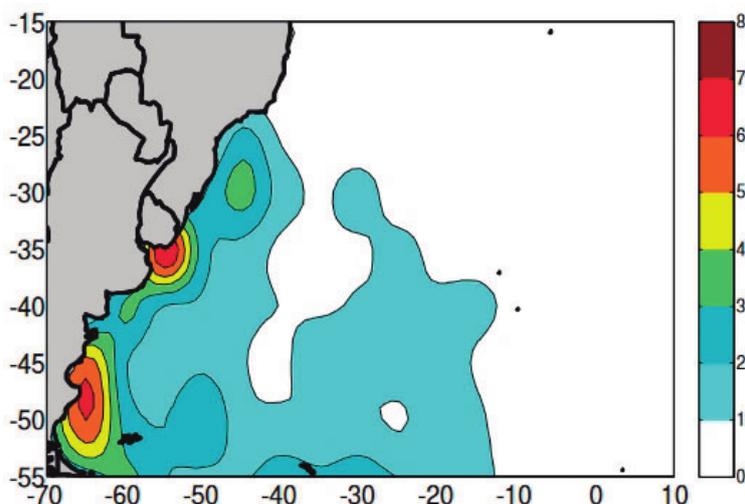


Figura 3. Densidade anual de ciclogêneses no período de 1990 a 1999. Fonte: Reboita (2008)

Na costa do sul da Argentina, o máximo de ciclogênese está associado à influência de cavados em altos níveis deslocando-se do Oceano Pacífico ao Oceano Atlântico (GAN e RAO, 1994) e ao jato subtropical a sotavento dos Andes (HOSKINS e HODGES, 2005). Já na região costeira do Uruguai, o transporte de calor e umidade pelos Jatos de Baixos Níveis (JBN) a leste dos Andes (MENDES et al., 2007), associado à passagem de cavados em altos níveis da troposfera, teria um papel destacado nas ciclogêneses.

1.3 Ciclones Extratropicais de Desenvolvimento Explosivo

Um ciclone extratropical é dito de desenvolvimento explosivo quando apresenta, em um curto intervalo de tempo, grande queda de pressão, que é expressa pela taxa de aprofundamento da pressão no centro do ciclone em superfície (PIVA et al., 2008).

Sanders e Gyakum (1980) classificaram como explosiva a ciclogênese extratropical que apresenta taxa de intensificação maior ou igual a 1 Bergeron, que corresponde à queda da pressão central do sistema de 24 hPa em 24 horas, normalizada para a

latitude de 60°. De acordo com esses autores, a Taxa Normalizada de Aprofundamento da Pressão Central (TNAc) é dada por:

$$\text{TNAc} = (\Delta p_c / 24 \text{ hPa}) \times (\text{sen } 60 / |\text{sen } \phi|)$$

em que Δp_c é a variação da pressão central do ciclone em 24h e ϕ é a latitude média de localização do centro do ciclone, considerando os pontos inicial e final da trajetória no período de 24 horas.

Sanders (1986) classificou a intensidade dos ciclones extratropicais explosivos como “fracos” ($1,0 \leq \text{Bergeron} \leq 1,2$), “moderados” ($1,3 \leq \text{Bergeron} \leq 1,8$) e “fortes” ($\text{Bergeron} > 1,8$).

Do ponto de vista dinâmico, Sanders e Gyakum (1980) afirmaram que os ciclones “bomba” estão frequentemente associados ao fenômeno de warm seclusion (aprisionamento ou seclusão do setor quente do ciclone). Gyakum (1983 a,b) trata a seclusão quente como sendo o resultado da rápida intensificação do ciclone e da intrusão de ar frio circundando o setor quente.

Shapiro e Keyser (1990) estudaram a formação de seclusão nos ciclones extratropicais marítimos intensos, propondo



um modelo conceitual para a sua análise. A seclusão seria um mecanismo que poderia potencializar o aprofundamento desse tipo de ciclone.

Além da dinâmica atmosférica, Piva et al. (2011) mostraram que a termodinâmica tem papel importante no aprofundamento dos ciclones. Segundo o estudo, os fluxos de calor latente e de calor sensível entre a superfície do mar e a atmosfera auxiliam nos estágios iniciais do desenvolvimento do ciclone explosivo. Também foi verificado que os ciclones extratropicais intensos se formam sobre os oceanos, em regiões acima de correntes oceânicas quentes e nas proximidades de intensos gradientes horizontais de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) (SANDERS; GYAKUM, 1980). Já Mendes et al. (2007) mostraram que, diante de instabilidades baroclínicas, o transporte de calor e umidade pelo Jato de Baixos Níveis, orientado pela presença da cordilheira dos Andes, favorece a gênese de ciclones de dinâmica explosiva na região da costa leste da América do Sul.

Sobre a climatologia de ciclones sobre o Atlântico Sul, Bitencourt et al. (2013) encontraram 85 ciclogêneses explosivas na região ciclogênica da América do Sul no período entre 1957 e 2010. Dessa forma, eles concluíram que, assim como nas outras regiões do globo, os ciclones explosivos na América do Sul são um fenômeno raro, com cerca de 4,1% de frequência entre todos os ciclones que se formam nessa área. A maior frequência dos ciclones explosivos ocorre nos meses mais frios, em junho, julho e agosto, com 47,1 % dos casos.

1.4 Modelo Conceitual de Shapiro-Keyser para Ciclones Marítimos Intensos

Durante a década de 1980, ficou evidente que nem todos os ciclones extratropicais evoluem de maneira similar à apresentada pelo modelo norueguês de ciclones

extratropicais, iniciado por Bjercknes (1919). O uso de ferramentas mais modernas, principalmente, a modelagem numérica de meso-escala, permitiu que as frentes fossem mais bem resolvidas do que no passado, ajudando a revelar novas estruturas nos ciclones extratropicais (SCHULTZ e KEYSER, 2021).

Bjercknes e Solberg (1922) citam em seu artigo a existência de um fenômeno durante o início do processo de oclusão, conhecido como seclusão, conforme visto na seção 1.2 do presente trabalho. Porém, à época da publicação, ao ser incluído no modelo norueguês de formação de ciclones extratropicais, o termo seclusão tinha um significado um pouco mais restrito e seu entendimento não foi aprofundado nas décadas seguintes.

O modelo apresentado por Bjercknes (1919) e Bjercknes e Solberg (1922) descreve a formação dos ciclones extratropicais com a existência de gradientes horizontais de temperatura em superfície, e o aprofundamento do sistema meteorológico ocorre com a rotação da frente fria em torno do centro de baixa pressão, até o momento em que alcança a frente quente e inicia a oclusão. Ao final do processo de oclusão, o setor quente do ciclone desaparece da superfície, predominando apenas ar frio no centro do ciclone.

Shapiro e Keyser (1990) propuseram um modelo de desenvolvimento de ciclone extratropical similar à fase inicial do modelo apresentado por Bjercknes e Solberg (1922), como uma onda frontal, conforme apresentado na Figura 4 (I). Porém, esse novo modelo engloba situações não previstas pela escola norueguesa, que são observadas, principalmente, em ciclones marítimos de rápido desenvolvimento. Nele, a frente fria não gira em torno da baixa e possui um deslocamento perpendicular ao da frente quente, não ocorrendo o encontro de ambas. Para o Hemisfério Norte, a configuração apresentada na Figura 4 (II) é chamada de T-Bone frontal, pois o grande ângulo formado entre



as frentes assemelha-se à disposição do osso do corte de bisteca, no formato da letra “T”.

Com a evolução do ciclone, nota-se um enfraquecimento do lado polar da frente fria, próximo ao centro do ciclone. Como a frente quente, nesse momento, se curva para trás, tem-se a estrutura chamada bent-back front, conforme apresentado na Figura 4 (III).

Por fim, na Figura 4 (IV), o ar frio circunda o ar quente nas proximidades do centro do ciclone levando ao aprisionamento do ar mais quente, região conhecida como “warm seclusion” ou seclusão quente. Nota-se que um ciclone do tipo Shapiro-Keyser é alongado no sentido da frente quente.

Portanto, o modelo de ciclone de Shapiro-Keyser (Figura 4) se diferencia do modelo norueguês (Figura 5) devido

a quatro novos padrões: fratura frontal, a frente quente curvada para trás, o padrão em “T”, e a seclusão do núcleo quente (SCHULTZ e KEYSER, 2021).

O modelo conceitual de Shapiro-Keyser não surgiu para substituir o modelo norueguês, mas, complementá-lo nos casos em que a ocorrência de seclusão tem papel importante no desenvolvimento do ciclone, sobretudo, nos ciclones marítimos intensos, como aqueles que serão analisados adiante.

Vale acrescentar que, de acordo com Hulme e Martin (2009), a seclusão quente pode dar origem a um ciclone subtropical, diante do aumento da simetria do ciclone e a redução do cisalhamento do vento em seu interior. Isso leva à maior organização e empilhamento do ciclone.

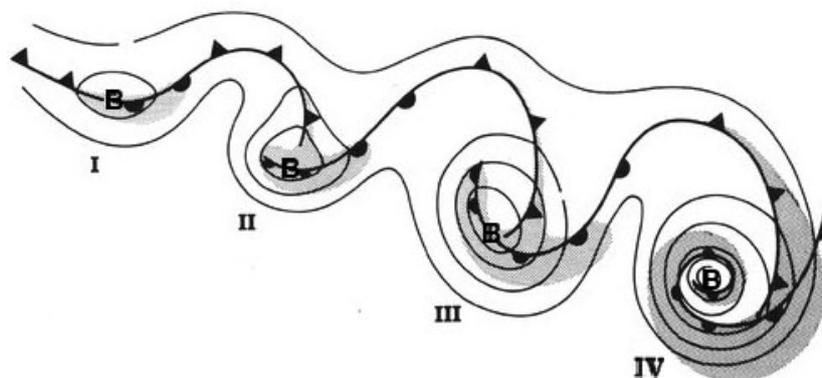


Figura 4. Modelo Conceitual de Shapiro-Keyser. Fonte: Adaptado de Shapiro e Keyser (1990)

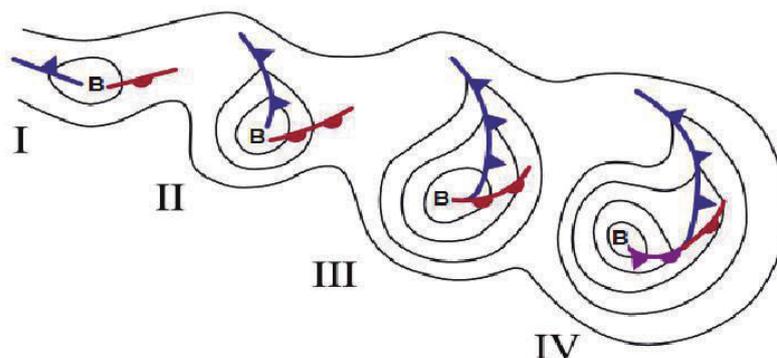


Figura 5. Modelo Conceitual Norueguês. Fonte: Adaptado de Schultz e Vaughan (2011)



2. METODOLOGIA

O presente trabalho aplica o modelo conceitual de Shapiro-Keyser (1990) na análise de dois ciclones extratropicais intensos, que se deslocaram sobre a área marítima de responsabilidade brasileira no Atlântico Sul, conhecida como METAREA V. Os referidos casos foram escolhidos dentre tantos outros devido aos seus recentes impactos à navegação e à região costeira, bem como às peculiaridades observadas durante os seus desenvolvimentos.

O primeiro ciclone ocorreu entre os dias 30 de junho e 2 de julho de 2020 e impactou significativamente a região Sul do Brasil. O segundo ocorreu entre 26 de junho e 1º de julho de 2021, sendo inicialmente um intenso ciclone extratropical, que, posteriormente realizou transição de fase para um ciclone subtropical. A Marinha do Brasil, de acordo com a intensidade do ciclone, o classificou como Tempestade Subtropical a partir do dia 29 de junho de 2021.

Para a elaboração dos campos e cortes verticais, foi utilizada a reanálise ECMWF Atmospheric ReAnalysis Version 5 (ERA-5) (HERSBACH et al., 2018), do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), utilizando o programa Grid Analysis and Display System (GrADS) (DOTY e KINTER, 1995), na versão Opengrads para Windows. A resolução espacial dos dados atmosféricos é de 0,25° x 0,25°, com 27 níveis verticais entre 1000 hPa e 100 hPa.

Também foram utilizadas as seguintes informações:

- Imagens do satélite Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-16), no canal infravermelho termal, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);
- Estimativas de ventos do sensor Advanced Scatterometer (ASCAT)

a bordo do satélite de órbita polar METOP-C, da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Disponível em <https://manati.star.nesdis.noaa.gov/datasets/ASCATData.php>;

- Diagramas de fase de ciclone elaborados pelo CHM, aplicando a metodologia de Hart (2003) nas informações de reanálise ERA-5;
- Dados horários de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no estado do Rio Grande do Sul; e
- Dados horários da boia meteocceanográfica RS-4, localizada nas proximidades de Rio Grande (Latitude 32,25°S e Longitude 052,09°W), do Sistema Brasileiro de Monitoramento Costeiro (SiMCosta). Disponível em: <https://simcosta.furg.br/>.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ciclone entre 30 de junho e 2 de julho de 2020

A formação do primeiro ciclone a ser analisado ocorreu ao longo do dia 30 de junho (Figuras 6a e 7a), entre o nordeste da Argentina, Uruguai e o sul do Brasil. Depois, passou a se deslocar predominantemente para Leste/Sudeste e apresentou rápido desenvolvimento no início de seu deslocamento marítimo. O máximo aprofundamento do ciclone ocorreu na área compreendida entre 27°S e 33°S e entre 050°W e 040°W no dia 1º de julho (Figuras 6b, 6c, 6d e 7b). Nota-se que há bastante atividade convectiva associada à região de menor pressão atmosférica do ciclone, conforme pode ser visto através dos topos mais frios (brancos) das nuvens Cumulonimbus nas imagens de satélite das Figuras 7a e 7b.

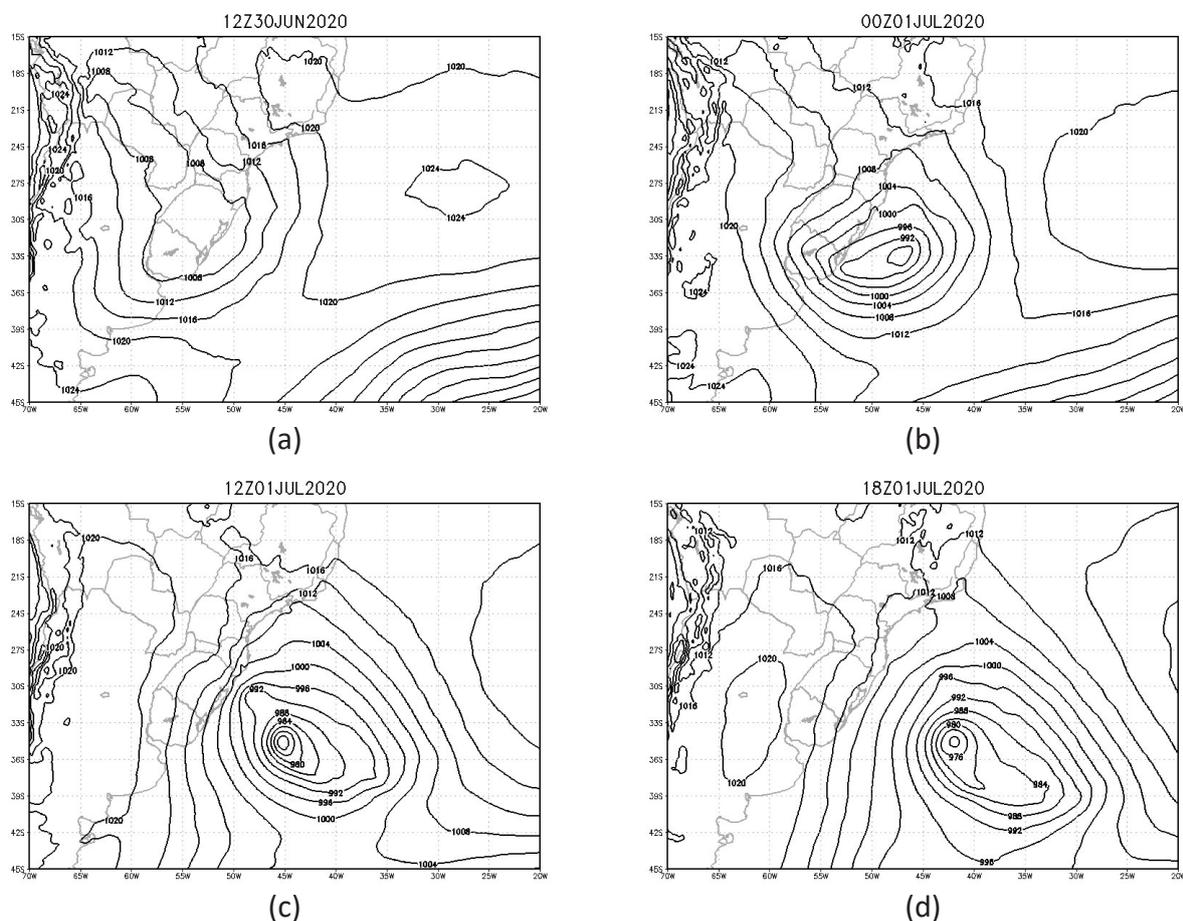


Figura 6. Pressão atmosférica ao nível do mar (hPa) – Reanálise ERA-5

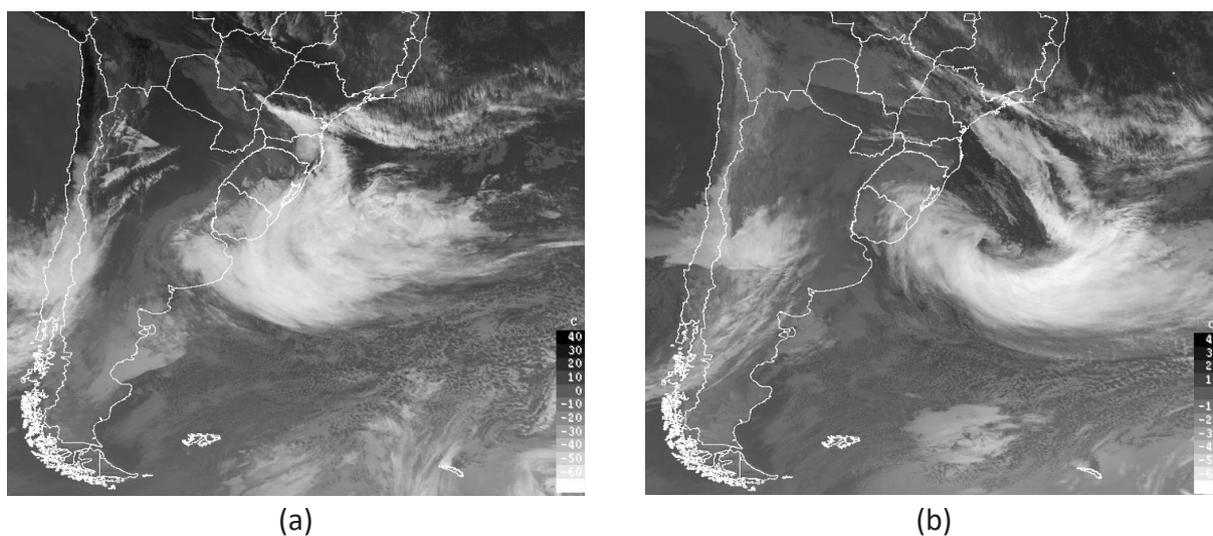


Figura 7. Imagens do satélite GOES-16 no canal infravermelho termal em (a) 30 de junho às 2000Z e (b) 1º de julho às 0600Z. Fonte: INMET

Pelos resultados encontrados por meio da Reanálise ERA-5, a queda de pressão no centro do ciclone foi de aproximadamente 34 hPa no período de 24 horas, entre 1200Z do dia 30 de junho e 1200Z do dia 1º de julho, passando de 1006 hPa (Figura 6a) para 972 hPa (Figura 6c), configurando o período de maior aprofundamento do ciclone.

Por meio do cálculo da Taxa Normalizada de Aprofundamento da pressão central (TNAc), o ciclone apresentou um valor de 2,25 Bergeron no dia 1º de julho às 1200Z, considerando o seu deslocamento médio na latitude de 33°S. Portanto, segundo Sanders (1986), o ciclone pode ser classificado como um ciclone explosivo forte (Bergeron > 1,8).

$$\text{TNAc} = (\Delta p_c / 24 \text{ hPa}) \times (\text{sen } 60^\circ / |\text{sen } \phi|)$$

$$\text{TNAc} = (34 \text{ hPa} / 24 \text{ hPa}) \times (\text{sen } 60^\circ / |\text{sen } -33^\circ|) = 2,25 \text{ Bergeron}$$

Na manhã do dia 30 de junho, os ventos sobre a área marítima adjacente ao estado do Rio Grande do Sul estavam entre 30 e 35 nós. Como consequência do grande

aprofundamento do ciclone e do desenvolvimento de fortes gradientes de pressão, os ventos se intensificaram e foram superiores a 50 nós nas proximidades da costa no dia 1º de julho (Figura 8).

A estação meteorológica do INMET em Barra do Chuí registrou, às 0400Z do dia 1º de julho, ventos sustentados de 44,7 nós (82,8 km/h) e rajadas de 63 nós (116 km/h). A boia RS-4 do SiMCosta, nas proximidades de Rio Grande, registrou, às 0700Z, ventos sustentados de 39,8 nós (73,8 km/h) e rajadas de 51,1 nós (94,7 km/h).

O desenvolvimento do ciclone criou condições favoráveis à formação de tempestades sobre o continente, com fortes pancadas de chuva e rajadas de vento, que, segundo Sudré (2020), foram a causa de mortes, da interrupção do fornecimento de energia elétrica e de prejuízos econômicos na região Sul do Brasil.

Sobre o mar, a navegação foi afetada pelos ventos fortes e pelas grandes ondas geradas pelo ciclone. Na manhã do dia 1º de julho, a boia RS-4 registrou alturas significativas de ondas de até 4,1 metros e alturas de pico de até 6,2 metros.

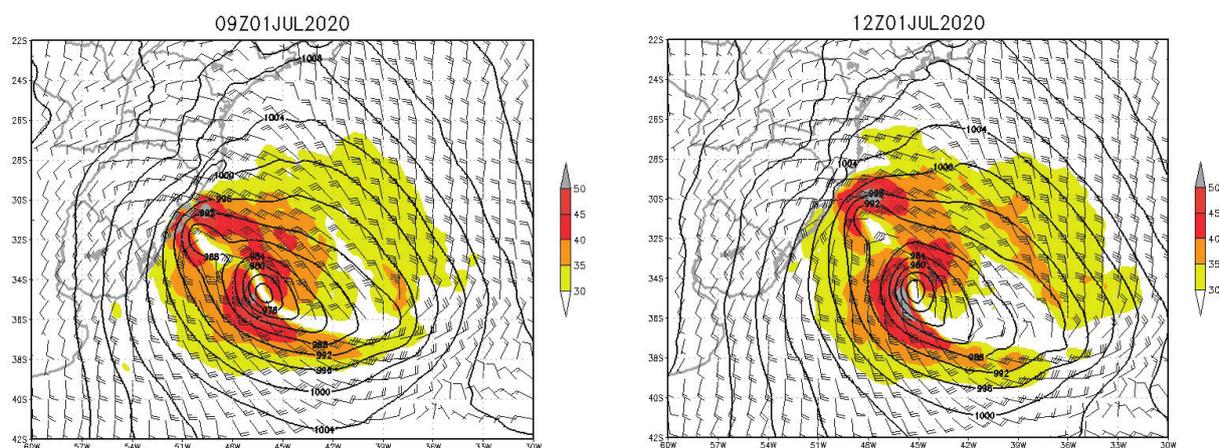


Figura 8. Pressão atmosférica ao nível do mar (hPa) (linhas pretas) e vento a 10 metros (nós) acima de 30 nós (hachurado) – Reanálise ERA-5



Como visto anteriormente, os ciclones de desenvolvimento explosivo normalmente estão associados à ocorrência de seclusão quente. A seguir serão apresentados campos e cortes atmosféricos para se verificar a ocorrência de seclusão quente no caso em estudo, e para analisá-lo, de acordo com o modelo conceitual de Shapiro-Keyser.

Os campos de temperatura potencial equivalente em 925 hPa (Figura 9) mostram a predominância de ar mais aquecido no centro do ciclone, com a ocorrência da fratura da frente fria e a dobra da frente

quente para a retaguarda do sistema já a partir do dia 30 de junho. A seclusão fica evidente a partir de 0000Z do dia 1º de julho, enquanto o padrão T-bone fica claro a partir de 0600Z do mesmo dia. Dessa forma, a oclusão tradicional conforme o modelo de Bjerknes e Solberg (1922) não ocorreu, pois, a frente fria não rotacionou em torno do centro do ciclone, seguindo de maneira quase perpendicular à frente quente. A representação do sistema frontal por meio do Modelo de Shapiro-Keyser (1990) torna-se mais conveniente.

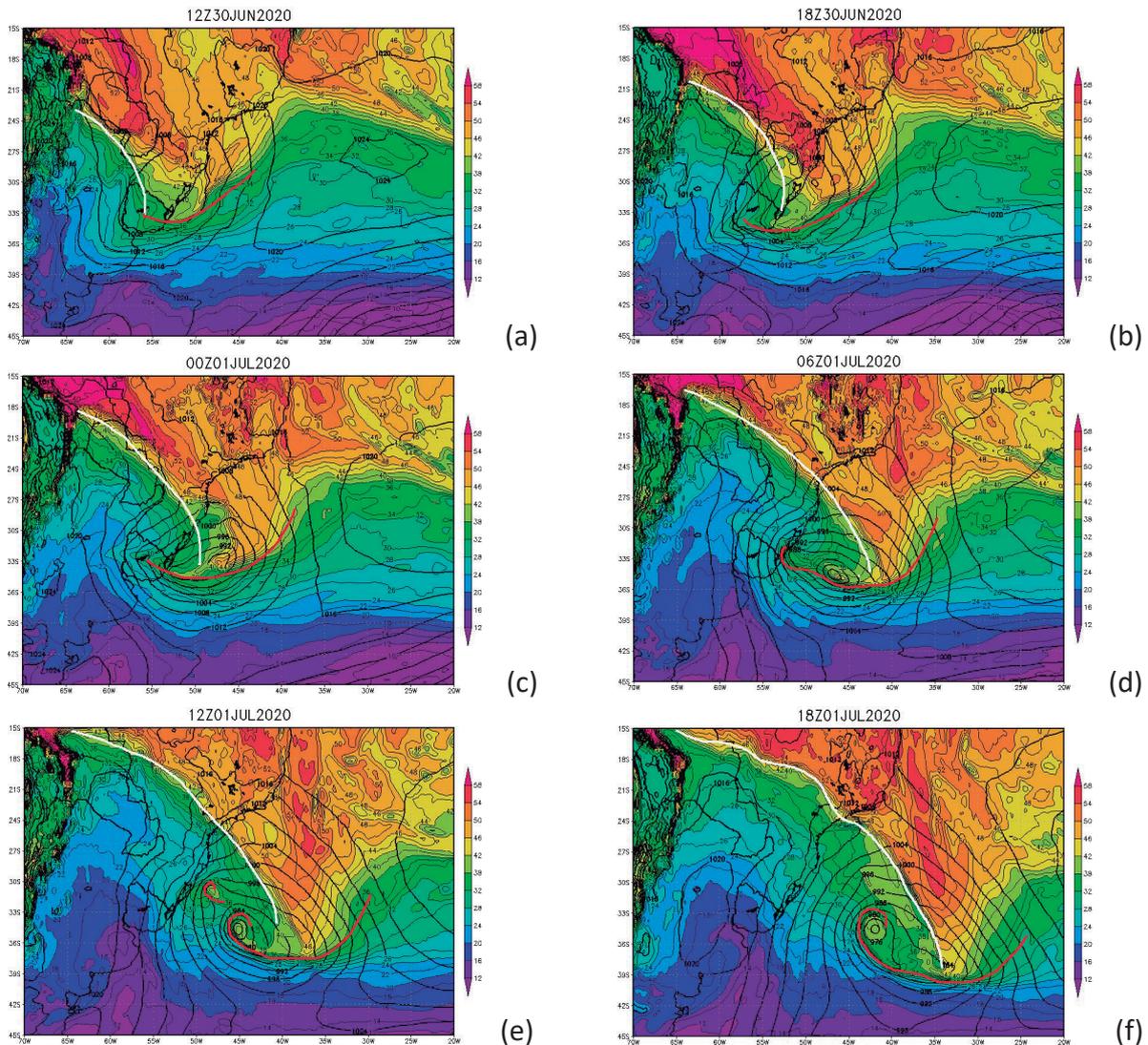


Figura 9. Pressão ao nível médio do mar (hPa) (linhas pretas) e temperatura potencial equivalente (°C) em 925 hPa (hachurado) – Reanálise ERA-5. A linha branca representa a posição da frente fria, enquanto a linha vermelha representa a posição da frente quente

A fratura da frente fria e o padrão T-bone, que são características da seclusão, nem sempre são de fácil identificação por meio de imagens de satélite, como pode ser observado na Figura 10. Isso ocorre devido à presença de grande cobertura de nuvens médias e altas, que impede a visualização da descontinuidade frontal em níveis mais baixos. Dessa forma, a utilização de modelos numéricos fornece parâmetros objetivos e critérios mais seguros para a caracterização de um ciclone com seclusão.

Como os campos de temperatura potencial equivalente apresentados permitem analisar apenas o nível de 925 hPa, ou aproximadamente, 800 metros de altitude, foram elaborados cortes verticais entre 1000 hPa e 100 hPa, na latitude do centro da baixa principal do ciclone, contendo as anomalias zonais da temperatura do ar. As referidas anomalias indicam os desvios das temperaturas do ar em torno do ciclone, com relação aos valores médios da temperatura na faixa

de latitude em que o centro do ciclone transita em determinado instante. Por meio desses gráficos, é possível visualizar as regiões anormalmente quentes ou frias na estrutura do ciclone, quando comparadas com a temperatura média zonal.

No corte vertical, apresentado na Figura 11, são identificados o setor quente do ciclone a leste, a massa de ar frio pós-frontal a oeste, assim como a seclusão quente, que aparece envolvida pelo ar frio. Nota-se também que abaixo de 800 hPa e a leste da posição do centro ciclone (045°W), há o predomínio de ar mais aquecido ligando a seclusão ao setor quente do ciclone. Essa continuidade de ar quente mostra que não havia uma frente fria ou oclusão a leste da baixa principal do ciclone. Desse modo, fica evidente a fratura da frente fria, que se localizava mais ao norte da latitude do centro do ciclone (Figura 9e), e que a baixa era alimentada com ar aquecido transportado pela circulação convergente provinda do setor quente do sistema frontal.

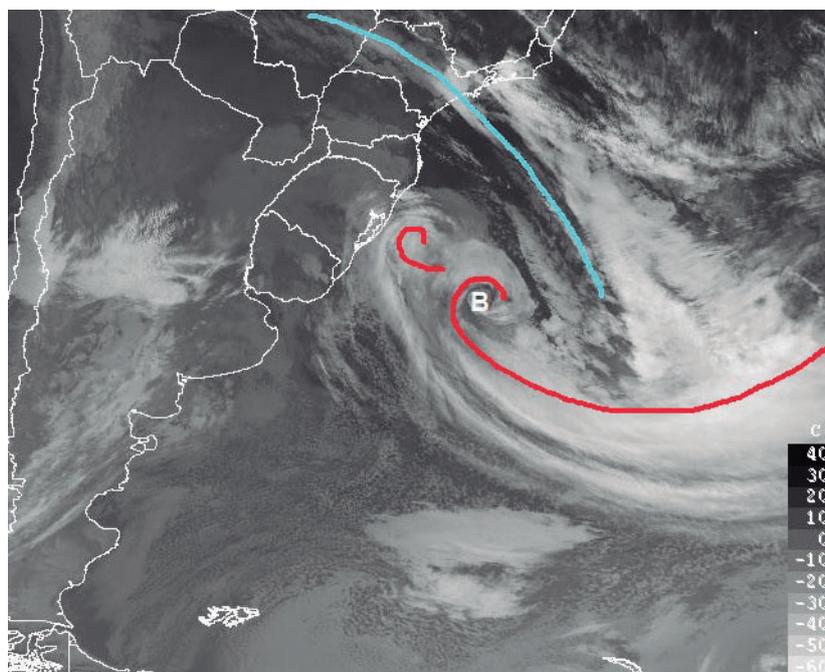


Figura 10. Imagem do satélite GOES-16 no canal infravermelho termal em 1º de julho às 1200Z. A linha azul representa a posição da frente fria, enquanto a linha vermelha representa a posição da frente quente. A letra “B” indica a posição do centro de baixa pressão principal

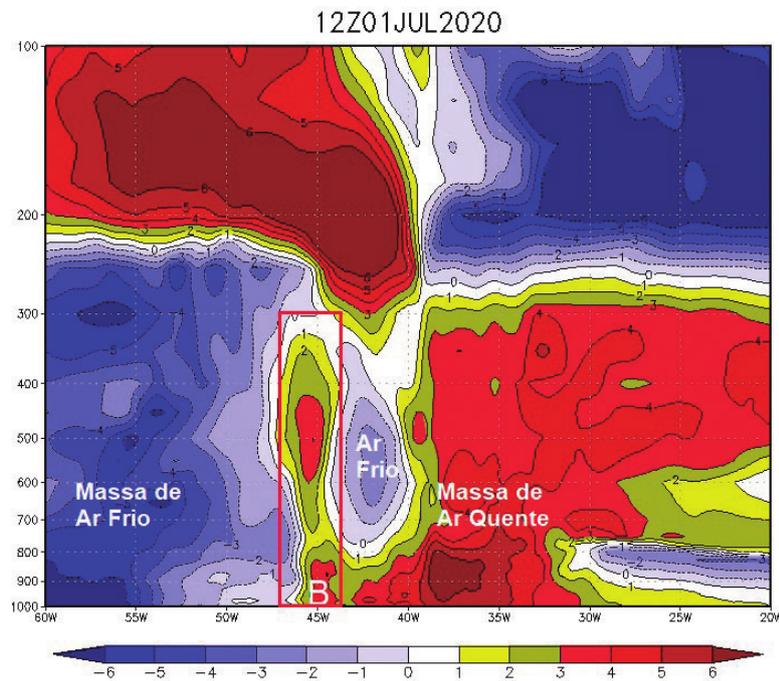
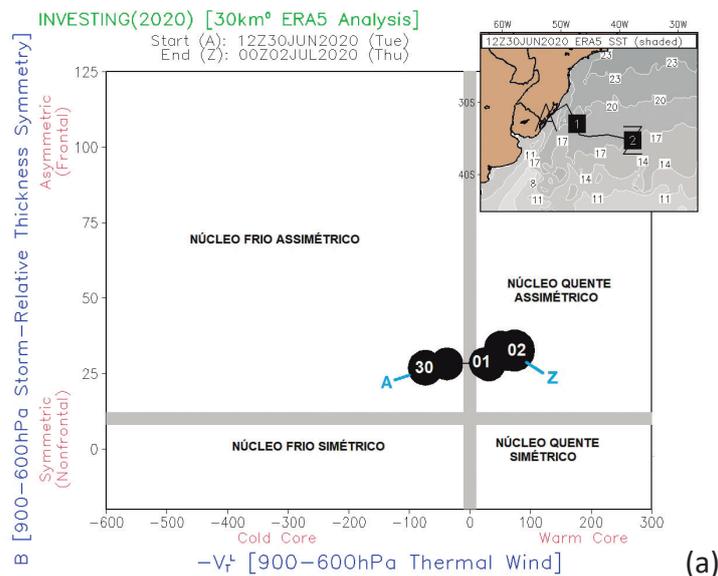


Figura 11. Corte vertical, entre 1000 hPa e 100 hPa, da anomalia zonal de temperatura (°C) na latitude do centro do ciclone (34°S) no dia 1º de julho às 1200Z – Reanálise ERA-5. A letra “B” identifica a posição do centro da baixa do ciclone em superfície e o retângulo vermelho destaca a seclusão quente envolvida pela massa de ar frio

Outra forma de se analisar objetivamente a natureza térmica do ciclone (núcleo quente x núcleo frio) e sua simetria (frontal x não-frontal) é o uso de diagramas de fase de ciclone, conforme a metodologia de Hart (2003). A Figura 12 apresenta os diagramas de fase do ciclone,

fornechos pelo Centro de Hidrografia da Marinha com base nos dados da reanálise ERA-5, com informações a cada 6 horas. A letra “A” indica o início da análise do ciclone e a letra “Z” o final. Os números nos círculos indicam os dias analisados, no horário de 00Z.



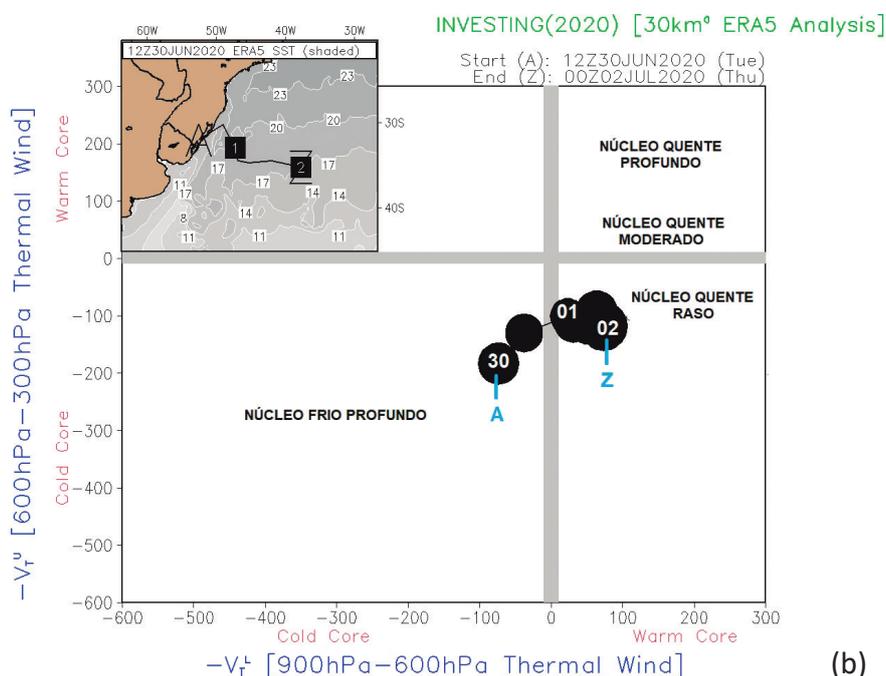


Figura 12. Diagramas de fase do ciclone com os parâmetros-VTL e B (a) e os parâmetros-VTL e-VTU (b) – Reanálise ERA-5
Fonte: CHM

Os ciclones extratropicais comuns são caracterizados pela presença de núcleo frio profundo, ou seja, a sua temperatura central é mais fria que as redondezas desde a superfície até altos níveis da troposfera. Entretanto, os ciclones de desenvolvimento explosivo apresentam núcleo quente em baixos níveis como consequência da seclusão quente.

Analisando a Figura 12a, nota-se que o ciclone apresentou assimetria térmica ao longo de todo o período analisado (entre 1200Z do dia 30 de junho e 0000Z do dia 2 de julho), evidenciando o seu comportamento frontal. Porém, percebe-se que, em baixos níveis (entre 900 hPa e 600 hPa), o ciclone realizou uma transição de núcleo frio para núcleo quente entre o final do dia 30 de junho e o início do dia 1^o de julho. Essa informação vai ao encontro da análise das Figuras 9 e 11, pelas quais, se conclui a ocorrência de seclusão.

A Figura 12b complementa a análise da fase do ciclone, e o diagrama apresenta o comportamento da temperatura do ciclone em baixos níveis (900 hPa até 600 hPa) e altos níveis (600 hPa até 300 hPa). Nota-se que o ciclone se manteve com núcleo frio profundo até o final do dia 30 de junho. Nos horários seguintes, a parte inferior do ciclone assumiu núcleo quente, enquanto a sua parte superior manteve o núcleo frio.

Comparando essas informações com o sumário apresentado por Hart (2003), a respeito da posição assumida pelos ciclones nos diagramas de fase (Figura 13), fica clara a presença de seclusão, que é a ocorrência de um núcleo quente em um ciclone extratropical devido ao seu rápido desenvolvimento. Portanto, trata-se de um núcleo quente forçado, e em nada se assemelha ao processo de formação de ciclones tropicais, que são quentes devido à liberação de calor latente nas torres de cumulus em seu interior.

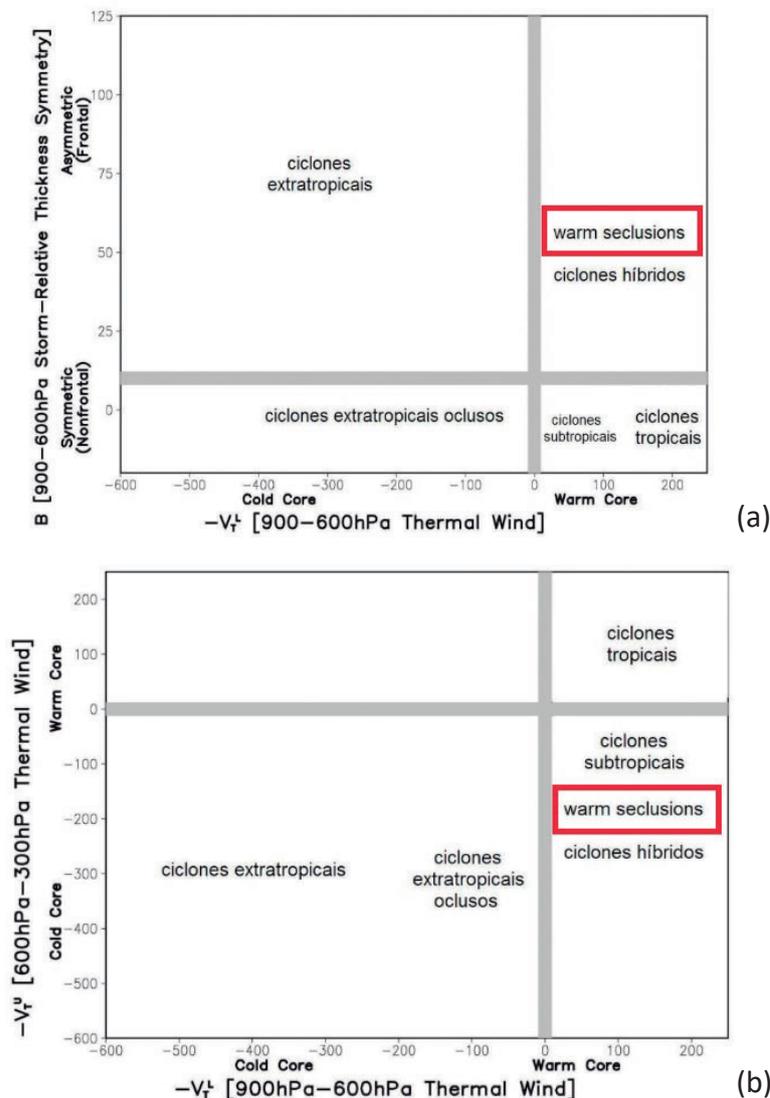


Figura 13. Diagramas de Fase com o sumário da localização típica dos principais tipos de ciclone contendo em (a) os parâmetros-VTL e B e em (b) os parâmetros-VTL e-VTU. Fonte: Hart (2003), adaptado por Mathias (2012)

3.2 Ciclone entre 26 de junho e 1º de julho de 2021

O segundo ciclone extratropical se formou na divisa do Brasil com o Uruguai, entre a noite do dia 26 e a madrugada do dia 27 de junho de 2021 (Figura 14a), adquirindo rapidamente trajetória marítima no rumo Sul. A máxima profundidade do ciclone ocorreu à 00Z do dia 28 (Figura 14b), quando sua pressão central era de cerca de 984 hPa. Ao longo

do dia 28, o ciclone fez uma trajetória circular no sentido horário, e depois passou a se movimentar para Norte/Nordeste e a atuar nas proximidades da desembocadura do Rio da Prata, entre a costa Leste da Argentina e o Uruguai. Nos dias 29 e 30 (Figuras 14c e 14d), o ciclone continuou o seu movimento para Nordeste nas proximidades da costa do Rio Grande do Sul, reduzindo a sua intensidade. No dia 1º de julho, o sistema de baixa pressão remanescente do ciclone se dissipou.

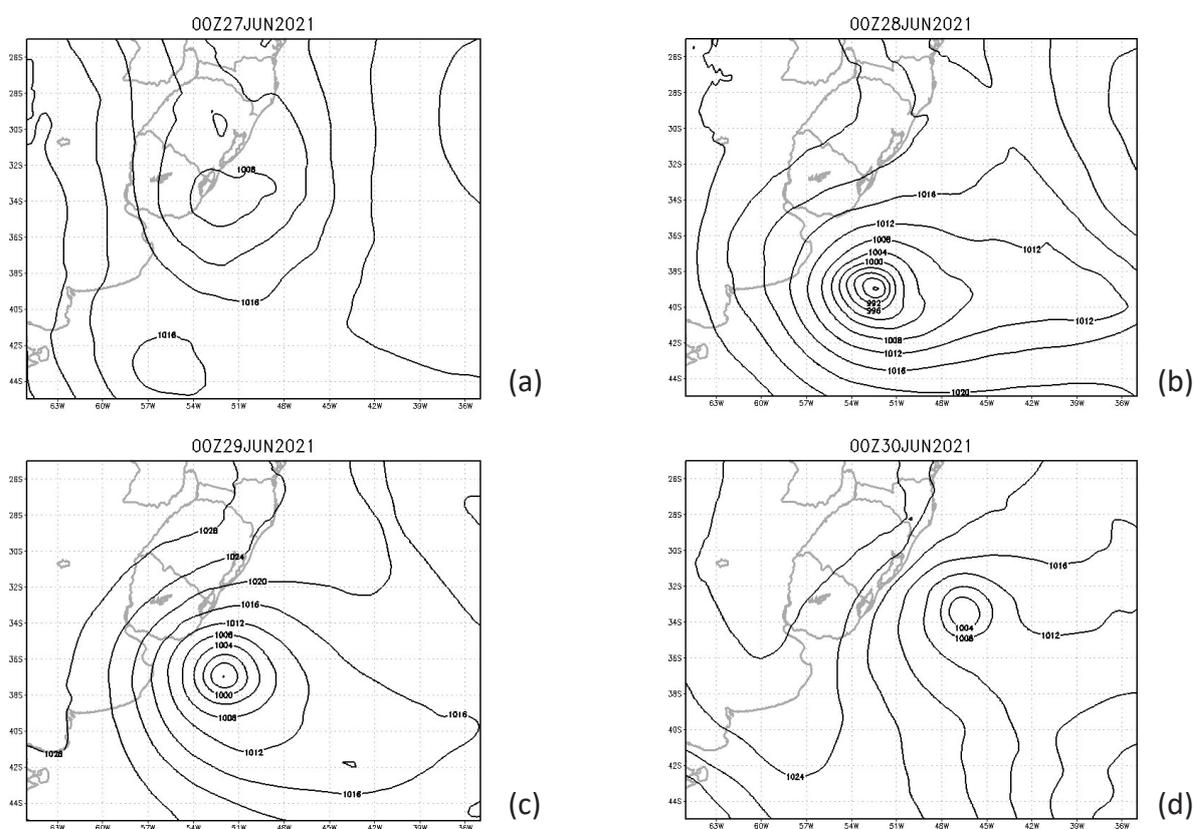


Figura 14. Pressão atmosférica ao nível do mar (hPa) – Reanálise ERA-5

De acordo com a reanálise, a maior queda da pressão no centro do ciclone ocorreu no período entre 0000Z do dia 27 e 0000Z do dia 28 de junho, passando de 1006 hPa (Figura 14a) para 984 hPa (Figura 14b), ou seja, redução de 22 hPa em 24 horas. Portanto, pelo cálculo da taxa normalizada de aprofundamento da pressão central, considerando o deslocamento na latitude média de 36°S, o ciclone apresentou um valor de 1,35 Bergeron. Segundo Sanders (1986), ele pode ser classificado como ciclone “bomba” moderado ($1,3 \leq \text{Bergeron} \leq 1,8$). Com isso, há grande probabilidade de o ciclone estar associado à ocorrência de seclusão quente, o que será analisado mais adiante.

Os ventos mais intensos estimados por satélite foram superiores a 50 nós em alguns setores do ciclone (Figura 15), porém,

tiveram atuação mais distante da costa, quando comparados aos ventos do caso anterior.

Além do desenvolvimento explosivo apresentado, este ciclone merece destaque por ter sido classificado pelo Centro de Hidrografia da Marinha, a partir do dia 29 de junho, como um ciclone subtropical, na categoria de Tempestade Subtropical (ventos à superfície superiores a 34 nós). Conforme preconizado pelas Normas da Autoridade Marítima para as Atividades de Meteorologia Marítima (NORMAM-19), a tempestade subtropical foi nomeada como “Raoni”.

A classificação como ciclone subtropical, e não mais como ciclone extratropical, mostra que o CHM identificou uma transição de fase no sistema meteorológico. O ciclone adquiriu núcleo quente raso e uma estrutura barotrópica, na qual, os campos de pressão e de temperatura estavam

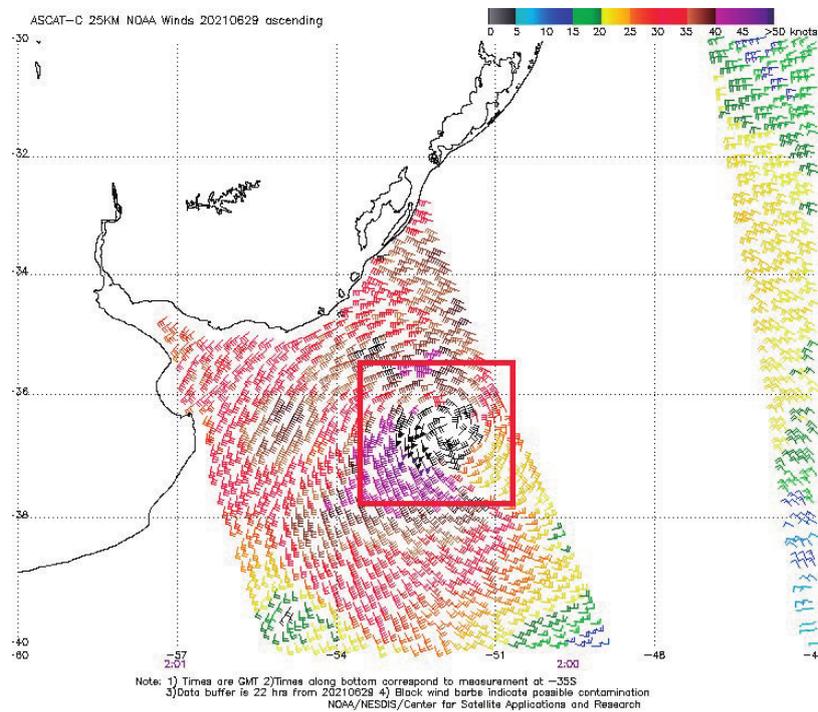
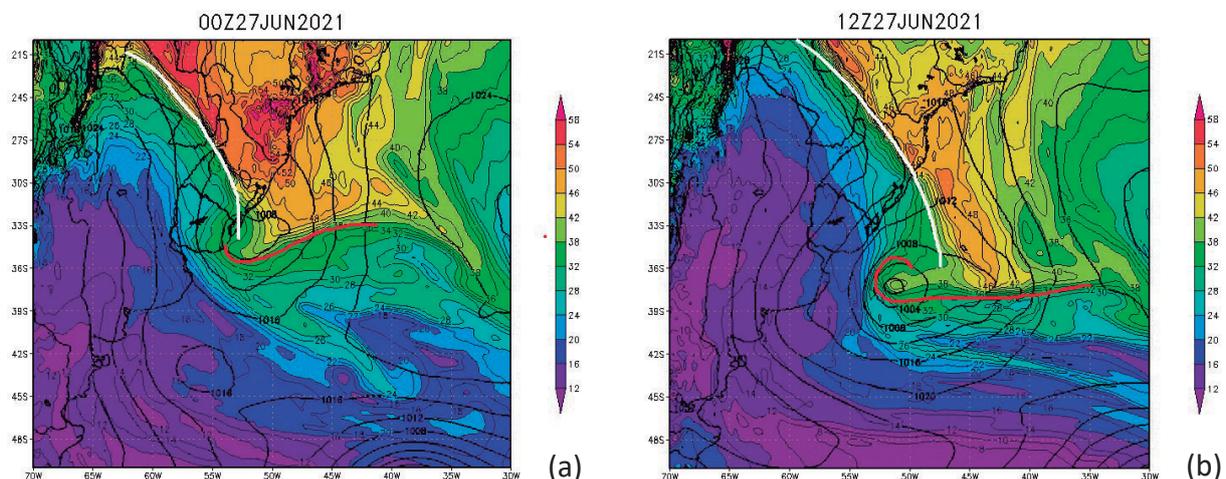


Figura 15. Vento estimado pelo escanerômetro ASCAT a bordo do satélite METOP-C no dia 29 de junho às 02Z. Em destaque ventos superiores a 50 nós. Fonte: NOAA

praticamente em fase e simétricos. Ciclones subtropicais também possuem estrutura “empilhada”, ou seja, não há inclinação do seu eixo vertical, como ocorre com os ciclones extratropicais, que se inclinam para oeste em decorrência da baroclinia.

A análise dos campos de temperatura potencial equivalente em 925 hPa (Figura 16) mostram que o ciclone, logo após

a frontogênese, passou a apresentar uma fratura da frente fria e ar mais aquecido no centro da baixa (Figura 16b). O padrão T-bone e a dobra da frente quente para a retaguarda do sistema frontal, que caracterizam a presença da seclusão, indicam que esse ciclone foi um ciclone do tipo Shapiro-Keyser e não apresentou a clássica oclusão do modelo conceitual norueguês.



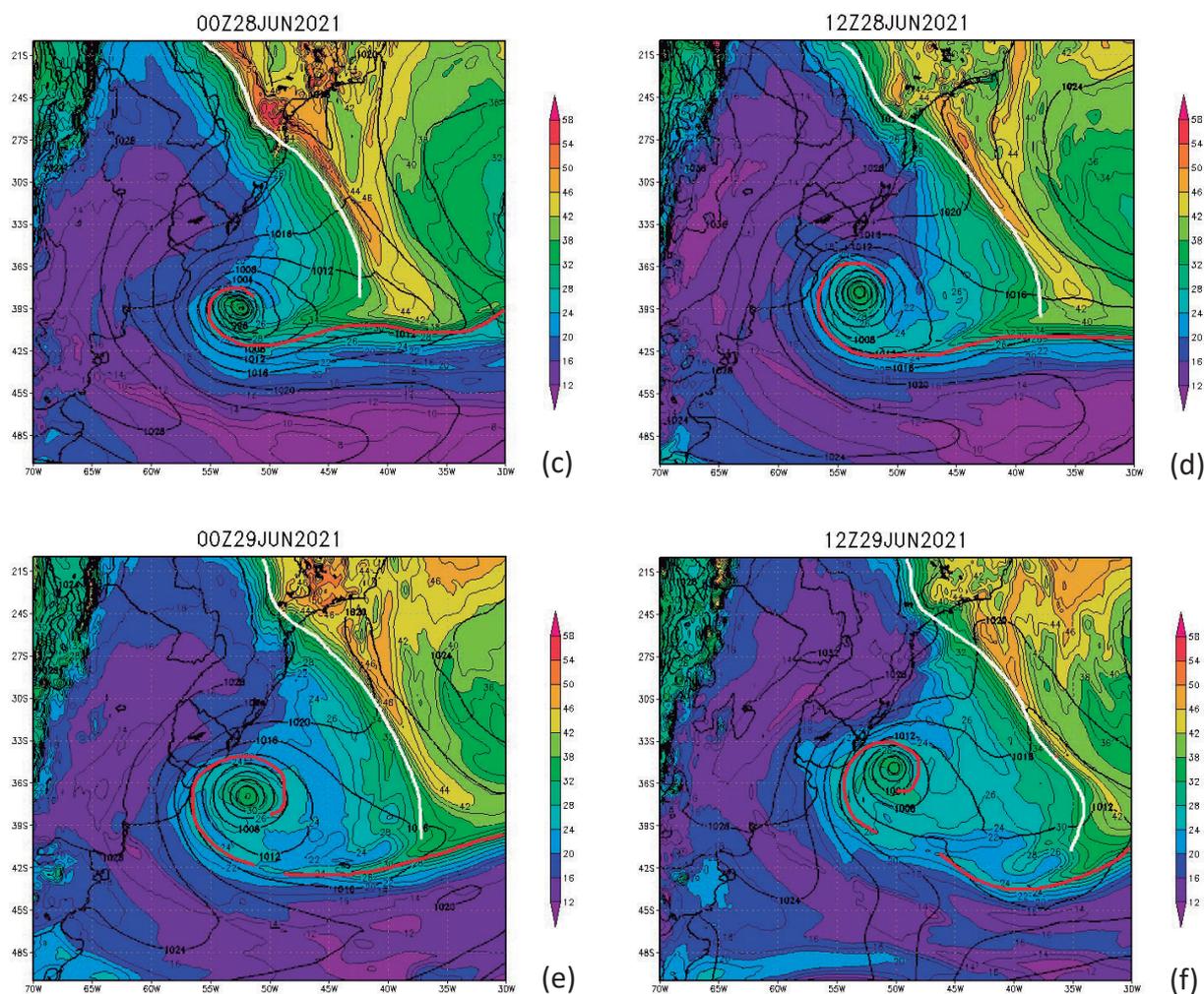


Figura 16. Pressão ao nível médio do mar (hPa) (linhas pretas) e temperatura potencial equivalente (°C) em 850 hPa (hachurado) – Reanálise ERA-5. A linha branca representa a posição da frente fria, enquanto a linha vermelha representa a posição da frente quente

Pelos diagramas de fase (Figura 17), nota-se que o ciclone ocupou o espaço dos ciclones com seclusão quente no final do dia 27 e durante o dia 28 de junho. Com o aumento progressivo da simetria do ciclone com núcleo quente raso, não era possível identificar as características de um sistema frontal nas proximidades do centro de baixa pressão, e o ciclone encontrava-se na iminência de realizar uma transição subtropical. Na noite do dia 28 de junho, de acordo com as estimativas de vento por satélite (ventos em superfície acima de 33 nós ou força 7 na

escala Beaufort), o ciclone foi classificado pelo CHM como uma Tempestade Subtropical e foi batizado como “Raoni”.

O processo de seclusão também fica nítido na sequência de cortes verticais apresentados na Figura 18. Nota-se que a estrutura quente do ciclone se isolou da região frontal, mantendo-se como uma “bolha” de ar quente e rasa no interior da massa de ar frio pós-frontal, ao contrário do primeiro caso analisado, em que o ciclone se manteve unido ao setor quente do sistema frontal.

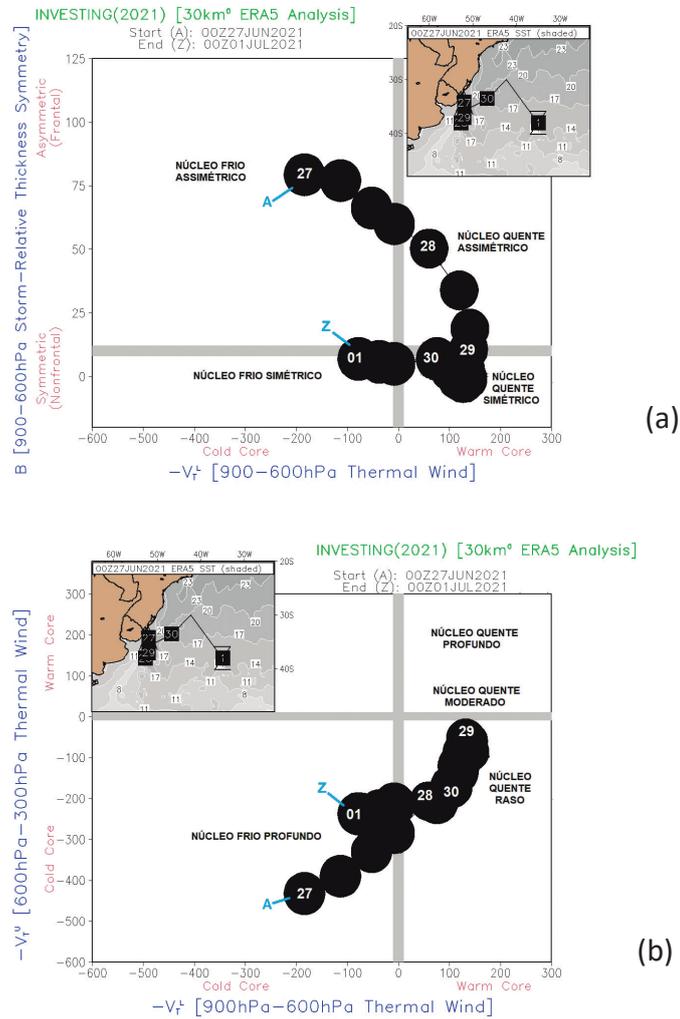
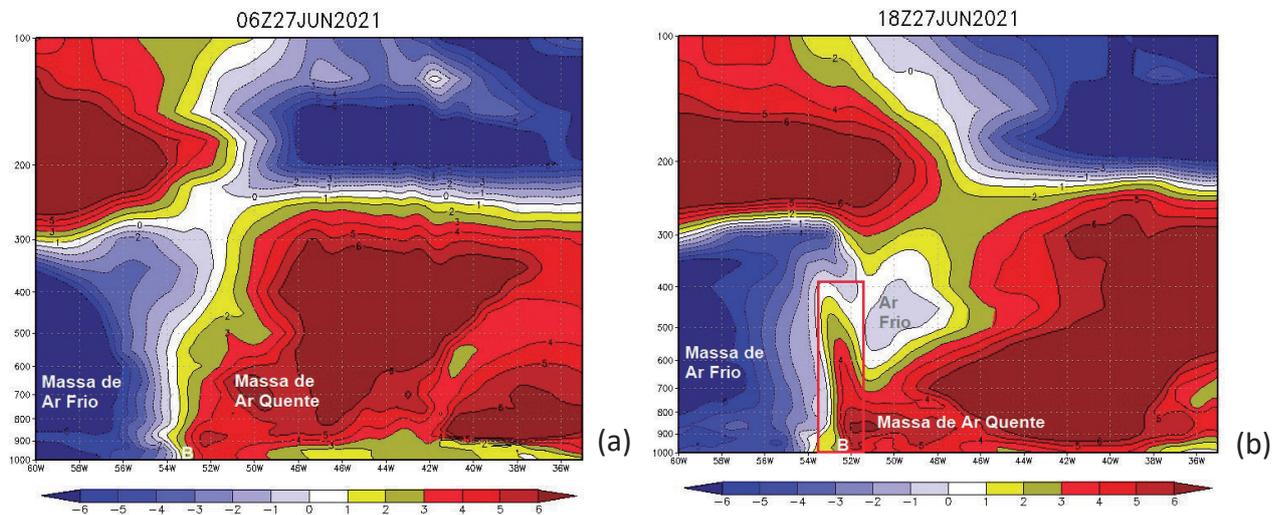


Figura 17. Diagramas de fase do ciclone com os parâmetros-VTL e B (a) e os parâmetros-VTL e-VTU (b) – Reanálise ERA-5
 Fonte: CHM



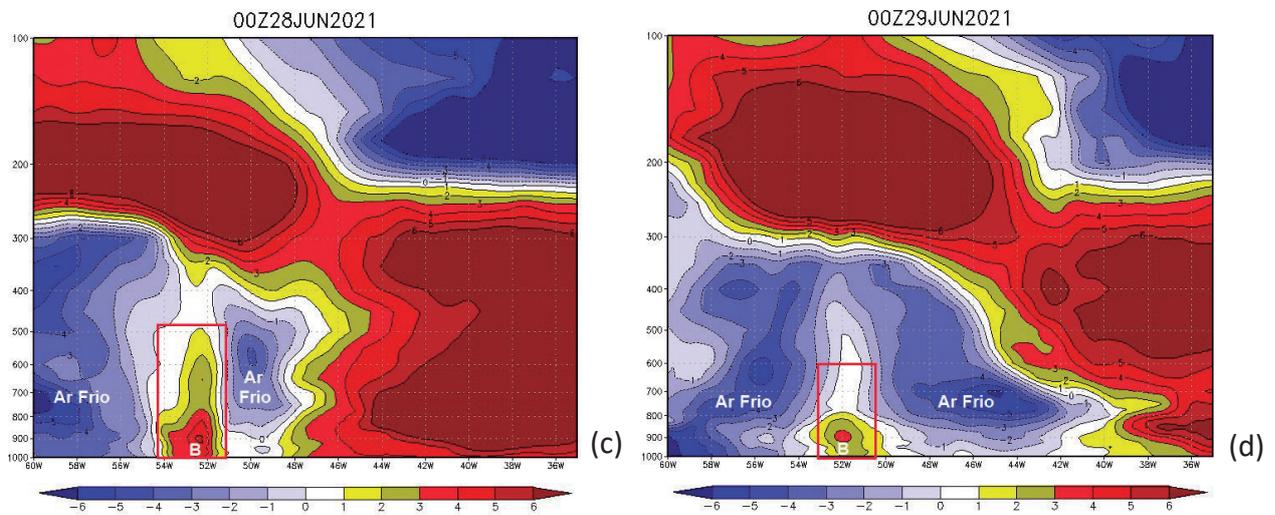


Figura 18. Cortes verticais, entre 1000 hPa e 100 hPa, da anomalia zonal de temperatura (°C) na latitude do centro do ciclone – Reanálise ERA-5. A letra “B” identifica a posição do centro da baixa do ciclone em superfície e o retângulo vermelho destaca a seclusão quente

A simetria do ciclone Raoni também pode ser constatada pelo aspecto apresentado pela cobertura de nuvens (Figura 19). Em alguns períodos, as nuvens convectivas apresentaram aparência circular simétrica e uma região central com poucas nuvens, o

que se assemelha a um olho. Essa característica mostra a organização das bandas de nuvens convectivas, cuja circulação divergente em altos níveis força a subsidência no centro do ciclone, dificultando o desenvolvimento de nuvens.

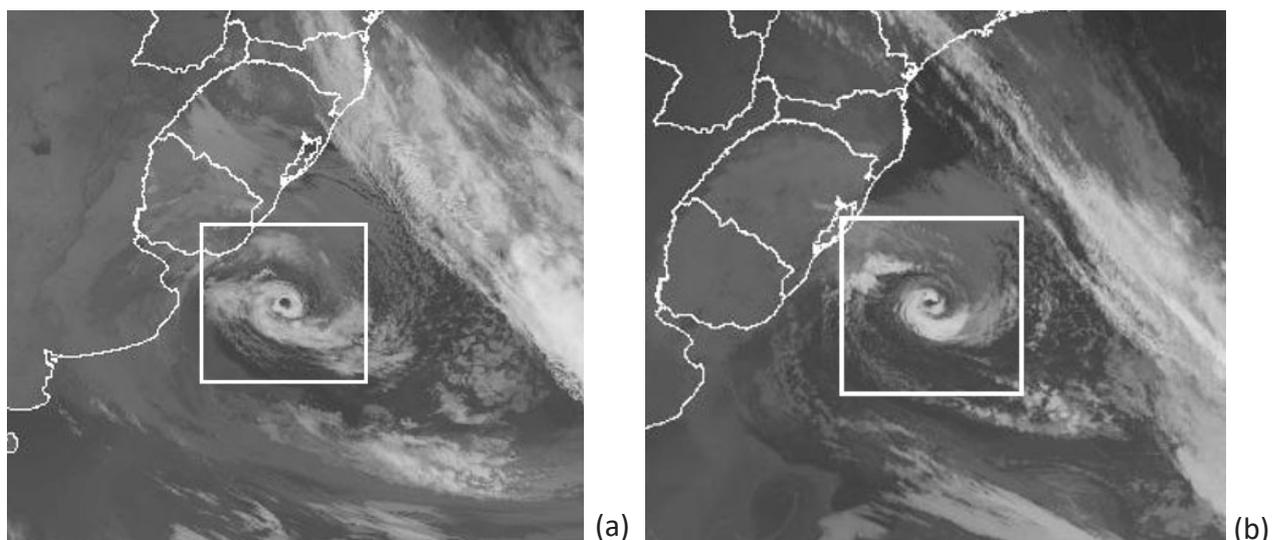


Figura 19. Imagens do satélite GOES-16 no canal infravermelho termal em (a) 29 de junho de 2021 às 0000Z e (b) 29 de junho às 2000Z. Fonte: INMET



4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As ferramentas numéricas apresentadas (campos, cortes verticais e diagramas de fase) foram suficientes para o cálculo da Taxa Normalizada de Aprofundamento da Pressão Central, a classificação dos ciclones como “bomba”, e a identificação das estruturas de um ciclone do tipo Shapiro-Keyser.

O uso de campos de temperatura potencial equivalente foi mais adequado para a análise dos sistemas frontais. Trata-se de uma variável que carrega, simultaneamente, as informações de temperatura e umidade do ar e permite distinguir as diferentes massas de ar fronteiriças. Foi adotado o nível vertical de 925 hPa, pois apresenta menor influência das irregularidades do terreno e do escoamento da camada limite planetária, mas não está demasiado distante da superfície terrestre, em torno de 800 metros de altitude. Ao se tentar utilizar o nível de 850 hPa para a mesma análise, foram observados grandes desvios do posicionamento das frentes com relação à superfície. Isso se deve à natureza baroclínica dos ciclones extratropicais, que faz com que o sistema frontal se incline em direção à massa de ar frio. Portanto, quanto maior a altitude, mais para oeste a frente fria será localizada em relação à frente em superfície. Caso seja mais conveniente, outros níveis podem ser empregados, não deixando de se levar em consideração essa defasagem do posicionamento da frente com a altitude e as influências da superfície.

Também foram empregados cortes verticais da anomalia zonal de temperatura, complementando as informações contidas nos diagramas de fase do ciclone a respeito da natureza térmica do núcleo do ciclone (quente ou frio) e sua extensão vertical. Vale ressaltar que esses cortes verticais de anomalias de temperatura podem ser complementados com as informações das anomalias zonais de altura geopotencial, que permitem identificar

claramente a inclinação do eixo do cavado e algumas características estruturais típicas de ciclones extratropicais e tropicais.

Os resultados mostraram que os dois ciclones estudados, apesar da formação semelhante, apresentaram desenvolvimentos distintos. Enquanto o ciclone de 2020 se manteve extratropical (assimétrico e frontal) durante todo o seu ciclo de vida, o ciclone de 2021 apresentou o aumento da sua simetria ao se afastar da região frontal e realizou uma transição de fase, passando de ciclone extratropical a subtropical.

As características em comum aos dois ciclones foram o desenvolvimento explosivo e a conseqüente seclusão quente, que forçou a formação de um núcleo quente restrito às camadas mais baixas da troposfera. Depois dos dois primeiros dias de desenvolvimento, os ciclones evoluíram de maneiras distintas. Conforme exposto, o modelo conceitual norueguês não permite uma perfeita análise da interação das massas de ar ao redor do ciclone de desenvolvimento explosivo. O modelo de Shapiro-Keyser é recomendado, a menos que se ignore a presença de ar quente no centro do ciclone extratropical, que, segundo a Teoria da Frente Polar, deveria ser dominado por ar frio na oclusão.

As vantagens de se adotar o modelo de Shapiro-Keyser nas análises sinóticas são as seguintes:

- Obtenção de análises mais realistas e detalhadas dos ciclones;
- Manutenção do estado da arte em análises sinóticas;
- Identificação visual de ciclones intensos e de rápido aprofundamento na carta sinótica e, conseqüentemente, a estimativa de áreas de ventos fortes e mar agitado. Normalmente, esses ciclones apresentam maiores riscos à navegação quando comparados aos ciclones que realizam a oclusão clássica;
- Maior destaque para o acompanhamento da evolução do ciclone explosivo.



Um ciclone extratropical com núcleo quente, mesmo que raso, pode se desprender da onda baroclínica que lhe deu origem e se deslocar por regiões instáveis, úmidas e com baixo cisalhamento vertical do vento. Isso favorece o desenvolvimento de nuvens convectivas mais profundas e pode intensificar o núcleo quente, aumentando o seu potencial para transições tropicais e/ou subtropicais, conforme ocorrido no segundo caso estudado.

Recomenda-se para as análises de ciclones extratropicais intensos, assim como para ciclones subtropicais e tropicais, que sejam elaborados campos numéricos específicos de diferentes níveis atmosféricos e cortes verticais que permitam averiguar a estrutura térmica tridimensional do ciclone, em complemento à utilização de imagens de satélite, de dados meteorológicos observados em superfície e dos campos numéricos convencionais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BITENCOURT, D. P.; FLUENTES, M. V.; CARDOSO, C. S. Climatologia dos Ciclones Explosivos para a Área Ciclogênica da América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v.28. n. 1, p. 43-56, 2013.

BJERKNES, J. On the structure of moving cyclones. *Geofysiske Publikasjoner*, v. 1, n. 2, p. 1-8, 1919.

BJERKNES, J., & SOLBERG, H. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geofysiske Publikasjoner*, v. 3, p. 3-18, 1922.

DOTY, B.E. & J.L. KINTER III, Visualization Techniques in Space and Atmospheric Sciences. *Geophysical Data Analysis and Visualization using GrADS*. eds. E.P. Szuszcwicz and J.H. Bredekamp, NASA, Washington, D.C., 209-219, 1995.

GAN, M. A., & RAO, V. B. Surface Cyclogenesis over South America. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. São Paulo. Brasil. p. 1293-1302, 1991.

GAN, M. A., & RAO, V. B. The Influence of the Andes Cordillera on Transient Disturbances. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. São Paulo. Brasil. p. 1141-1157, 1994.

GYAKUM, J. R. On the Evolution of the QEII Storm. I: Synoptic Aspects. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 1137-1155, 1983.

GYAKUM, J. R. On the Evolution of the QEII Storm. II: Dynamic and Thermodynamic Structure. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 1156-1173, 1983.

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

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., BIAVATI, G., HORÁNYI, A., MUÑOZ SABATER, J., NICOLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., ROZUM, I., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., SOCI, C., DEE, D., THÉPAUT, J.-N. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2018.

HOSKINS, B. J., & HODGES K. I. A New on Southern Hemisphere Storm Tracks. *Journal of Climate*. Vol. 18, 4108-4129, 2005.



HULME, A. L., & J. E. MARTIN. Synoptic-and frontal-scale influences on tropical transition events in the Atlantic basin. Part I: A six-case survey. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 3605–3625, 2009.

MATHIAS, R. S. B. Análise e Classificação de Ciclones Utilizando Diagramas de Fase: Conceitos e Aplicação em Previsão de Tempo Operacional. (Dissertação) Mestrado em Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.

MENDES, D.; SOUZA, E. P.; TRIGO, I. F.; MIRANDA, P. M. A. On precursors of South American Cyclogenesis. *Tellus*, 59A, p. 114-121, 2007.

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 América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v. 23, n. 4, 2008.

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*, 89(6), 1–27, 2011.

REBOITA, M. S. Ciclones Extratropicais Sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade. (Tese) Doutorado em Meteorologia - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P.; CUSTÓDIO, I. S. Ciclones em Superfícies em Latitudes Austrais: Parte I – Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v. 32, n. 4, 2017.

SANDERS, F., & GYAKUM, J. R. Synoptic-Dynamic Climatology of the Bomb. Department of Meteorology. Massachusetts Institute of Technology. Vol. 108, p. 1589-1606, 1980.

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.

SCHULTZ, D. M., BOSART, L. F., COLLE, B. A., DAVIES, H. C., DEARDEN, C., KEYSER, D., MARTIUS, O., ROEBBER, P. J., STEENBURGH, W. J., VOLKERT, H., & WINTERS, A. C. 2019. Extratropical Cyclones: a Century of Research on Meteorology's Centerpiece, *Meteorological Monographs*, 59, 16.1-16.56, 2019.

SCHULTZ, D. M., & VAUGHAN G. Occluded Fronts and the Occlusion Process: A Fresh Look at Conventional Wisdom, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), 443-466, 2011.

SCHULTZ, D. M., & KEYSER, D. Antecedents for the Shapiro–Keyser Cyclone Model in the Bergen School Literature, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 102(2), E383-E398, 2021.

SUDRÉ, L. Saiba o que é o Ciclone Bomba que atingiu o Sul e quais serão os impactos no Sudeste. *Brasil de Fato*. São Paulo. 1º de julho de 2020.

Disponível em: <<https://www.brasildefato.com.br/2020/07/01/saiba-o-que-e-o-ciclone-bomba-que-atingiu-o-sul-e-quais-serao-os-impactos-no-sudeste>>. Acesso em: 07 de mar. de 2022.

SHAPIRO, M. A., & KEYSER, D. Fronts, Jet Streams, and the Tropopause. *Extratropical Cyclones. The Eric Palmén Memorial Volume*, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Amer. Meteor. Soc., 167-191, 1990.