



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS**

**ANÁLISE SINÓTICA E DE GRANDE ESCALA DE ONDAS DE FRIO EXTREMAS NO
SUDESTE DO BRASIL NO SÉCULO XX**

DISSERTAÇÃO

Bruno César Capucin

Itajubá, MG, Brasil

2021

**ANÁLISE SINÓTICA E DE GRANDE ESCALA DE ONDAS DE FRIO EXTREMAS NO
SUDESTE DO BRASIL NO SÉCULO XX**

por

Bruno César Capucin

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte das exigências obrigatórias para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Clima e Sustentabilidade

**Itajubá, MG, Brasil
2021**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS

**ANÁLISE SINÓTICA E DE GRANDE ESCALA DE ONDAS DE FRIO EXTREMAS NO
SUDESTE DO BRASIL NO SÉCULO XX**

Por

Bruno César Capucin

À Banca Examinadora composta pelos membros

Prof^a Dr^a Michelle Simões Reboita (Orientadora)
Universidade Federal de Itajubá

Prof. Dr. Gustavo Carlos Juan Escobar (Coorientador)
Divisão de Previsão de Tempo e Clima

Prof. Dr. Enrique Vieira Mattos
Universidade Federal de Itajubá

Prof^a Dr^a Marta Pereira Llopart
Universidade Estadual Paulista

Dr^a Ana Carolina Nóbile Tomaziello
Universidade de São Paulo

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força e sabedoria durante as dificuldades nesses dois anos de mestrado. A minha família que sempre apoiou a minha jornada até aqui, em especial aos meus pais Raul e Cida, assim como o meu irmão Thiago e a minha cunhada Michelle.

Agradeço também a minha orientadora Prof^a Michelle Reboita por contribuir com o seu conhecimento neste trabalho, pelo seu acolhimento, paciência e por todos os nossos momentos juntos. Ao coorientador Dr. Gustavo Escobar pelo ensinamento que auxiliou no desenvolvimento dessa pesquisa. Aos amigos Bruna Andreлина, Thales Teodoro, Lara Marques e Vitor Marrafon pelos momentos de ajuda e distração, fundamentais durante a minha estadia na cidade de Itajubá.

Agradeço ainda ao programa de mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Itajubá e ao corpo docente por todo conhecimento transmitido nas disciplinas, e por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 pelo auxílio financeiro que propiciou a realização desse estudo.

RESUMO

CAPUCIN, Bruno César. **Análise sinótica e de grande escala de ondas de frio extremas no Sudeste do Brasil no século XX**. 2021. 58 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.

O século XX foi marcado por várias ondas de frio intensas no Brasil. Devido aos impactos dos extremos frio para a saúde pública e agricultura, este trabalho teve como objetivo investigar 12 episódios ocorridos no Sudeste do Brasil entre os anos de 1961 e 2017, além de um estudo de caso para um desses eventos, que ocorreu no ano de 1985, devido a sua magnitude e duração. Para tanto, utilizaram-se os dados da reanálise do ERA20-C a fim de elaborar os campos sinóticos, composições e para a aplicação do *ray tracing*. Com relação aos padrões sinóticos dos 12 eventos, há uma similaridade da estrutura das ondas na atmosfera superior que, em geral, apresentam cristas amplificadas no oceano Pacífico Leste e cavados amplificadas sobre a América do Sul (AS). Esse padrão de onda é importante para direcionar o escoamento de sul para norte nos baixos níveis, gerando advecção horizontal fria na Região Sudeste. As composições da anomalia da altura geopotencial em 250 hPa mostram um trem de ondas de Rossby que parte do centro-leste do oceano Pacífico Sul em direção a AS dois dias antes do máximo extremo frio no local de estudo. A análise do *ray tracing* corrobora com as composições e revela que a região fonte das ondas planetárias de número 2 e 3 é a parte centro-leste do oceano Pacífico Sul. Sugere-se que as cristas que se amplificam do oceano Pacífico Leste em direção à Patagônia e, posteriormente, para o oceano Atlântico Sudoeste, são uma resposta aos eventos da quebra da onda de Rossby que ocorrem nas longitudes da AS. Os resultados obtidos para a onda de frio de 1985 mostram que a amplificação de uma longa já existente sobre o continente sul-americano contribuiu para um padrão de bloqueio, o que explica os dias consecutivos de advecção fria no Centro-Sul do Brasil e, consequentemente, na Região Sudeste. Isso porque, a estrutura de bloqueio nas longitudes da AS - forçada a partir de uma perturbação no trem de ondas do Hemisfério Sul (HS) gerada no oceano Índico - estabeleceu um campo bórico dipolo no oceano Atlântico Sudoeste, caracterizado por uma alta de bloqueio nas Ilhas Malvinas e uma baixa pressão na costa leste da Região Sul do Brasil. A atuação de ambos os sistemas intensificou o gradiente de pressão que direcionou os ventos de sul/sudeste no interior do continente por vários dias. A persistência dessa configuração atmosférica gerou recordes de temperaturas mínimas e uma ampla área coberta por geada em diversos estados, incluindo o registro de neve no Pico das Agulhas Negras, dentro do Parque Nacional de Itatiaia.

Palavras-chave: Onda de frio; Sinótica; Circulação Atmosférica.

ABSTRACT

CAPUCIN, Bruno César. Synoptic and large-scale analysis of extreme cold waves in southeastern Brazil in the 20th century. 2021. 58 f. Dissertation (Master in Environment and Water Resources) - Institute of Natural Resources, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2021.

The 20th century was marked by several intense cold waves in Brazil. Due to the impacts of cold extremes on public health and agriculture, this study aimed to investigate 12 episodes that occurred in Southeast Brazil between the years 1961 and 2017. In addition, we performed a case study for one of these events, which occurred in 1985, due to its magnitude and duration.

For this purpose, the ERA20-C reanalysis data was used in order to elaborate the synoptic fields, compositions and for the application of ray tracing. Regarding the synoptic patterns of the 12 events, there is a similarity in the structure of the waves in the upper atmosphere, which, in general, present ridges amplified in the East Pacific Ocean and amplified troughs over South America (SA). This wave pattern is important to direct the flow from south to north at low levels, generating cold horizontal advection in the Southeast Region. Compositions of the 250 hPa geopotential height anomaly show a Rossby wave train that departs from the center-east of the South Pacific Ocean towards SA two days before the extreme cold at the study site. The ray tracing analysis confirm the compositions and reveals that the source region of the number 2 and 3 planetary waves is the central-eastern part of the South Pacific Ocean. It is suggested that the ridges that amplify from the East Pacific Ocean towards the Patagonia and, later, to the Southwest Atlantic Ocean, are a response to the events of the Rossby wave break that occur in the AS longitudes. The results obtained for the 1985 cold wave show that the amplification of an existing long wave over the South American continent contributed to a blocking pattern, which explains the consecutive days of cold advection in the Center-South of Brazil and, consequently, in the Southeast Region. This is because the blocking structure in the longitudes of the SA - forced from a disturbance in the wave train of the Southern Hemisphere (SH) generated in the Indian Ocean - established a dipole baric field in the Southwest Atlantic Ocean, characterized by a high block in the Falkland Islands and low pressure on the east coast of the South Region of Brazil. The performance of both systems intensified the pressure gradient that directed the south/southeast winds in the interior of the continent for several days. The persistence of this atmospheric configuration has generated records of minimum temperatures and a wide area covered by frost in several states, including the snow record at Pico das Agulhas Negras, within the Itatiaia National Park.

Keywords: Cold Wave; Synoptic; Atmospheric Circulation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** Região onde as fontes de trajetórias de ondas de Rossby foram testadas (retângulo azul) e região usada para selecionar as trajetórias destas ondas associadas aos eventos de frio estudados (retângulo verde)..... 17
- Figura 2** Corrente de jato em cores (m/s) e altura geopotencial para o nível de 250 hPa em linhas contínuas em roxo (m_{gp}), pressão ao nível médio do mar em linhas contínuas em preto (hPa), espessura da camada 850/1000 hPa em linhas tracejadas (m), sistemas de alta (A) e baixa (B) pressão e sistemas frontais, onde as linhas com triângulos azuis equivalem as frentes frias, linhas com semicírculos vermelhos as frentes quentes, linhas com triângulos e semicírculos roxos as frentes oclusas e linhas com triângulos azuis e semicírculos vermelhos as frentes estacionárias às 1200 Z do dia de pico do extremo frio dos 12 casos em estudo: a) 21/08/1965, b) 09/07/1972, c) 18/07/1975, d) 15/08/1978, e) 01/06/1979, f) 21/07/1981, g) 08/06/1985, h) 08/08/1987, i) 05/06/1988, j) 27/06/1994, k) 10/07/1994 e l) 17/07/2000. 20
- Figura 3** Advecção horizontal de temperatura em cores para 1000 hPa ($^{\circ}\text{K/s}$)*10 – 4, altura geopotencial em 500 hPa em linhas contínuas e vento em 1000 hPa (m/s) às 1200 Z para os mesmos dias da Figura 2. 21
- Figura 4** Temperatura do ar em 2 metros em cores ($^{\circ}\text{C}$), vento em 1000 hPa e pressão ao nível médio do mar em linhas brancas contínuas às 1200 Z para os mesmos dias da Figura 2. 24
- Figura 5** Umidade específica em cores (kg/kg), isoterma de 0°C em linha azul tracejada e vento em 850 hPa às 1200 Z para os mesmos dias da Figura 2. 25
- Figura 6** Composição da anomalia da altura geopotencial (gpm) no nível de 250 hPa (painel: esquerdo) e 850 hPa (painel direito) às 1200 Z para os dias -2, -1, 0, 1 e 2 das 12 ondas de frio (1961 a 2017), juntamente com o teste t-Student em hachurado com 95% de confiança. A seta nos painéis (a), (b), (c) e (d) indicam o trem de ondas de Rossby. 28
- Figura 7** Trajetória preferencial das ondas de Rossby de número 2 (a) e 3 (b) a partir do estado básico dos ventos de oeste para os 12 casos..... 29
- Figura 8** Corrente de jato em cores (m/s) e altura geopotencial no nível de 250 hPa em linhas contínuas em roxo (m_{gp}), pressão ao nível médio do mar em linhas contínuas em preto (hPa), espessura da camada 850/1000 hPa em linhas tracejadas (m), sistemas de alta (A) e baixa (B) pressão e sistemas frontais, onde as linhas com triângulos azuis indicam as frentes frias, linhas com semicírculos vermelhos as frentes quentes, linhas com triângulos e semicírculos roxos as frentes oclusas e linhas com triângulos azuis e semicírculos vermelhos as frentes estacionárias às 1200 Z para os dias: a) 01/06/1985, b) 02/06/1985, c) 03/06/1985, d) 04/06/1985, e) 05/06/1985, f) 06/06/1985, g) 07/06/1985, h) 08/06/1985, i) 09/06/1985, j) 10/06/1985, k) 11/06/1985, l) 12/06/1985. 40
- Figura 9** Anomalia de altura geopotencial em cores (m_{gp}) e altura geopotencial em linhas contínuas em m_{gp} ao nível de 500 hPa para o mesmo horário sinótico e datas apresentadas na Figura 8..... 45

Figura 10 Anomalia da pressão ao nível médio do mar em cores (hPa) e pressão ao nível médio do mar em linhas contínuas em hPa para o mesmo horário sinótico e datas apresentadas na Figura 8.	46
Figura 11 Anomalia da temperatura em 2 metros em cores (°C) e pressão ao nível médio do mar em linhas contínuas em hPa para o mesmo horário sinótico e datas apresentadas na Figura 8.	47
Figura 12 Corrente de jato em cores (m/s) e altura geopotencial em 250 hPa (m _{gp}). As linhas tracejadas em amarelo se referem ao eixo dos cavados, enquanto as linhas cerradas em verde ao eixo das cristas.	51

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	11
CAPÍTULO I	12
1.1 INTRODUÇÃO.....	12
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	14
1.2.1 IDENTIFICAÇÃO DOS PADRÕES SINÓTICOS DE CADA ONDA DE FRIO	14
1.2.2 DEFINIÇÃO DOS PADRÕES MÉDIOS ANÔMALOS DA CIRCULAÇÃO DE GRANDE ESCALA ASSOCIADA AOS 12 EVENTOS	15
1.2.3 <i>RAY TRACING</i>	17
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
1.3.1 ANÁLISE SINÓTICA INDIVIDUAL DOS 12 CASOS	18
1.3.2 ANÁLISE DOS PADRÕES MÉDIOS DE GRANDE ESCALA.....	26
1.3.3 TRAJETÓRIA DAS ONDAS DE ROSSBY PARA OS 12 CASOS	27
1.4 CONCLUSÃO.....	29
1.5 AGRADECIMENTOS	30
1.6 REFERÊNCIAS.....	30
CAPÍTULO II.....	34
2.1 INTRODUÇÃO.....	34
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	36
2.2.1 CAMPOS DE ANOMALIA.....	37
2.2.2 DOMÍNIO DA ANÁLISE	37
2.2.3 REGISTRO HISTÓRICO.....	37
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
2.3.1 ANÁLISE SINÓTICA.....	38
2.3.2 PADRÕES DE GRANDE ESCALA	49
2.4 CONCLUSÃO.....	51
2.5 AGRADECIMENTOS	53
2.6 REFERÊNCIAS.....	53
CONCLUSÃO GERAL	57
REFERÊNCIAS GERAIS	58
ANEXOS	60

INTRODUÇÃO GERAL

Durante o inverno austral, o Brasil é influenciado por intensas massas de ar polar que por vezes configuram ondas de frio. A definição desse fenômeno compreende o período de alguns dias de forte resfriamento do ar que excede limiares climatológicos de temperaturas mínimas para uma dada região (OMM, 2016). Entender os processos da circulação atmosférica responsáveis pelas ondas de frio é importante para medidas mitigadoras, sobretudo em setores do país que são impactados pelo frio, como o da agricultura (MARENGO et al., 1997). No entanto, fortes episódios de resfriamento podem resultar em problemas de saúde pública em função do aumento das doenças do sistema respiratório, especialmente nas crianças e idosos (SILVEIRA, 2018).

Ao longo do século XX, várias incursões de ar polar trouxeram recordes de frio ao Brasil, inclusive com episódios de geadas abrangentes e neve em partes do Sul e até da Região Sudeste, como em junho de 1985. No inverno de 1994 a produção de café no Sudeste teve prejuízos com a geada daquele ano (MARENGO et al., 1997).

Tendo em vista que a Região Sudeste é a mais populosa (AGÊNCIA BRASIL, 2019) do país e um importante polo agrícola na produção de laranja, cana-de-açúcar e soja (EDUCA+BRASIL, 2019), por exemplo, o objetivo desse trabalho é complementar o conhecimento a respeito dos padrões de circulação atmosférica responsáveis pelos extremos frios que atingiram a região entre os anos de 1961 a 2017.

Deste modo, o presente estudo está dividido em 2 capítulos. O capítulo 1 busca investigar os padrões atmosféricos individuais das ondas de frio ocorridas entre 1961 e 2017, além dos padrões médios anômalos de todos os casos e a região de origem das ondas de frio (método *ray tracing*). Já no capítulo 2 realizou-se um estudo de caso objetivando a compreensão da configuração atmosférica responsável pela onda de frio de 1985, que foi marcada por sua grande magnitude e longevidade.

Para ambos os estudos utilizaram-se a reanálise ERA20-C (POLI et al., 2016), do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. A escolha dessa reanálise esteve baseada no fato de ser uma das poucas que possuem dados antes de 1979.

CAPÍTULO I

ANÁLISE SINÓTICA E DE GRANDE ESCALA DE ONDAS DE FRIO EXTREMAS NO SUDESTE DO BRASIL NO SÉCULO XX

1.1 INTRODUÇÃO

Devido a sua grande extensão latitudinal (12°N a 55°S), o continente sul-americano apresenta uma diversidade de relevos, climas e biomas (REBOITA et al., 2010). Grande parte das terras da AS estão localizadas no trópico e no território brasileiro. Nesse setor, encontra-se a Região Sudeste do Brasil. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima predominante no Sudeste é o AW - tropical chuvoso com inverno seco (KOTTEK et al., 2006). Este tipo climático é reflexo da atuação de um sistema de monção. Vários estudos (ZHOU; LAU, 1998; REBOITA et al., 2010; MARENGO et al., 2012; CARVALHO; CAVALCANTI, 2016; ASHFAQ et al., 2020) descrevem as características do sistema de monção da AS (SMAS). O SMAS modula o regime de precipitação principalmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Sua característica mais marcante é a presença de uma banda de nebulosidade e chuvas com orientação noroeste-sudeste que se estende desde a Região Norte, passando pela Região Sudeste, até o oceano Atlântico Sul (SILVA et al., 2019), o que corresponde à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Durante o inverno do HS, tem-se o período seco do SMAS e é comum a passagem de massas de ar frio na AS, sendo que algumas conseguem penetrar o Centro-Sul brasileiro. Em geral, é nessa época do ano que há maior frequência de frentes polares na Região Sudeste (ESCOBAR et al., 2019). Esse ar frio em alguns casos também alcança o sul da Região Norte reduzindo a temperatura do ar, o que caracteriza o fenômeno friagem (OLIVEIRA et al., 2004). Já nos estados do Sul, Sudeste e Centro-Oeste, há um forte resfriamento do ar e até a ocorrência de geadas (SATYAMURTY et al., 2002). Em casos particulares, também se verifica precipitação invernal nas partes serranas do Sul, incluindo a neve (DOLIF NETO et al., 2016). Alguns destes episódios de resfriamento são denominados ondas de frio. Segundo a definição geral da Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2016), uma onda de frio corresponde a um período de forte resfriamento do ar próximo à superfície e cobrindo uma vasta área, de modo que as temperaturas fiquem abaixo de certos limiares climatológicos por alguns dias.

Existem diferentes metodologias baseadas em índices para a identificação das ondas de frio. Alves et al. (2017) compilaram algumas das metodologias e as aplicaram no estado de

Santa Catarina. Entre essas metodologias, destaca-se a de Nairn e Fawcett (2011), que consideram uma onda de frio quando a temperatura do ar de uma determinada região, permanece abaixo do percentil de 5% da série histórica considerada por pelo menos 3 dias consecutivos.

Entender e prever as ondas de frio é fundamental para o preparo da sociedade diante dos impactos associados, tais como surto de doenças respiratórias que podem ocorrer com pessoas mais vulneráveis, como crianças e idosos (SILVEIRA et al., 2018), prejuízos econômicos na agricultura devido às geadas (MARENGO et al., 1997) e até óbitos dos moradores de rua (AGÊNCIA BRASIL, 2019). Apesar dos inconvenientes, cidades como Campos do Jordão (SP) e São Joaquim (SC), por exemplo, lucram com o turismo de inverno. Enquanto alguns setores lucram, outros têm impactos negativos, como o da agricultura que possui um histórico de prejuízos em decorrência das geadas. Um dos casos mais severos no Brasil ocorreu na década de 1970 (GIRARDI, 1983), quando uma incursão de ar polar atingiu o continente e acabou com a produção dos cafezais do Paraná devido à geada negra (geada que congela a água no interior dos vegetais). A Região Sudeste também já registrou muitas perdas nessa cultura devido às ondas de frio. Em junho de 1994, o frio intenso que atingiu o Sudeste do país reduziu a produção do café, o que contribuiu para o aumento do preço deste produto (MARENGO et al., 1997).

As ondas de frio podem ser estudadas em diferentes escalas, como a grande escala, associada à propagação de ondas, e a escala sinótica, que permite à caracterização dos eventos. Estudos em escala sinótica têm mostrado os padrões associados a fortes incursões frias no continente sul-americano. Reboita et al. (2015), por exemplo, utilizaram a análise de componentes principais para os dados da pressão em superfície e altura geopotencial em 500 hPa, a fim de identificar características da circulação durante ondas de frio que atuaram no sul de Minas Gerais de maio a setembro entre os anos de 1965 a 2014. O principal modo de variabilidade encontrado é constituído por uma onda amplificada em 500 hPa. Enquanto a crista associada está no Pacífico sul, o cavado a jusante se encontra entre a AS e o oceano Atlântico. Acompanhando esse padrão de nível superior, em superfície um anticiclone pós-frontal se desloca do oceano Pacífico para o cone-sul da AS, ao mesmo tempo que um ciclone se desenvolve no oceano Atlântico. A interação desses sistemas favorece a advecção horizontal do ar frio para o norte, que ajuda a propagar uma extensa frente fria em direção às latitudes subtropicais e tropicais da AS. Os padrões descritos por Reboita et al. (2015) também são observados em Escobar (2007).

Intensas ondas de frio podem também estar em um contexto mais complexo da circulação atmosférica, sendo parte dos processos de teleconexão, decorrentes das variabilidades de baixa frequência. O termo teleconexão refere-se a padrões de anomalias num dado local do globo e que são responsáveis pela dispersão de ondas atmosféricas, que, por sua vez, alteram a temperatura e o regime de precipitação em locais distantes (LIU; ALEXANDER, 2007; SHIMIZU; CAVALCANTI, 2011). Dentre os principais modos de variabilidade responsáveis pelos processos teleconectivos com impactos na circulação extratropical do HS estão o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), Oscilação Madden-Julian (OMJ), Oscilação Antártida (OA) e o Pacific South America (PSA).

Marengo et al. (2002) estudaram o comportamento da circulação no HS durante invernos rigorosos na Região Sul e Sudeste do Brasil entre os anos de 1979 a 1998. Cerca de 12 dias antes do auge do frio no Brasil, um duplo trem de ondas se organiza do oceano Pacífico (próximo da Austrália) em direção à AS em formato de arco, embebido no jato subtropical e polar. Entretanto, as ondas entram em fase na parte oriental do oceano Pacífico e sobre o continente sul-americano, resultando em extensas áreas de anomalias da circulação e num escoamento gélido de sul sobre áreas subtropicais e tropicais da AS, padrão semelhante ao descrito por Müller e Berri (2012).

Tendo em vista que a maioria dos estudos sobre ondas de frio se detêm ao sul do Brasil ou região dos Pampas argentinos, Lucyrio et al. (2019) buscaram complementar o conhecimento desses sistemas em episódios que afetaram o estado de São Paulo. Os autores elaboraram uma metodologia para identificar as ondas de frio mais fortes já registradas no centro-norte do estado de São Paulo entre 1961 e 2017. Utilizando um percentil muito restritivo de 0,2%, os autores encontraram 12 casos extremos de frio no estado paulista que se concentram entre os anos de 1961 a 2000, inclusive com registro de geadas em todos eles.

Diante dos impactos já mencionados anteriormente dos extremos frio para a agricultura e a saúde pública, o presente trabalho tem por objetivo complementar o estudo de Lucyrio et al. (2019) através de uma descrição sinótica e dos padrões da circulação de grande escala associados à ocorrência dos 12 eventos de ondas de frio (1961 a 2017) na Região Sudeste do Brasil, que neste estudo se limita ao estado de São Paulo e sul de Minas Gerais.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Identificação dos padrões sinóticos de cada onda de frio

A fim de descrever o padrão sinótico (localização das regiões com alta e baixa pressão, por exemplo) de cada um dos 12 eventos extremos de frio identificados por Lucyrio

et al. (2019) no estado de São Paulo, utilizou-se o banco de dados da reanálise ERA20-C (POLI et al., 2016), do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, por ser um dos poucos que possuem dados antes de 1979. Os dados utilizados neste estudo possuem resolução horizontal de $0,75^\circ$ e 6 níveis verticais (superfície, 1000, 850, 500, 300 e 250 hPa) para os 4 horários sinóticos (0000, 0600, 1200 e 1800 Z). Nessa etapa, o domínio da análise corresponde à área da AS (60°S a 5°N e 100°O a 10°O). As variáveis utilizadas são: temperatura do ar, vorticidade relativa, vorticidade potencial, geopotencial, componentes zonal e meridional do vento, pressão ao nível médio do mar e umidade específica. A partir destas variáveis primárias, calcularam-se as variáveis secundárias como advecção horizontal de temperatura, advecção horizontal de vorticidade relativa, espessura da camada e altura geopotencial. Essas equações podem ser encontradas em Holton (1973), Wallace e Hobs (2006) e Capucin et al. (2019). Embora a análise tenha levado em conta todos os horários sinóticos, por motivos de brevidade nos resultados são apresentados apenas o horário das 1200 Z, uma vez que neste horário sinótico existe uma maior disponibilidade de dados observados e que são assimilados nas reanálises, como os dados de radiossonda.

1.2.2 Definição dos padrões médios anômalos da circulação de grande escala associada aos 12 eventos

Realizou-se uma investigação nos padrões médios anômalos da circulação do HS, cujo o domínio de estudo para as 12 ocorrências de ondas de frio corresponde a 90°S a 5°N e de 180°O a 180°L (Figura 1). Estudos como o de Müller e Berri (2012) mostram que a componente meridional do vento e a altura geopotencial nos altos níveis da troposfera permitem visualizar as ondas de Rossby responsáveis por eventos extremos como ondas de frio. No intuito de detectar as anomalias da circulação de grande escala, elaborou-se a climatologia diária dessas variáveis para os meses de inverno (junho, julho e agosto) de 1961 a 2017, uma vez que Lucyrio et al. (2019) detectaram ondas de frio extremas nesse período. Posteriormente, geraram-se os campos das anomalias diárias da circulação para os meses dos anos que se registraram as fortes incursões frias. Salienta-se que apenas o horário das 1200 Z foi utilizado nos cálculos da climatologia e anomalia diária (mesmo motivo descrito na Seção 2.1), sendo que a anomalia (A) foi obtida de acordo com: $A = X_i - \bar{X}$ em que X_i é a variável em um dado dia às 1200 Z e \bar{X} é a climatologia da variável em um dado dia às 1200 Z.

De posse das anomalias diárias (às 1200 Z) das variáveis, selecionaram-se os dias -2, -1, 0, 1 e 2 para construção das composições das 12 ondas de frio (Tabela 1), seguindo a mesma metodologia de Müller e Berri (2012) com relação aos dias das composições, onde o

dia 0 corresponde ao dia de pico do extremo frio, isto é, o dia em que a média da anomalia da temperatura mínima diária foi a menor para cada evento. Os valores de anomalia da temperatura foram obtidos das estações meteorológicas do centro-norte do estado de São Paulo e sul de Minas Gerais, conforme o estudo de Lucyrio et al. (2019).

Tabela 1 Datas das 12 ondas de frio extremas ocorridas entre 1961 a 2017 e a relação com os dias utilizados para as composições. Fonte: adaptado de Lucyrio et al. (2019).

Ano	Dia -2 Composição	Média Ano. Temp. Mín.	Dia -1 Composição	Média Ano. Temp. Mín.	Dia 0 Composição	Média Ano. Temp. Mín.	Dia 1 Composição	Média Ano. Temp. Mín.	Dia 2 Composição	Média Ano. Temp. Mín.
1965	19/ago	1.7	20/ago	-5.4	21/ago	-12.9	22/ago	-8.8	23/ago	-6.7
1972	07/jul	2.1	08/jul	-6.8	09/jul	-10.9	10/jul	-5.7	11/jul	-4.5
1975	16/jul	1.6	17/jul	-7.6	18/jul	-12.4	19/jul	-10.0	20/jul	-5.1
1978	13/ago	-1.7	14/ago	-5.1	15/ago	-11.5	16/ago	-10.4	17/ago	-6.7
1979	30/mai	-6.4	31/mai	-12.3	01/jun	-12.7	02/jun	-7.9	03/jun	-3.7
1981	19/jul	-3.3	20/jul	-7.6	21/jul	-13.7	22/jul	-10.3	23/jul	-4.3
1985	06/jun	-5.6	07/jun	-7.7	08/jun	-11.5	09/jun	-10.7	10/jun	-9.7
1987	06/ago	0.2	07/ago	-6.5	08/ago	-10.8	09/ago	-8.2	10/ago	-3.5
1988	03/jun	-1.6	04/jun	-4.9	05/jun	-11.2	06/jun	-8.7	07/jun	-1.4
1994	25/jun	-2.5	26/jun	-11.7	27/jun	-12.7	28/jun	-9.9	29/jun	-7.3
1994	08/jul	1.1	09/jul	-6.9	10/jul	-12.5	11/jul	-7.9	12/jul	-4.0
2000	15/jul	-0.8	16/jul	-2.7	17/jul	-11.9	18/jul	-10.4	19/jul	-6.4

A fim de saber se a diferença entre a média dos 12 eventos de ondas de frio (amostra) e a média do conjunto de todos os dados (população) é estatisticamente significativa, calculou-se o teste t-Student (STEVENSON, 1981). Os dados utilizados nesta etapa também são para às 1200 Z. A estatística é calculada de acordo com a equação a seguir, onde \bar{X}_{am} é a média da amostra para os dias das composições (-2, -1, 0, 1, 2), \bar{X}_{pop} é a média da população (junho, julho e agosto de 1961 a 2000), S_{am} é o desvio padrão da amostra, S_{pop} é o desvio padrão da população, n_{am} o grau de liberdade da amostra e n_{pop} o grau de liberdade da população.

$$t = \frac{\bar{X}_{am} - \bar{X}_{pop}}{\sqrt{\frac{S_{am}^2}{n_{am}} + \frac{S_{pop}^2}{n_{pop}}}}$$

Neste trabalho foi considerado o teste bi-lateral com nível de significância de $\alpha = 0.05$ (95% de confiança), onde a hipótese nula (H_0) equivale a médias iguais entre os dois grupos de dados (amostra e população), enquanto a hipótese alternativa (H_1) se refere ao oposto. A hipótese H_0 é rejeitada para $-2.201 > t > 2.201$, isto é, quando $|t| > 2.201$ a hipótese H_1 é aceita.

1.2.3 Ray tracing

Para a obtenção das trajetórias das ondas de Rossby associadas às 12 ondas de frio, utilizou-se a metodologia do *ray tracing* (AMBRIZZI et al., 2014; REHBEIN et al., 2020). Para isso é utilizado o vento médio zonal em 250 hPa com intervalo de 6 horas (0000, 0600, 1200 e 1800 Z) do ERA-20C com 2.5° de espaçamento horizontal (POLI et al., 2016). Este dado possui resolução mais grosseira que aquela utilizada nas análises sinóticas para evitar interferências do sinal dos fenômenos de menor escala durante o rastreamento.

O *ray tracing* permite investigar a trajetória seguida pelas ondas de Rossby a partir de diversas fontes e diferentes condições iniciais. No presente experimento, foram rastreadas todas as ondas geradas nos pontos de grade da região delimitada pelo retângulo azul na Figura 1 (50°E - 110°W / 60°S - 10°S) com distanciamento de $2,5^\circ$ entre os pontos, tempos totais de integração de 3, 4, 5 e 7 dias e números de onda total (K) 2, 3 e 4. Após o rastreamento, as trajetórias das ondas que em algum momento cruzaram a região de interesse delimitada pelo retângulo verde na Figura 1 (60°W - 40°W / 30°S - 10°S), foram selecionadas. No final, foram selecionadas as trajetórias das ondas de Rossby com $K=2$ e $K=3$, pois o objetivo é investigar ondas planetárias que estão no contexto das ondas de frio, além de 5 dias de integração. Acima de 5 dias, os traçados de ondas se deslocam muito ao norte da região de interesse (distantes da caixa verde na Figura 1) e abaixo disso, ficam muito a sul ou não alcançam a região de interesse. Para o cálculo do *ray tracing* é utilizada uma ferramenta desenvolvida na linguagem R (R CORE TEAM, 2020) disponível no repositório oficial do R (CRAN - <https://cran.r-project.org/web/packages/raytracing/index.html>; mais informações em github.com/salvatirehbein/raytracing).

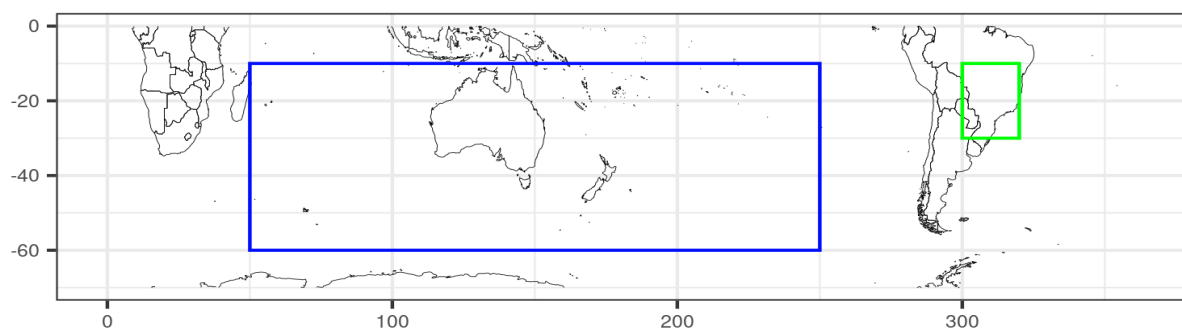


Figura 1 Região onde as fontes de trajetórias de ondas de Rossby foram testadas (retângulo azul) e região usada para selecionar as trajetórias destas ondas associadas aos eventos de frio estudados (retângulo verde).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Análise sinótica individual dos 12 casos

As ondas de frio aqui estudadas foram aquelas que causaram episódios frios entre São Paulo e o sul de Minas Gerais e que foram previamente identificadas no estudo de Lucyrio et al. (2019). Portanto, “pico da onda de frio” se refere ao dia com maior queda de temperatura (menor média da anomalia da temperatura mínima) produzida pela onda de frio na região em estudo. Por brevidade, aqui só serão apresentados os campos sinóticos do dia do pico do extremo frio para cara um dos 12 casos de ondas de frio que atingiram o Sudeste do Brasil entre os anos de 1961 e 2017 (Figuras 2 a 5). A Figura 1 é a junção de uma carta sinótica de superfície (pressão atmosférica, espessura da camada entre 1000 e 850 hPa e símbolos de sistemas meteorológicos) com uma de altos níveis (velocidade do vento superior a 36 m/s equivale à corrente de jato). As características mais comuns entre os 12 casos das ondas de frio são a presença de um extenso sistema frontal entre o Brasil e o oceano Atlântico e o posicionamento dos anticiclones pós-frontais sobre o continente com valor de pressão médio de 1027 hPa, considerando os 12 casos (Figura 2).

Apesar de existir variabilidade na posição dos anticiclones pós-frontais, a trajetória continental dos sistemas contribui para uma maior penetração do ar frio nas latitudes menores do Brasil, incluindo o Sudeste. Além disso, a rota dos anticiclones nos 12 casos concorda com a do estudo de Pezza e Ambrizzi (2005), que elaboraram um modelo conceitual para a trajetória de sistemas de tempo associados a ondas de frio na AS. Contudo, os ciclones extratropicais também exibem grande variabilidade de posição nos 12 casos. Em geral, eles aparecem desde as latitudes altas do oceano Atlântico Sul até a costa da Região Sul do Brasil e apresentam deslocamento para sudeste.

Com relação aos padrões de nível superior, uma das características mais marcantes é o posicionamento do ramo norte do jato polar sobre latitudes menores. O ramo norte do jato polar situa-se tipicamente entre as alturas geopotenciais de 10.400 a 10.200 mgp (WPC, 2000). Nos anos de 1972 (Figura 2b), 1975 (Figura 2c), 1978 (Figura 2d), 1985 (Figura 2g), 1994 (Figura 2k) e 2000 (Figura 2l), o jato polar atingiu parte da Região Sul do Brasil e do oceano Atlântico adjacente e, portanto, contribuiu para a advecção de ar frio e espessuras menores em direção ao Brasil. Nos anos citados anteriormente, verifica-se ainda que a espessura de 1320 metros associada ao ar polar acompanhou o deslocamento do jato polar sobre áreas do Sul brasileiro.

Um dos principais campos atmosféricos investigados em estudos de ondas de frio é o da advecção horizontal de temperatura em 1000 hPa. Através deste campo é possível

identificar a taxa de redução ou aumento da temperatura em um dado local e tempo. Na Figura 3, a advecção de temperatura foi plotada juntamente com a altura geopotencial no nível de 500 hPa. Ressalta-se que os tons de azul equivalem à advecção fria, isto é, regiões resfriadas pela entrada da massa de ar frio vinda de sul nas regiões de cavados na média troposfera.

Observa-se que na maioria dos casos há um padrão de onda amplificada. No entanto, algumas ondas de frio exibiram cavados amplamente meridionais em direção a Região Sudeste, como visto na Figura 3g e 3l. Quando isso ocorre, o gradiente de pressão em superfície contribui para que haja um escoamento de sul para norte, que transporta o ar frio para latitudes menores do Brasil (Reboita et al., 2015). Outra característica das ondas da média troposfera são as estruturas do tipo bloqueio dipolo, sendo identificadas pelo deslocamento de cristas ao sul dos cavados do oceano Atlântico (Figura 3c, 3d, 3f, 3h e 3l). Segundo Sprenger et al. (2013), essas estruturas de bloqueio no contexto de ondas de frio se relacionam com anomalias de vorticidade potencial em nível superior, sobretudo durante eventos da “quebra da onda de Rossby” que levam a formação de baixas desprendidas na atmosfera superior (cutoff-low em inglês).

Com relação à advecção de temperatura na área de interesse, os valores negativos (advecção fria) mais intensos para às 1200 Z do dia pico das ondas de frio se destacam para os casos dos anos de 1965 (Figura 3a) e 1985 (Figura 3g).

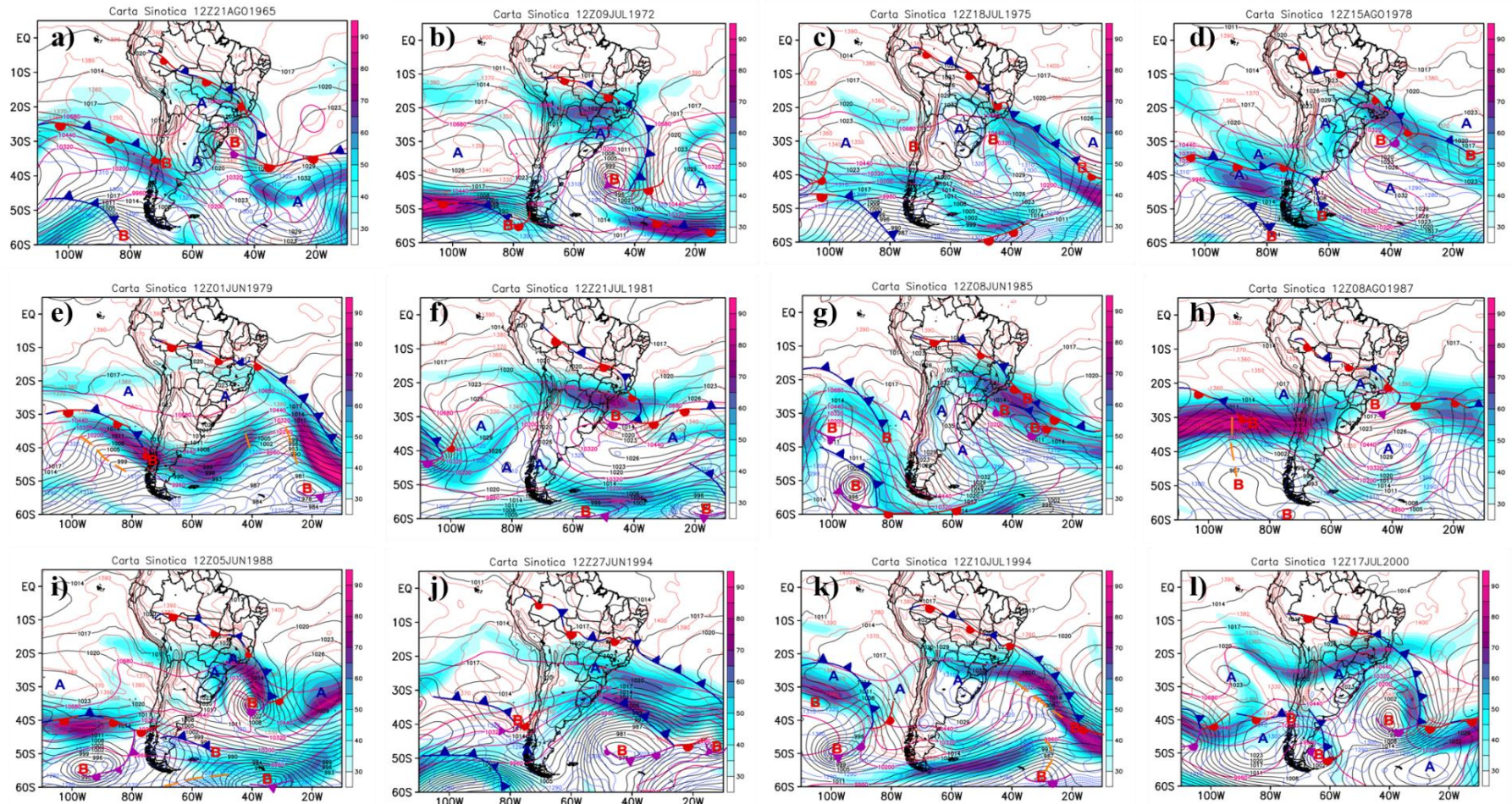


Figura 2 Corrente de jato em cores (m/s) e altura geopotencial para o nível de 250 hPa em linhas contínuas em roxo (mvp), pressão ao nível médio do mar em linhas contínuas em preto (hPa), espessura da camada 850/1000 hPa em linhas tracejadas (m), sistemas de alta (A) e baixa (B) pressão e sistemas frontais, onde as linhas com triângulos azuis equivalem as frentes frias, linhas com semicírculos vermelhos as frentes quentes, linhas com triângulos e semicírculos roxos as frentes oclusas e linhas com triângulos azuis e semicírculos vermelhos as frentes estacionárias às 1200 Z do dia de pico do extremo frio dos 12 casos em estudo: a) 21/08/1965, b) 09/07/1972, c) 18/07/1975, d) 15/08/1978, e) 01/06/1979, f) 21/07/1981, g) 08/06/1985, h) 08/08/1987, i) 05/06/1988, j) 27/06/1994, k) 10/07/1994 e l) 17/07/2000.

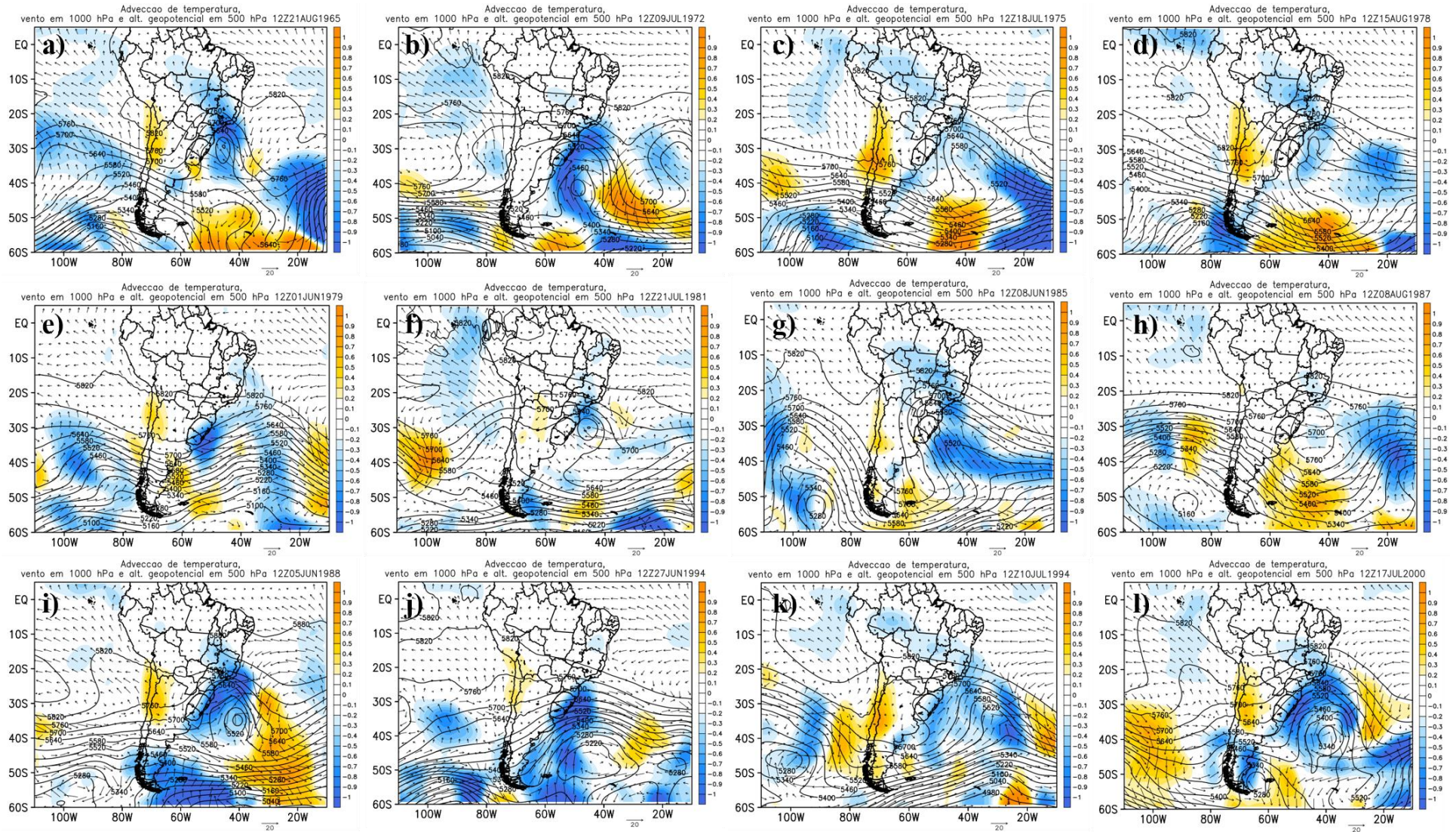


Figura 3 Advecção horizontal de temperatura em cores para 1000 hPa ($^{\circ}\text{K/s}) \cdot 10^{-4}$, altura geopotencial em 500 hPa em linhas contínuas e vento em 1000 hPa (m/s) às 1200 Z para os mesmos dias da Figura 2.

Os processos descritos nas Figuras 2 e 3 são úteis também para explicar a distribuição espacial da temperatura do ar nos dias das ondas de frio (Figura 4), uma vez que há uma relação direta desses sistemas com a dinâmica das latitudes médias, onde as massas de ar frio (ar quente) são conduzidas para o norte (sul) através dos cavados (cristas) no HS. Em todos os casos da Figura 4, observa-se o predomínio de sistemas de alta pressão pós-frontais sobre o continente associado ao ar frio. A variabilidade da posição dos anticiclones para os 12 casos explica duas principais direções do vento no estado de São Paulo e triângulo mineiro, sendo o quadrante sudoeste e sudeste. O pico do extremo frio nessas regiões se desenvolve na presença das altas pressões e de um extenso sistema frontal sobre o continente. O limite dos sistemas frontais é identificado pelo forte gradiente térmico configurado entre os estados do Centro-Oeste e Sudeste, como visto na Figura 4 e conforme os sistemas frontais plotado na Figura 2. Entre a Região Sul, o estado de São Paulo e do Mato Grosso do Sul, estão os menores valores de temperatura entre os eventos, sobretudo na região de interesse nos anos de 1981 (Figura 4f), 1985 (Figura 4g), 1988 (Figura 4i), julho de 1994 (Figura 4k) e 2000 (Figura 4l). Com exceção dos casos de 1965, 1978, 1981, 1985, 1987, os demais exibem núcleos mínimos de temperatura na Região Sul. Essas baixas temperaturas são explicadas pela altitude e pela perda de radiação de onda longa da superfície para atmosfera durante a noite, especialmente nas regiões centrais dos anticiclones que são livres de nuvens (YNOUE et al., 2017).

A umidade do ar é outra característica importante da intensidade das ondas de frio. O impacto desta variável na temperatura consiste no fato de que em uma atmosfera úmida, o vapor d'água armazena e emite calor por meio da radiação de onda longa em direção à superfície. Já em condições secas, este fenômeno não ocorre, o que permite um forte declínio na temperatura do ar (YNOUE et al., 2017). Junto da umidade específica em 850 hPa, mostra-se a isoterma de 0 °C para este mesmo nível, a fim de identificar o deslocamento para norte das massas de ar frio (Figura 5). As variações norte-sul da isoterma de 0°C em 850 hPa são explicadas pelos escoamentos meridionais. Os ventos de sul, por exemplo, são responsáveis pelo transporte da isoterma de 0 °C em direção ao norte (latitudes menores). Por outro lado, os ventos mais quentes de norte tendem a deixar o ambiente menos frio, de forma que a isoterma de 0 °C apresenta um recuo para latitudes maiores. Com relação à isoterma de 0 °C, essa alcançou o estado de São Paulo nos episódios de extremos frios de 1965 (Figura 5a), 1975 (Figura 5c), 1978 (Figura 5d) e julho de 1994 (Figura 5k), indicando condições gélidas na Região Sudeste. Baixos valores de umidade específica são observados em praticamente todos os casos na Região Sudeste, de maneira menos abrangente apenas em 1981 (Figura 5f).

Contudo, a massa de ar frio esteve mais seca sobre o Sudeste brasileiro nos eventos de 1972 (Figura 5b) e 1985 (Figura 5g)

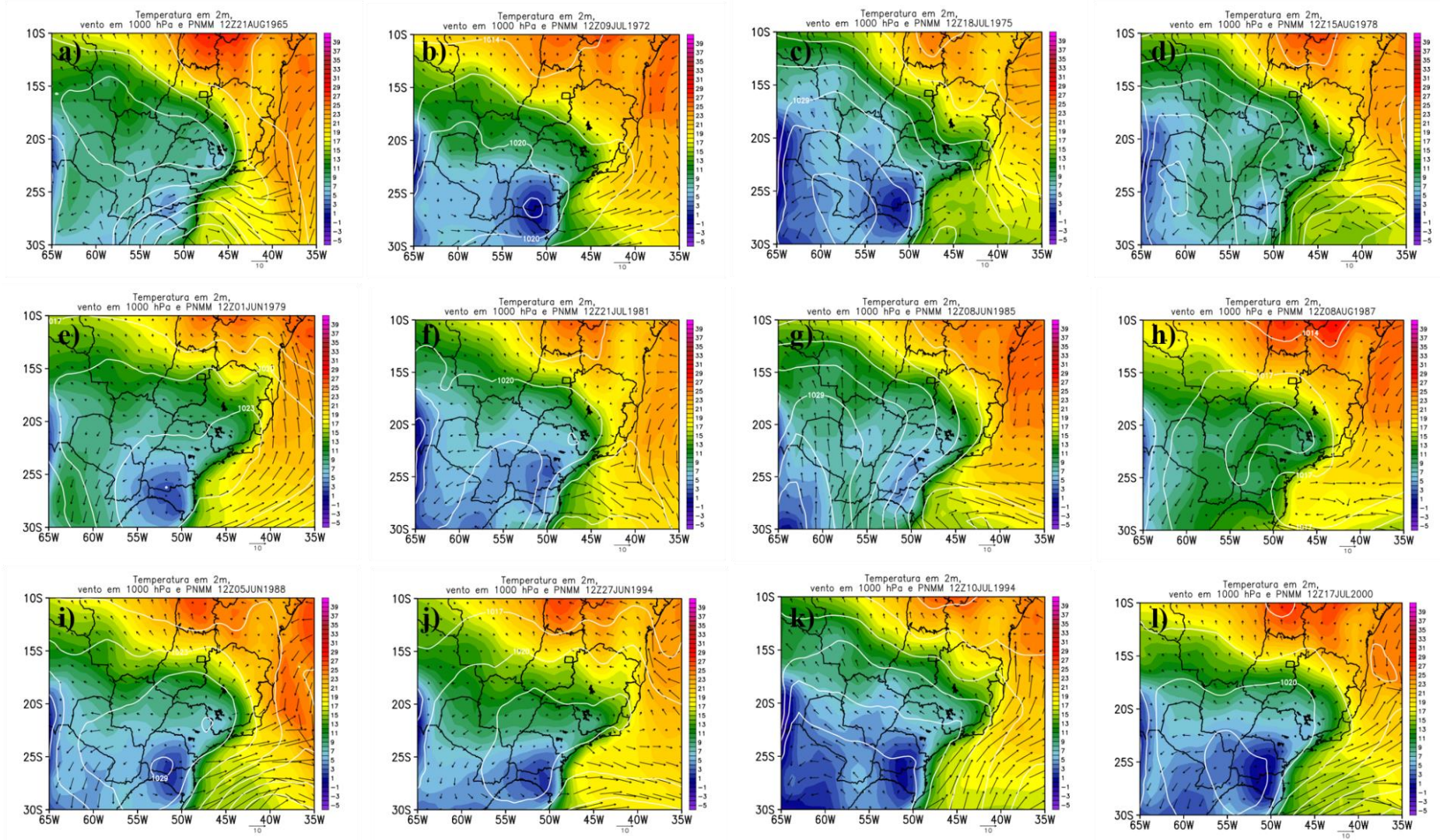


Figura 4 Temperatura do ar em 2 metros em cores (°C), vento em 1000 hPa e pressão ao nível médio do mar em linhas brancas contínuas às 1200 Z para os mesmos dias da Figura 2.

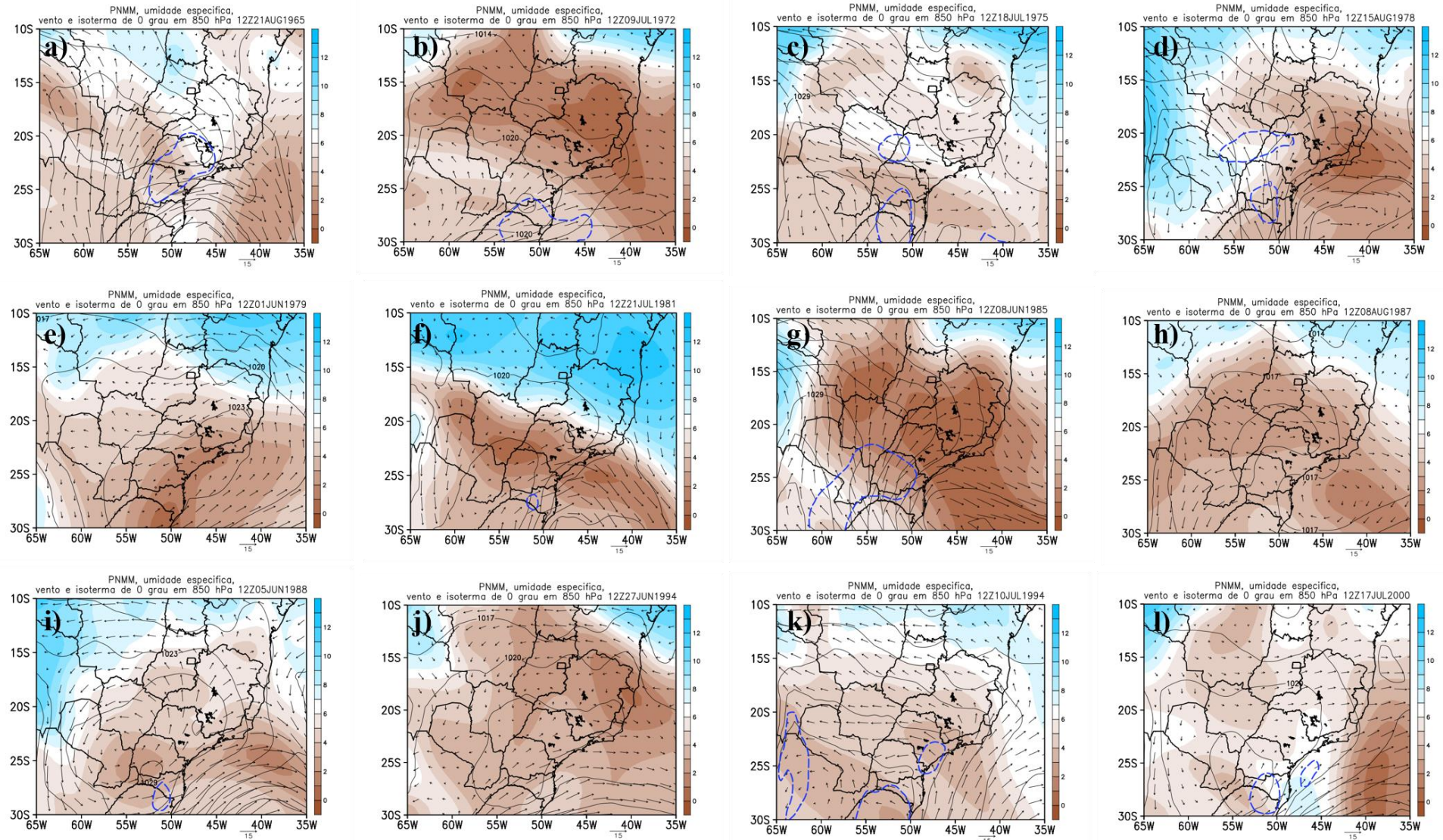


Figura 5 Umidade específica em cores (kg/kg), isoterma de 0°C em linha azul tracejada e vento em 850 hPa às 1200 Z para os mesmos dias da Figura 2.

1.3.2 Análise dos padrões médios de grande escala

Partindo para a análise de maior escala, na Figura 6 estão as composições das anomalias da altura geopotencial em 250 e 850 hPa para os dias -2, -1, 0, 1 e 2; lembra-se que o dia 0 corresponde ao dia do pico das ondas de frio. A anomalia da altura geopotencial na alta troposfera (250 hPa) possibilita a identificação das ondas planetárias, ou ondas de Rossby, que são responsáveis por extremos de calor e frio. Valores positivos (negativos) de anomalias têm relação com fortes sistemas de alta (baixa) pressão e intensos escoamentos meridionais próximos da superfície. Dois dias antes do pico das ondas de frio (Figura 6a e 6b), é perceptível um trem de ondas de Rossby no HS, mas que se intensifica e se curva para nordeste ao atingir a AS. Uma trajetória similar também foi obtida aplicando o método do *ray tracing* na composição do vento médio zonal em 250 hPa. A amplificação das ondas planetárias a partir do centro-leste do oceano Pacífico e a propagação para nordeste ao longo do continente sul-americano é um aspecto comum da circulação de grande escala durante fortes incursões frias na AS, como visto em Marengo et al. (2002). Para Müller e Berri (2007) que encontraram esse modo de propagação das ondas de Rossby no HS no contexto de ondas de frio na AS, o anticiclone pós-frontal é intensificado sobre o continente por meio da circulação indireta induzida na região de entrada (confluência) do jato subtropical.

Os altos valores de anomalia de altura geopotencial entre o Pacífico e a Patagônia (Figura 6a), evidenciam fortes cristas de nível superior nestas localidades na maioria dos casos, com destaque para a amplificação destes sistemas em direção à Península Antártica. Logo a jusante, observam-se valores negativos de anomalia entre o cone Sul da AS e o Atlântico. Tais anomalias equivalem a cavados amplificados que se desenvolvem corrente abaixo das cristas. Como reflexo das ondas longas e barotrópicas na alta troposfera, circulações anômalas em fase também se estabelecem próximo da superfície, como é o caso do nível de 850 hPa (Figura 6b). Atribui-se que os valores positivos centrados na Patagônia estejam relacionados à posição média dos anticiclones polares dois dias antes do máximo frio registrado no Sudeste do Brasil. Analogamente, os valores negativos no Atlântico a leste da Região Sul do país, mostram a posição média dos ciclones extratropicais. No entanto, as anomalias positivas da crista sobre a AS que se prolongam em direção à Península Antártida (Figura 6a), além de explicarem a entrada de fortes altas pressões no sul da AS (Figura 6b), parecem ter relação com a formação de anticiclones nas altas latitudes do oceano Atlântico sul. Estes sistemas de alta pressão caracterizam em média um campo de pressão dipolo com o ciclone extratropical ao norte (adjacente ao Sul do Brasil), conforme observado na Figura 6b.

Uma característica relevante encontrada nestes padrões, é que os máximos de anomalias positivas de altura geopotencial em 250 hPa migram da região do Pacífico leste/Patagônia no dia -2 (Figura 6a) em direção ao oceano Atlântico sul, em cerca de 60°S no dia 0 (Figura 6e). Isso mantém a estrutura dipolo das anomalias também em 850 hPa, especialmente até o dia 0 (Figura 6f) entre 30-70°S e 40°O.

O deslocamento das anomalias positivas de altura geopotencial em 250 hPa do oceano Pacífico para o Atlântico entre os dias -2 (Figura 6a) e 0 (Figura 6e), pode ser explicado por situações de bloqueios atmosféricos que resultam no fenômeno quebra da onda de Rossby, (POSTEL; HITCHMAN, 1999; SPRENGER et al., 2007). Deste modo, sugere-se que o padrão de bloqueio dipolo no oceano Atlântico, é importante para a manutenção do ar frio de altas latitudes em direção à área situada entre as circulações dos anticiclones pós-frontais sobre o continente e o ciclone extratropical no oceano Atlântico (Figuras 6b, 6d e 6f). Para o dia 1 (Figura 6g e 6h), as anomalias de altura geopotencial desintensificam em relação ao dia 0 (Figura 6e e 6f), mas ainda mostram um trem de ondas de Rossby ao redor do HS. Já para o dia 2 (Figura 6i e 6j) não existem anomalias significativas próximas ao Brasil.

1.3.3 Trajetória das ondas de Rossby para os 12 casos

Anteriormente foram analisados os padrões sinóticos associados aos 12 eventos de ondas de frio ocorridos no século XX. Também foram examinados os padrões de larga escala dos campos médios de anomalia de altura geopotencial em baixos (850 hPa) e altos (250 hPa) níveis da atmosfera, encontrando um padrão de ondas de Rossby. Nesta seção, as trajetórias individuais seguidas pelas ondas de Rossby para os 12 eventos de ondas de frio são identificadas, a fim de averiguar a existência de teleconexões responsáveis por estes eventos.

Figura 7 mostra as trajetórias seguidas pelas ondas de Rossby com $K=2$ (Figura 7a) e $K=3$ (Figura 7b) para cada um dos 12 eventos de ondas de frio a partir de uma região em aproximadamente 45°S/130°O, similar à Figura 6a, onde a composição da anomalia da altura geopotencial em 250 hPa exibe a amplificação das ondas a partir dessa região do oceano Pacífico Sul. Existe uma semelhança com relação a região fonte destas ondas para todos os eventos de onda de frio, com exceção daquela ocorrida em 1988 cujo início da trajetória de onda ocorre à noroeste dos demais eventos (está além do escopo deste estudo detalhar as particularidades deste caso de 1988), porém segue a mesma trajetória que os demais eventos estudados. Portanto, há uma clara relação de conexão entre a região de formação de ondas de Rossby na região do Pacífico Sul e as ondas de frio ocorridas no Sudeste do Brasil, com destaque para uma curvatura maior no raio de propagação para $K = 2$. Os raios de propagação

para $K=2$ e $K=3$ exibem similaridades com estudos de Marengo et al. (2002) e Müller e Berri (2007).

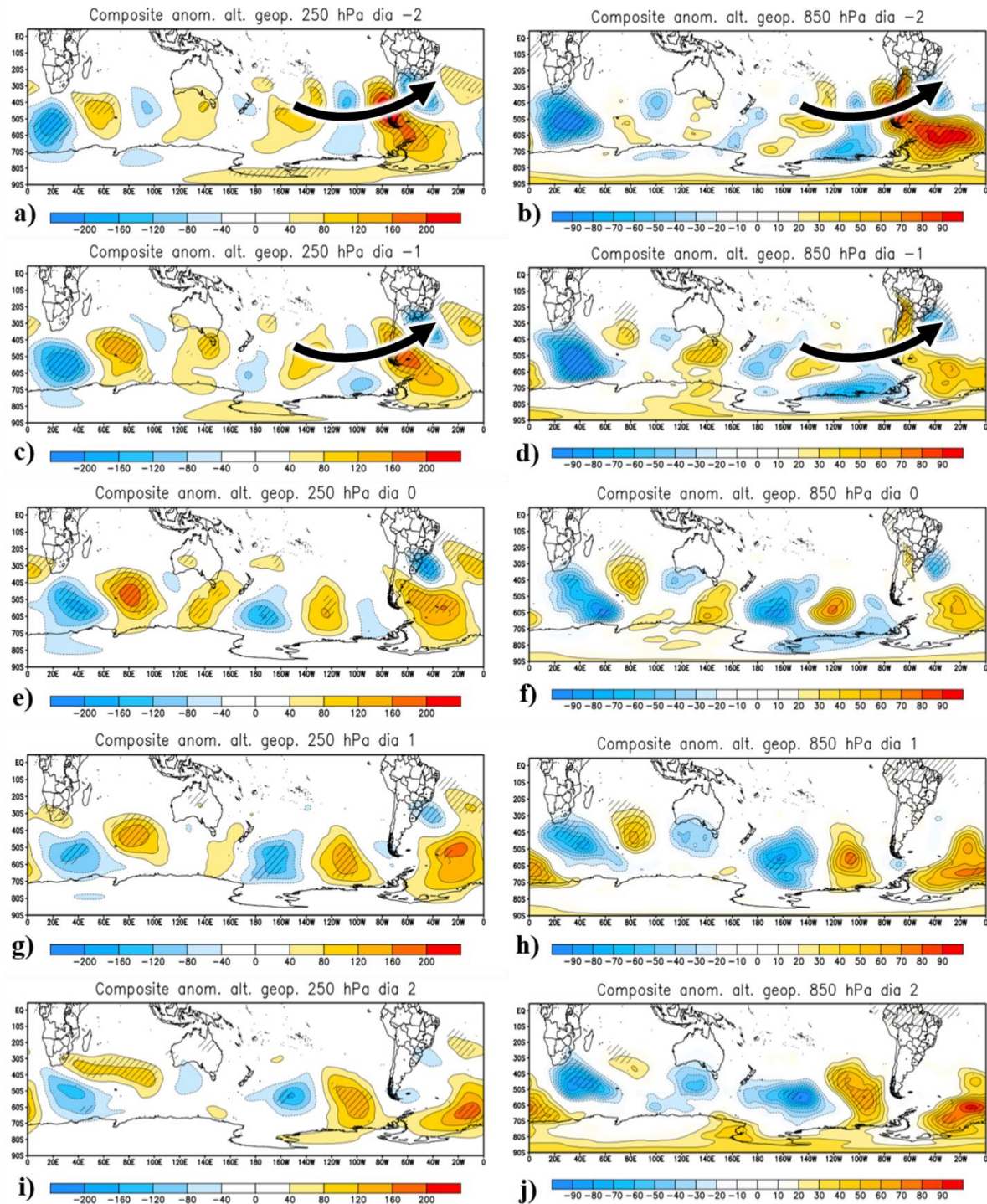


Figura 6 Composição da anomalia da altura geopotencial (gpm) no nível de 250 hPa (painel: esquerdo) e 850 hPa (painel direito) às 1200 Z para os dias -2, -1, 0, 1 e 2 das 12 ondas de frio (1961 a 2017), juntamente com o teste t-Student em hachurado com 95% de confiança. A seta nos painéis (a), (b), (c) e (d) indicam o trem de ondas de Rossby.

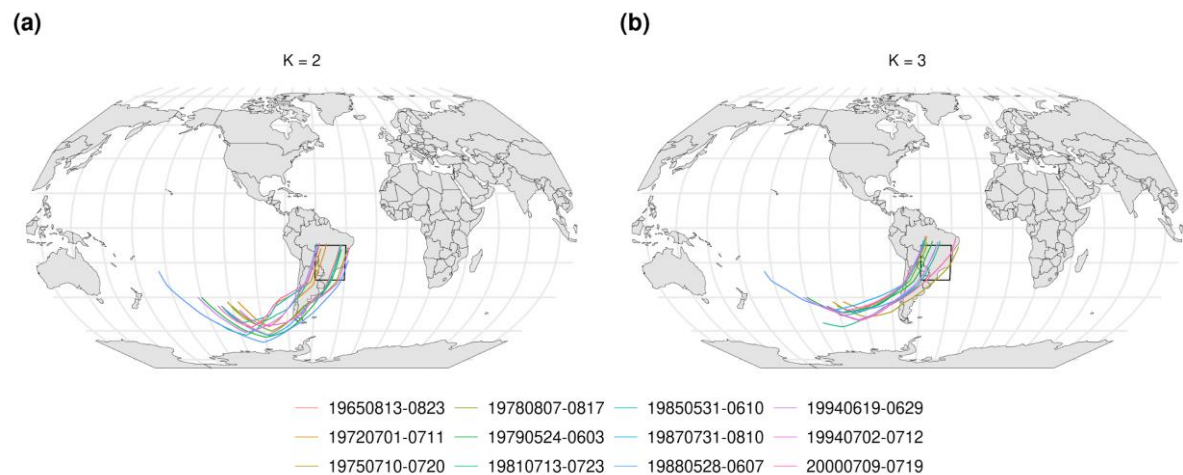


Figura 7 Trajetória preferencial das ondas de Rossby de número 2 (a) e 3 (b) a partir do estado básico dos ventos de oeste para os 12 casos.

1.4 CONCLUSÃO

O presente trabalho investiga os padrões sinóticos e de grande escala associados a 12 casos extremos de ondas de frio no período entre 1961 a 2017 na Região Sudeste do Brasil. Elaborou-se a análise sinótica individual para o dia de pico de cada uma das ondas de frio e, posteriormente, foram construídas composições para identificação dos padrões anômalos da circulação atmosférica e possíveis impactos de teleconexão.

Todas as ocorrências mostram um padrão de onda amplificada em 500 hPa entre os oceanos Pacífico e Atlântico, de modo que, em média, as cristas de nível superior dão suporte para altas pressões migratórias se deslocarem do oceano Pacífico Leste em direção ao Cone-Sul da AS, enquanto os cavados de nível superior a jusante das cristas, fornecem suporte aos ciclones extratropicais no oceano Atlântico. Estes resultados são compatíveis com Escobar (2007), Müller e Berry (2007) e Reboita et al. (2015) por exemplo, onde este padrão de ondas condicionam em superfície um campo de pressão favorável para um intenso escoamento meridional de sul para norte, favorecendo forte advecção horizontal de ar frio no Centro-Sul do país.

As composições da altura geopotencial e do vento mostram uma estrutura barotrópica da circulação, com uma forte amplificação das ondas entre a região central do oceano Pacífico em direção à AS dois dias antes do dia pico das ondas de frio. Sugere-se que a amplificação das cristas sobre o continente sul-americano em direção à altas latitudes do oceano Atlântico, esteja associada aos eventos de quebra da onda de Rossby (bloqueio dipolo), o que explica o campo de pressão dipolo em 850 hPa no Atlântico entre os dia -2 e 0 nas composições. Essa estrutura da circulação é importante para desalojar o ar frio de altas latitudes em direção ao

norte, visto que esse ar frio é conduzido entre a circulação dos anticiclones pós-frontais sobre a AS e dos ciclones extratropicais sobre o oceano Atlântico Sul.

A análise das trajetórias usando o método *ray tracing* sugere que a maioria das ondas de Rossby partem das altas latitudes do oceano Pacífico Sul em direção a AS. Essa mesma característica é confirmada ao se analisar a composição da anomalia da altura geopotencial em 250 hPa para os 12 eventos, sugerindo uma conexão remota entre as duas regiões.

No tópico anexo desta dissertação, é apresentado o modelo conceitual físico para o padrão médio da circulação das 12 ondas de frio. Esse modelo conceitual resume os principais processos físicos mencionados acima, como o trem de ondas planetárias que se amplifica em direção a AS e o campo de pressão dipolo no oceano Atlântico.

Esse estudo é importante porque complementa o entendimento dos mecanismos sinóticos e de grande escala que estiveram associados às ondas de frio históricas na Região Sudeste, uma vez que os 12 episódios investigados neste trabalho foram extremos e ainda não haviam sido estudados em conjunto.

1.5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), *Climate Forecast System Reanalysis* pela disponibilização dos dados e ao auxílio financeiro do CNPq, FAPEMIG e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil - Código de Financiamento 001) e também a Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro através do processo nº 2016/10557-0.

1.6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASIL. Frio: pelo menos seis pessoas em situação de rua morreram em SP Disponível em: <(https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-07/frio-pelo-menos-seis-pessoas-em-situacao-de-rua-morreram-em-sp)>. Acesso em: 14/10/2020.

ALVES, Maikon Passos Amilton et al. Onda de frio? Análise de diferentes métodos de identificação. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2017.

AMBRIZZI, Tércio; SACCO, Marcelo Alejandro Luna; FERRAZ, Simone Erotildes Teleginski. IMPORTANCE OF TELECONNECTIONS FOR SEASONAL PREDICTION. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, p. 137-148, 2014.

ASHFAQ et al. Robust late twenty-first century shift in the regional monsoons in RegCM-CORDEX simulations, **Climate Dynamics**, 2020.

CAPUCIN, Bruno César et al. Synoptic analysis of a cold period in Bauru-SP in July 2015. **Anuario do Instituto de Geociencias**, p. 53-65, 2019.

DE CARVALHO, Leila Maria Véspoli; CAVALCANTI, Iracema FA. The South American Monsoon System (SAMS). **The Monsoons and Climate Change**, p. 121-148, 2016.

DOLIF NETO, Giovanni et al. Thundersnow in Brazil: a case study of 22 July 2013. **Atmospheric Science Letters**, v. 17, n. 1, p. 26-32, 2016.

ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 241-254, 2007.

ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan; REBOITA, Michelle Simões; SOUZA, Amanda. Climatology of surface baroclinic zones in the coast of Brazil. **Atmósfera**, v. 32, n. 2, p. 129-141, 2019.

HOLTON, James R. An introduction to dynamic meteorology. **American Journal of Physics**, v. 41, n.5, p. 752-754, 1973.

HOLTON, James R. An introduction to dynamic meteorology. **American Journal of Physics**, v. 41, n. 5, p. 752-754, 1973.

KOTTEK, Markus et al. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. 2006.

LIU, Zhengyu; ALEXANDER, Mike. Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 2007.

LUCYRIO, Vinícius; REBOITA, Michelle Simões; ALBIERI, Marcelo de Campos Garcia. ONDAS DE FRIO INTENSAS SOBRE O CENTRO-NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO DE 1961 A 2017. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

MARENGO, Jose et al. Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 11, p. 2759-2786, 1997.

MARENGO, J. A. et al. Upper-air wave trains over the Pacific Ocean and wintertime cold surges in tropical-subtropical South America leading to Freezes in Southern and Southeastern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 73, n. 3, p. 223-242, 2002.

MARENGO, J. A. et al. Recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 1-21, 2012.

MÜLLER, Gabriela V.; BERRI, Guillermo J. Atmospheric circulation associated with persistent generalized frosts in central-southern South America. **Monthly Weather Review**, v. 135, n. 4, p. 1268-1289, 2007.

MÜLLER, Gabriela V.; BERRI, Guillermo J. Atmospheric circulation associated with extreme generalized frosts persistence in central-southern South America. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 5-6, p. 837-857, 2012.

NAIRN, J.; FAWCETT, R. Defining heatwaves: heatwave defined as a heat-impact event servicing all. **Europe**, v. 220, p. 224, 2011.

OLIVEIRA, Paulo Jorge de et al. Efeitos de um evento de friagem nas condições meteorológicas na Amazônia: um estudo de caso. **Acta amazônica**, v. 34, n. 4, p. 613-619, 2004.

PEZZA, Alexandre Bernardes; AMBRIZZI, Tércio. Dynamical conditions and synoptic tracks associated with different types of cold surge over tropical South America. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 25, n. 2, p. 215-241, 2005.

POLI, Paul et al. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. **Journal of Climate**, v. 29, n. 11, p. 4083-4097, 2016.

POSTEL, Gregory A.; HITCHMAN, Matthew H. A climatology of Rossby wave breaking along the subtropical tropopause. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 56, n. 3, p. 359-373, 1999.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2020. Disponível em: <(https://www.R-project.org/)>. Acesso em: 20/01/2020.

REBOITA, Michelle Simões et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REBOITA, Michelle Simões; ESCOBAR, Gustavo; LOPES, Vitor. Climatologia sinótica de eventos de ondas de frio sobre a região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, 2015.

REHBEIN, Amanda et al. Raytracing: An R package for identification and tracking the atmospheric Rossby waves', R package version 0.1.0, <https://github.com/salvati rehbein/raytracing>. DOI:10.5281/zenodo.4390985.

SATYAMURTY, Prakki et al. An early freeze in southern Brazil in April 1999 and its NWP guidance. **Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling**, v. 9, n. 1, p. 113-128, 2002.

SILVA, João Pedro Rodrigues; REBOITA, Michelle Simões; ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

SILVEIRA, Rafael Brito et al. Impactos das ondas de frio sobre a saúde pública no município de São Joaquim-Santa Catarina-Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.

SPRENGER, Michael; WERNLI, Heini; BOURQUI, Michel. Stratosphere–troposphere exchange and its relation to potential vorticity streamers and cutoffs near the extratropical tropopause. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 64, n. 5, p. 1587-1602, 2007.

SPRENGER, Michael; MARTIUS, Olivia; ARNOLD, Julian. Cold surge episodes over southeastern Brazil—a potential vorticity perspective. **International journal of climatology**, v. 33, n. 12, p. 2758-2767, 2013.

STEVENSON, William J. Estatística Aplicada à Administração. São Paulo, SP: Ed. Harbra, 1986,* STEWART, David W. The Application and Misapplication of Factor Analysis in Marketing Research. **Journal of Marketing Research**, v. 18, p. 51-62, 1981.

WPC. Corrente de jato de Nível Superior. Disponível em <(https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/jetport.shtml)>. Acesso em 15/09/2020.

TT-DEWCE, W. W. O. Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events: Draft Version. **First Review by TT-Dewce**, 2016.

YNOUE, Rita Yuri et al. **Meteorologia: noções básicas**. Oficina de Textos, 2017.

ZHOU, Jiayu; LAU, K. M. Does a monsoon climate exist over South America?. **Journal of climate**, v. 11, n. 5, p. 1020-1040, 1998.

CAPÍTULO II

ONDA DE FRIO HISTÓRICA NO BRASIL: UM ESTUDO DE CASO DE JUNHO DE 1985

2.1 INTRODUÇÃO

O século XX foi marcado por ondas de frio históricas no Brasil. Registros passados mostram uma sequência de anos em que fortes incursões polares foram abrangentes e intensas no território brasileiro, como nos anos de 1955, 1957, 1965, 1975, 1979, 1981, 1984, 1985, 1988, 1991, 1994, 1996, 1999 e 2000 (PARMENTER, 1976; GIRARDI, 1983; FORTUNE; KOUSKY, 1983; MARENGO et al., 1997; KRISHNAMURTI et al., 1999; PEZZA, 2003; LANFREDI; CAMARGO, 2018; LUCYRIO et al., 2019). Em julho de 1955, por exemplo, uma intensa onda de frio atingiu a AS e foi uma das mais intensas já registradas tanto pela abrangência do ar frio, como também pela área coberta por geada, neve e pelos baixos valores de temperatura máxima e mínima em diversos estados. No dia 31 de julho daquele ano, Guarapuava no Paraná registrou temperatura mínima de $-8,4^{\circ}\text{C}$, enquanto em Cruzeiro do Sul no Acre teve mínima de $10,2^{\circ}\text{C}$ de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Existem diversas definições na literatura para ondas de frio, algumas mais gerais e outras mais específicas. Uma definição geral da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2016) descreve o fenômeno como sendo um período de forte resfriamento do ar próximo da superfície sobre uma vasta área, de modo que as temperaturas fiquem abaixo de limiares climatológicos da região atingida por alguns dias. Contudo, Nairn e Fawcett (2013) realizaram um estudo a fim de elaborar critérios para definir ondas de frio e calor na região da Austrália. Segundo os autores, uma onda de frio pode ser caracterizada quando a temperatura média do ar em um dado local permanece abaixo do percentil de 5% da série histórica de temperatura por pelo menos 3 dias seguidos. Vários trabalhos também utilizam definições para ondas de frio, mas com foco na AS, por exemplo: Fortune e Kousky, 1983; Seluchi e Nery, 1992; Vera e Vigliarolo, 2000; Garreaud, 2000; Lanfredi e Camargo, 2018; Escobar et al., 2019.

Fortes ondas de frio, como as do século XX, são de grande impacto para a agricultura e saúde pública. Em julho do ano de 1975 uma severa incursão de ar polar histórica atingiu o Brasil. Cerca de 75% da produção de café no Brasil foi perdida devido às geadas negras (geada que congela a água no interior das plantas). O estado do Paraná foi o mais atingido na

época, com quase 100% da sua produção afetada; foram colhidas 10,2 milhões de sacas no ano de 1975 (48% de toda a produção nacional de café), antes da geada, e apenas 3,8 mil sacas no ano seguinte (PARMENTER, 1976; GIRARDI, 1983; MARENGO et al., 1997; PEZZA, 2003; REVISTA CAFEICULTURA, 2010). Esse evento gerou problemas econômicos e sociais à população paranaense. Décadas depois, outra onda de frio em junho de 1994 impactou a produção de café com geadas, mas dessa vez na Região Sudeste que registrou um aumento no preço de comercialização do produto (MARENGO et al., 1997).

Extremos frios também estão associados a problemas de saúde pública e desigualdade social. Silveira (2018) estudou o impacto das baixas temperaturas no número de internações hospitalares por doenças respiratórias e circulatórias em São Joaquim-SC. O autor verificou que o número de internações devido à pneumonia aumentou cerca de 39% durante as ondas de frio entre os anos de 1999 a 2013. Com relação aos problemas sociais, condições extremas de frio geram óbitos de moradores de rua devido à hipotermia, especialmente nas grandes metrópoles onde a desigualdade é agravada. No inverno de 2019, cinco pessoas em situação de rua morreram na cidade de São Paulo devido aos dias frios (BRASIL DE FATO, 2019).

Outro aspecto comum das ondas de frio no Brasil é o fenômeno conhecido por friagem. A friagem se trata da diminuição da temperatura do ar e umidade no sul da Região Norte após a passagem de uma frente fria na região (OLIVEIRA et al., 2004). Já Serra e Rastibona (1972) descrevem os eventos de friagem como uma forte incursão de ar frio vindo do sul que alcança as latitudes tropicais da AS e influencia o tempo no sul da Amazônia. As condições sinóticas que propiciam o alcance do ar frio no sul da bacia Amazônica é o posicionamento de anticiclones pós-frontais nas regiões centrais da AS. Pezza e Ambrizzi (2005) realizaram um estudo da trajetória de ciclones e anticiclones associados a eventos de frio intenso na AS que alcançaram o Estado de São Paulo. No modelo conceitual de trajetórias dos sistemas sinóticos, os autores verificaram que a maioria dos anticiclones migram do extremo sul do continente para as latitudes do Paraguai e, posteriormente, se movem para leste ao longo do Estado de São Paulo.

Como as ondas de frio são fenômenos de escala sinótica, muitos trabalhos focam na identificação e descrição dos padrões atmosféricos durante fortes períodos de resfriamento no Brasil. Portanto, tem sido mostrado que na atmosfera superior, a configuração mais recorrente é um padrão de onda amplificada com a crista no Pacífico Leste e o cavado no Atlântico Sudoeste. Essa estrutura de nível superior conduz as altas pressões para o norte a leste dos Andes, enquanto no Atlântico baixas pressões se desenvolvem (FORTUNE; KOUSKY, 1983; GIRARDI, 1983; GARREAUD, 2000; PEZZA 2003; PEZZA; AMBRIZZI, 2005;

ESCOBAR, 2007; REBOITA et al., 2015). Em decorrência da configuração mencionada anteriormente, o gradiente de pressão formado entre as altas pressões sobre o continente e os ciclones no Atlântico favorecem ventos de sul e o transporte de ar frio para as latitudes tropicais e subtropicais do Brasil.

No entanto, padrões de teleconexão associados às variabilidades de baixa frequência podem modular a escala sinótica, resultando em condições meteorológicas extremas em áreas distantes como ondas de frio e calor. De acordo com Shimizu e Cavalcanti (2011) e Reboita et al. (2020), o termo teleconexão está relacionado com anomalias em uma região do globo que promovem a dispersão de ondas na atmosfera superior e que alteram o regime de precipitação e temperatura em locais remotos. O El Niño Oscilação Sul (ENOS) e a Oscilação Antártica (OA) são exemplos de modos de variabilidade de baixa frequência com impacto na circulação extratropical do HS.

Em junho de 1985, o Brasil foi atingido por uma intensa onda de frio, memorável tanto pela duração do fenômeno como por sua abrangência. Este evento foi responsável por geadas em quase todo o Estado de São Paulo, no entanto os maiores prejuízos foram observados nas plantações de café na região de Franca, nordeste paulista, onde a temperatura mínima ficou abaixo dos 2 °C por três dias seguidos (8, 9 e 10 de junho); no dia 9 a temperatura da relva chegou a -5,2 °C na cidade. As pastagens foram menos atingidas devido à estiagem que já atingia todo o estado antes. A produção de leite, a fruticultura e a olivicultura foram afetadas também nas regiões de Catanduva, Pindorama, Sorocaba e Bragança Paulista. As geadas também foram registradas na região sul de Minas Gerais (São Sebastião do Paraíso, Guaxupé e Maria da Fé), também com prejuízos na cafeicultura, onde o frio foi responsável por mortes de moradores de rua na cidade de São Paulo e em Curitiba-PR. Em todo o Estado de São Paulo estima-se que 10% das plantações de café foram atingidas pelas geadas, sendo a maior parte na região de Franca. Além das geadas, houve registro de neve no Pico das Agulhas Negras, dentro do Parque Nacional de Itatiaia, na divisa de Minas Gerais com o Rio de Janeiro (O ESTADO DE SÃO PAULO, 11/06/1985, p. 14; 12/06/1985, p. 13). Devido à magnitude e extensão dessa onda de frio, o presente estudo tem por objetivo realizar uma análise sinótica detalhada do evento. Também serão apresentados dados de observação da época durante a discussão dos resultados.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A fim de descrever o padrão sinótico associado a onda de frio de 1985, utilizou-se o banco de dados da reanálise do ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather*

Forecasts (Copernicus Climate Change Service – C3, 2017; HERSBACH; DEE, 2016), cuja resolução horizontal é de 0,25°. Os dados utilizados neste estudo possuem 6 níveis verticais (2 metros, superfície, 1000, 850, 500, 250 hPa) para os 4 horários sinóticos (0000, 0600, 1200 e 1800 Z). No entanto, por fins de brevidade nos resultados, apresentam-se apenas o horário das 1200 Z, horário em que há um maior registro de dados observados. As variáveis utilizadas são: temperatura do ar, geopotencial, componentes zonal e meridional do vento, pressão ao nível médio do mar (PNMM) e umidade específica. A partir destas variáveis primárias, calcularam-se as variáveis secundárias como espessura da camada e a altura geopotencial. As equações para obtenção dessas variáveis podem ser encontradas em Wallace e Hobs (2006) e em Capucin et al. (2019).

2.2.1 Campos de anomalia

As anomalias foram computadas considerando a climatologia de 1979 a 2010 com dados da ERA5. Os valores de anomalia obtidos das variáveis PNMM, altura geopotencial, temperatura em 2 m e umidade específica se deram através da equação $A = X_i - \underline{X}$ em que X_i se refere ao valor da variável em um dado dia às 1200 Z e \underline{X} a climatologia da mesma variável também em um dado dia às 1200 Z.

2.2.2 Domínio da análise

Para a análise sinótica focada na AS, a área adotada para o estudo corresponde de 60°S a 5°N de latitude e de 100°O a 10°O de longitude. Já para identificação dos padrões de grande escala, considerou-se todo o HS, cuja área corresponde de 90°S a 5°N de latitude e de 180°O a 180°L de longitude.

2.2.3 Registro histórico

Por ter sido um evento de onda de frio de longa duração, o pico de temperaturas baixas ocorreu em datas distintas nas diferentes regiões do Brasil. Lucyrio et al. (2019) identificaram 12 casos de ondas de frio intensas sobre o nordeste do Estado de São Paulo entre 1961 e 2017, no qual a onda de frio de junho de 1985 foi a de maior duração, 9 dias, em relação à duração média encontrada que foi de 5 dias.

Devido à esta longa duração, foram utilizados dados de estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), de temperaturas mínimas e máximas, do período compreendido entre os dias 1 e

15 de junho de 1985. As estações meteorológicas utilizadas se localizam nos estados da região Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Norte do Brasil.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Análise sinótica

A Figura 8 se refere à carta sinótica construída a partir da PNMM, corrente de jato em cores (250 hPa), espessura da camada entre o nível de 1000 e 850 hPa e altura geopotencial em 250 hPa às 12 Z do dia 1 ao dia 12 de junho de 1985. Através dessas informações, é possível atribuir o posicionamento das frentes meteorológicas em superfície. Como a onda de frio de 1985 teve ampla penetração nas latitudes subtropicais e tropicais da AS, a espessura da camada mais apropriada para avaliar a incursão de ar frio é a definida entre 1000 e 850 hPa, uma vez que o ar frio das altas latitudes se torna mais raso à medida em que se propaga para o trópico (WPC INTERNATIONAL DESKS, 2020).

No dia 1 de junho (Figura 8a), há uma onda frontal no oceano Atlântico a leste da Argentina devido à presença de um cavado sobre o sul da AS. Enquanto a frente fria desse sistema encontra-se entre o norte da Argentina e do Uruguai com forte gradiente de espessura da camada associado, atrás do sistema frontal um pulso anticiclônico oriundo da Alta Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) ingressa sobre os Andes. Esse tipo de configuração inicial das ondas de frio na AS é clássico, amplamente demonstrado em vários estudos como o de Parmenter (1976), Girardi (1983), Marengo et al. (1997), Pezza (2003), Escobar (2007) e Reboita et al. (2015).

Até o dia 4 (Figura 8d), o sistema frontal avança para o norte sobre o Brasil, abrangendo as regiões Centro-Oeste e Sudeste e é acompanhado pelo deslocamento progressivo da alta pós-frontal para o norte ao longo da Argentina. O padrão de onda amplificada crista/cavado na corrente de jato entre o oceano Pacífico e Atlântico pouco se altera entre os dias 3 (Figura 8c) e 4 (Figura 8d). Contudo, do dia 5 (Figura 8e) em diante, um processo de amplificação mais forte no trem de ondas do HS visto pela orientação meridional da corrente de jato atinge as longitudes da AS, o que aumenta a amplitude da onda pré-existente e fornece suporte para que o sistema frontal se reconfigure sobre a AS no dia 6 (Figura 8f) e atinja baixas latitudes até o dia 10 (Figura 8j). O sistema frontal recebe suporte de uma circulação ciclônica intensificada no oceano Atlântico em 45°W e 35°S (Figura 8f). O desvio da corrente de jato para o sul, sobretudo a partir do dia 5 (Figura 8e), denota uma ampla crista responsável por um intenso anticiclone com características de bloqueio (TRENBERTH; MO, 1985) na região das Ilhas Malvinas. O gradiente de pressão formado

entre o anticiclone e as baixas pressões a leste do Brasil configura fortes ventos de sul sobre o interior do país por vários dias consecutivos. A persistência dos ventos de sul se deve à estacionariedade da onda de nível superior e, conseqüentemente, do campo bórico em superfície.

Uma das características que evidencia a intensidade do ar frio e sua penetração em direção ao trópico é o deslocamento do jato polar. No dia 10 (Figura 8j), a isoípsa de 10.320 mgp atinge o leste do Paraná, sendo um indicativo da presença do jato polar entre parte da Região Sul e o sul do Estado de São Paulo. Tais características sinóticas permitiram um amplo avanço do sistema frontal até a região equatorial (Figura 8j).

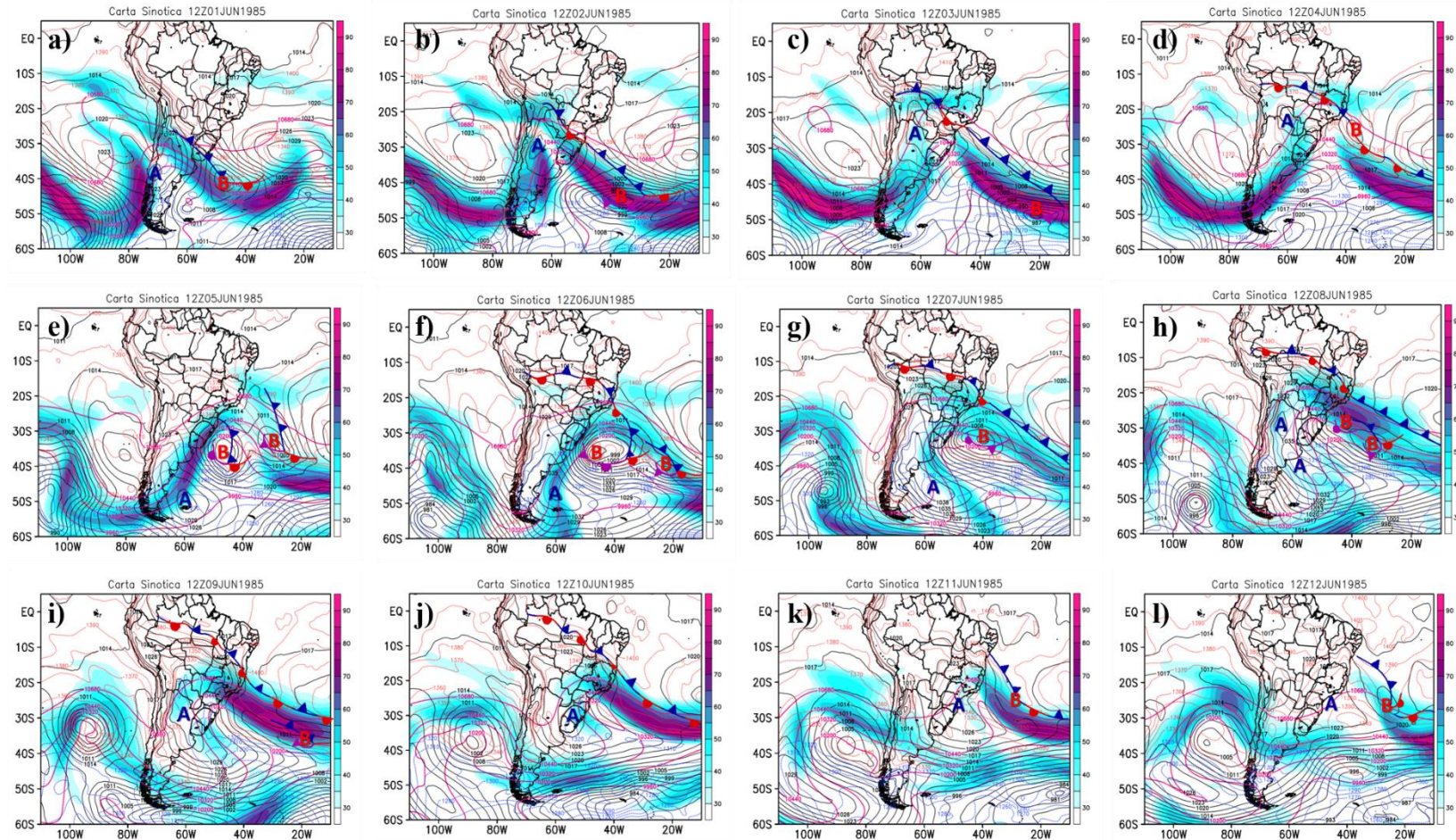


Figura 8 Corrente de jato em cores (m/s) e altura geopotencial no nível de 250 hPa em linhas contínuas em roxo (mvp), pressão ao nível médio do mar em linhas contínuas em preto (hPa), espessura da camada 850/1000 hPa em linhas tracejadas (m), sistemas de alta (A) e baixa (B) pressão e sistemas frontais, onde as linhas com triângulos azuis indicam as frentes frias, linhas com semicírculos vermelhos as frentes quentes, linhas com triângulos e semicírculos roxos as frentes oclusas e linhas com triângulos azuis e semicírculos vermelhos as frentes estacionárias às 1200 Z para os dias: a) 01/06/1985, b) 02/06/1985, c) 03/06/1985, d) 04/06/1985, e) 05/06/1985, f) 06/06/1985, g) 07/06/1985, h) 08/06/1985, i) 09/06/1985, j) 10/06/1985, k) 11/06/1985, l) 12/06/1985.

A onda de frio provocou também uma intensa friagem no sul da Amazônia, com intensa queda nas temperaturas entre os dias 9 e 12. O frio intenso provocou recordes de temperaturas mínimas nas Normais Climatológicas de 1961-1990 (INMET, 2009) em diversas estações meteorológicas da região Norte, como 7,8 °C em Cruzeiro do Sul e Rio Branco-AC e 10,2 °C em Lábrea-AM. Em Porto Velho-RO a temperatura caiu para 12,4 °C no dia 10. Foram quebrados diversos recordes de frio, sejam eles mensais ou absolutos, em relação às Normais Climatológicas de 1961-1990 nas regiões Sudeste, Norte e Centro-Oeste.

Para o estudo das condições sinóticas associadas a uma onda de frio, avaliar a altura geopotencial é fundamental, uma vez que essa variável permite identificar o padrão de onda crista/cavado na atmosfera superior. Extremos de temperatura surgem no contexto de amplificação dessas ondas, onde as massas de ar frio (quente) são forçadas para o norte (sul) através de cavados (cristas) de ar superior no HS. A Figura 9 mostra os campos da anomalia da altura geopotencial (em cores) e a altura geopotencial em isolinhas para às 1200 Z do dia 1 ao dia 12 de junho. A análise da anomalia da altura geopotencial permite identificar o quanto essa variável desviou da sua média climatológica durante a intensa onda de frio do início de junho de 1985.

No dia 1 (Figura 9a) há um trem de ondas razoavelmente amplificado com uma crista no oceano Pacífico Sul, um cavado sobre o continente sul-americano e outra crista sobre o oceano Atlântico Sul. Embora esse trem de ondas apresente um caráter mais estacionário, há um ligeiro deslocamento para leste até o dia 4 (Figura 9d) enquanto se amplifica. Entre os dias 3 (Figura 9c) e 4 (Figura 9d), o cavado orientado meridionalmente atinge o Sudeste do Brasil. Salienta-se que o padrão de crista amplificada no Pacífico Leste e cavado amplificado no Atlântico Sudoeste é a principal assinatura de nível superior no contexto de ondas de frio na AS e Brasil durante o inverno austral (MARENGO et al., 1997; MÜLLER; BERRI, 2007; ESCOBAR, 2007; MÜLLER; BERRI, 2012; REBOITA et al., 2015).

Uma amplificação mais forte do trem de ondas nas longitudes da AS é verificado a partir do dia 5 (Figura 9e). Nesse dia, o ganho de amplitude no cavado que está no oceano Pacífico em aproximadamente 120°W conduz à amplificação corrente abaixo da crista posicionada no sul da AS e, conseqüentemente, do cavado no Atlântico Sudoeste. No entanto, as anomalias de altura geopotencial se tornam mais intensas do dia 6 (Figura 9f) em diante. Ainda no dia 6, a crista altamente amplificada sobre a Patagônia se desloca ao sul do cavado sobre o Atlântico com anomalias positivas de até 300 mgp. Em decorrência dessa configuração, ocorre um aprofundamento do cavado a leste do Brasil e o fechamento da isoípsa de 5460 mgp. A literatura mostra que esse processo é conhecido por quebra da onda

de Rossby ou *cutoff-low* do termo em inglês (POSTEL; HITCHMAN, 1999; SPRENGER et al., 2007). No caso analisado, uma estrutura de bloqueio do tipo ômega com tendência para uma estrutura dipolo configurou-se entre o oceano Pacífico Leste e Atlântico Sudoeste e apresentou um processo ciclogênético a leste do Brasil em resposta ao *cutoff-low* na média troposfera. Ondas que apresentam esse comportamento se tornam ancoradas na troposfera superior devido à redução da advecção de vorticidade relativa, tornando os sistemas de tempo em superfície mais persistentes numa mesma região (IWABE; DA ROCHA, 2009).

Até o dia 8 (Figura 9h) a magnitude da anomalia de altura geopotencial permanece intensa na crista (300 mgp) sobre as Malvinas. No cavado sobre a sul brasileiro, as anomalias negativas também são fortes, mas concentradas numa área menor. O trem de ondas nesse dia exibe crista e cavados com orientação NO-SE, uma particularidade também encontrada em uma das análises de componentes principais obtidas no estudo de Reboita et al., (2015).

De modo geral, o processo de dissipação do trem de ondas é identificado a partir do dia 9 (Figura 9i), podendo ser observado pela diminuição da amplitude dos cavados e da crista, com redução também das anomalias de altura geopotencial. O cavado sobre a Região Sudeste persiste até o dia 10 (Figura 9j) e, posteriormente, se dissipa no oceano Atlântico (Figura 9l). Com relação à crista, apesar da mesma persistir ao norte das Malvinas entre os dias 9 (Figura 9i) e 11 (Figura 9k), sua amplitude diminui entre esses dias.

A fim de complementar a análise do acoplamento entre os sistemas de altos e baixos níveis da troposfera, apresenta-se o campo de anomalia da PNMM (em cores) juntamente com o valor da PNMM às 1200 Z do dia 1 ao dia 12 de junho. A Figura 10 complementa a análise realizada para a Figura 9, facilitando o entendimento da dinâmica dos sistemas. As características mais marcantes da PNMM no dia 1 (Figura 10a) são a presença de um pulso anticiclônico sobre a Argentina a partir da ASPS e um ciclone extratropical em desenvolvimento no Atlântico Sudoeste, que está identificado por “B” na Figura 8a. Altas pressões pós-frontais que adentram o continente sul-americano a partir do oceano Pacífico ao mesmo tempo que baixas pressões evoluem nas altas latitudes do oceano Atlântico são fatores clássicos que antecedem um evento de frio no Brasil, conforme mostrado em vários estudos (PEZZA; AMBRIZZI, 2005; REBOITA et al., 2015).

A Figura 10 indica que não há fortes anomalias de PNMM sobre o Brasil pelo menos até o dia 4 de junho (Figura 10d). No entanto, após essa data, a intensificação de um anticiclone sobre as Malvinas se associa com a expansão de sua crista sobre o interior da AS, principalmente no norte da Argentina (Figura 10e). Anomalias positivas de 5 hPa são vistas no oeste da Região Sul e no oeste do Mato Grosso do Sul nessa data. Posteriormente, no dia 6

(Figura 10f), o gradiente de pressão se intensifica entre o ciclone e o anticiclone no Atlântico Sudoeste, o que favorece a maior penetração de ar frio e o aumento da pressão atmosférica sobre o continente. Isso pode ser visto pelas anomalias positivas de PNMM abrangendo parte do Centro-Sul.

Com a incursão de ar frio ganhando força sobre o Brasil entre os dias 7 (Figura 10g) e dia 10 (Figura 10j), as anomalias positivas de PNMM abrangem grande parte do país, especialmente sobre a Região Sul, parte do Sudeste, Centro-Oeste e o centro-sul da Região Norte. Algumas áreas como o Rio Grande do Sul, oeste de Santa Catarina e do Paraná, Mato Grosso do Sul, sul do Mato Grosso e sul de Rondônia mostram anomalias positivas na ordem de 15 hPa neste evento (Figuras 10h). Para os dias 11 (Figura 10k) e 12 (Figura 10l), o enfraquecimento do ar frio sobre o continente reduz a pressão atmosférica, que por sua vez neutraliza os valores de anomalia da PNMM.

É possível verificar que a intensificação da crista em 500 hPa descrita anteriormente na Figura 9 foi a forçante dinâmica para o aumento da pressão atmosférica em superfície identificada na Figura 10 no Atlântico Sudoeste. Por outro lado, o cavado, também discutido na Figura 9, a leste da Região Sul forneceu suporte dinâmico para as regiões de baixa pressão em superfície observadas na Figura 10, especialmente a partir do dia 5 (Figura 10e). A estrutura de bloqueio do tipo ômega com tendência de estrutura dipolo citada anteriormente é refletida também em superfície entre os dias 5 (Figura 10e) e 7 (Figura 10g), onde o ciclone extratropical se desenvolve ao norte de uma zona de alta pressão, enquanto ambos os sistemas pouco se deslocam para leste.

Deste modo, o padrão de onda ancorada na atmosfera superior forçou um estacionamento dos sistemas de pressão em superfície próximos da costa leste da AS. Além disso, um forte gradiente de pressão configurou-se ao longo da bacia do rio da Prata e manteve os ventos de sul sobre o interior do Brasil por dias consecutivos.

Na Figura 11 tem-se o campo de anomalia da temperatura em 2 metros (em cores) juntamente com a PNMM. Essa variável permite avaliar o quão anômalo foi o ar frio que atingiu o Brasil durante a onda de frio do início de junho de 1985. Salienta-se que valores negativos (positivos) de anomalia equivalem aos desvios abaixo (acima) da média climatológica da temperatura.

A onda de frio de junho de 1985 pode ser dividida em dois momentos. O primeiro seria entre os dias 1 (Figura 11a) e 4 (Figura 11d), quando um sistema frontal atinge o Centro-Sul do Brasil (vide Figura 8) e o segundo entre os dias 5 (Figura 11e) e 10 (Figura 11j). No primeiro pulso de ar frio, as anomalias de temperatura não são tão fortes e abrangentes como

no segundo. Observa-se que nos dias 3 (Figura 11c) e 4 (Figura 11d) as anomalias mais intensas são da ordem de -6°C e apenas em parte da Região Sul e de Mato Grosso do Sul. Anomalias mais fracas e com menor abrangência são identificadas no Estado de São Paulo, sul de Minas Gerais, sul de Goiás e Mato Grosso nesse período.

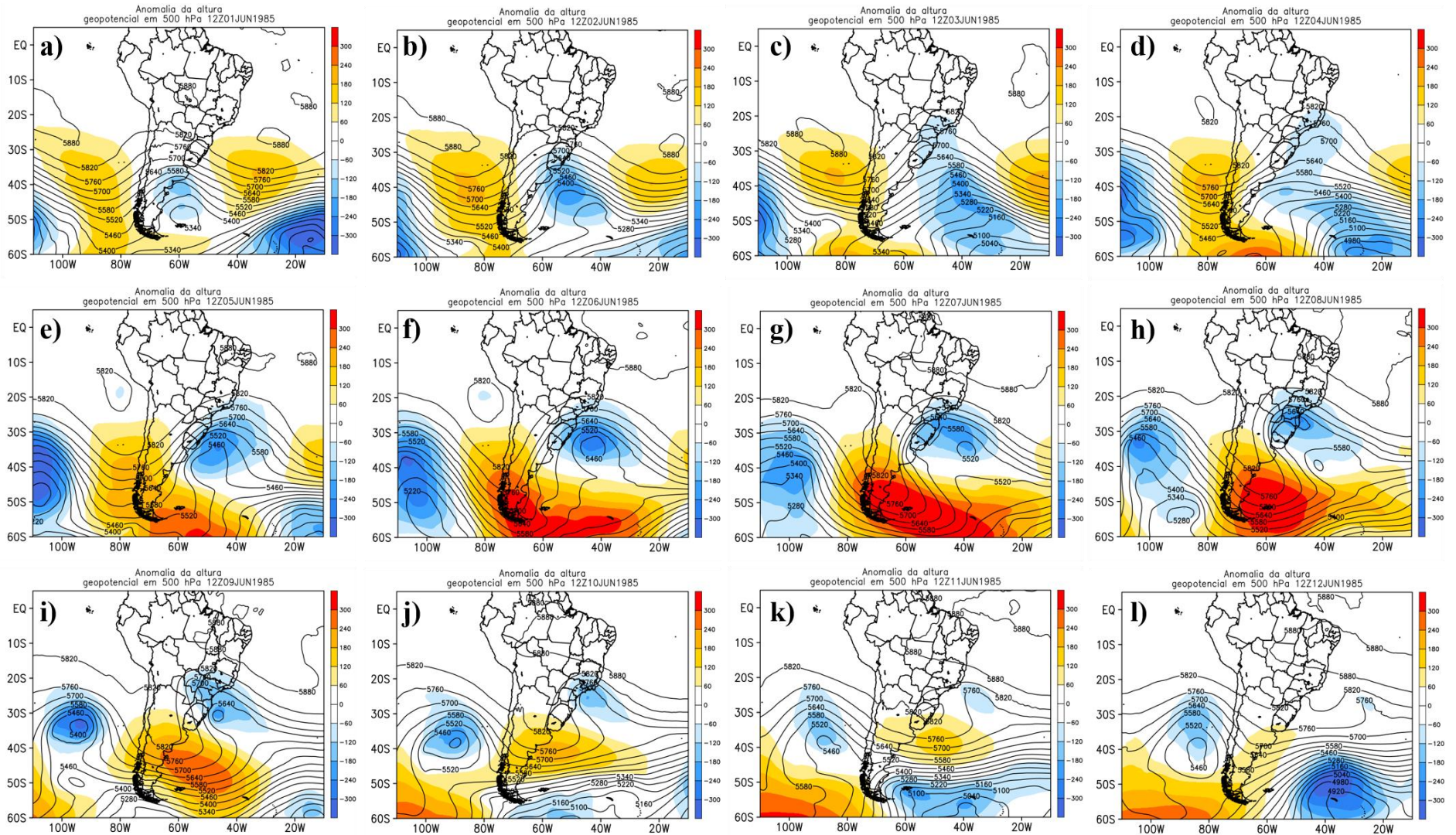
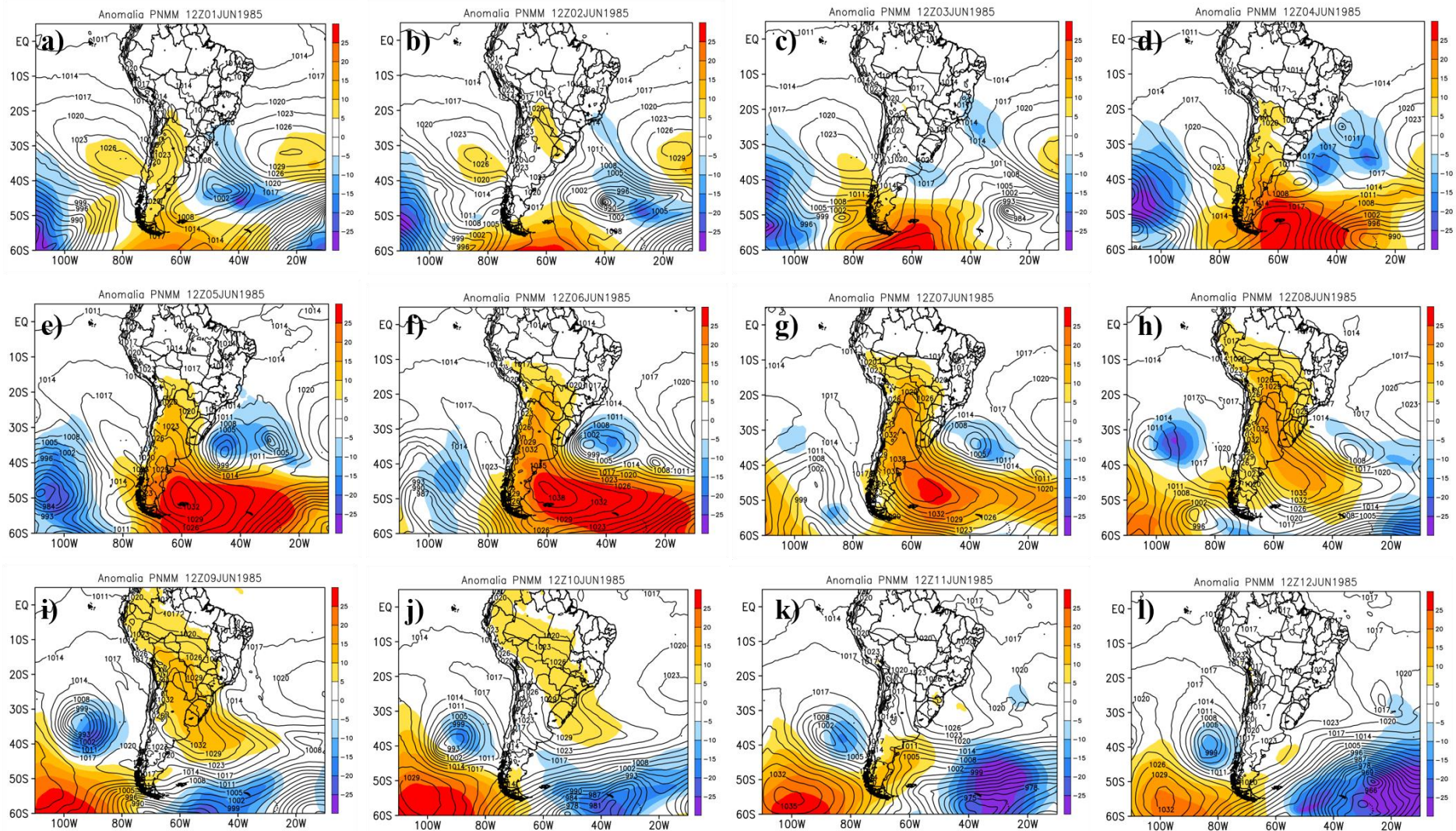


Figura 9 Anomalia de altura geopotencial em cores (m/g) e altura geopotencial em linhas contínuas em m/g ao nível de 500 hPa para o mesmo horário sinótico e datas apresentadas na Figura 8.



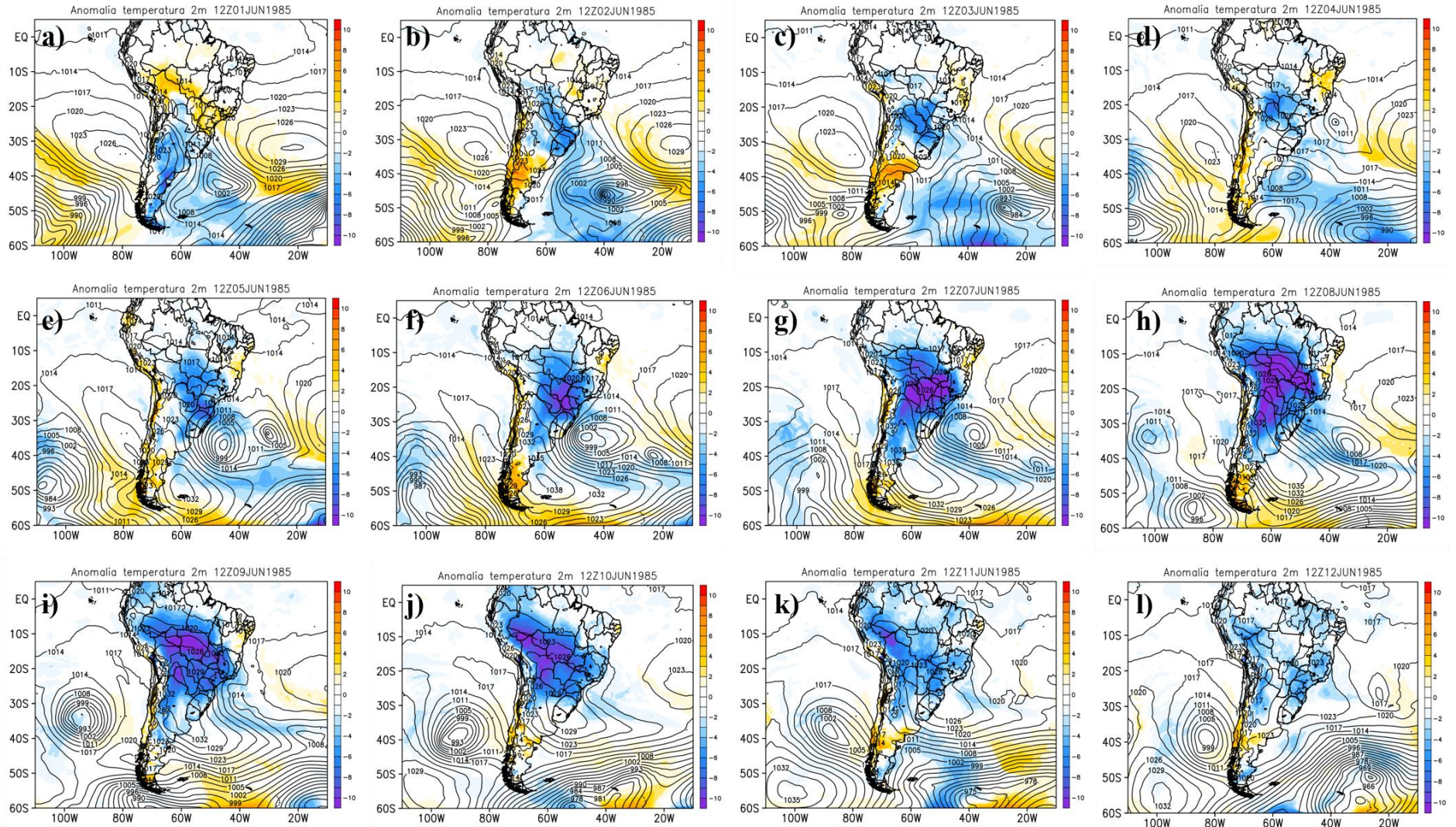


Figura 11 Anomalia da temperatura em 2 metros em cores (°C) e pressão ao nível médio do mar em linhas contínuas em hPa para o mesmo horário sinótico e datas apresentadas na Figura 8.

Já o segundo pulso frio foi o mais importante, visto que além de abranger grande parte do Brasil durou cerca de uma semana. Dinamicamente, o processo de amplificação da onda na média troposfera sucedido por uma estrutura de bloqueio foi a razão pelo segundo pulso de ar frio ser tão forte e duradouro. Com o fortalecimento do gradiente de pressão e, consequentemente, dos ventos de sul nos dias 6, 7 e 8 (Figuras 11f, 11g e 11h), a massa de ar frio é transportada para as baixas latitudes da AS. A penetração do ar frio no subtropical e trópico do Brasil é vista através das anomalias negativas que dominam o interior da AS e parte do Brasil (Figuras 11f, 11g e 11h). Valores de anomalia de temperatura na ordem de -10°C são verificados em parte do Sul e Centro-Oeste no dia 6 (Figura 11f), entre o Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso no dia 7 (Figura 11g) e numa ampla área do Centro-Oeste, parte do Sudeste e Norte no dia 8 (Figura 11h).

Do dia 8 (Figura 11h) ao dia 10 (Figura 11j), as anomalias negativas mais intensas atingem gradativamente o sul da Região Norte, caracterizando um episódio de friagem. Após o dia 10 (Figura 11j), as anomalias negativas se enfraquecem sobre o país, indicando que o ar frio começa a perder intensidade.

Com relação aos extremos de temperatura mínima, foram observados dois picos na região Sul, sendo um entre os dias 6 e 8 e outro entre os dias 10 e 11. O primeiro esteve associado a um amplo e intenso cavado que permaneceu sobre o sul do Brasil, favorecendo o ingresso de ar muito frio em níveis médios e altos, com suporte aos sistemas em superfície; em Santa Catarina e o Rio Grande do Sul destacam-se os valores de temperaturas máximas observadas durante este pico, em que no dia 6 as máximas foram de $3,8^{\circ}\text{C}$ em São Joaquim-SC, $6,7^{\circ}\text{C}$ em Vacaria-RS e $7,1^{\circ}\text{C}$ em Campos Novos-SC, e no dia 7 com $2,0^{\circ}\text{C}$ em São Joaquim-SC, $3,4^{\circ}\text{C}$ em Campos Novos-SC, $4,5^{\circ}\text{C}$ em Vacaria-RS, $5,3^{\circ}\text{C}$ em Chapecó-SC e $7,2^{\circ}\text{C}$ em Ibirubá-RS. As mínimas não foram tão baixas devido à nebulosidade que foi propiciada pelo cavado nos médios e altos níveis; as menores temperaturas mínimas nestes dois estados foram em São Joaquim-SC, com $-2,8^{\circ}\text{C}$ no dia 6, $-2,0^{\circ}\text{C}$ no dia 7 e $-1,0^{\circ}\text{C}$ no dia 8. Entretanto, o Paraná se manteve em condições atmosféricas mais estáveis, e por isso foram observadas mínimas mais baixas no dia 7 com $-0,8^{\circ}\text{C}$ em Castro e $0,5^{\circ}\text{C}$ em Curitiba. Este mesmo cavado se manteve sobre o sul do país até o dia 8, quando houve a amplificação de seu eixo e maior avanço sobre a região Sudeste. Com essa progressão do cavado e consequente estabilidade trazida pela alta migratória um novo pico mais intenso de temperaturas mínimas ocorreu na região Sul nos dias 10 e 11, sobretudo no Paraná, com mínimas de $-1,2^{\circ}\text{C}$ e $-0,8^{\circ}\text{C}$ em Castro nos dias 10 e 11 respectivamente, $1,1^{\circ}\text{C}$ em Campo Mourão e $1,3^{\circ}\text{C}$ em Curitiba no dia 10; fez ainda $0,0^{\circ}\text{C}$ em Campos Novos e $0,4^{\circ}\text{C}$ em

Lages-SC no dia 11. Na região Sul houve, também, precipitação de neve em Bom Jesus-RS (dias 7 e 8), São José dos Ausentes-RS (dias 7 e 8), São Joaquim-SC (dias 6 e 8) (O Estado de São Paulo, 08/06/1985 p. 13; 09/06/1985 p. 18).

A grande amplificação do cavado associada ao avanço mais intenso da alta migratória sobre a Região Sudeste favoreceu a ocorrência de temperaturas mais baixas de forma consistente devido ao forte suporte de ar frio em todos os níveis da troposfera. As temperaturas mais baixas foram observadas na metade norte do estado, com maior destaque para Ribeirão Preto, com mínimas de 0,2 °C, 0,3 °C e 0,8 °C, e Franca com 1,8 °C, 1,3 °C e 1,4 °C respectivamente nos dias 8, 9 e 10. Em Campinas a menor temperatura ocorreu no dia 8 com 1,4 °C; também foi observada máxima de apenas 10,7 °C na cidade no dia 9. Em Minas Gerais as menores temperaturas ocorreram no dia 9 em Lambari e Machado, com -2,2 °C e -1,8 °C respectivamente. Em Belo Horizonte fez 5,3 °C no dia 9 e 4,7 °C nos dias 10 e 11. Mesmo no norte do estado de Minas Gerais a temperatura caiu muito, com mínimas de 4,7 °C em Itamarandiba e 6,2 °C em Pirapora no dia 11. Segundo informações do jornal O Estado de São Paulo (11/06/1985, p. 14; 12/06/1985, p. 13) ocorreram geadas em todo o estado paulista e no sul de Minas Gerais. Houve danos às pastagens, o que prejudicou a produção de leite nas regiões de Bragança Paulista e Sorocaba, além de danos à fruticultura, olivicultura e hortaliças nas regiões de Catanduva e São José do Rio Preto. Os danos aos cafezais foram mais relevantes na região de Franca, onde 30 a 40% das plantações foram afetadas, com danos irreversíveis.

O Centro-Oeste também foi muito afetado por esta onda de frio, devido a forte amplificação do cavado nos médios e altos níveis, o que favoreceu a entrada de ar frio para latitudes mais baixas do que ocorre normalmente. Na região o pico ocorreu no dia 10, com mínimas de 1,0 °C na Fazenda Sucupira (Brasília), 3,3 °C em Brasília e 3,5 °C em Goiânia, a menor temperatura mínima entre todos os meses nas Normais Climatológicas de 1961-1990 (INMET, 2009). Entretanto, o sul de Goiás observou um pico no dia 11, quando fez -0,4 °C em Jataí e 3,8 °C em Catalão. No Mato Grosso fez 7,4 °C em Cuiabá, 4,1 °C em Meruri e 2,0 °C em Poxoréu no dia 10, e 3,1 °C em Meruri e 1,8 °C em Poxoréu no dia 11.

2.3.2 Padrões de grande escala

A fim de identificar os padrões atmosféricos de grande escala responsáveis pela onda de frio de junho de 1985, são apresentados na Figura 12 os campos de altura geopotencial e magnitude do vento em 250 hPa superior a 30 m/s a fim de mostrar os máximos de velocidade do vento associados às correntes de jato. As datas utilizadas nesta etapa da análise no HS são

do dia 3 a 8 de junho às 1200 Z, visto que nesse intervalo de dias houve processos importantes na circulação extratropical do HS.

Para o dia 3 (Figura 12a), verifica-se uma onda longa nas longitudes do Pacífico Leste e da AS. O eixo da crista dessa onda está identificado pela linha cerrada na cor verde ao longo da costa do Chile, enquanto o eixo do cavado está identificado pela linha tracejada amarela entre o Sudeste do Brasil e o oceano Atlântico Sudoeste. A proximidades das isoípsas de altura geopotencial em 250 hPa (10.200, 10320, 10440 m_gp), especialmente na região da crista e do cavado mencionados, evidencia a baroclinia intensificada e o acoplamento entre o jato subtropical e polar.

Durante o dia 4 (Figura 12b), a onda permanece ancorada nas longitudes do continente sul-americano e sem grandes alterações em relação ao dia anterior (Figura 12a). Entretanto, observa-se que nessa data há uma forte amplificação da onda (cavado-crista) entre o oceano Índico e o sul da Austrália, área identificada por um círculo vermelho tracejado. Do dia 5 (Figura 12c) ao dia 6 (Figura 12d) esse pulso de energia gerado entre 90°E e 150°E de longitude se propaga pelo jato de altos níveis em direção à AS, ao mesmo tempo em que a onda longa ainda se mostra estacionária sobre o continente.

A partir do dia 7 (Figura 12e) a energia gerada na região da Austrália alcança a AS, amplificando a onda estacionária já existente. Esse processo pode ser evidenciado pelo ganho de amplitude da crista e do cavado a jusante, além da inclinação do eixo de ambos os sistemas com orientação noroeste-sudeste. Essa inclinação de cristas e cavados altamente amplificados que afetam o continente sul-americano no contexto de ondas de frio é descrito na literatura em diversos estudos (MARENGO et al., 2002; MÜLLER; BERRI, 2012; REBOITA et al., 2015). O processo de amplificação e inclinação da onda foi importante para reforçar o ancoramento da mesma, visto que nesta condição, a crista penetrou o sul do cavado e configurou uma estrutura parcial de dipolo no campo de pressão. Com esse padrão de nível superior configurado, o campo bórico em superfície manteve ventos de sul por dias consecutivos no interior do Brasil, explicando a longevidade da onda de frio de junho de 1985.

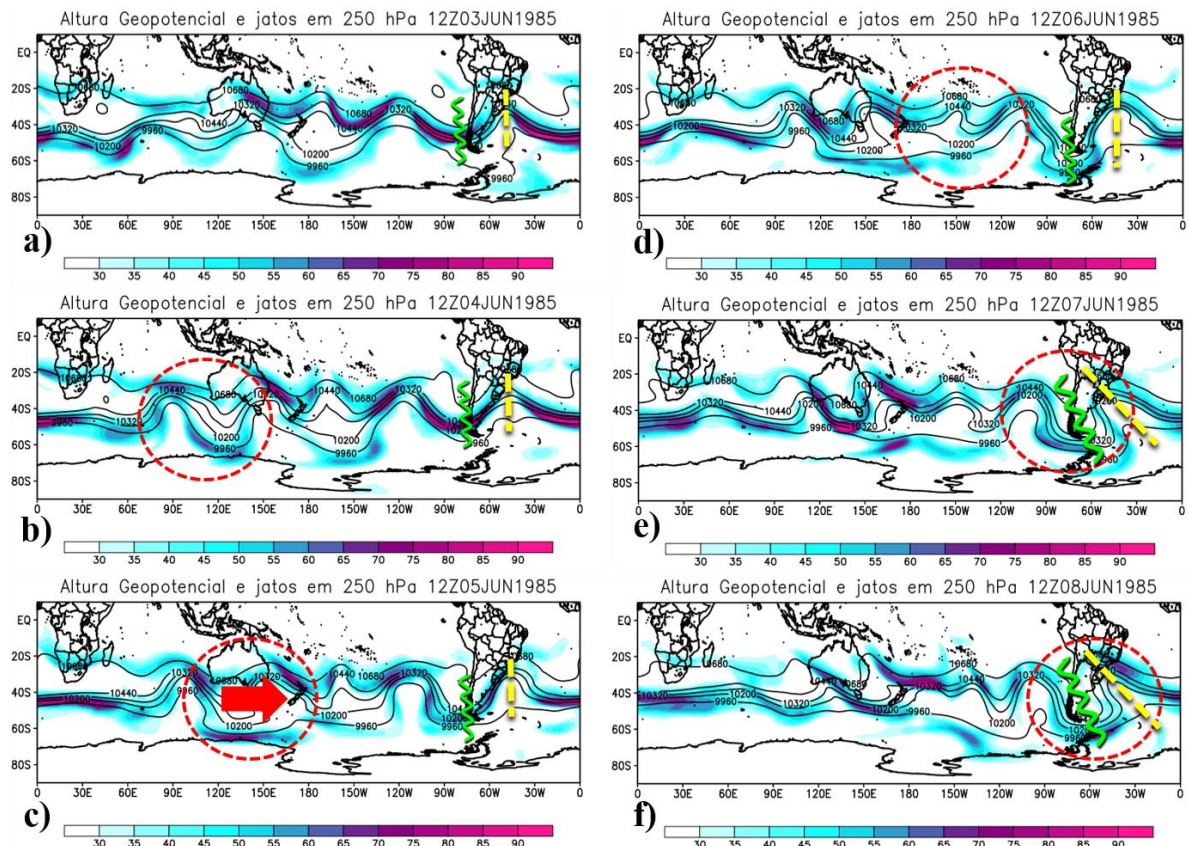


Figura 12 Corrente de jato em cores (m/s) e altura geopotencial em 250 hPa (mgp). As linhas tracejadas em amarelo se referem ao eixo dos cavados, enquanto as linhas cerradas em verde ao eixo das cristas.

2.4 CONCLUSÃO

Esta etapa da dissertação propôs estudar os padrões sinóticos e de grande escala que resultaram na forte e duradoura onda de frio de junho de 1985 que atingiu o Brasil, sendo uma das mais intensas do século XX. A análise sinótica mostra dois momentos da onda de frio.

O primeiro pulso sendo uma incursão de ar polar em parte do centro-sul brasileiro entre os dias 1 e 4 de junho. A entrada desse ar frio foi facilitada pelo padrão de uma onda longa e razoavelmente amplificada na atmosfera superior, que auxiliou o deslocamento de um sistema de alta pressão do Pacífico para o norte da Argentina ao mesmo tempo que um ciclone extratropical se desenvolvia no oceano Atlântico. As atuações de ambos os sistemas favoreceram a entrada de ventos de sul sobre o interior do país. Além disso, a rota desses sistemas exibiu similaridade com o modelo conceitual proposto por Pezza e Ambrizzi (2005) para trajetos de ciclones e anticiclones em ondas de frio na AS, assim como outros estudos (FORTUNE; KOUSKY, 1983; GIRARDI, 1983; GARREAU, 2000; PEZZA 2003; ESCOBAR 2007; REBOITA et al., 2015).

O segundo pulso de ar frio foi mais forte, amplo e persistente. Nos campos sinóticos ele é identificado a partir do dia 5 de junho através de uma amplificação do trem de ondas já amplificado sobre as longitudes do continente sul-americano. O ganho de amplitude da crista (cavado) sobre o Pacífico Leste (Atlântico Sudoeste) foi importante para formar um intenso anticiclone na região das Ilhas Malvinas e uma baixa pressão a leste da Região Sul do Brasil. No entanto, essa estrutura de circulação apresentou uma tendência de bloqueio dipolo no Atlântico na medida em que a crista penetrou o sul do cavado e favoreceu uma baixa desprendida, que também foi refletida em superfície na costa brasileira. A maioria dos estudos mostram essa relação das ondas de frio na AS com bloqueio atmosféricos, por exemplo, Sprenger et al. (2007).

Em decorrência da estrutura de bloqueio, um forte gradiente de pressão foi configurado e persistiu na costa leste da AS, de modo que houve intensos ventos de sul por dias consecutivos sobre o interior brasileiro. Neste evento, o sistema frontal associado conseguiu atingir as latitudes subtropicais e tropicais, com forte friagem no sul da Região Norte e queda acentuada da temperatura nos estados do centro-sul. Registros históricos de geadas mostram uma ampla área coberta pelo fenômeno nos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná, embora os dados sejam coerentes com a ocorrência de geadas de moderada a forte intensidade também no centro-sul de Goiás, Distrito Federal e sul do Mato Grosso, com prejuízos na agricultura e pecuária de leite em São Paulo e sul de Minas Gerais. Houve quebra de recordes mensais e absolutos de temperatura mínima em diversas estações meteorológicas nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Norte. Além da geada, foi observada precipitação de neve em alguns municípios da Serra Geral, como em São Joaquim-SC, Bom Jesus e São José dos Ausentes-RS, e no Pico das Agulhas Negras, no Estado do Rio de Janeiro.

A análise de grande escala permitiu identificar que uma forte amplificação no trem de ondas do HS na região da Austrália no dia 4 de junho explica o processo de amplificação da onda longa que já se encontrava ancorada sobre a AS. O pulso de energia propagado através da corrente de jato chegou nas longitudes do continente sul-americano no dia 7 de junho, e é observado pelo ganho de amplitude da onda e pela inclinação noroeste-sudeste da mesma.

Estudos desse tipo possuem inúmeras utilidades, por exemplo, revelam os padrões sinóticos de períodos frios anômalos sendo de grande utilidade para os profissionais da área de previsão de tempo e chamam a atenção dos tomadores de decisão para a elaboração de políticas públicas que visem reduzir os problemas associados com doenças e perda de culturas agrícolas.

2.5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), *Climate Forecast System Reanalysis* pela disponibilização dos dados e ao auxílio financeiro do CNPq, FAPEMIG e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil - Código de Financiamento 001). Agradecemos também ao INMET, IAC e EPAGRI pela disponibilização de dados meteorológicos.

2.6 REFERÊNCIAS

BRASIL DE FATO. Frio intenso causa morte de cinco pessoas em situação de rua em SP nos últimos 2 dias. Disponível em: <(https://www.brasildefato.com.br/2020/08/22/frio-intenso-causa-morte-de-cinco-moradores-de-rua-em-sp-nos-ultimos-2-dias)>. Acesso em: 15 de dezembro de 2020.

CAPUCIN, BRUNO CÉSAR 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, 2019.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE Service (C3S). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 2017. Disponível em: <(https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home)>. Acesso em 10/10/2020.

ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 241-254, 2007.

ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan; VAZ, João Caetano Mancini; REBOITA, Michelle Simões. Surface Atmospheric Circulation Associated With “Friagens” in Central-West Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 241-254.

REVISTA CAFEICULTURA. Entenda o que foi a Geada Negra que dizimou todas as plantações de café do Paraná, 2010. Disponível em: <(https://revistacafeicultura.com.br/?mat=34022)> Acesso em: 24/12/2020.

FORTUNE, Michael A.; KOUSKY, Vernon E. Two severe freezes in Brazil: Precursors and synoptic evolution. **Monthly weather review**, v. 111, n. 1, p. 181-196, 1983.

FRIO CHEGA MAIS CEDO E TRAZ AMEAÇA DE GEADAS. O Estado de São Paulo, São Paulo, 08 jun. 1985. p. 13.

FRIO DIMINUI, FICAM OS PREJUÍZOS. O Estado de São Paulo, São Paulo, 13 jun. 1985, p. 13.

GARREAUD, RenéD. Cold air incursions over subtropical South America: Mean structure and dynamics. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 7, p. 2544-2559, 2000.

GIRARDI, C. El pozo de los Andes. In: **Proceedings. 1st International Congress on Southern Hemisphere Meteorology, São José dos Campos, São Paulo, Brazil. Amer. Meteor. Soc.** 1983. p. 226-229.

HERSBACH, Hans; DEE, D. J. E. N. ERA5 reanalysis is in production. **ECMWF newsletter**, v. 147, n. 7, p. 5-6, 2016.

INMET. Normais Climatológicas do Brasil, 1961-1990, Brasília, DF, 2009. Disponível em: <(http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas)>. Acesso em: 25/12/2020.

INMET. Banco de dados meteorológicos. Disponível em: <(https://bdmep.inmet.gov.br/)>. Acesso em: 09/10/2020.

IWABE, Clara Miho Narukawa; DA ROCHA, Rosmeri Porfírio. An event of stratospheric air intrusion and its associated secondary surface cyclogenesis over the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D9, 2009.

KRISHNAMURTI, T. N. et al. Downstream amplification: A possible precursor to major freeze events over southeastern Brazil. **Weather and Forecasting**, v. 14, n. 2, p. 242-270, 1999.

LANFREDI, Isaque Saes; DE CAMARGO, Ricardo. Classification of Extreme Cold Incursions over South America. **Weather and Forecasting**, v. 33, n. 5, p. 1183-1203, 2018.

LUCYRIO, Vinícius; REBOITA, Michelle Simões; ALBIERI, Marcelo de Campos Garcia. ONDAS DE FRIO INTENSAS SOBRE O CENTRO-NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO DE 1961 A 2017. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

LUCYRIO¹, Vinícius et al. Validação das previsões de três ondas de frio pelo modelo GFS no Centro-Norte do Estado de São Paulo e Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 05, p. 1994-2018, 2020.

MARENGO, José A.; NOBRE, Carlos A.; CULF, Alistair D. Climatic impacts of “friagens” in forested and deforested areas of the Amazon basin. **Journal of Applied Meteorology**, v. 36, n. 11, p. 1553-1566, 1997.

MARENGO, Jose et al. Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 11, p. 2759-2786, 1997.

MARENGO, J. A. et al. Upper-air wave trains over the Pacific Ocean and wintertime cold surges in tropical-subtropical South America leading to Freezes in Southern and Southeastern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 73, n. 3, p. 223-242, 2002.

METEOROLOGIA PREVÊ NOVAS GEADAS. O Estado de São Paulo, São Paulo, 11 jun. 1985, p. 14.

MORTE E GEADAS EM SP, NEVE NO SUL. O Estado de São Paulo, São Paulo, 09 jun. 1985. p. 18.

MÜLLER, Gabriela V.; BERRI, Guillermo J. Atmospheric circulation associated with persistent generalized frosts in central-southern South America. **Monthly Weather Review**, v. 135, n. 4, p. 1268-1289, 2007.

MÜLLER, Gabriela V.; BERRI, Guillermo J. Atmospheric circulation associated with extreme generalized frosts persistence in central-southern South America. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 5-6, p. 837-857, 2012.

NAIRN, J.; FAWCETT, R. Defining heatwaves: heatwave defined as a heat-impact event servicing all. **Europe**, v. 220, p. 224, 2011.

OLIVEIRA, Paulo Jorge de et al. Efeitos de um evento de friagem nas condições meteorológicas na Amazônia: um estudo de caso. **Acta amazônica**, v. 34, n. 4, p. 613-619, 2004.

PAISAGENS BRANCAS, UM FENÔMENO EM SC E RS. O Estado de São Paulo, São Paulo, 9 jun. 1985. p. 18.

PARMENTER, Frances C. A Southern Hemisphere cold front passage at the equator. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 57, n. 12, p. 1435-1440, 1976.

PEZZA, ALEXANDRE BERNARDES. Ondas de frio na América do sul e as trajetórias dos ciclones e anticiclones extratropicais: climatologia sinótica. **Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil**, 2003.

PEZZA, Alexandre Bernardes; AMBRIZZI, Tércio. Dynamical conditions and synoptic tracks associated with different types of cold surge over tropical South America. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 25, n. 2, p. 215-241, 2005.

POSTEL, Gregory A.; HITCHMAN, Matthew H. A climatology of Rossby wave breaking along the subtropical tropopause. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 56, n. 3, p. 359-373, 1999.

REBOITA, Michelle Simões et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REBOITA, Michelle Simões; ESCOBAR, Gustavo; LOPES, Vitor. Climatologia sinótica de eventos de ondas de frio sobre a região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, 2015.

REBOITA, Michelle Simões et al. Impacts of Teleconnection Patterns on South America Climate: a Review. In: *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2020.

SELUCHI, Marcelo E.; NERY, Jonas T. Condiciones meteorologicas asociadas a la ocurrencia de heladas en la region de Maringa. **Rev. Brasileira Meteor**, v. 7, p. 523-534, 1992.

SILVEIRA, Rafael Brito et al. Impactos das ondas de frio sobre a saúde pública no município de São Joaquim-Santa Catarina-Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.

SPRENGER, Michael; WERNLI, Heini; BOURQUI, Michel. Stratosphere–troposphere exchange and its relation to potential vorticity streamers and cutoffs near the extratropical tropopause. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 64, n. 5, p. 1587-1602, 2007.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science: an introductory survey**. Elsevier, 2006.

TRENBERTH, Kevin F.; MO, Kingtse C. Blocking in the southern hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 113, n. 1, p. 3-21, 1985.

TT-DEWCE, W. W. O. Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events: Draft Version. **First Review by TT-Dewce**, 2016.

WPC International Desks. **Weather Prediction Center**. Disponível em: <(https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/wng/09_CSA/index.shtml)>. Acesso em: 06/01/2021.

VERA, Carolina S.; VIGLIAROLO, Paula K. A diagnostic study of cold-air outbreaks over South America. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 1, p. 3-24, 2000.

CONCLUSÃO GERAL

Essa pesquisa buscou um maior entendimento dos padrões de circulação atmosférica que resultaram em ondas de frio históricas na Região Sudeste do Brasil durante o século XX. O capítulo 1 teve por objetivo realizar uma análise sinótica individual de 12 extremos frios ocorridos entre os anos de 1961 a 2017, além dos padrões médios de grande escala para esses 12 casos. Já no capítulo 2 realizou-se um estudo de caso para o evento de 1985 devido sua grande magnitude e duração.

Os resultados encontrados para os 12 eventos individuais do ponto de vista de configuração sinótica exibem características similares entre eles. De modo geral, a amplificação do trem de ondas entre o oceano Pacífico e a AS antecede episódios de forte resfriamento no Sudeste. O posicionamento de uma crista (cavado) de grande amplitude sobre o oceano Pacífico Leste (continente sul-americano) é um mecanismo de nível superior importante para ventos de sul nos baixos níveis sobre o interior do Brasil e identificado em estudos anteriores (MARENGO et al., 1997; ESCOBAR, 2007; REBOITA et al., 2015; LANFREDI; CAMARGO, 2018). No entanto, a análise dos padrões médios anômalos dos 12 eventos revela um trem de ondas planetárias curvado entre as longitudes centrais do oceano Pacífico Sul em direção à AS. Esse mesmo sinal no trajeto das ondas aparece no *ray tracing* e indica que a região fonte das ondas de Rossby é a porção centro-leste do oceano Pacífico Sul (CAVALCANTI; KAYANO, 1999; GARREAUD, 2000; MARENGO et al., 2002; MÜLLER; BERRI, 2007), com exceção do ano de 1988 onde a região de origem provavelmente está situada mais ao norte e a leste da Nova Zelândia. Sugere-se que a amplificação das ondas sobre a AS observada nas composições levam a episódios da quebra da onda de Rossby (SPRENGER et al., 2013), caracterizando estruturas de bloqueio dipolo no oceano Atlântico Sudoeste e dando a manutenção para ventos de sul (advecção fria) em direção ao Brasil.

Com relação aos resultados do capítulo 2, a onda de frio de 1985 foi dividida em dois momentos, a saber: um primeiro pulso de ar frio menos intenso entre os dias 1 e 4 de junho e o segundo pulso mais forte a partir do dia 5 e que persistiu até meados do dia 11. A primeira incursão de ar frio se relacionou com uma estrutura de onda longa na atmosfera superior entre o oceano Pacífico e a AS, o que direcionou um anticiclone pós-frontal ao norte da Argentina ao mesmo tempo que um ciclone se desenvolvia no Atlântico Sudoeste. Essa configuração da pressão atmosférica é encontrada em modelos conceituais no contexto de ondas de frio no Brasil (PEZZA; AMBRIZZI, 2005). Entretanto, o campo bórico foi rapidamente modificado a partir do dia 4, quando um forte anticiclone se estabelece na região das Ilhas Malvinas e

uma baixa pressão se intensifica ao norte dessa alta pressão e a leste da Região Sul do Brasil. Com isso, um forte gradiente de pressão persistiu em direção ao Centro-Sul do país e manteve por dias consecutivos a advecção fria.

A configuração do anticiclone nas Ilhas Malvinas e a do ciclone ao seu norte teve como causa uma nova amplificação do padrão de onda crista-cavado que já estava sobre a AS, o que levou a um evento de quebra da onda de Rossby (SPRENGER et al., 2013). Sugere-se que o ganho de amplitude da onda gerou uma estrutura de bloqueio ômega invertido sobre as longitudes da AS e oceanos adjacentes, mas com tendência para uma assinatura de bloqueio dipolo no oceano Atlântico Sudoeste nos dias seguintes. Isso pode ser constatado nos campos através da crista que penetra a parte sul do cavado no oceano Atlântico e pelo campo de pressão que apresenta um forte anticiclone de bloqueio nas Ilhas Malvinas e um ciclone persistente ao seu norte. O processo de amplificação da onda já existente sobre a AS surgiu em reposta a uma perturbação baroclínica identificada no oceano Índico (sudoeste da Austrália).

Para trabalhos futuros, seria importante a investigação dos índices de oscilações climáticas e suas relações com a região fonte das ondas de Rossby, a fim de encontrar relações entre as variabilidades de baixa frequência em cada uma das 12 ondas de frio estudadas aqui.

REFERÊNCIAS GERAIS

AGÊNCIA BRASIL. Estudo diz que Sudeste reúne maior número de residentes no Brasil: 42,2%. Disponível em: <(<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2019-10/estudo-diz-que-sudeste-reune-maior-numero-de-residentes-422#:~:text=A%20regi%C3%A3o%20Sudeste%20%C3%A9%20a,milh%C3%B5es%20de%20pessoas%20no%20pa%C3%ADs>)>. Acesso em: 05/02/2020.

CAVALCANTI, I. F. A.; KAYANO, M. T. High-frequency patterns of the atmospheric circulation over the Southern Hemisphere and South America. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 69, n. 3, p. 179-193, 1999.

EDUCA + BRASIL. Economia da Região Sudeste. Disponível em: <(<https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/matematica/economia-da-regiao-sudeste>)>. Acesso em: 05/02/2020.

ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 241-254, 2007.

GARREAUD, RenéD. Cold air incursions over subtropical South America: Mean structure and dynamics. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 7, p. 2544-2559, 2000.

LANFREDI, Isaque Saes; DE CAMARGO, Ricardo. Classification of Extreme Cold Incursions over South America. **Weather and Forecasting**, v. 33, n. 5, p. 1183-1203, 2018.

MARENGO, Jose et al. Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 11, p. 2759-2786, 1997.

MARENGO, J. A. et al. Upper-air wave trains over the Pacific Ocean and wintertime cold surges in tropical-subtropical South America leading to Freezes in Southern and Southeastern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 73, n. 3, p. 223-242, 2002.

MÜLLER, Gabriela V.; BERRI, Guillermo J. Atmospheric circulation associated with persistent generalized frosts in central-southern South America. **Monthly Weather Review**, v. 135, n. 4, p. 1268-1289, 2007.

PEZZA, Alexandre Bernardes; AMBRIZZI, Tércio. Dynamical conditions and synoptic tracks associated with different types of cold surge over tropical South America. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 25, n. 2, p. 215-241, 2005.

POLI, Paul et al. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. **Journal of Climate**, v. 29, n. 11, p. 4083-4097, 2016.

REBOITA, Michelle Simões; ESCOBAR, Gustavo; LOPES, Vitor. Climatologia sinótica de eventos de ondas de frio sobre a região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, 2015.

SILVEIRA, Rafael Brito et al. Impactos das ondas de frio sobre a saúde pública no município de São Joaquim-Santa Catarina-Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018.

SPRENGER, Michael; MARTIUS, Olivia; ARNOLD, Julian. Cold surge episodes over southeastern Brazil—a potential vorticity perspective. **International journal of climatology**, v. 33, n. 12, p. 2758-2767, 2013.

TT-DEWCE, W. W. O. Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events: Draft Version. **First Review by TT-Dewce**, 2016.

ANEXOS

Anexo 1 – Configuração atmosférica média das 12 ondas de frio extremas na Região Sudeste do Brasil.

