



**Análise Sinótica de um Período Frio em Bauru - SP em Julho de 2015**  
Synoptic Analysis of a Cold Period in Bauru-SP in July 2015

Bruno César Capucin<sup>1</sup>; Marta Llopart<sup>2</sup>; Michelle Simões Reboita<sup>3</sup> & Clara Miho Narukawa Iwabe<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências

Avenida Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01 Vargem Limpa, 170333-60 - Bauru, SP - Brasil

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências / Centro de Meteorologia de Bauru (IPMet).

Avenida Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01 Vargem Limpa, 17033-360 - Bauru, SP - Brasil

<sup>3</sup> Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Instituto de Recursos Naturais

Avenida BPS, 1303 Pinheirinho, 37500-903 - Itajubá, MG - Brasil

E-mails: brunocapucin23@gmail.com; m.llopart@unesp.br; reboita@gmail.com; clara.iwabe@unesp.br

Recebido em: 09/11/2018 Aprovado em: 10/01/2019

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_1\\_53\\_65](http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_53_65)

## Resumo

Os primeiros dez dias do mês de julho de 2015 em Bauru, SP, apresentaram temperaturas baixas com um declínio mais acentuado no dia 05. Portanto, o objetivo desse estudo foi descrever as características da atmosfera que conduziram a esse declínio da temperatura no dia 05. Para isso, utilizaram-se dados da reanálise ERA-Interim com resolução horizontal de  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ . Foram construídas e analisadas as cartas sinóticas de 2 dias antes a dois dias após o dia de menor temperatura, bem como de outros campos atmosféricos. No período que antecede a maior queda de temperatura em Bauru, há uma onda no escoamento de oeste em 500 hPa que se propaga pelo oceano Pacífico Sul. Quando esse sistema cruza os Andes, ocorre a formação da onda frontal em superfície que juntamente com o anticiclone migratório causam advecção horizontal da massa de ar frio que influenciou o tempo em grande parte do Brasil no início do mês de julho de 2015. Considerando o padrão de onda em 500 hPa, a amplificação da crista pela intensa advecção quente no lado sudoeste da alta pós-frontal, em conjunto com a redução da advecção de vorticidade relativa negativa (positiva) a leste do cavado (crista) e os baixos valores de vorticidade potencial na região do cavado tiveram participação no lento deslocamento da onda, o que contribuiu para a maior permanência da alta pós-frontal no oceano Atlântico e, portanto, para um predomínio do transporte de ar mais frio em direção ao interior do Estado de São Paulo.

Palavras-chave: onda de frio; análise sinótica; Bauru

## Abstract

The first ten days of July 2015 in Bauru, SP, presented low temperatures with a higher decline on day 05. The purpose of this study was to describe the atmosphere characteristics that led to this decline in air temperature on July 5th. For this, we used the ERA-Interim reanalysis data with horizontal resolution of  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ . Synoptic charts were constructed and analyzed from 2 days before to 2 days after the day of interest; other atmospheric fields were analyzed as well. In the period prior to the highest temperature drop in Bauru, there is a wave in the west flow at 500 hPa that propagates through the South Pacific Ocean. When this system crosses the Andes, the formation of the frontal surface wave occurs that, together with the anticyclone migratory species cause horizontal advection of the cold air mass that influenced the time in much of Brazil in the beginning of July 2015. Considering the wave pattern at 500 hPa, the amplification of the ridge by the intense hot advection on the southwest side of the high post (positive) to the east of the dug (crest) and the low values of potential vorticity in the area of the dug had participation in the slow displacement of the wave, which contributed to the greater permanence of the post-frontal discharge in the Atlantic Ocean and, therefore, for a predominance of the transport of cooler air towards the interior of the State of São Paulo.

**Keywords:** cold wave; synoptic analysis; Bauru

## 1 Introdução

Os eventos extremos de precipitação e temperatura do ar têm ganhado maior repercussão na mídia devido à maior intensidade e frequência de ocorrência comparados ao passado. Eventos de ondas de calor e de frio, secas e alagamentos estão se tornando cada vez mais frequentes, e muitas pesquisas os associam com as mudanças climáticas.

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2015), uma onda de frio pode ser definida como um período de forte resfriamento numa grande área sendo marcada por queda significativa na temperatura do ar próximo à superfície, de forma que a temperatura fica abaixo de certos limiares climatológicos. Embora o conceito pareça simples, não há uma metodologia única para caracterizar a ocorrência de ondas de frio. Por exemplo, Alves *et al.* (2017) compilaram 10 métodos e os aplicaram no Estado de Santa Catarina. Entre esses estava o de Nairn & Fawcett (2013), que consideram um evento de onda de frio quando a temperatura média do ar fica abaixo do percentil de 5% da climatologia por pelo menos 3 dias consecutivos.

As ondas de frio afetam grandemente a agricultura. Como exemplo, tem-se a que ocorreu em junho de 1994 e impactou a produção de café na região Sudeste do país, resultando em uma alta no preço do produto (Marengo *et al.*, 1997). Além dos prejuízos econômicos no setor agrícola, os extremos frios também causam problemas na saúde, pois propiciam o aumento de doenças respiratórias (Silveira *et al.*, 2018).

Durante o inverno austral, intensas massas de ar frio atingem as latitudes subtropicais da América do Sul (AS) provocando redução significativa da temperatura do ar próximo à superfície. Garreaud (2000) verificou que os maiores impactos das baixas temperaturas e geadas entre a Argentina, sul do Brasil e Bolívia ocorrem especialmente no período do inverno. De acordo com o autor, as fortes incursões frias se desenvolvem quando um anticiclone do sudeste do oceano Pacífico se move para a Argentina, ao mesmo tempo em que um ciclone extratropical está no oceano Atlântico sudoeste. Este campo de pressão em superfície é auxiliado pelas advecções

de vortacidade na média troposfera. Padrão atmosférico similar também foi registrado por Escobar *et al.* (2004) que estudaram as incursões de ar frio na região central da Argentina.

Lupo *et al.* (2001) descreveram três tipos de padrões associados a ondas de frio na AS; o primeiro mostra uma incursão fria associada um anticiclone fraco a leste dos Andes na ausência de crista em níveis médios/altos da atmosfera. O segundo padrão indica a presença de uma crista em nível superior e um forte anticiclone em superfície a leste dos Andes. Já, o terceiro padrão, mostra a presença de ar frio a leste da costa do Brasil. As ondas sinóticas em altos níveis que atravessam a cordilheira dos Andes também contribuem para o fortalecimento dos ciclones na costa do sudeste da América do Sul (Vera & Vigiariolo, 2002) e, esses ciclones, podem contribuir para a advecção de ar frio para o interior do continente.

Considerando a AS, na retaguarda das intensas frentes frias, os anticiclones pós-frontais se movem do oceano Pacífico para o sul do continente e são forçados a se deslocarem em direção ao trópico (Vera & Vigiariolo, 2000). Iwabe & da Rocha (2009), através de um estudo de caso de ciclone secundário no sudeste da AS, ocorrido em abril de 1999, verificaram que uma intensa incursão de ar frio para as latitudes tropicais esteve associada a uma anomalia de Vorticidade Potencial (VP) em 300 hPa que despreendeu um centro de baixa pressão em 500 hPa. Este desprendimento posicionou os vetores de gradiente de vorticidade e vento de forma a diminuir a advecção horizontal de vorticidade ciclônica a leste do eixo do cavado (mecanismo de deslocamento). Com isso, houve desaceleração no deslocamento da onda obrigando a alta pós-frontal em superfície a se deslocar para norte, o que provocou quedas bruscas de temperatura em vários estados brasileiros das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (Satyamurty *et al.*, 2002). Krishnamurty *et al.* (1999) também mostraram que as geadas no Sudeste brasileiro se associam com um cavado em níveis médios da atmosfera com grande amplitude, alcançando até mesmo as regiões tropicais da AS.

Escobar (2007) estudou os padrões de grande escala relacionados à ocorrência de ondas de frio na cidade de São Paulo. O autor encontrou que a maio-

ria das ocorrências de ondas de frio está associada à passagem de frentes frias que se deslocam da Argentina em direção ao Brasil. Esses sistemas frontais são acompanhados por anticiclones pós-frontais que apresentam grande variabilidade de posição e intensidade. Já a configuração mais típica da circulação atmosférica em 500 hPa é uma onda constituída por uma crista amplificada no oceano Pacífico Sul e um cavado à jusante que se prolonga entre o sul da AS e o oceano Atlântico Sudoeste. Ainda sobre as ondas de frio na região Sudeste do Brasil, Reboita *et al.* (2015) verificaram que os principais eventos de ondas de frio na região sul de Minas Gerais se associam ao deslocamento de um anticiclone pós-frontal do oceano Pacífico Leste para o sul da AS, enquanto que há um ciclone extratropical posicionado sobre o oceano Atlântico Sudoeste. Ambos os sistemas atuam de forma a intensificar a advecção horizontal de ar frio sobre a AS. Tais resultados corroboram com os encontrados por Escobar (2007).

Pezza & Ambrizzi (2005) construíram um modelo conceitual de trajetórias de ciclones e anticiclones associados a eventos de forte resfriamento na AS que alcançam o Estado de São Paulo. No modelo, a maioria dos anticiclones deslocam-se do extremo sul da AS e migram para norte na altura do Paraguai e, posteriormente, se deslocam para leste em direção ao oceano Atlântico pelas latitudes do Estado de São Paulo. Mais recentemente, Lanfredi & Camargo (2018) identificaram 3 padrões principais de incursões frias na AS e descreveram a trajetória dos anticiclones. Para o padrão atmosférico que se associa com ondas de frio na região do Estado de São Paulo, os autores encontraram resultados similares aos encontrados por Escobar (2007) e Reboita *et al.* (2015). Em síntese, para o sudeste do Brasil, há poucos estudos sobre ondas de frio (Pezza & Ambrizzi, 2005; Escobar, 2007; Reboita *et al.*, 2015 e Lanfredi & Camargo, 2018).

Considerando o município de Bauru, localizado quase na parte central do Estado de São Paulo (22,4°S/49°W e 526 metros de altitude), esse possui temperatura média anual de cerca de 22,4°C (Peron *et al.*, 2016). Entretanto, os primeiros dez dias do mês de julho de 2015 apresentaram temperaturas baixas que podem até classificar o período como o

de uma onda de frio (detalhes na seção 2). Além disso, o dia 05 teve o maior declínio nas temperaturas.

Como as temperaturas em Bauru, em geral, são elevadas, sequências de dias frios podem ser nocivas para a agricultura, como para a cana-de-açúcar e laranja que são os cultivos predominantes na região, e para a saúde da população, propiciando doenças respiratórias. Diante desses fatos, o objetivo do estudo é apresentar a análise sinótica do sistema que causou o maior declínio na temperatura do ar registrado no dia 05 de julho de 2015. Como será mostrado nos resultados, o sistema frontal que contribuiu para a maior queda na temperatura do ar em Bauru apresentou padrão típico de incursão de ar frio na AS e a frente fria chegou até a região Amazônica.

## 2 Metodologia

Para mostrar a evolução das temperaturas em Bauru no mês de julho de 2015 (Figura 1) foram utilizados dados da estação meteorológica convencional do Centro de Meteorologia de Bauru (IPMet). Os primeiros dez dias do mês de julho de 2015 apresentaram dias com temperatura média abaixo do valor climatológico do período de maio a setembro (Figura 1), que é, em geral, considerado o período seco na região Sudeste do Brasil (Reboita *et al.*, 2015). Além disso, a temperatura média diária do início de julho de 2015 também foi inferior ao percentil de 5%, calculado de maio a setembro (17,8°C), o que caracteriza uma onda de frio de acordo com a metodologia de Nairn & Fawcett (2013). Portanto, o período de 01 a 09 de julho pode ser considerado como o de ocorrência de uma onda de frio em Bauru.

Alguns fatos que merecem destaque na Figura 1: (a) a amplitude térmica diária nos dias da onda de frio é pequena em Bauru (~4°C) e a partir do dia 10 a amplitude aumenta, assumindo o padrão típico do inverno na região: manhãs frias (temperaturas mínimas baixas) e grande aumento das temperaturas no decorrer do dia implicando em temperaturas máximas elevadas, (b) as temperaturas mínimas entre os dias 01 a 04 de julho de 2015 (período dentro da onda de frio) são maiores do que as temperaturas mínimas típicas desse período do ano e entre os dias 01 a 09 de julho, há uma queda na temperatura mínima no dia 05.

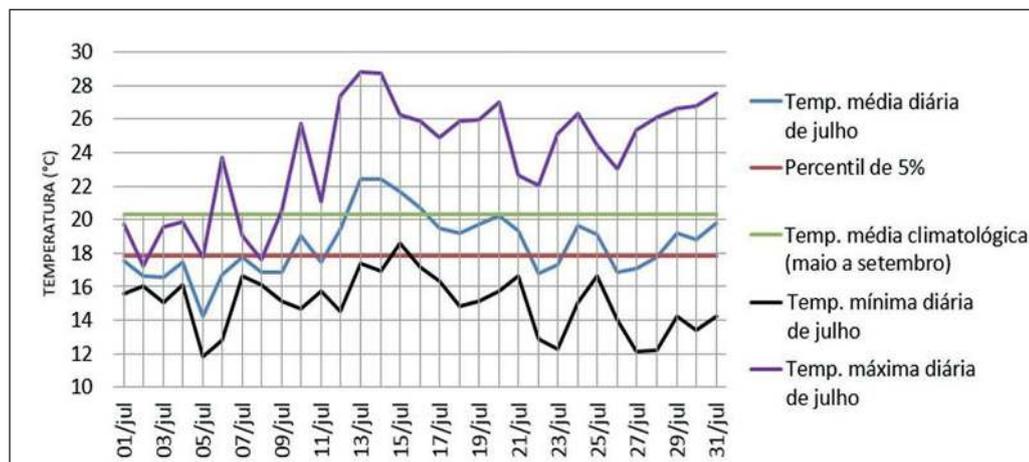


Figura 1 Temperaturas mínima diária (linha preta), média diária (azul) e máxima diária (roxa) medidas na estação do IPMet em °C para julho de 2015, juntamente com a climatologia (linha verde) da temperatura média e valor do percentil de 5% (linha vermelha) da série histórica, ambos considerando o período maio a setembro de 1985 a 2009.

Diante das informações obtidas com a Figura 1, foi realizada uma análise sinótica prévia para entender o padrão registrado nas temperaturas. Verificou-se que entre os dias 01 a 03 de julho havia predomínio de nebulosidade sobre o Estado de São Paulo (imagens de satélite não mostradas) e que nos dias subsequentes teve atuação de uma frente fria (dias 04 e 05 de julho) que chegou a atuar até o sul da Amazônia, contribuindo provavelmente para um episódio de friagem. A nebulosidade dos dias 01 e 03 atuou de forma a não deixar a temperatura mínima decair e a máxima a aumentar, implicando numa média mais baixa do que o normal do período de maio a setembro. Já a incursão de uma alta pós-frontal contribuiu para a manutenção das temperaturas baixas e para o máximo declínio das temperaturas no dia 05. Portanto, este trabalho descreve os padrões sinóticos de 02 a 07 de julho a fim de enfatizar apenas as condições atmosféricas antes e posterior ao dia de menor registro das temperaturas (dia 05) em Bauru. Para isso, utilizaram-se dados da reanálise ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) que estão disponíveis desde o ano de 1979 até o presente. Esses dados são gerados pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). A reanálise possui resolução horizontal de  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ , 37 níveis verticais em coordenada de pressão e é disponibilizada nos horários sinóticos padrões. No presente estudo utilizaram-se os níveis verticais de 1000, 850, 500 e 250 hPa das 12 Z. As variáveis utilizadas foram: temperatura do ar, vorticidade relativa, umidade específica, componente meridional e zonal do vento e geopotencial. Além disso, foi utilizada a pressão

atmosférica ao nível médio do mar. Definiu-se o horário das 12 Z por corresponder às 9:00 horas local, que é a mais próxima daquela em que ocorrem as temperaturas mínimas na área de estudo.

Os sistemas frontais foram identificados seguindo a literatura clássica que se encontra sintetizada em Escobar *et al.* (2010) e Reboita *et al.* (2017 a,b), que leva em consideração informações de gradiente horizontal de espessura da camada 500/1000 hPa, isóbaras e posição das correntes de jato em altos níveis, por exemplo.

No presente estudo, utilizaram-se as variáveis primárias (temperatura do ar, componentes horizontais do vento e geopotencial) para obter variáveis secundárias, como: a advecção horizontal de temperatura, altura geopotencial, advecção horizontal de vorticidade relativa e espessura da camada.

A advecção horizontal de temperatura do ar que é calculada por meio da equação 1 (Holton, 1992):

$$-\vec{v} \cdot (\vec{\nabla}T) \quad (1)$$

onde  $\vec{v}$  é a velocidade do vento horizontal em 1000 hPa e  $(\vec{\nabla}T)$  é o gradiente horizontal de temperatura em 1000 hPa.

O cálculo da altura geopotencial (Wallace & Hobbs, 2006) e da advecção horizontal de vorticidade relativa (Holton, 1992) seguiram as equações 2 e 3, respectivamente:

$$H_{500} = \phi_{500} / g \quad (2)$$

onde  $H_{500}$  é a altura geopotencial em 500 hPa,  $\phi_{500}$  é o geopotencial do nível de 500 hPa e  $g$  trata-se da aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>).

$$-\vec{v} \cdot (\vec{\nabla} \zeta) \quad (3)$$

onde  $\vec{v}$  é a velocidade do vento horizontal em 500 hPa e  $(\vec{\nabla} \zeta)$  é o gradiente horizontal da vorticidade relativa em 500 hPa.

Já a espessura da camada entre os níveis de 1000 e 500 hPa é obtida pela equação 4 (Wallace & Hobbs, 2006):

$$z = (\phi_f - \phi_i) / g \quad (4)$$

onde  $z$  é a espessura da camada entre 1000 e 500 hPa,  $\phi_f$  é o geopotencial em 500 hPa,  $\phi_i$  o geopotencial em 1000 hPa e  $g$  a aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>).

### 3 Resultados e Discussão

#### 3.1 Cartas Sinóticas

O resfriamento do ar registrado em Bauru pela estação do IPMet no começo de julho de 2015 caracterizou um evento frio no município (Figura 1), com o maior declínio das temperaturas no dia 05. Deste modo, descrevem-se aqui as características sinóticas associadas à passagem do sistema frontal sobre o Estado de São Paulo que contribuiu para as menores temperaturas em Bauru no dia 05. Inicialmente são descritos os padrões observados nas cartas sinóticas e, na sequência, é realizada uma análise de diferentes variáveis atmosféricas para explicar os padrões registrados em superfície.

A Figura 2, lado esquerdo, enfatiza a evolução do padrão sinótico em superfície (espessura da camada 500/1000 hPa, pressão atmosférica ao nível médio do mar, intensidade do vento e altura geopotencial em 250 hPa e sistemas sinóticos às 12 Z de 02 a 07 de julho de 2015) enquanto o lado direito enfatiza a evolução dos padrões em 250 hPa (vento em barbelas e a altura geopotencial em 250 hPa e as correntes de jato, em que as iniciais JS, JPN e JPS indicam, respectivamente, jato subtropical, ramo norte do jato polar e ramo sul do jato polar).

Na sequência temporal observa-se que, em superfície, no dia 02 (Figura 2A) há uma onda ciclônica no centro-leste da Argentina, cujo ramo frontal frio está acoplado com o ramo sul do jato polar (Figura 2G). Do dia 02 para o 03, a frente fria se intensifica e atinge o Rio Grande do Sul e Paraguai. Tal intensificação foi auxiliada pelo suporte de um anticiclone migratório que se desacopla do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) e começa a atravessar os Andes (Figura 2B). Observa-se, também, que a linha de espessura de 5400 metros é deslocada para o Uruguai e norte argentino em relação ao dia anterior (Figura 2A). Essa linha de espessura é utilizada para localizar o ar polar. Ainda considerando o dia 03, a porção mais equatorial da frente fria encontra-se acoplada com o ramo norte do jato polar (Figura 2H).

Entre os dias 04 e 05 (Figuras 2C, 2D), a alta pós-frontal se desloca do norte argentino para o Rio Grande do Sul e auxilia na propagação da frente fria para latitudes mais baixas do Brasil. Em altos níveis, ainda se verifica o acoplamento do sistema em superfície com o ramo norte do jato polar (Figura 2I). Considerando o dia 04 (Figura 2C), o centro da alta pressão pós-frontal se localiza ao norte da Argentina e possui valor de 1025 hPa. Na latitude do Estado de São Paulo, observa-se um retardo da frente fria em relação às áreas adjacentes. No dia em análise, os maiores gradientes horizontais de temperatura do ar (indicados pelas linhas de espessura) ocorrem sobre o Rio Grande do Sul, contribuindo para um núcleo máximo de velocidade do vento configurando o ramo norte do jato polar (Figura 2I). Já o ciclone extratropical associado ao sistema frontal que atua na AS se encontra em 40°S/40°W. O dia 04 é considerado como o de situação pré-frontal em Bauru (Figura 2C) o que pode ser também confirmado pelo aumento da temperatura registrado nesse dia na Figura 1. No dia 05, como o sistema frontal se propaga mais para norte e a isóbara de 1020 hPa passa pelo Estado de São Paulo, isso indica que Bauru já se encontra numa situação pós-frontal (Figura 2D). De fato, a Figura 1 também indica queda de temperatura em relação ao dia anterior. Sobre o oceano, a frente fria ainda se encontra acoplada com o ramo norte do jato polar (Figura 2J).

Nos dias 06 e 07 (Figuras 2E, 2F), o sistema anticiclônico se afasta do continente, mas seu setor noroeste ainda persiste sobre o Sudeste do Brasil. No oceano Atlântico Sul, o anticiclone forma uma estru-

tura de dipolo no campo de pressão atmosférica com o ciclone ao norte (27°S/18°W). O sistema frontal se

dissipa no dia 07 no oceano Atlântico, como pode ser visto na Figura 2F.

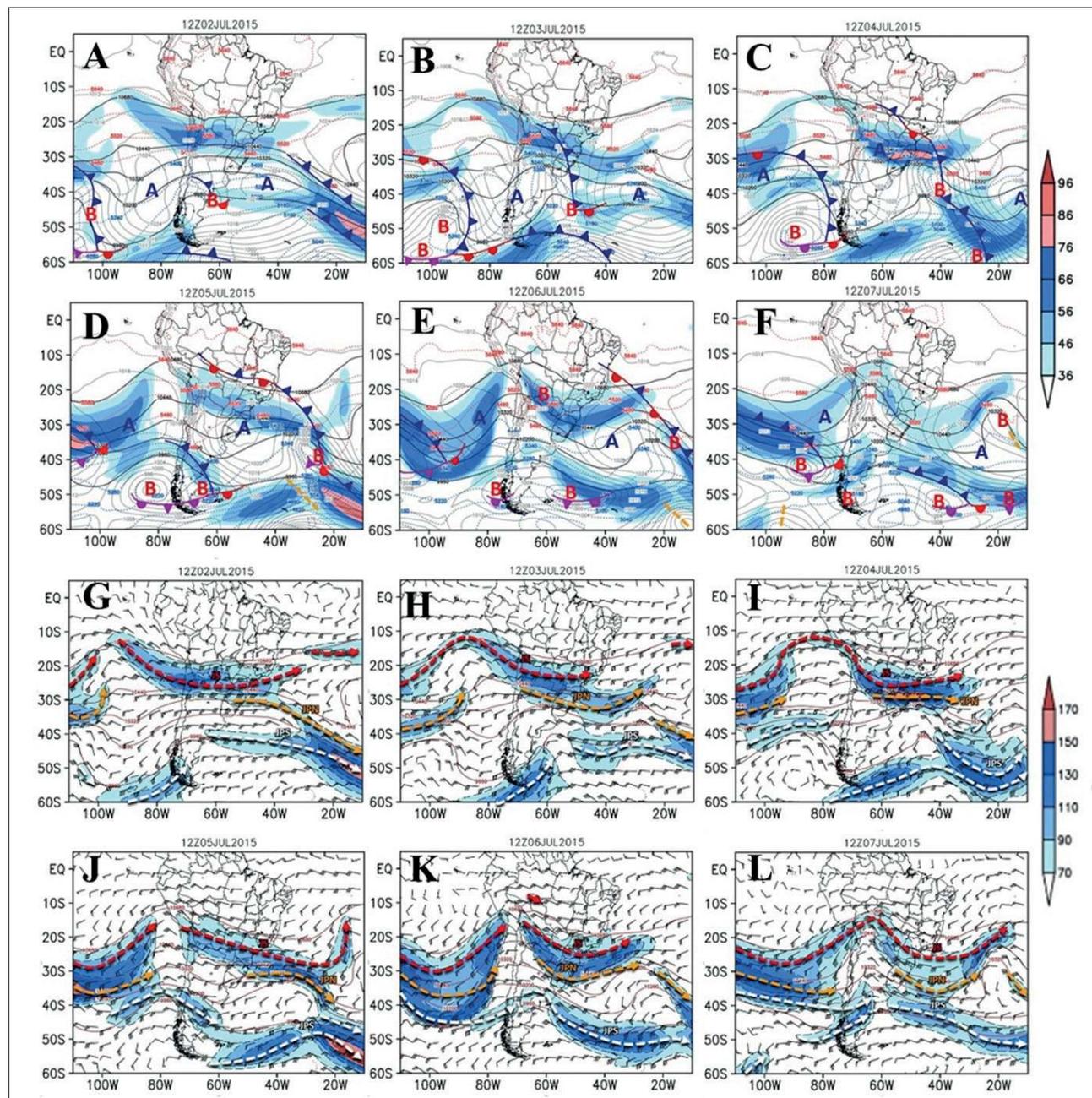


Figura 2 Lado esquerdo: Corrente de jato em 250 hPa (m/s, cores), pressão ao nível médio do mar em linhas contínuas (hPa), espessura da camada 500/1000 hPa em linhas tracejadas (m), altura geopotencial em linhas contínuas em negrito (m<sub>g</sub>p) em 250 hPa e sistemas atuantes às 12 Z para os dias: (A) 02/07/15 (B) 03/07/15 (C) 04/07/15 (D) 05/07/15 (E) 06/07/15 e (F) 07/07/15. As letras (A) e (B) plotadas são sistemas de alta e baixa pressão, respectivamente. As linhas com triângulos azuis são frentes frias, linhas com semicírculos vermelhos frentes quentes, linhas com triângulos e semicírculos roxos frente oclusa e linhas com triângulos azuis e semicírculos vermelhos frente estacionária. Os cavados de baixas pressões estão indicados com linhas tracejadas em laranja. Lado direito: vento em barbeta em 250 hPa (nós), alturas geopotenciais típicas para localização dos jatos de altos níveis (m<sub>g</sub>p) e as correntes de jato em 250 hPa em cores (nós), onde JS indica jato subtropical (linha pontilhada vermelha), JPN indica ramo norte do jato polar (linha pontilhada laranja) e JPS indica ramo sul do jato polar (linha pontilhada branca) às 12Z para os dias: (G) 02/07/15 (H) 03/07/15 (I) 04/07/15 (J) 05/07/15 (K) 06/07/15 (L) 07/07/15.

### 3.2 Análise de Outras Variáveis Atmosféricas

#### Advecção Horizontal de Temperatura do Ar

A Figura 3 mostra o campo de vento e advecção horizontal de temperatura para o nível de 1000 hPa e pressão atmosférica ao nível médio do mar do dia 02 a 07 de julho de 2015 às 12 Z. Os valores negativos (positivos) de advecção horizontal de temperatura correspondem à advecção fria (quente). Na sequência temporal da Figura 3, nota-se que o desenvolvimento do anticiclone pós-frontal e do ciclone extratropical formam um gradiente de pressão zonal e, esse gradiente induzido pelo campo bórico, configura ventos de sul que geram advecção fria entre o centro sul da AS e oceano Atlântico adjacente.

Do dia 03 ao dia 04 (Figuras 3B, 3C), a alta pós-frontal transpõe os Andes com pressão central superior a 1020 hPa e favorece advecção fria no interior da AS. A deformação no anticiclone está relacionada aos processos adiabáticos impostos pela orografia dos Andes no escoamento atmosférico (o que é mostrado pela equação de Sutcliffe; Kousky & Elias, 1982; Marrafon & Reboita, 2018) e também com a conservação da vorticidade potencial. (Figura 3B). No dia 03 (Figura 3B), o centro-oeste de São Paulo é dominado por advecção quente, enquanto no dia 04 (Figura 3C), já ocorre predomínio de ad-

vecção fria, mas isso parece não afetar muito Bauru, uma vez que a estação meteorológica (Figura 1) registra nesse dia um ligeiro aumento de temperatura. Já nos demais ocorre queda de temperatura.

Nos dias 06 e 07 (Figuras 3E e 3F), o lento movimento para leste da alta pós-frontal sobre o oceano Atlântico muda a direção dos ventos sobre o Estado de São Paulo para nordeste, cessando a advecção fria no interior paulista, mas a temperatura média do ar em Bauru permanece abaixo da média climatológica, sendo um comportamento comum após a passagem de frentes frias. Entretanto, nos dias 06 e 07 as temperaturas estiveram mais altas em relação ao dia 05. Sugere-se que essa elevação da temperatura possa ter relação com a cobertura de nuvens, visto que essa é responsável pelo aumento da temperatura mínima e desfavorecendo o aumento da máxima.

A trajetória realizada pelo anticiclone neste estudo é similar à do modelo conceitual apresentado por Pezza & Ambrizzi (2005), onde na maioria dos casos investigados, os sistemas de alta pressão migram do sul do continente até a região do Paraguai e posteriormente movem-se para leste, bem como a de outros estudos que descrevem episódios de incursão de ar frio na AS como: Marengo *et al.* (1997); Garreaud (2000); Escobar (2007); Reboita *et al.* (2015) e Lanfredi & Camargo (2018).

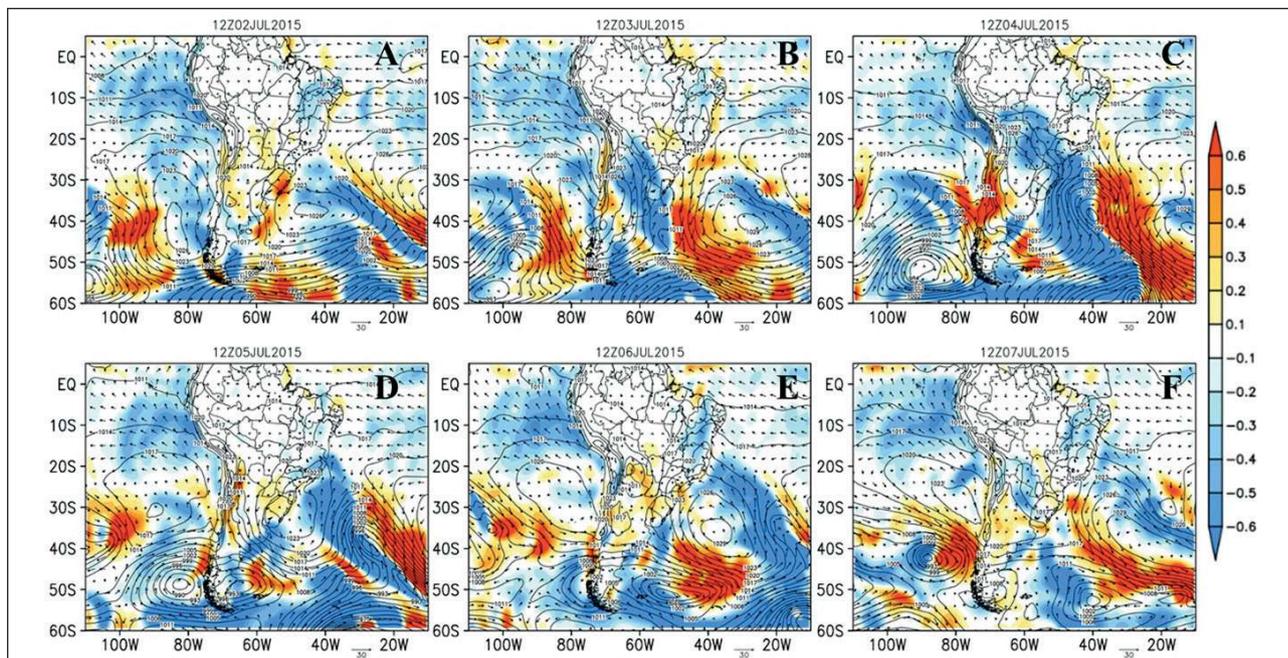


Figura 3 Advecção horizontal de temperatura do ar em cores para 1000 hPa ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}) \cdot 10^{-4}$ , pressão ao nível médio do mar (hPa) em linhas contínuas, e vento em 1000 hPa (m/s) às 12 Z para os dias: (A) 02/07/15 (B) 03/07/15 (C) 04/07/15 (D) 05/07/15 (E) 06/07/15 e (F) 07/07/15.

## Umidade Específica e Linhas de Corrente

A fim de indicar o conteúdo de umidade da atmosfera associado às massas de ar, é mostrada na Figura 4 a umidade específica do ar junto à isoterma de 0°C, que é uma traçadora da incursão de ar frio, e as linhas de corrente para o nível de 850 hPa às 12 Z do dia 02 a 07 de julho de 2015. De forma resumida, os baixos valores de umidade específica na Figura 4 permitem identificar uma massa de ar mais seca na costa oeste da AS que ao passar do tempo se desloca para o interior do continente, indicando a localização do anticiclone pós-frontal. A evolução da alta é descrita na sequência.

No dia 2 (Figura 4A), a circulação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) propicia ventos de nordeste na região de Bauru e há maior umidade específica sobre todo o Estado de São Paulo. No dia 03 (Figura 4B), o anticiclone adentrando o continente e o ciclone no oceano Atlântico próximo à costa da Argentina são responsáveis por uma pista de ventos de sul da região da Patagônia ao sul do Paraguai, onde há um gradiente de umidade específica e, portanto, onde se localiza a frente fria e o limite máximo da advecção fria, conforme as Figuras 3B e 2B, respectivamente. Os ventos de sul além de secos são frios e contribuem para o deslocamento da isoterma de 0°C até a região da Província de Buenos Aires, o que sugere a presença do ar polar continental em parte do centro-leste argentino. No dia 04 a isoterma de 0°C apresenta seu máximo deslocamento latitudinal próximo da AS em 36°S/52°W. Tanto

no dia 03 quanto no dia 04 há ar mais úmido sobre o Estado de São Paulo que está associado ao transporte da região tropical continental em direção ao sul/sudeste do Brasil.

No dia 05 (Figura 4D), o gradiente de pressão formado entre o ciclone e o anticiclone no Atlântico (35°S/42°W) favorece ventos de sul sobre o oceano Atlântico, mas através da circulação anticiclônica da alta pós-frontal tornam-se de sudeste/leste em direção a São Paulo, favorecendo menores valores de umidade específica do ar na região de Bauru, durante todo o período em estudo. Nesse dia o sistema frontal já havia passado pela cidade (Figura 2D). A isoterma de 0°C em 38°S/42°W evidencia a presença do ar polar marítimo no oceano que passa a ser advecado em direção ao leste da região Sudeste do Brasil, onde se identifica valores negativos de advecção fria (Figura 3D). Por fim, nos dias 06 e 07 (Figuras 4E e 4F), o deslocamento para leste da alta pós-frontal ao longo do Atlântico muda a direção dos ventos no Estado de São Paulo, onde passam a ser de nordeste e transportam maior umidade do oceano para a região de Bauru. Para o dia 06 (Figura 4E), verifica-se que o escoamento de noroeste sobre o interior do continente (23°S/60°W) apresenta curvatura ciclônica na região da baixa pressão (Figura 2E), sugerindo que o sistema contribuiu na intensificação do escoamento mais quente das baixas latitudes da AS em direção a borda sudoeste da alta pós-frontal no oceano Atlântico Sudoeste. Isso pode ser evidenciado por um recuo para sudeste na isoterma de 0°C em 50°S e 40°W.

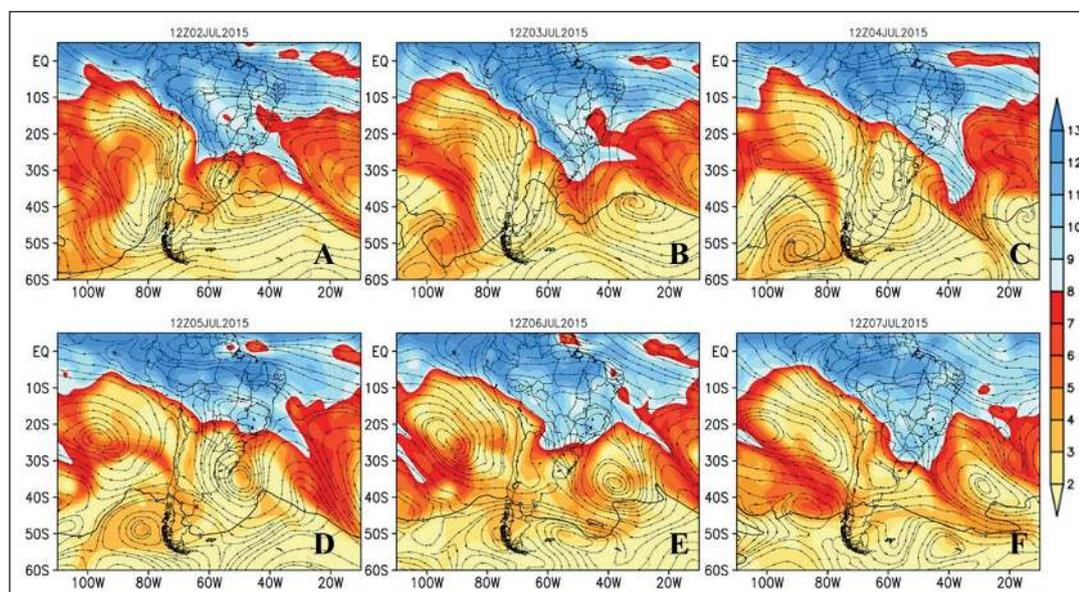


Figura 4  
Umidade específica (g/kg; cores) e isoterma de 0°C (linha contínua preta) e linhas de corrente no nível de 850 hPa às 12 Z para os dias: (A) 02/07/15 (B) 03/07/15 (C) 04/07/15 (D) 05/07/15 (E) 06/07/15 e (F) 07/07/15.

## Altura Geopotencial e Advecção Horizontal de Vorticidade Relativa

Para identificar a contribuição dos níveis médios da troposfera no desenvolvimento dos sistemas de baixa e alta pressão em superfície, na Figura 5 são apresentados os campos de altura geopotencial e advecção horizontal de vorticidade relativa para o nível de 500 hPa às 12 Z do dia 02 a 07 de julho de 2015. Valores positivos (negativos) indicam advecção horizontal de vorticidade anticiclônica (cyclônica). Além disso, advecção horizontal de vorticidade ciclônica é proporcional à divergência de massa (Kousky & Elias, 1982), o que influencia o desenvolvimento de sistemas em superfície.

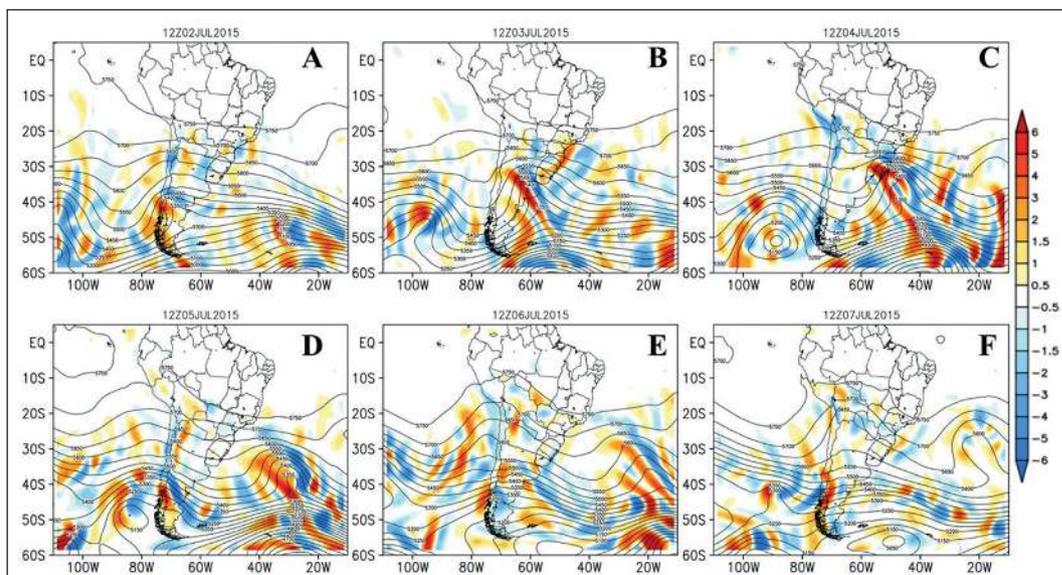
No dia 02 (Figura 5A), há uma crista sobre o oceano Pacífico e um cavado com pequena amplitude à jusante sobre o norte da Patagônia. Nota-se, também, um cavado ao norte do Chile. O deslocamento da onda atmosférica para leste no dia seguinte (Figura 5B) posiciona a região leste da crista sobre a Argentina com altos valores de advecção de vorticidade anticiclônica, contribuindo para o desacoplamento do anticiclone migratório da ASPS em direção à Argentina (Figura 2B). O cavado com eixo sobre Buenos Aires e orientação noroeste-sudeste se mostra mais amplificado comparado ao dia anterior (Figura 5A) e o sistema configura a ocorrência de advecção de vorticidade ciclônica a leste do eixo, o que fornece suporte para o ciclone extratropical em desenvolvimento observado em 45°S/50°W na Figura 2C.

Durante o dia 04 (Figura 5C), a onda continua a mover-se para leste e a crista associada encontra-se entre o centro-sul da Argentina e o oceano Atlântico. Nota-se o aumento da advecção de vorticidade anticiclônica a leste da crista sobre o Rio Grande do Sul e oceano Atlântico. O aumento da vorticidade anticiclônica na média troposfera é um dos fatores que contribuem para o aumento da pressão em superfície com o passar do tempo e, portanto, a direção dos ventos na média troposfera auxilia o deslocamento do anticiclone em superfície para o sul do Brasil. Esse fato pode ser evidenciado pelo posicionamento do centro da alta pós-frontal entre o Rio Grande do Sul e o oceano no dia 05 (Figura 2D).

No dia 05 (Figura 5D), a onda ainda se desloca para leste com baixos (altos) valores de advecção de vorticidade a leste do cavado (crista) no oceano Atlântico. Já nos dias 06 e 07 (Figuras 5E, 5F), observa-se a redução significativa das advecções de vorticidade.

Escobar (2007) encontrou um padrão semelhante de ondas em 500 hPa em eventos de ondas de frio na AS. De acordo com o autor, a maioria dos casos se relacionam com uma crista amplificada sobre o Pacífico Sul e um cavado à jusante entre o sul da AS e o oceano Atlântico Sudoeste no nível de 500 hPa. Cavalcanti & Kousky (2003) também observaram que a principal forçante para ondas de frio na AS tem relação com o processo de amplificação do trem de ondas entre o oceano Pacífico e Atlântico. Outro estudo com resultados similares ao obtido aqui é o de Lanfredi & Camargo (2018).

Figura 5 Advecção de vorticidade relativa em cores ( $1/s$ )\* $10^{-9}$  e altura geopotencial (mgp) no nível de 500 hPa às 12 Z para os dias: (A) 02/07/15 (B) 03/07/15 (C) 04/07/15 (D) 05/07/15 (E) 06/07/15 e (F) 07/07/15.



## Vorticidade Potencial

A variável VP é uma variável conservativa em movimentos adiabáticos e foi inicialmente introduzida por Rossby (Rossby, 1940). A VP envolve as variáveis vorticidade relativa e estabilidade estática. Portanto, o ar estratosférico das latitudes mais altas pode se deslocar para os níveis da troposfera tropical formando vorticidade ciclônica (Vaughan *et al.*, 1994 e Cox *et al.*, 1995,1997), pois para conservar a VP é necessário aumentar sua vorticidade relativa em virtude do decréscimo da estabilidade estática. A presença de VP em altos níveis tem importante contribuição no desenvolvimento de perturbações de latitudes médias. Segundo Hoskins *et al.* (1985), a aproximação de anomalias de VP de altos níveis sobre uma região baroclínica em superfície induz circulação ciclônica em superfície a leste da anomalia de VP, que por sua vez ajuda reforçar a circulação ciclônica de altos níveis. Esta interação reforça a circulação ciclônica em toda a coluna formando um intenso ciclone. Em altos níveis, a própria circulação da anomalia de VP advecta altos valores de VP ciclônica (de sul para norte) a oeste, e baixos valores de VP ciclônica (de norte para sul) a leste. Isto dificulta o deslocamento de todo o sistema para leste.

A Figura 6 refere-se à evolução da VP em 300 hPa e da altura geopotencial em 500 hPa durante a passagem da perturbação de latitudes médias que causou a maior queda de temperatura em Bauru. Lembra-se aqui que os valores de VP ciclônica no Hemisfério Sul (HS) são negativos, e as regiões que apresentam núcleos de VP muito abaixo de -1,5 VP são chamadas de anomalias de VP (Elbern *et al.*, 1998).

Na Figura 6A, há uma onda cuja crista encontra-se no oceano Pacífico Sul e o cavado à jusante ao norte da Patagônia. Nesse cavado há valores bastante negativos de VP, ou seja, uma região de anomalia dessa variável localizada em 70°W-42,5°S. Na Figura 2A, nota-se que em 250 hPa há uma corrente de jato que se estende de 70°W em direção leste e que se posiciona em torno da latitude de 42,5°S. Em torno de 55°S tem-se uma outra corrente de jato desde 100°W a 70°W. O lado polar da entrada da primeira corrente de jato (região de movimento subsidente

da circulação direta do jato) centrado em 42,5°S e o lado equatorial da saída da segunda corrente de jato (região de movimento subsidente da circulação indireta do jato) centrado em 55°S estão localizados na região do núcleo de anomalia da VP. Esta configuração das correntes de jatos, quando os movimentos subsidentes da circulação direta e indireta de duas correntes de jato se acoplam, provoca a intrusão do ar estratosférico para os níveis da tropopausa (Danielsen, 1968).

No dia 03 (Figura 6B) ocorre a amplificação do cavado entre o centro argentino e o oceano Atlântico adjacente, e a anomalia de VP acompanha todo o eixo do cavado. Pode-se observar também que neste dia os gradientes de temperatura em superfície sobre o norte da Argentina e Uruguai aumentaram (observada por meio do gradiente de espessura da camada de 1000 e 500 hPa na Figura 2B). Este gradiente foi responsável pelo deslocamento do cavado para nordeste (Figura 6B).

Já nos dias 04 e 05 (Figura 6C, 6D), a onda entre a AS e o oceano Atlântico se desloca para nordeste e o cavado não altera sua amplitude. Em ambos os dias, as anomalias de VP na região do cavado entre 30°-40°S se mantém. No dia 04 de julho, no campo de altura geopotencial ao norte do cavado nota-se um aumento do seu gradiente. Isto é uma consequência do aumento do gradiente de temperatura discutido na Figura 2C, que por sua vez intensificou a corrente de jato em 250 hPa e deslocou o cavado para nordeste. Este deslocamento do cavado fez com que o centro de baixa pressão se movesse mais para norte contribuindo para a incursão da alta pressão pós-frontal no Estado de São Paulo. Neste mesmo dia (Figura 6C), nota-se, a oeste do centro de anomalia de VP, áreas com valores entre -1,5 e -3,5 UVP. De acordo com Danielsen (1968), esta região recebe advecção de VP ciclônica por meio do escoamento de sul para norte da circulação da vorticidade ciclônica associada ao centro de anomalia de VP, dificultando o movimento de todo o sistema para leste. De fato, do dia 03 (Figura 6B) ao dia 04 (Figura 6C), o cavado adquire um deslocamento mais lento, e do dia 04 para dia 05 (Figura 6D) o deslocamento se torna um pouco mais acelerado, voltando a desacelerar entre os dias 06 e 07 (Figura 6E, 6F). Tais deslocamentos mais lentos

do cavado em níveis médios podem contribuir para a incursão do anticiclone pós-frontal ao norte.

Neste evento, a intensificação da circulação ciclônica do cavado em 500 hPa devido à anomalia de VP não foi suficiente para desprender um centro de baixa pressão e provocar uma diminuição na advecção horizontal de vorticidade ciclônica a leste do eixo do cavado. Uma hipótese que explica isso, pode ser a intensificação da corrente de jato ao norte do centro de anomalia de VP, pois isso mantém o escoamento mais zonal impedindo o desprendimento de uma baixa fechada. A intensificação da circulação ciclônica do cavado em 500 hPa manteve intensa a advecção horizontal de vorticidade ciclônica a leste do eixo do cavado, pois a configuração entre o vetor gradiente de vorticidade e o vetor vento ainda permaneceram mais paralelos devido à manutenção do formato de onda do cavado.

Nos dias 06 e 07 (Figura 6E e 6F), observa-se que as anomalias de VP desintensificam significativamente em ambos os dias, e o cavado em 500 hPa fica semi-estacionário no oceano Atlântico (20°-45°S) em função da amplificação da crista explicada na Figura 5 e também devido a diminuição drástica da advecção quente a leste da baixa pressão (em torno de 20° W e 30°-35°S) (Figura 2E, 2F).

#### 4 Considerações finais

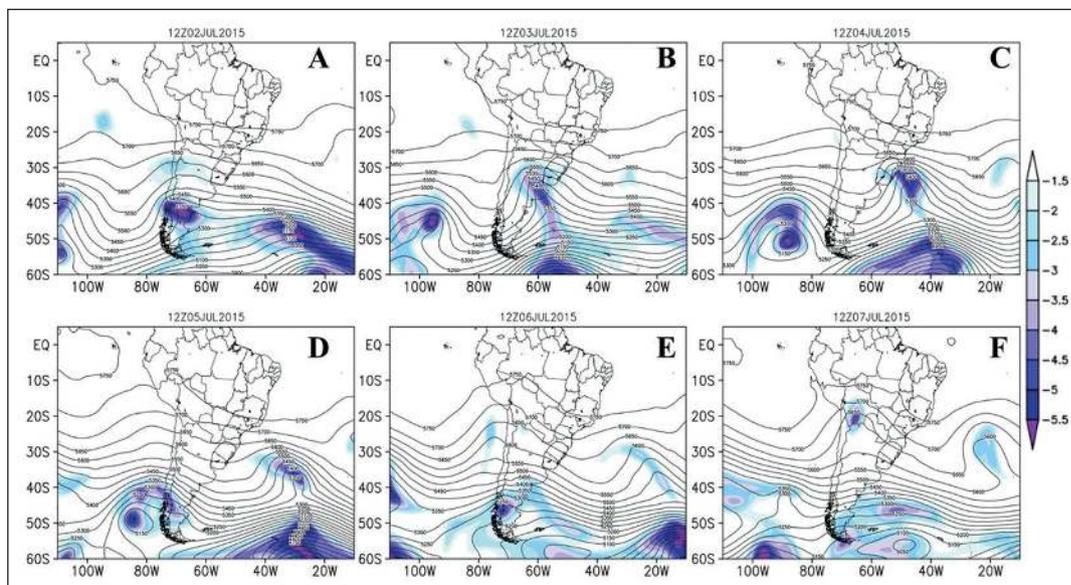
Entre os dias 01 e 09 de julho de 2015 Bauru, SP, experimentou baixas temperaturas (mínima,

média e máxima), que em termos da metodologia de Nairn & Fawcett (2013), tais dias poderiam ser classificados como de ocorrência de onda de frio. Até o dia 04, predominou nebulosidade no Estado de São Paulo, o que contribuiu para as baixas temperaturas. Entretanto, a menor temperatura registrada no período ocorreu no dia 05 de julho. Assim, o objetivo desse estudo foi descrever o ambiente sinótico associado a essa queda na temperatura do ar.

A queda da temperatura do ar no dia 05 esteve associada a passagem de uma alta pós-frontal, cuja a frente fria associada conseguiu atingir até a Amazônia. A frente fria e a alta pós-frontal apresentaram padrão sinótico similar aos modelos conceituais de incursão de ar frio na AS descritos por Garreaud (2000), Ecobar *et al.* (2004), Escobar (2007), Pezza & Ambrizzi (2005) e Reboita *et al.* (2015), por exemplo. Entretanto, o diferencial desse estudo em relação aos anteriores é a descrição do impacto no interior do Estado de São Paulo e, também, a abordagem da VP associada ao padrão da onda de frio.

Uma crista em 500 hPa que se propaga de oeste nas latitudes médias do oceano Pacífico Sul foi responsável pelo deslocamento de um anticiclone migratório desse oceano para a Argentina. Ao atravessar a Cordilheira dos Andes, o sistema é deformado pelos processos adiabáticos e pela conservação da vorticidade potencial e se move em direção à região de tendência de maior pressão, nesse caso o

Figura 6 Vorticidade potencial em cores (UVP)\* 10<sup>-6</sup> no nível de 300 hPa e altura geopotencial (mcp) no nível de 500 hPa às 12 Z para os dias: (A) 02/07/15 (B) 03/07/15 (C) 04/07/15 (D) 05/07/15 (E) 06/07/15 e (F) 07/07/15.



norte argentino. Essa configuração ocorreu ao mesmo tempo em que o cavado de 500 hPa à jusante da crista forneceu suporte dinâmico para o desenvolvimento de uma onda frontal entre o continente e o oceano Atlântico adjacente.

Após atingir o norte da Argentina, a alta pós-frontal migra em direção ao oceano Atlântico pelas latitudes da região Sul do Brasil e favorece o deslocamento do sistema frontal sobre o país. Essa configuração dos transientes nas latitudes médias favoreceu a incursão do ar frio na região de Bauru.

A crista razoavelmente amplificada na onda de escala sinótica em 500 hPa apresentou altos valores de advecção de vortacidade anticiclônica a leste de seu eixo sobre o sudeste da AS e oceano adjacente entre os dias 03 e 05 de julho, sugerindo uma importante contribuição para a divergência de massa no centro do anticiclone e a consequente subsidência. Além disso, a onda também configurou um campo de pressão em superfície que propiciou uma maior componente meridional do vento, permitindo um deslocamento mais lento para leste dos transientes devido à presença de anomalias de VP e uma corrente de jato de altos níveis. A partir do dia 06, observou-se uma redução significativa da advecção quente na vanguarda do ciclone extratropical sobre o oceano Atlântico e um incremento da mesma na borda ocidental da alta pós-frontal, resultando na amplificação da crista. Isso ocorreu juntamente com os baixos valores de VP no cavado e a diminuição das advecções de vortacidade ciclônica (anticiclônica) a leste do cavado (crista). A soma dos fatores mencionados anteriormente resultou no retardo da onda de médios níveis e, portanto, refletiu no deslocamento mais lento do anticiclone no oceano Atlântico, sobretudo entre os dias 06 e 07 de julho.

O declínio da temperatura do ar em Bauru no dia 05 de julho teve como forçante a advecção fria pelos ventos de sudeste da alta pós-frontal. Já para os dias 06 e 07 não se observou advecção fria na região de Bauru. Com isso, a temperatura média diária aumentou na cidade, embora tenha ficado abaixo do percentil de 5%. Sugere-se que a presença de nuvens possa ter contribuído para o aumento da temperatura mínima o que não favoreceu a elevação da temperatura máxima.

Ressalta-se que a análise realizada nesse trabalho se refere ao estudo de uma onda de frio considerando a estatística do percentil de 5% no período de maio a setembro. Seria interessante aplicar outras metodologias e realizar um estudo comparativo. Além disso, também, é desejável analisar os impactos da onda de frio na saúde humana, uma vez que alguns estudos apontam aumento de doenças respiratórias durante os episódios frios. Assim, sugere-se a utilização de dados do Sistema Único de Saúde em estudos futuros.

## 5 Agradecimentos

A Fapesp (Proc. N° 2017/18805-6) e ao ECMWF pelos dados fornecidos.

## 6 Referências

- Alves, M.P.A.; Silveira, R.B.; Bitencourt, D.P. & Franke, A.E. 2017. Onda de frio? Análise de diferentes métodos de identificação. *Revista Brasileira de Climatologia*, 21: 295-312.
- Cavalcanti, I.F.A. & Kousky, V.E. 2003. Climatology of South American cold fronts. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY*, 7, Wellington, 2003.
- Cox, B.D.; Bithell, M. & Gray, L.J. 1995. A general circulation model study of a tropopause-folding event at middle latitudes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121: 883-910.
- Cox, B.D.; Bithell, M. & Gray, L.J. 1997. Modelling of stratospheric intrusions within a mid-latitude synoptic-scale disturbance. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123: 1377-1403.
- Danielsen, E.F. 1968. Stratospheric-tropospheric Exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 25: 502-518.
- Almeida Marrafon, V.H. & Reboita, M.S. 2018. Revisitando a Equação do Desenvolvimento de Sutcliffe. *Anuario do Instituto de Geociências*, 41: 614-629.
- Dee, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, O.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balmaseda, M.; Balsamo, G.; Bauer, B.; Bechtold, P.; Beljaars, A.; van de Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A.; Haimberger, L.; Healy, S.; Hersbach, H.; Holm, E.; Isaksen, I.; Kallberg, P.; Kohler, M.; Matricardi, M.; McNally, A.; Monge-Sanz, B.; Morcrette, J.; Park, B.; Peubey, C.; de Rosnay, P.; Tavolato, C.; Thepaut, J. & Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137:553-597.
- Elbern, H.; Hendricks, J. & Ebel, A. 1998. A climatology of

- tropopause folds by global analyses. *Theoretical and Applied Climatology*, 59: 181-200.
- Escobar, G.; Compagnucci, R. & Bischoff, S. 2004. Sequence patterns of 1000 hPa and 500 hPa geopotential height fields associated with cold surges over Central Argentina. *Atmosfera*, 17: 69-89.
- Escobar, G.C.J. 2007. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 22: 241-254.
- Escobar, G. 2010. Projeto: Educação e difusão do conhecimento em clima e meio ambiente - ECOMAC - apoiado pelo CNPq Meteorologia Sinótica Prática: Sistemas frontais clássicos, cavados baroclínicos e frentes subtropicais sobre América do Sul – 2010. Material didático destinado a professores, alunos e profissionais interessados na previsão de tempo.
- Garreaud, R. 2000. Cold air incursions over subtropical South America: Mean structure and dynamic. *Monthly Weather Review*, 128: 2544-2559.
- Holton, J.R. 1992. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Seattle. Elsevier Academic Press. 535p.
- Hoskins, B.J.; McIntyre, M.E. & Robertson, A.W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111: 877-946.
- Iwabe, C.M.N. & Rocha, R.P. 2009. An event of stratospheric air intrusion and its associated secondary surface cyclogenesis over the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114: 1-15.
- Kousky, V.E. & Elias, M. 1982. *Meteorologia Sinótica: Parte I*. São José dos Campos: INPE -2605-MD/021, São José dos Campos. 118 p.
- Krishnamurti, T.N.; Tewari, M.; Chakraborty, D.R.; Marengo, J.; Silva Dias, P.L. & Satyamurty, P. 1999. Downstream amplification: A possible precursor to major freeze events over southeastern Brazil. *Weather and Forecasting*, 14: 242-270.
- Lanfredi, I.S. & Camargo, R. 2018. Classification of Extreme Cold Incursions over South America. *Weather and Forecasting*, 33: 1183-1203.
- Lupo, A.R.; Nocera, J.J.; Bosart, L.F.; Hoffman, E.G. & Knight, D.J. 2001. South American cold surges: Types, composites, and case studies. *Monthly Weather Review*, 129: 1021-1041.
- Marengo, J.; Cornejo, A.; Satyamurty, P.; Nobre, C. & Sea, W. 1997. Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. *Monthly Weather Review*, 125: 2759-2786.
- Mendonça, M. & Romero, H. 2012. Ondas de frio, Índices de Oscilação e Impactos Socioambientais das Variabilidades Climáticas de Baixa Frequência na América do Sul. *Acta Geográfica, Edição Especial "Climatologia Geográfica"*: 185-203.
- Nairn, J. & Fawcett, R. 2013. Defining heatwaves: heatwave defined as a heat impact event servicing all community and business sectors in Australia. *CAWCR Technical Report* No. 060.
- OMM. December 2015. Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events, Draft version – first review by TT-DEWCE.
- Peron, B.; Llopart, M. & Reboita, M. 2016. Classificação climática de Koppen-Geiger através de simulações e projeções climáticas para Bauru-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 19, João Pessoa. 2016.
- Pezza, A.B. & Ambrizzi, T. 2005. Cold waves in South America and freezing temperatures in São Paulo: Historical background (1888-2003) and case studies of cyclone and anticyclone tracks. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20: 141-158.
- Reboita, M.S.; Escobar, G. & Lopes, V. 2015. Climatologia sinótica de eventos de ondas de frio sobre a região sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, 16: 72-92.
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; Rocha, R.P.D. & Custódio, I.S. 2017. Surface Cyclones over Austral Latitudes: Part I-Bibliographic Review. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32: 171-186.
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; da Rocha, R.P. & Custódio, I.S. 2017. Surface Cyclones over Austral Latitudes: Part II Cases Study. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32: 509-542.
- Rossby, C.G. 1940. Planetary flow patterns in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 66: 68-87.
- Satyamurty, P.; Fonseca, J.F.B.; Bottino, M.J.; Seluchi, M.E.; Lourenço, M.C.M. & Gonçalves, L.G.G. 2002. An early freeze in southern Brazil in April 1999 and its NWP guidance. *Meteorological Applications*, 9: 113-128.
- Silveira, R.B.; Mendonça, M.; Franke, A.E.; & Bitencourt, D.P. 2018. Impactos das ondas de frio sobre a saúde pública no município de São Joaquim-Santa Catarina-Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22: 249-266.
- Vaughan, G.; Price, J.D. & Howells, A. 1994. Transport into the troposphere in a tropopause fold. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 120: 1085-1103.
- Vera, C.S. & Vighiarolo, P.K. 2000. A diagnostic study of cold-air outbreaks over South America. *Monthly Weather Review*, 128: 3-24.
- Vera, C.S.; Vighiarolo, P.K. & Berbery, E.H. 2002. Cold season synoptic-scale waves over subtropical South America. *Monthly Weather Review*, 130: 684-699.
- Wallace, J.M. & Hobbs, P. 2006. *Atmospheric science: an introductory survey*. Seattle. Elsevier Academic Press. 483p.