



Revisitando a Equação do Desenvolvimento de Sutcliffe Revisiting the Sutcliffe Development Equation

Vitor Hugo de Almeida Marrafon & Michelle Simões Reboita

Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais– UNIFEI

Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG

E-mails: vitorhmarrafon@gmail.com; reboita@gmail.com

Recebido em: 23/02/2018 Aprovado em: 15/09/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_614_629

Resumo

Este estudo apresenta uma revisão da interpretação dos termos da equação de Sutcliffe e sua contribuição na previsão de sistemas de baixa e alta pressão em latitudes médias. Para tanto, é realizado o estudo de um ciclone extratropical que esteve associado a uma onda de frio no Brasil. O ciclone teve gênese no dia 15 de julho de 2017 entre a costa do Uruguai e da Argentina. Um intenso gradiente horizontal de temperatura do ar na superfície e advecção horizontal de vorticidade absoluta ciclônica em 500 hPa contribuíram para a formação do centro de baixa pressão em superfície. Já a advecção horizontal de vorticidade absoluta ciclônica, de acordo com a equação de Sutcliffe, foi importante para a manutenção do sistema e, quando associada com a advecção horizontal de temperatura do ar, controlaram o deslocamento do ciclone em superfície.

Palavras-chave: Ciclone Extratropical; Análise Sinótica; Equação de Sutcliffe.

Abstract

This study presents a review of the interpretation of the terms of the Sutcliffe's equation and its contribution to the prediction of low and high pressure systems. For this reason, it was performed a case study of an extratropical cyclone that was associated with a cold wave in Brazil. The cyclone occurred on July 15, 2017 between the coast of Uruguay and Argentina. An intense horizontal gradient of surface air temperature and the horizontal advection of absolute vorticity at 500 hPa contributed to the formation of the low over the surface. The horizontal advection of absolute vorticity, according to the Sutcliffe's equation, was important to the system manutention. On the other hand, this advection associated with the horizontal advection of air temperature were important to guide the displacement of the cyclone on the surface.

Keyword: Extratropical Cyclone; Synoptic Analysis; Sutcliffe Equation.

1 Introdução

Antes do desenvolvimento da modelagem numérica do tempo, as previsões do estado futuro da atmosfera eram realizadas somente com base em cartas sinóticas e auxílio de algumas equações cujos termos podiam (e ainda podem) ser estimados com as informações apresentadas nas próprias cartas. Por exemplo, a advecção horizontal de temperatura do ar pode ser estimada através da identificação de regiões em que o vento geostrófico cruza (formando algum ângulo) as isotermas; e essa advecção é máxima quando o vento geostrófico é perpendicular (ângulo de 90°) às isotermas (ou linhas de espessura). Outro exemplo é a identificação de regiões com movimentos ascendentes, que podem ser diagnosticadas quando identificada a convergência do vetor Q (Sanders & Hoskins, 1990). É interessante destacar que a equação do vetor Q é indicada para a média troposfera, pois utiliza o conceito do vento geostrófico. A equação do vento geostrófico produz resultados mais similares ao vento real quando empregada para níveis atmosféricos mais afastados da superfície, onde o atrito já não é mais relevante (Holton, 2004).

Com o avanço computacional, a advecção horizontal de temperatura do ar, os movimentos verticais na atmosfera e muitas outras variáveis passaram a ser facilmente calculadas e representadas espacialmente em mapas. Além disso, com a modelagem numérica do tempo, já se tem a previsão dos campos atmosféricos em momentos futuros, não sendo necessário a realização da previsão apenas com os conhecimentos da extrapolação temporal das cartas sinóticas (Sutcliffe, 1952), como feito nas décadas anteriores a 1960. Embora a tecnologia proporciona a confecção de produtos atmosféricos de forma rápida, por outro lado, desestimula a dedicação dos estudantes de ciências atmosféricas no entendimento da dinâmica e sinótica da atmosfera; muitos pensam “erroneamente” que não há motivo para estudar, por exemplo, o vetor Q , já que hoje em dia qualquer modelo atmosférico fornece a variável movimento vertical. Além disso, vários estudantes acreditam que fazer previsão do tempo é apenas verificar os valores das saídas de modelos atmosféricos. Sugere-se que esses fatos contribuem para mascarar a importância dos meteorologistas sinóticos na atualidade.

Retornando às práticas sinóticas, uma equação de grande importância é a equação do desenvolvimento de sistemas de latitudes médias de Sutcliffe (1947). Essa equação permite identificar, através do comportamento de algumas variáveis atmosféricas, as regiões propícias à formação dos ciclones e anticiclones e, também, através da configuração dessas variáveis, inferir sobre a posição futura dos sistemas. Um panorama histórico da equação de Sutcliffe é dado na sequência.

Sutcliffe (1939) mostrou que o desenvolvimento de sistemas de pressão na atmosfera depende da presença de convergência e divergência na coluna atmosférica; se há convergência em baixos níveis, divergência deve predominar em altos níveis para a ocorrência de ciclogênese. A estrutura reversa implica em anticiclogênese. Portanto, o desenvolvimento dos sistemas podia (pode) ser inferido através do diagnóstico da diferença da divergência entre a superfície e altos níveis da atmosfera. Apoiado nesses conhecimentos, Sutcliffe (1947) elaborou a equação do desenvolvimento dos sistemas de latitudes médias onde relaciona a divergência em 1000 hPa (lado esquerdo de sua equação) com a advecção horizontal de vorticidade relativa geostrófica em 1000 hPa, advecção horizontal da vorticidade térmica (entre 1000 e 500 hPa) e advecção horizontal da vorticidade planetária; nos três termos o vento real é aproximado pelo vento térmico computado na camada entre 1000 e 500 hPa. Na época, já era possível utilizar informações do nível de 500 hPa, pois havia a elaboração de cartas sinóticas nos níveis de 1000, 700, 500 e 300 hPa (Sutcliffe, 1946; Lackmann, 2012).

O trabalho de Sutcliffe (1947) foi pioneiro em estabelecer a fundamentação do comportamento dos padrões de tempo e, de acordo como Hoskins (1999), Sutcliffe deu um passo gigante entre os conhecimentos prévios de sistemas de latitudes médias e a proposição de que o desenvolvimento em superfície estava relacionado com a divergência entre baixos e médios/altos níveis da atmosfera. Com o passar do tempo, outros estudos desenvolveram modificações na equação de Sutcliffe. Um deles ficou conhecido como a equação do desenvolvimento de Sutcliffe-Petterssen (Petterssen, 1956). O modelo de Sutcliffe-Petterssen faz a suposição que a divergência em 500 hPa é negligenciada comparada a em superfície e que a

advecção de vorticidade em superfície é negligenciada comparada com a em 500 hPa. Além disso, o efeito do aquecimento/resfriamento adiabático e diabático da atmosfera foi incluído na equação do desenvolvimento dos sistemas (Petterssen, 1956). A equação de Sutcliffe-Petterssen relaciona a variação da vorticidade absoluta em 1000 hPa (termo do lado esquerdo da equação) com a advecção da vorticidade absoluta em 500 hPa e com Laplaciano de três termos integrados entre 1000 e 500 hPa: advecção de espessura (temperatura do ar), movimento vertical (termo adiabático) e aquecimento diabático. Os resultados dessa equação não são obtidos facilmente das cartas sinóticas, mas é uma das mais utilizadas para a explicação do desenvolvimento dos sistemas de latitudes médias em sala de aula (Carlson, 1991). Petterssen (1956) também deixou evidente que o desenvolvimento dos ciclones na superfície pode ser esperado em qualquer tempo e lugar onde haja apreciável advecção de vorticidade ciclônica na média troposfera (pois essa grandeza é proporcional à divergência) e que isso ocorra sobre uma zona baroclínica em superfície.

Na equação de Sutcliffe-Petterssen (referida daqui em diante apenas como equação de Sutcliffe), o termo da advecção horizontal da vorticidade absoluta é o que controla o desenvolvimento da vorticidade em superfície, ou seja, esse termo é responsável pela gênese dos ciclones/anticiclones. Como mostrado por Sutcliffe (1947) e Kousky & Elias (1982), a advecção horizontal da vorticidade absoluta ciclônica (que possui sinal negativo, se for considerado o Hemisfério Sul) em níveis mais elevados da troposfera é proporcional à divergência; o que implica em retirada de massa da coluna atmosférica favorecendo menor pressão na superfície. Com isso, ocorre convergência em baixos níveis e desenvolvimento de vorticidade relativa ciclônica em superfície (podendo originar um ciclone). O termo da advecção horizontal da vorticidade absoluta também é responsável pelo deslocamento dos sistemas em superfície (Kousky & Elias, 1982). Uma vez que esse termo corresponde à soma das advecções da vorticidade relativa e da planetária e, sendo a vorticidade planetária desprezível comparada à relativa em escala sinótica, tem-se que os sistemas em níveis afastados da superfície se propagaram para leste de forma, que a advecção horizontal da vorticidade relativa também se deslocará para leste, influenciando o sistema em

superfície através da criação de vorticidade relativa ciclônica (negativa) adiante desse. De acordo com Kousky & Elias (1982), os outros termos da equação de Sutcliffe são de natureza secundária e servem para modificar a intensidade dos sistemas existentes.

O termo da advecção horizontal de temperatura (espessura) influencia tanto a intensidade quanto o deslocamento dos ciclones. Num ciclone, a advecção de ar quente ocorre adiante do sistema. De acordo com a termodinâmica, ar quente é menos denso do que o ar frio e, por isso, o termo de advecção de temperatura contribui para a formação de uma região de menor pressão (e, por tanto, favorece convergência e criação de vorticidade ciclônica) adiante do centro do ciclone em superfície (Kousky & Elias, 1982). Isso determinará o movimento do ciclone, pois o sistema se movimenta na direção da tendência mínima de pressão que será a sua frente; e essa região também sofre influência da advecção horizontal de vorticidade absoluta em 500 hPa. Do ponto de vista das cartas sinóticas, o ciclone se desloca paralelo ao máximo gradiente das linhas de espessura (paralelo à frente quente; Carlson, 1991). Através desse conhecimento, os previsores nas décadas passadas podiam inferir a localização futura do sistema. Com relação à influência do termo da advecção horizontal de temperatura (espessura) na intensidade dos ciclones em superfície, isso ocorre de maneira indireta, à medida que a advecção de ar frio na retaguarda dos ciclones serve para intensificar os cavados (reduzir a espessura da camada) e, na dianteira, para intensificar as cristas (aumentar a espessura da camada) na média troposfera, o que contribuirá para o aumento (em módulo) da advecção horizontal de vorticidade absoluta produzida por eles (Kousky & Elias, 1982).

Ainda com relação ao deslocamento dos ciclones, Carlson (1991) menciona que o ciclone não é carregado como uma bolha no escoamento, mas que o campo da pressão em superfície é reconstituído continuamente pela influência da divergência em altos níveis. Ao mesmo tempo, o campo da convergência em superfície (valor negativo da divergência indica convergência) é moldado pela influência das advecções térmica e de vorticidade (adiante do sistema). Assim, as baixas (ou as altas) movem-se de um ponto a outro uma vez que o padrão da pressão em superfície é

continuamente reconstituído (Carlson, 1991). Com relação ao termo da vorticidade planetária, Sutcliffe percebeu que esse possuía pouca importância comparado aos outros (Hoskins, 1999). Por outro lado, os termos adiabático e diabático afetam a intensidade dos sistemas em superfície; esses serão explicados com maiores detalhes na seção resultados. Entretanto, vale ressaltar que o termo adiabático também pode afetar a trajetória dos sistemas de pressão quando há interação do escoamento atmosférico com a topografia (Kousky & Elias, 1982).

As ideias de Sutcliffe e Petterssen foram incorporadas no desenvolvimento das equações da teoria quase-geostrófica apresentada, por exemplo, em Phillips (1963) e Holton (2004). De forma breve, a teoria quase-geostrófica possui equações que mostram a ocorrência dos movimentos verticais na atmosfera. Esses movimentos ocorrem porque a atmosfera não está totalmente em balanço geostrófico (e nem hidrostático); dessa forma, o movimento ageostrófico contribui para a explicação dos movimentos verticais (Lackmann, 2012).

As equações atmosféricas, como a de Sutcliffe, são compostas por termos que às vezes se contrapõem. Portanto, é importante conhecer a contribuição individual de cada termo para o resultado final. Diante do exposto, este estudo tem como objetivo apresentar a interpretação dos termos da equação de Sutcliffe ao longo do ciclo de vida de um ciclone extratropical que teve gênese no 15 de julho de 2017, sobre o sudeste da América do Sul e oceano Atlântico Sul, e que contribuiu para a ocorrência de uma onda de frio no Brasil. A intenção desse estudo é de servir como guia didático aos estudantes de ciências atmosféricas e áreas afins, uma vez que a equação de Sutcliffe é uma ferramenta de prognóstico do tempo.

2 Dados e Metodologia

2.1 Dados

Para a realização desse estudo foram utilizados dados do período de 14 a 17 de julho de 2017 obtidos do National Centers for Environmental Prediction (NCEP; Kalnay et al., 1996). Esses dados possuem resolução horizontal de 2.5° e frequência de 6 horas (0000, 0600, 1200 e 1800 Z). As variáveis utilizadas

foram: temperatura do ar (K), componente zonal e meridional do vento (m s⁻¹), velocidade vertical (Pa s⁻¹) e altura geopotencial (m). Os dados foram obtidos para 13 níveis verticais (1000 a 100 hPa). Também foram utilizadas imagens do canal infravermelho do satélite GOES-13 disponibilizadas pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

2.2 Equação do Desenvolvimento de Sutcliffe

A equação do desenvolvimento de Sutcliffe (Petterssen, 1956; Kousky & Elias, 1982) em coordenadas isobáricas é:

$$\frac{\partial Q_0}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \vec{\nabla} Q)_p - \frac{R}{f} \nabla_p^2 \int_p^{p_0} (A_T + S + H) d \ln p \quad (1)$$

1A 1B 1C 1D 1E

o índice 0 denota o nível de 1000 hPa, os termos 1C, 1D e 1E são integrados desde a superfície até o nível de 500 hPa. Como descrito em Reboita et al. (2009), os termos da equação (1) indicam:

Termo 1A: tendência da vorticidade absoluta em 1000 hPa

$$Q_0 = \zeta_0 + f \quad (2.1)$$

$$Q_0 = \left(\frac{\partial v_0}{\partial x} - \frac{\partial u_0}{\partial y} \right) + f \quad (2.2)$$

sendo Q_0 a vorticidade absoluta em 1000 hPa, ζ_0 a vorticidade relativa, f a vorticidade planetária ($f = 2 \Omega \sin \varphi$) e u_0 e v_0 as componentes zonal e meridional do vento, respectivamente. Na vorticidade planetária, Ω representa a velocidade angular da Terra e φ a latitude.

A tendência da vorticidade absoluta em 1000 hPa depende da contribuição dos termos que compõem o lado direito da equação 1. Considerando o Hemisfério Sul, se o lado direito da equação 1 for negativo (positivo) haverá contribuição para ciclogênese (anticiclogênese).

Termo 1B: a advecção horizontal de vorticidade absoluta em 500 hPa é obtida por:

$$A_Q = (-\vec{V} \cdot \vec{\nabla} Q)_p$$

onde Q é a vorticidade absoluta e $\vec{V} = u_i + v_j$ é o escoamento horizontal, ambos em 500 hPa.

Termo 1C: a advecção de espessura ou de temperatura é calculada como:

$$A_T = -\vec{V} \cdot \vec{\nabla}_p T$$

onde T é a temperatura do ar.

Termo 1D: termo relacionado ao movimento vertical, ou seja, estabilidade da coluna de ar, é:

$$S = -\omega \left(\frac{\partial T}{\partial p} - \frac{1}{\rho c_p} \right)$$

onde ω é a pseudo-velocidade vertical, p a pressão atmosférica, ρ a densidade do ar e C_p o calor específico à pressão constante ($1004 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$). Se a equação do estado for utilizada, ρ pode ser substituído por $R T/p$, sendo R a constante universal dos gases. Dessa forma, pode-se escrever:

$$S = -\omega (\partial T / \partial p - (R T) / (p c_p)).$$

Termo 1E: a taxa de aquecimento/resfriamento diabático é definida como:

$$H \equiv \frac{1}{c_p} \frac{d\bar{H}}{dt}$$

onde \bar{H} é o aquecimento diabático, calculado como o resíduo da equação da energia termodinâmica, como em Reboita et al. (2009):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \underbrace{-\vec{V} \cdot \vec{\nabla}_p T}_{3A \quad 3B} + \underbrace{\omega \frac{RT}{p c_p}}_{3C} - \underbrace{\omega \frac{\partial T}{\partial p}}_{3D} + \underbrace{\frac{1}{c_p} \frac{\partial H}{\partial t}}_{3E} \quad (3)$$

em que o termo 3A representa a variação local da temperatura, 3B a advecção horizontal de temperatura do ar, 3C a expansão/compressão adiabática induzida pelo movimento vertical, 3D a advecção vertical de temperatura e 3E é a taxa de aquecimento/resfriamento diabático (pois o termo H é derivado no tempo). Lembra-se que H representa a soma dos processos radiativos, liberação de calor latente, calor sensível e

transporte turbulento de calor. Já os termos 3C e 3D juntos representam o próprio termo S da equação 1 (termo 1D), porém ainda não integrados verticalmente.

Na equação 1, antes da integral aparece o operador Laplaciano. A função desse operador é de mudar o sinal obtido inicialmente. Isso ocorre porque os termos das equações geralmente são descritos por funções periódicas, como senóides e cossenóides. Os termos 1C, 1D e 1E serão favoráveis à ciclogênese se possuírem valores negativos.

2.3 Estudo do Ciclone Extratropical

O ciclone extratropical em estudo foi escolhido por estar associado à ocorrência de uma onda de frio que afetou o Brasil entre 16 a 19 de julho de 2017. Ondas de frio são definidas como períodos (em geral superiores a 3 dias) em que a temperatura do ar num determinado local apresenta valores abaixo do percentil de 5% (Nairn & Fawcett, 2013). Vários jornais documentaram a ocorrência da onda de frio no Brasil (por exemplo, Diário de Canos e Portal da Amazônia) e sua atuação até a Amazônia, o que é chamado de friagem (Marengo et al., 1997 a,b).

Na seção 3.1 será mostrado que o ambiente sinótico associado à onda de frio de julho de 2017 foi similar ao padrão clássico das ondas de frio que atuam no país, isto é, presença de um anticiclone próximo do Chile e Argentina e de um ciclone na costa leste da América do Sul (Garreaud, 2000; Reboita et al., 2015). Portanto, essa situação sinótica apresenta características interessantes para a análise dos termos da equação de Sutcliffe. Essa análise será realizada para quatro estágios do ciclo de vida do ciclone em superfície associado ao episódio de friagem; os estágios do ciclone foram denominados de pré-ciclogênese, ciclogênese, maturidade e dissipação. Na fase de pré-ciclogênese não há isóbaras fechadas caracterizando a presença do ciclone. Por outro lado, a ciclogênese é considerada quando aparecem as isóbaras fechadas. A fase de maturidade é quando o ciclone chega a sua máxima intensidade o que é observado através do decréscimo da pressão em superfície e pelo ciclone em superfície passar a se localizar no lado polar do jato em altos níveis (Reboita et al., 2017 a,b). Por fim, a fase de dissipação ocorre quando o ciclone

começa a enfraquecer (as isóbaras começam a apresentar maior valor). Entretanto, no caso em análise, está sendo considerado como dissipação o estágio em que o ciclone apresenta seu primeiro enfraquecimento, com a desconfiguração das isóbaras fechadas, pois após o dia 16/11/17 às 1800 Z, o ciclone volta a se intensificar.

Para cada uma das fases mencionadas, os termos da equação de Sutcliffe (equação 1) serão apresentados em mapas (com o cálculo do Laplaciano). Também serão apresentados perfis verticais de cada termo da equação da energia termodinâmica (equação 3). Para construir os perfis verticais, foram computadas médias simples em domínios com 10° de latitude e longitude para cada nível vertical. Como o centro do ciclone foi utilizado como referencial para delimitação dos domínios, a localização espacial desses variou com o decorrer da evolução do sistema. As longitudes e latitudes centrais utilizadas para a construção de cada domínio foram: 55°W e 37,5°S para a fase de pré-ciclogênese e ciclogênese, 50°W e 40° na fase de maturidade e 47,5°W e 37,5°S na fase de dissipação.

3 Resultados

3.1 Análise Sinótica

O ciclone em estudo se forma entre a costa do Uruguai e da Argentina. Nessa região, na fase de pré-ciclogênese (Figura 1A; 15/07/17 às 0000 Z), há intenso gradiente horizontal de temperatura do ar em superfície, representado pela proximidade das linhas de espessura, e presença de jato em altos níveis (250 hPa) com ventos atingindo até 75 m s⁻¹ (Figura 1A). Na região do jato em altos níveis também há nebulosidade (Figura 1B). Embora não seja mostrado o campo da altura geopotencial em 500 hPa, o padrão desse é similar ao das linhas de espessura. Dessa forma, é possível inferir a presença de um cavado com eixo no sentido noroeste-sudeste entre o oceano Pacífico e o sul da América do Sul (40°-50° S). Em superfície, a oeste do cavado em 500 hPa, localiza-se o Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS). Tanto no oceano Pacífico quanto no oceano Atlântico, os anticiclones subtropicais estão bem configurados (Figura 1A) e predominam nuvens estratiformes (Figura 1B; cor cinza contínua).

As isóbaras no campo da pressão atmosférica se fecham no dia 15/07/17 às 1800 Z dando origem ao ciclone. A Figura 1C mostra que as linhas de espessura e o jato em altos níveis cruzam o centro do ciclone indicando a característica baroclínica do sistema de baixa pressão. Além disso, o ciclone em superfície se forma a jusante do eixo do cavado em 500 hPa (Figura 1C), de forma que há uma inclinação do eixo vertical do sistema para oeste. Associado ao ciclone tem-se as frentes quente e fria. A frente fria, no horário em análise, cruza o Uruguai e chega ao nordeste da Argentina (Figura 1C). Da fase pré-ciclogênese para a atual, outra característica interessante da atmosfera é o deslocamento do ASPS para leste e a consequente redução de nebulosidade entre o oceano Pacífico e o Chile (Figura 1D). Já, entre o Uruguai e a Argentina há aumento da área coberta por nuvens em relação à fase de pré-ciclogênese.

A fase de maturidade do ciclone é caracterizada pelo avanço da frente fria até a região da frente quente, o que indica o processo de oclusão e que é identificado na Figura 1E pela linha de cor roxa (frente oclusa). Além disso, há redução da pressão atmosférica no centro do ciclone (queda de 4 hPa entre a fase de ciclogênese, em que o centro do ciclone possui pressão de 1000 hPa, e a fase de maturidade, em que a pressão central é 996 hPa) e o jato em altos níveis não cruza mais o centro do sistema em superfície como nos horários anteriores. Em outras palavras, na fase de oclusão é quando o ciclone atinge sua maior intensidade (maturidade). Nessa fase (16/07/17 às 0600 Z), a frente fria se estende do oceano Atlântico Sul até o norte da Argentina e, portanto, atravessa o estado do Rio Grande do Sul. O padrão curvo das isóbaras sobre o Chile e Argentina mostra que o ASPS está cruzando os Andes e caracterizando a alta pós-frontal (Figura 1E). Na realidade, é o ar frio advectado das maiores para as menores latitudes sobre o sul da América do Sul que se conecta ao ASPS dando a impressão de que é o ASPS que adentra o continente. A advecção do ar frio é produzida pelos ventos de quadrante sul provenientes do acoplamento dos ventos do setor oeste do ciclone extratropical no oceano Atlântico e os ventos do setor leste do ASPS (figura não mostrada). A Figura 1F mostra a redução de nebulosidade nas áreas dominadas por alta pressão e a nebulosidade associada com a frente fria e com o centro de baixa

pressão. Nesse horário, a nebulosidade já está com a forma de vírgula invertida o que caracteriza bem o ciclone extratropical.

O padrão atmosférico representado pelas isóbaras na Figura 1E é similar ao primeiro estágio do modelo conceitual de Garreaud (2000) quando há ocorrência de incursão de ar frio até latitudes mais baixas da América do Sul. De fato, a sequência de horários mostrados na Figura 1 se assemelha ao modelo descrito por Garreaud (2000). Outros estudos sobre ondas de frio na América do Sul também mostram padrão sinótico similar ao do presente estudo como o de Marengo et al. (1997a) e Reboita et al. (2015).

Aqui está sendo considerado como dissipação do ciclone o primeiro aumento da pressão atmosférica em superfície, ocorrido no dia 16/07/17 às 1800 Z (Figura 1G), pois em horários posteriores o sistema irá se intensificar novamente. Na fase de dissipação, as isóbaras em superfície não estão fechadas. A alta pós-frontal e a frente fria avançaram em direção a latitudes mais baixas chegando à região centro-oeste do Brasil. A imagem de satélite mostra bem a frente fria em superfície chegando ao centro-oeste do país (Figura 1H) e separando as massas de ar com propriedades termodinâmicas distintas (pelo contraste das tonalidades de cinza).

Embora a análise dos termos da equação de Sutcliffe será realizada até a fase de primeiro enfraquecimento (considerada como dissipação) do ciclone, é interessante mostrar também um horário sinótico em que a frente fria atinge a Amazônia caracterizando o fenômeno de friagem (Marengo et al., 1997b). O horário escolhido foi às 1800Z do 18/07/17 (Figura 1I-J). Nesse, a frente fria se estende do Atlântico Sul ao estado do Amazonas e a alta pós-frontal está bem separada do ASPS. Já o ciclone deslocou-se para leste em relação aos horários anteriores, ficando fora do domínio da Figura 1I. Em síntese, o padrão sinótico descrito corresponde ao de uma onda de frio clássica sobre o Brasil. Segundo o sítio da Climatempo, no dia 17/07/17 houve registro de neve em algumas cidades serranas do Rio Grande do Sul e na cidade de São Joaquim em Santa Catarina. Já, de acordo com registros das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia, as temperaturas

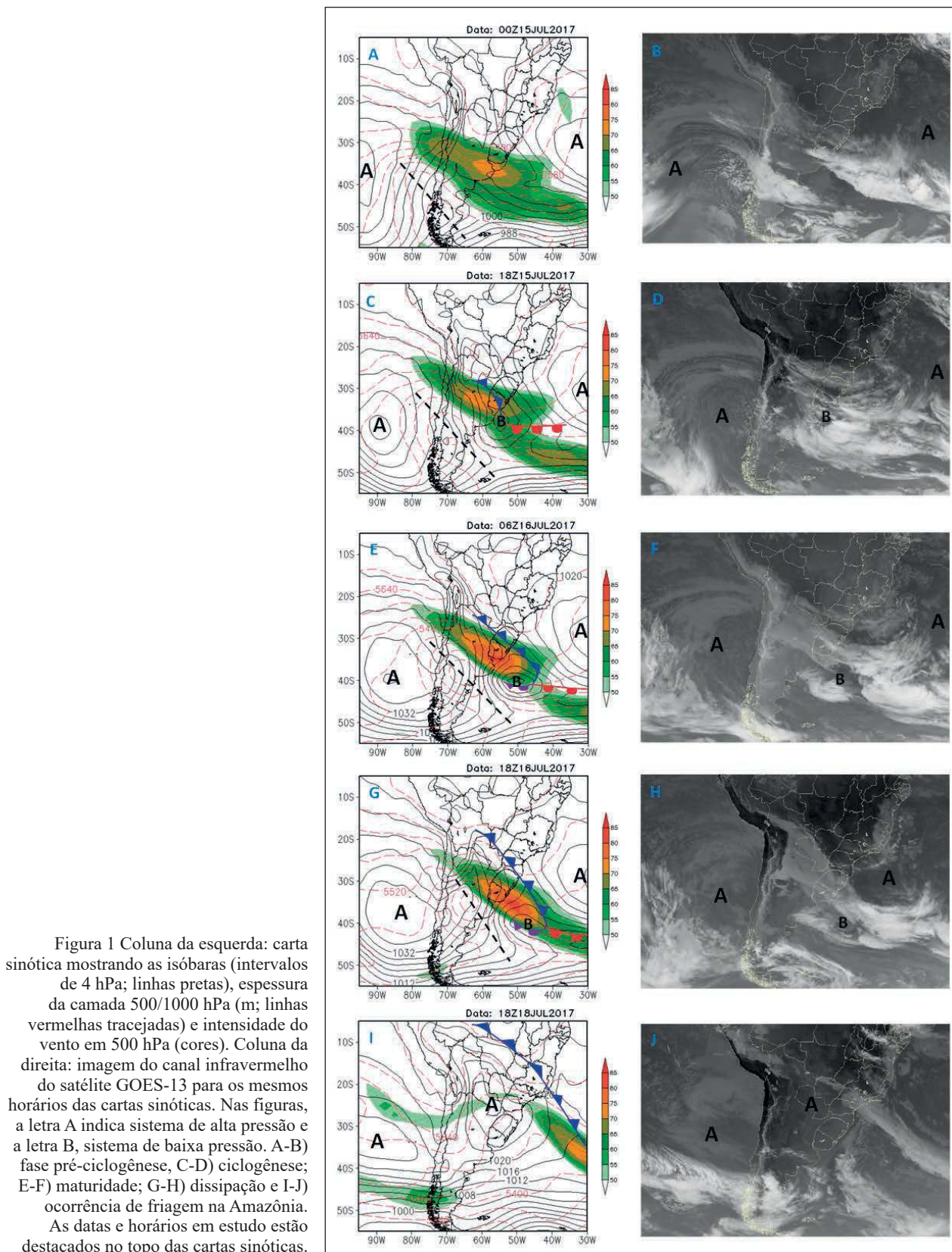
no Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e Mato Grosso do Sul foram abaixo de zero no dia 18.

3.2 Análise dos Termos da Equação de Sutcliffe

A equação do desenvolvimento de Sutcliffe indica as regiões que são propícias ao desenvolvimento ou decaimento de sistemas de baixa e alta pressão. Considerando a equação 1, se a soma dos termos do lado direito da equação fornecer um valor negativo (positivo), isso significa que há condições de ciclogênese (anticiclogênese). No presente estudo, tal informação encontra-se na Figura 2, que corresponde ao termo da tendência da vorticidade absoluta em 1000 hPa nos quatro estágios do ciclo de vida do ciclone associado à onda de frio em julho de 2017. Na fase pré-ciclogênese (Figura 2A), não há sinal de tendência de vorticidade absoluta na região entre a costa do Uruguai e Argentina, região em que o ciclone irá se formar, porém esse horário analisado é de 18 horas antes da formação do ciclone. Já, às 1200 Z do dia 15/07 há tendência de vorticidade absoluta negativa (figura não mostrada). Após 6 horas, ocorre a gênese do ciclone (Figura 2B) na região em que havia tendência de vorticidade absoluta negativa. Na fase de ciclogênese (Figura 2B), a cerca de 40° S e 50° W há tendência de vorticidade absoluta negativa, o que indica a região como favorável para a localização do ciclone em tempos futuros. De fato, às 0600 Z do dia 16/07 essa é a posição que o ciclone ocupa. Nos dias atuais, a estimativa da localização dos ciclones com base na equação de Sutcliffe parece não ter grande utilidade uma vez que se tem inúmeros campos (variáveis atmosféricas) provenientes da previsão numérica do tempo, mas no passado isso era de grande utilidade para prognosticar a localização dos sistemas de tempo. Agora a atenção será voltada para o setor leste do ASPS. Na Figura 2B, há tendência de vorticidade absoluta positiva no nordeste da Argentina (35°S e 65°W), isso é um indicativo de que nos próximos tempos haverá predomínio de alta pressão na região. Observando-se a Figura 2C, nota-se, realmente, a presença de alta pressão na região em que havia tal indicativo. A mesma análise pode ser feita para as Figuras 2 C-D. Na Figura 2C, há tendência de vorticidade absoluta positiva entre a Bolívia, Argentina e Paraguai e na Figura 2D, a alta pressão está ocupando tal setor.

Revisitando a Equação do Desenvolvimento de Sutcliffe

Vitor Hugo de Almeida Marrafon & Michelle Simões Reboita



Muitas vezes também se tem interesse em saber quais os termos da equação do desenvolvimento de Sutcliffe que mais contribuem para o resultado da tendência da vorticidade absoluta. Dessa forma, aqui também se apresenta a análise individual dos termos da equação. Entretanto, antes dessa abordagem é importante ressaltar que a gênese dos ciclones extratropicais na baixa troposfera ocorre pela influência de gradientes horizontais de temperatura do ar (zonas frontais em superfície) e advecção horizontal de vorticidade absoluta negativa (cyclônica) a jusante dos cavados em níveis médios e altos na atmosfera (e essa advecção é proporcional à divergência de massa) – Kousky & Elias (1982); Reboita et al. (2017a,b). Logo, o termo mais importante da equação de Sutcliffe é o primeiro termo à direita da igualdade na equação 1, que é o termo da advecção horizontal de vorticidade absoluta em 500 hPa. Esse termo indicará onde há condições para a gênese de um ciclone e sua possível posição em tempos futuros. Entretanto, o termo da advecção horizontal de temperatura do ar também é importante para guiar o deslocamento dos sistemas de pressão. No caso dos ciclones, esses tenderão a se deslocar para a região mais quente (onde a pressão atmosférica é menor) adiante deles.

O termo da advecção horizontal de vorticidade absoluta em 500 hPa é composto pela soma das advecções de vorticidade relativa e planetária. Já é de conhecimento prévio que, em sistemas de escala sinótica, a advecção de vorticidade relativa é dominante em relação à planetária (Holton, 2004). Isso é uma informação importante tendo em vista que ambas possuem sinais opostos. Outro conhecimento prévio é que a advecção horizontal de vorticidade absoluta ciclônica (anticiclônica) é proporcional a divergência (convergência) de massa em níveis médios e altos da atmosfera (Kousky & Elias, 1982). Portanto, numa região em que haja sinal de advecção de vorticidade absoluta ciclônica (valor negativo no Hemisfério Sul), logo se associa à ocorrência de divergência de massa e essa, por sua vez, contribui para a retirada de massa da coluna atmosférica e redução da pressão atmosférica em superfície. Para ilustrar essas informações tem-se a Figura 3. No período pré-ciclogênese, na costa do Uruguai e Rio Grande do Sul há advecção horizontal de vorticidade absoluta positiva, o que não indica a ocorrência de ciclogênese, porém esse sinal mudará

com o passar do tempo a fim de favorecer a formação do ciclone. De fato, na Figura 3B há dois núcleos de advecção horizontal de vorticidade absoluta negativa: um no setor oeste do ciclone e outro, mais intenso, a sudeste do centro do ciclone (40°S e 47°W). Esse núcleo mais intenso indica que tal região é propícia à divergência de massa e queda da pressão em superfície em tempos futuros de forma que o ciclone se reconfigurará sob a região com divergência. Às 0600 Z do dia 16/07 o ciclone se encontra a cerca de 40°S, mas um pouco deslocado para oeste (50° W) em relação à posição prevista. Com relação à advecção horizontal de vorticidade absoluta positiva, na Figura 3C, por exemplo, entre a Bolívia, Paraguai e norte da Argentina há um núcleo dessa advecção e nesse local predominará parte da alta pós-frontal como indica a Figura 3D. Os próximos termos a serem analisados estão integrados na camada entre 1000 a 500 hPa e com o operador Laplaciano a frente. Portanto, se um termo tiver valor positivo, o Laplaciano irá trocar o sinal do termo.

Seguindo a sequência apresentada na equação 1, o primeiro termo dentro da integral é o da advecção horizontal de temperatura do ar. Devido ao movimento ciclônico dos sistemas de baixa pressão (horário no Hemisfério Sul), advecção quente ocorrerá, em geral, a leste do centro de baixa e a advecção fria, a oeste. A advecção quente contribui para a camada atmosférica tornar-se menos densa e, com isso, há favorecimento para a convergência de massa e vorticidade ciclônica. Essas características da atmosfera somadas à da advecção de vorticidade absoluta ciclônica induzem o deslocamento (ou melhor dizendo, a reconfiguração) do ciclone no local com as características descritas. As advecções quente e fria na coluna atmosférica também contribuem, de forma indireta, na intensidade dos ciclones por intensificar/amplificar os cavados e cristas na média troposfera e, com isso, há intensificação da advecção horizontal de vorticidade absoluta. Na Figura 1C é mostrado que o ciclone em superfície se forma entre um cavado (a oeste) e uma crista (a leste) em níveis médios. Portanto, a advecção de ar frio na região do cavado contribui para reduzir a espessura da camada, enquanto a advecção de ar quente na região da crista contribui para aumentar a espessura dessa. O contraste de temperatura é importante para a baroclinia do sistema (gradientes de temperatura do ar).

Na Figura 4 é evidente a presença de advecção quente a leste do centro do ciclone e fria a oeste. Porém, como o operador Laplaciano troca o sinal do termo, a advecção quente está associada com valores negativos e a fria com valores positivos na referida figura. Em outras palavras, advecção de ar quente ajuda a criar vorticidade absoluta ciclônica (termo A da equação 1). Note que a região com advecção de horizontal de temperatura do ar positiva (Figura 4) no ciclone não coincide exatamente com a da advecção horizontal de vorticidade absoluta negativa em 500 hPa (Figura 3), mas elas em geral, estão no mesmo sentido e podem ter seus efeitos somados.

O segundo termo dentro da integral da equação 1 é o referente aos processos adiabáticos. Nos ciclones

deve ocorrer movimentos ascendentes (Sutcliffe, 1947; Kousky & Elias, 1982), mas à medida que o ar ascende na atmosfera, se expande e resfria tornando a coluna atmosférica mais densa. Isso atua contra à ciclogênese e a favor à anticiclogênese. Já os movimentos subsidentes são favoráveis à ciclogênese e desfavoráveis à anticiclogênese, pois há aquecimento do ar por compressão adiabática e redução da densidade do ar o que favorece a convergência em superfície. Dessa forma, o termo adiabático é um limitador tanto do desenvolvimento dos ciclones quanto dos anticiclones.

Movimentos ascendentes (subsidentes) na atmosfera associados à variável velocidade vertical possuem sinal negativo (positivo), mas com a aplicação

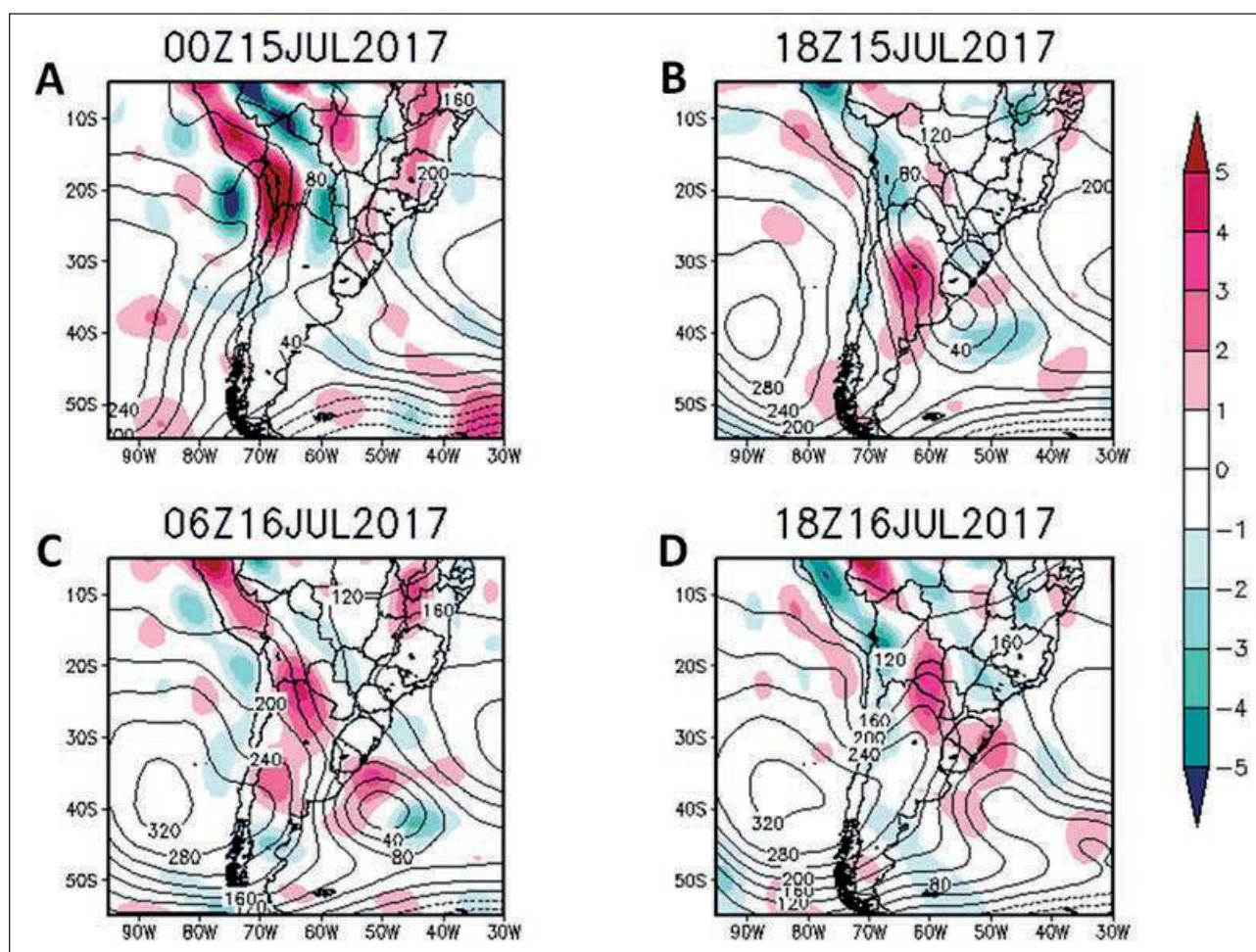


Figura 2 Tendência da vorticidade absoluta ($\times 10^{-9} s^{-2}$), que é o termo do lado esquerdo da igualdade da equação do desenvolvimento de Sutcliffe, e altura geopotencial em 1000 hPa (m, linhas pretas) nas quatro fases do ciclone em estudo: (A) pré-ciclogênese, (B) ciclogênese, (C) maturidade e (D) dissipação.

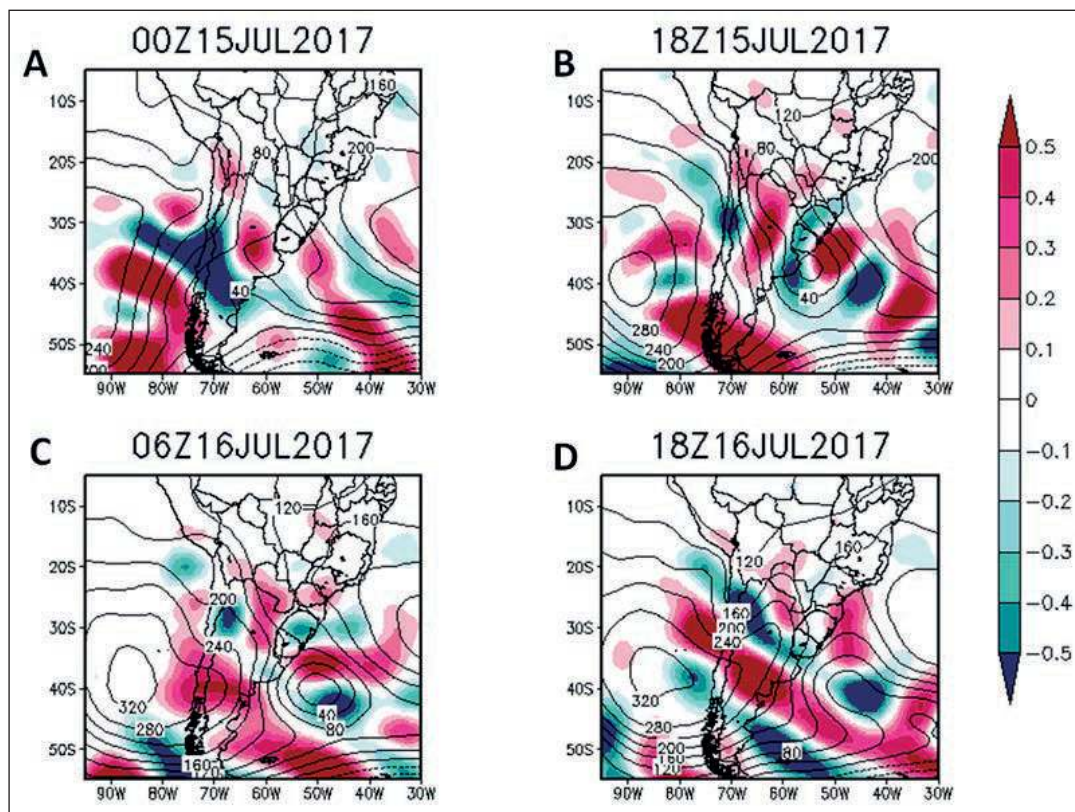


Figura 3 Advecção horizontal de vorticidade absoluta ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$) em 500 hPa e altura geopotencial em 1000 hPa (m, linhas pretas) nas quatro fases do ciclone em estudo: (A) pré-ciclogênese, (B) ciclogênese, (C) maturidade e (D) dissipação.

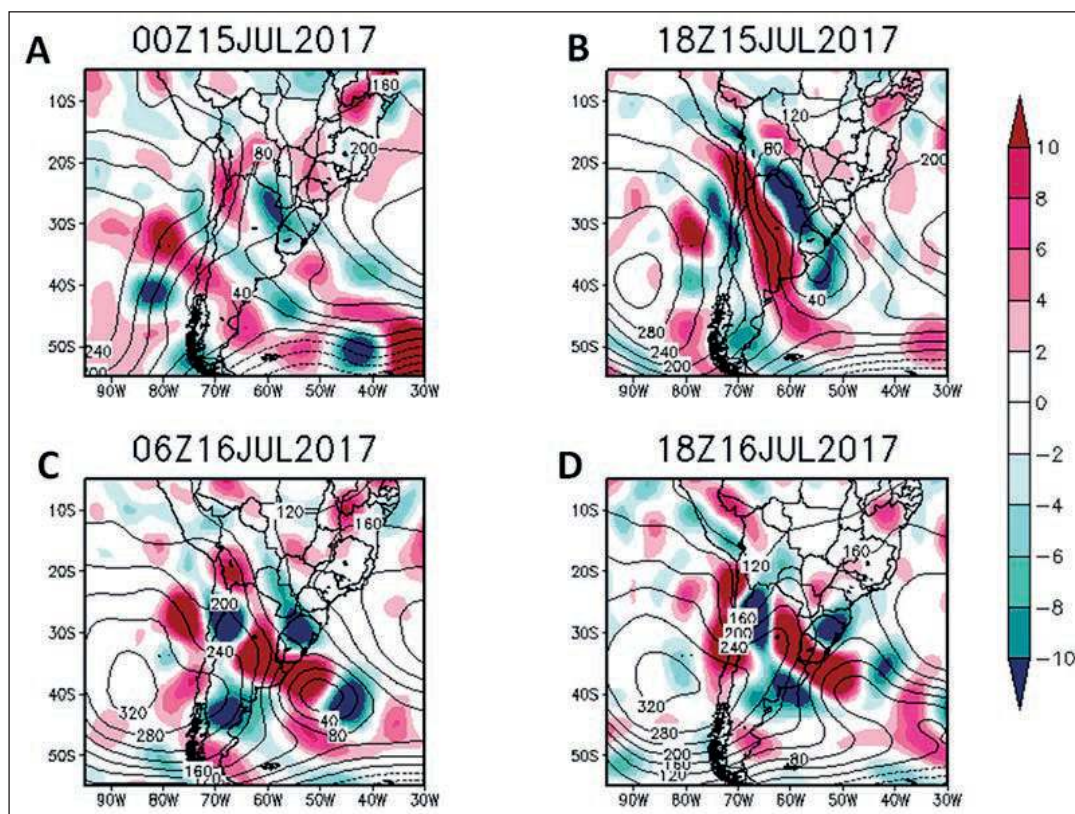


Figura 4 Laplaciano da advecção horizontal de temperatura do ar integrada na camada 1000-500 hPa ($\times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$) e altura geopotencial em 1000 hPa (m, linhas pretas) nas quatro fases do ciclone em estudo: (A) pré-ciclogênese, (B) ciclogênese, (C) maturidade e (D) dissipação.

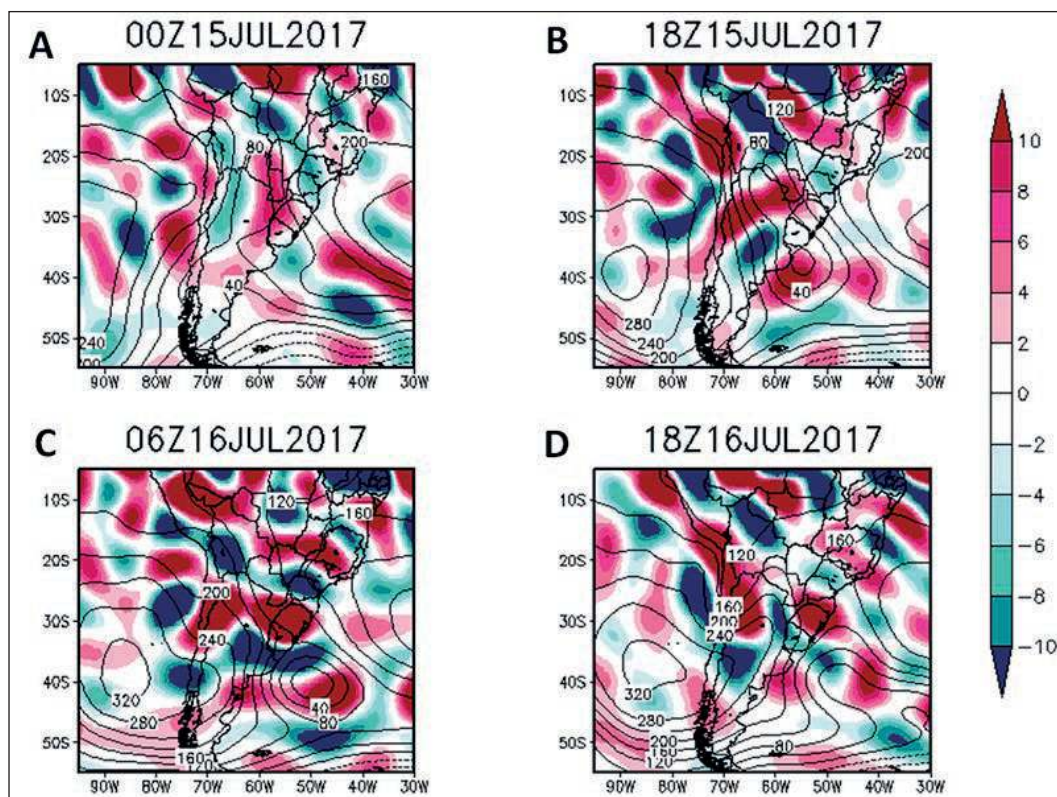


Figura 5 Laplaciano do termo adiabático integrado na camada 1000-500 ($\times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$) e altura geopotencial em 1000 hPa (m, linhas pretas) nas quatro fases do ciclone em estudo: (A) pré-ciclogênese, (B) ciclogênese, (C) maturidade e (D) dissipação.

do operador Laplaciano, regiões com movimentos ascendentes (subsidentes) aparecem com sinal positivo (negativo) como mostra a Figura 5. No estágio pré-ciclogênese (Figura 5A) predominam movimentos subsidentes (cores em tons de verde) na região em que o ciclone irá se formar. Já nos demais estágios em análise (Figura 5 B,C,D), as áreas com movimentos ascendentes no ciclone extratropical coincidem com as de ocorrência de advecção horizontal de ar quente (Figura 4). Como ambas as variáveis possuem sinais opostos, podem se anular.

O termo adiabático também pode afetar a trajetória dos sistemas transientes. Na Figura 1 foi mostrado que a alta ao cruzar os Andes, do Pacífico em sentido ao continente, apresentava curvatura nas isóbaras. Essa curvatura pode ser explicada com o auxílio do termo adiabático. Inicia-se a explicação considerando uma figura ilustrativa (Figura 6A) e sem efeitos adiabáticos. Nessa, serão analisados 4 pontos representados pelos números de 1 a 4. No ponto 1, o escoamento tende a subir a montanha. Portanto, irá resfriar por expansão adiabática e aumentar a curvatura anticiclônica do escoamento. No ponto 2, já no lado

argentino, mas na mesma latitude do ponto 1, o ar desce a montanha e, portanto, aquece por compressão adiabática, o que aumenta a curvatura ciclônica do escoamento. No ponto 3, o escoamento volta a subir a montanha e adquire curvatura anticiclônica e, por fim, no ponto 4, o escoamento desce a montanha e adquire curvatura ciclônica. O efeito produzido no escoamento está ilustrado na Figura 6B e é similar ao mostrado na Figura 1.

O último termo na integral da equação 1 é o termo do aquecimento diabático. O aquecimento diabático pode ser proveniente de aquecimento radiativo, fluxos turbulentos de calor latente e sensível e liberação de calor latente por condensação nas nuvens. Esse termo é o mais difícil de ser estimado, mas pode ser obtido como o resíduo da equação da energia termodinâmica. A primeira versão da equação de Sutcliffe não incluía esse termo (Petterssen, 1956).

A Figura 7 ilustra o perfil vertical médio dos termos da equação da energia termodinâmica nas quatro fases do ciclone em estudo. O termo diabático (resíduo) será considerado para cálculo da equação de

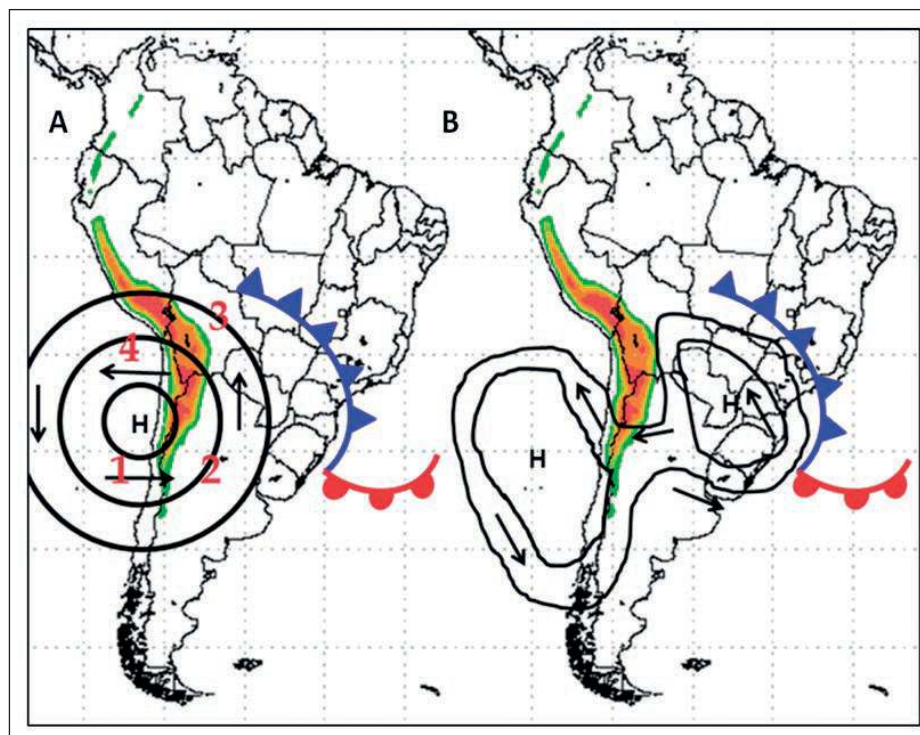


Figura 6 Representação esquemática do efeito do termo adiabático num sistema de alta pressão (indicado pela letra H) atravessando os Andes. (A) sem o efeito do termo adiabático e (B) com o efeito do termo adiabático. Adaptado de Kousky & Elias (1982).

Sutcliffe. A equação da energia termodinâmica indica a tendência da temperatura do ar e o que controla essa tendência são os termos do lado direito da igualdade na equação (3). A ideia transmitida na Figura 7 é o sinal predominante de cada termo da equação 3 na região do ciclone, pois é considerada uma média na área (domínio) que abrange o sistema (ver definição dos domínios na seção 2).

A variação local de temperatura do ar (Figura 7A), em todas as fases do ciclone, mostra predomínio de tendência negativa de temperatura até 500 hPa e tendência positiva acima desse nível. O aquecimento em altos níveis está relacionado com a advecção horizontal de temperatura positiva e com o aquecimento diabático (Figura 7B,D) e é contrabalanceado pelos valores negativos associados aos movimentos verticais (Figura 7C). Os valores positivos do termo diabático (resíduo, Figura 7D) em níveis médios e altos é consequência do aquecimento por liberação de calor latente de condensação que é comum ocorrer nesses níveis da atmosfera (Peixoto & Oort, 1992). Na baixa troposfera, a tendência negativa da temperatura do ar (Figura 7A) tem, em cada estágio do ciclo de vida do ciclone, contribuição de termos diferentes. Na fase

de pré-ciclogênese (linha azul), a tendência negativa da temperatura do ar (Figura 7A) ocorre associada aos valores negativos dos termos adiabático (Figura 7C) e diabático (Figura 7D). Já na ciclogênese (linha verde), com os valores negativos associados ao termo adiabático (Figura 7C). Com relação à fase de maturidade (linha vermelha), a tendência negativa da temperatura do ar (Figura 7A) é resultado da efeito associado à advecção horizontal fria (Figura 7B) termo adiabático (Figura 7C). Por fim, na fase de dissipação (linha preta), a tendência negativa da temperatura do ar (Figura 7A) está relacionada com valores negativos de todos os termos do lado direito da equação 3.

O aquecimento diabático pode atuar de forma a fortalecer os gradientes horizontais de temperatura no sistema ciclônico se o aquecimento ocorrer no lado quente do ciclone, mas se ocorrer no lado frio, atua de forma a enfraquecer os gradientes horizontais de temperatura (Nuss & Anthes, 1987; Rogers & Bosart, 1991). Com relação ao ciclone em estudo, após a integração vertical do termo diabático e a aplicação do operador Laplaciano tem-se o resultado mostrado na Figura 8 onde o aquecimento (resfriamento) é representado por sinal negativo (positivo). Na fase

Revisitando a Equação do Desenvolvimento de Sutcliffe

Vitor Hugo de Almeida Marrafon & Michelle Simões Reboita

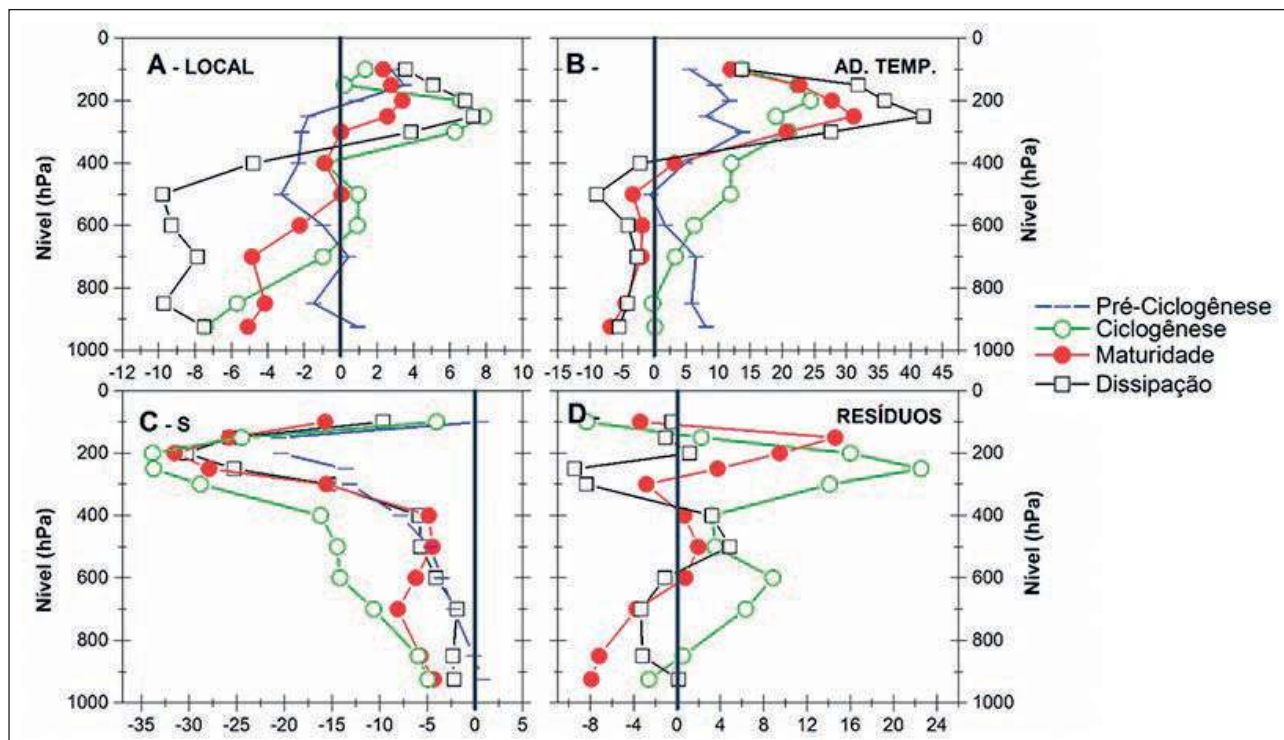


Figura 7 Perfil vertical médio dos termos da equação da energia termodinâmica (equação 3): (A) variação local (ou tendência) da temperatura do ar ($K \text{ dia}^{-1}$), que é o termo 3A da equação, (B) advecção horizontal de temperatura do ar ($K \text{ dia}^{-1}$), que é o termo 3B, (C) termo associado aos movimentos verticais na atmosfera ($K \text{ dia}^{-1}$), que é a soma dos termos 3C e 3D e representa os processos adiabáticos, e (D) resíduo (ou termo diabático; $K \text{ dia}^{-1}$) em cada fase do ciclo de vida do ciclone extratropical. A fase de pré- formação é representada pela cor azul, a de ciclogênese pela cor verde, a de maturidade pela cor vermelha e a de dissipação pela cor preta. Em todos os quadros, a linha vertical indica o valor zero.

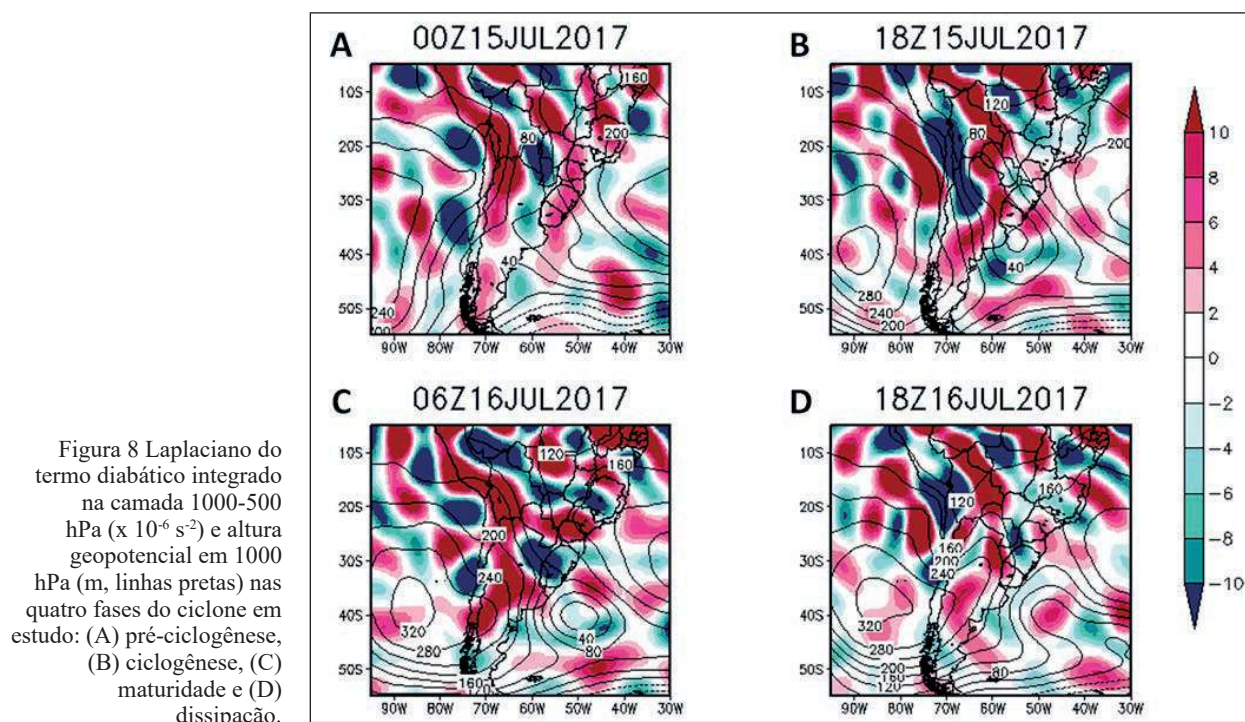


Figura 8 Laplaciano do termo diabático integrado na camada 1000-500 hPa ($\times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$) e altura geopotencial em 1000 hPa (m, linhas pretas) nas quatro fases do ciclone em estudo: (A) pré-ciclogênese, (B) ciclogênese, (C) maturidade e (D) dissipação.

de ciclogênese, no mesmo local onde há advecção horizontal quente e movimentos ascendentes (a cerca de 40° S e 52° W) há aquecimento diabático (Figura 8B) que, provavelmente, está associado com a liberação de calor latente por condensação. Na imagem de satélite (Figura 1D) encontra-se nebulosidade em tal região, o que pode colaborar com a hipótese. Padrão similar ao descrito é observado na fase de maturidade (Figura 8C) a sudeste do centro do ciclone (43° S e 45° W). Em suma, os termos da equação de Sutcliffe dentro da integral atuam de forma a modificar a intensidade do sistema e podem se contrapor.

4 Conclusões

Foi apresentado o estudo de caso de um ciclone extratropical que teve gênese no 15 de julho de 2017 às 1800 Z, entre a costa do Uruguai e da Argentina. A gênese do ciclone ocorreu associada à presença de intenso gradiente horizontal de temperatura do ar em superfície e advecção horizontal de vortacidade absoluta ciclônica a jusante de um cavado em níveis médios da atmosfera. A configuração do ciclone e da alta pós-frontal contribuiu para a advecção de ar frio sobre a América do Sul e, conseqüentemente, para a frente fria associada ao ciclone chegar até a região norte do Brasil configurando um episódio de friagem.

Em cada fase do ciclone extratropical (pré-ciclogênese, ciclogênese, maturidade e dissipação) foram analisados os termos da equação de Sutcliffe. Embora no horário mostrado como pré-ciclogênese não havia advecção horizontal de vortacidade absoluta ciclônica em 500 hPa, no horário sinótico posterior esse termo já passou a atuar de forma mais efetiva e o mesmo contribuiu para a ciclogênese. A advecção horizontal de vortacidade absoluta ciclônica atuou de forma a guiar o deslocamento do ciclone, pois no local em que havia tal advecção num dado horário sinótico, no seguinte o ciclone se localizava na região em que havia advecção ou muito próxima a ela. Portanto, a advecção horizontal de vortacidade absoluta ciclônica é uma variável importante nas práticas de previsão do tempo, pois ajuda a prever a gênese e a localização dos sistemas de baixa pressão (e também os de alta pressão). Com relação à advecção horizontal de temperatura do ar, foi mostrado o domínio de advecção quente a

leste do centro do ciclone e fria a oeste. A advecção quente é importante uma vez que ajuda a criar convergência e vortacidade ciclônica em superfície; portanto, a advecção horizontal de temperatura do ar também contribui para o deslocamento dos sistemas em superfície. Próximo ou nos mesmos locais com advecção quente ocorreu aquecimento diabático, provavelmente, devido à liberação de calor latente por condensação. Já o termo adiabático foi um limitador do desenvolvimento do ciclone, pois na ocorrência de movimentos ascendentes na atmosfera o ar resfria adiabaticamente sendo desfavorável ao ciclone. De forma resumida, os termos dentro da integral na equação de Sutcliffe contribuem para intensificar ou enfraquecer o ciclone.

Por fim ressalta-se que a mensagem principal desse estudo não foi a análise do evento ciclônico e da onda de frio associada, mas sim a contribuição para a retomada de conceitos “adormecidos” nas análises sinóticas.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao NCEP pela reanálise, ao INPE pelas imagens de satélite e ao CNPq pelo suporte financeiro.

6 Referências

- Carlson, T.N. 1991. *Mid-Latitude Weather Systems*. London, Harper Collins. 512 p.
- Climatempo, 2017. Frio Congelante e Neve no Sul do Brasil. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/noticia/2017/07/17/esta-nevando-no-sul-do-brasil-6535>>. Acesso em: 8 fev. 2018.
- Diário de Canoas, 2017. Nevasca Histórica no Chile Precede Onda de Frio e Neve no Estado. Disponível em: <http://www.diariodecanoas.com.br/_conteudo/2017/07/noticias/mundo/2142203-nevasca-historica-no-chile-precede-onda-de-frio-e-neve-no-estado.html>. Acesso em: 07 fev. 2018.
- Garreaud, R.D. 2000. Cold Air Incursions over Subtropical South America: Mean structure and Dynamics. *Monthly Weather Review*, 128(7): 2544-2559.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. Joseph, D. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3): 437-472.
- Kousky, V.E. & Elias, M. 1982. *Meteorologia Sinótica: Parte I*.

Revisitando a Equação do Desenvolvimento de Sutcliffe

Vitor Hugo de Almeida Marrafon & Michelle Simões Reboita

- INPE-2605-MD/021, São José dos Campos. 118 p.
- Lackmann, G. 2012. *Midlatitude Synoptic Meteorology: Dynamic, Analysis e Forecasting*. Boston, American Meteorological Society. 345 p.
- Holton, J.R. 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Burlington, MA: Elsevier. 553p.
- Hoskins, B.J. 1999. Sutcliffe and His Development Theory. In: SHAPIRO, M.A. & GRØNÅS, S. (eds.). *The Life Cycles of Extratropical Cyclones*. American Meteorological Society, p. 81-86.
- Marengo, J., Cornejo, A., Satyamurty, P., Nobre, C., & Sea, W. 1997a. Cold Surges in Tropical and Extratropical South America: The Strong Event in June 1994. *Monthly Weather Review*, 125(11): 2759-2786.
- Marengo, J.A., Nobre, C.A., & Culf, A.D. 1997b. Climatic Impacts of "Frigens" in Forested and Deforested Areas of the Amazon Basin. *Journal of Applied Meteorology*, 36(11): 1553-1566.
- Nairn, J.R. & Fawcett, R.G. 2013. *Defining Heatwaves: Heatwave Defined as a Heat-impact Event Servicing All Community and Business Sectors in Australia*. The Centre for Australian Weather and Climate Reserarch. Kent Town, Australia, 84 p.
- Nuss, W.A. & Anthes, R.A. 1987. A Numerical Investigation of Low-Level Processes in Rapid Cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 115: 2728-2743.
- Petterssen, S. 1956. *Weather Analysis and Forecasting*. McGraw-Hill Book Company. 448 p.
- Peixoto, J.P. & Oort, A.H. 1992. *Physics of Climate*. United States. 520 p.
- Phillips, N.A. 1963. Geostrophic Motion. *Reviews of Geophysics*, 1(2): 123-176.
- Portal da Amazônia, 2017. Onda de Frio Deve Atingir Amazonas, Acre, Mato Grosso e Rondônia. Disponível em: <<http://portalamazonia.com/noticias/onda-de-frio-deve-atingir-amazonas-acre-mato-grosso-e-rondonia>>. Acesso em: 10 fev. 2018.
- Reboita, M.S., Iwabe, C., da Rocha, R.P., & Ambrizzi, T. 2009. Análise de um Ciclone Semi-estacionário na Costa Sul do Brasil Associado a Bloqueio Atmosférico: O Evento de 02 a 06 Maio de 2008. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24(4): 407-422.
- 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(1): 73-92.
- Reboita, M.S., Gan, M.A., da Rocha, R.P. & Custódio, I.S. 2017a: Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I - Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2): 171-186.
- Reboita, M.S., Gan, M.A., da Rocha, R.P. & Custódio, I.S. 2017b: Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(4), 509-542.
- Rogers, E. & Bosart, L.F. 1991. A Diagnostic Study of Two Intense Oceanic Cyclones. *Monthly Weather Review*, 119(4): 965-996.
- Sanders, F. & Hoskins, B.J. 1990. An Easy Method for Estimation of Q-vector from Weather Maps. *Weather and Forecasting*, 5(2): 346-353.
- Sutcliffe, R.C. 1939. Cyclonic and Anticyclonic Development. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 65(282): 518-524.
- Sutcliffe, R.C. 1947. A Contribution of the Problem of Development. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 73(317-318): 370-383.
- Sutcliffe, J.P. 1952. Problems for a Theory of Social Learning. *Australian Journal of Psychology*, 4(2): 107-125.