

CLIMATOLOGIA DE CICLONES EXPLOSIVOS PARA A ÁREA CICLOGENÉTICA DA AMÉRICA DO SUL

DANIEL PIRES BITENCOURT¹; MÁRCIA VETROMILLA FUENTES²; CAMILA DE SOUZA CARDOSO³

¹Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho (FUNDACENTRO), Florianópolis, SC, Brasil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), Florianópolis, SC, Brasil.

³Fundação de Apoio ao Desenvolvimento Rural Sustentável de Santa Catarina (FUNDAGRO), Florianópolis, SC, Brasil.

daniel.bitencourt@pq.cnpq.br, marciaf@ifsc.edu.br, k_mila_krdoso@hotmail.com

Recebido Março de 2012 - Aceito Julho de 2012

RESUMO

Ciclones extratropicais são classificados como “explosivos” quando a pressão central decresce 1 hPa h^{-1} em 24 h. Estes sistemas são importantes sobre a América do Sul devido aos fortes impactos sócio-econômicos. Esse artigo apresenta uma climatologia dos ciclones explosivos para a área ciclogênica da América do Sul, usando dados da reanálise do NCEP/NCAR de 1957 a 2010. A taxa de aprofundamento de um ciclone individual foi analisada com respeito a sua latitude média. Analisou-se vários aspectos, como frequência, gênese, trajetória e aprofundamento em 6 h. Além disso, a profundidade, pressão central e raio dos ciclones explosivos foram comparadas com a climatologia de ciclones não explosivos. O campo de vento horizontal é comparado através de um sistema de coordenada móvel, no qual o centro do ciclone é posicionado no centro de um domínio de $30^\circ \text{ lat} \times 30^\circ \text{ lon}$. Constatou-se que os ciclones explosivos não ocorrem ao norte de 27° S e, em geral, iniciam sobre o oceano. Também observou-se que, em média, os ciclones explosivos são $5,1 \text{ hPa}$ mais profundos, possuem raio $0,41^\circ \text{ lat}$ maior e pressão central de $15,5 \text{ hPa}$ menor, em relação aos ciclones não explosivos. Além disso, os ciclones explosivos geram ventos médios de até 60 % mais intensos que os demais ciclones. **Palavras-chave:** Ciclone Explosivo; América do Sul; Frequência; Trajetória

ABSTRACT: CLIMATOLOGY OF EXPLOSIVE CYCLONES OVER CYCLOGENETIC AREA OF SOUTH AMERICA

Extratropical cyclones are defined as “explosive” when their deepening rate is maintained at 1 hPa h^{-1} during a 24-h period. Those systems are important over the South American continent due to their severe socio-economic impacts. This study presents a climatology of explosive cyclones over the cyclogenetic area of South America using NCEP-NCAR re-analysis data from 1957 to 2010. The deepening rate of an individual cyclone was classified with respect to their average latitude. Six-hourly storm attributes such as frequency, genesis, tracks, and deepening rates were analyzed. As a second step, their depth, central pressure, and radius were meaningfully compared with the climatological values obtained from non-explosive cyclones. Horizontal wind fields were compared through a co-moving coordinate system consisting of a $30^\circ \text{ lat} \times 30^\circ \text{ lon}$ domain. It was found that the trajectory of most systems started over the ocean and that no explosive cyclones were found to occur at north of 27° S . This study also highlights that, on average, explosive cyclones are 5.1 hPa deeper, have a radius 0.41° lat larger, and a central pressure 15.5 hPa lower than non-explosive cyclones. In addition, the data suggested that explosive cyclones were associated with wind speeds that were on average 60 % stronger than non-explosive cyclones.

Keywords: Explosive Cyclones; South America; Frequency; Tracks

1. INTRODUÇÃO

O tempo e conseqüentemente o clima do Hemisfério Sul (HS) são fortemente modulados pela ocorrência de ciclones extratropicais. Com base em climatologia do período de 1958-1997, Simmonds e Keay (2000b) constataram uma média de 35 a 38 sistemas ciclônicos (dependendo da estação do ano) por análise numérica sazonal no HS. Para a área ciclogênética da América do Sul considerada nesse estudo, entre 45°S e 15°S e entre 60°W e 20°W, Sinclair (1994) mostrou que a densidade de ciclones (centros por círculo de 5 °lat de raio) no inverno é de até aproximadamente 200 ciclones. Nesta área, os ciclones extratropicais atuam em todas as épocas do ano, mas com maior frequência no inverno (Gan e Rao, 1991; Sinclair, 1994, 1995; Mendes et al., 2010). Durante os meses de junho, julho e agosto, a densidade de sistemas ciclônicos é de aproximadamente 1×10^{-3} ciclones °lat⁻² maior do que nos demais meses do ano (Simmonds e Keay, 2000b).

Ainda considerando a área ciclogênética da América do Sul definida para esse estudo, a profundidade média dos ciclones encontrada por Simmonds e Keay (2000b) foi de 2,5 a 3,5 hPa nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro e de 3,0 a 4,0 hPa nos meses de junho, julho e agosto. Dependendo dos valores da profundidade e da distância entre o centro dos sistemas e a costa da região Sul do Brasil, os ciclones que atuam nessa área ciclogênética provocam consideráveis velocidades de vento no litoral dessa região, especialmente ao sul de 28 °S (Bitencourt et al., 2010), podendo causar prejuízos sociais e econômicos.

Pode-se considerar dois fatores como sendo responsáveis pela área ciclogênética abordada nesse estudo. O primeiro, considerado como fundamental para o desenvolvimento ciclogênético, principalmente nos meses de inverno, é a instabilidade baroclínica. O segundo fator diz respeito as trocas de energia entre a superfície e a atmosfera. A corrente do Brasil pode contribuir para a maior frequência e intensificação desses sistemas no Atlântico Sul (Sinclair, 1994, 1995; Vera et al., 2002). Smith (2000) mostrou que a distribuição horizontal do aquecimento é importante para o desenvolvimento de ciclones. Essa distribuição do aquecimento, quando caracteriza-se por altos gradientes horizontais de temperatura, tais como 0,3 °C km⁻¹, conforme encontrado por Pezzi et al. (2009) na confluência das correntes Brasil-Malvinas, tem relação com os fluxos de calor latente e sensível entre a superfície oceânica e a atmosfera, os quais contribuem para o desenvolvimento de ciclones (Nuss e Anthes, 1987; Davis e Emanuel, 1988; Crescenti e Weller, 1992; Neiman e Shapiro, 1993; Saraiva, 1996; Piva, 2001 e Piva et al., 2008 e 2011). Além disso, há a influência da Cordilheira dos Andes (Satyamurty et al., 1980; Gan e Rao, 1994; Sinclair, 1995; Seluchi et al., 1998; Seluchi e Saulo, 1998; Vera et al., 2002; Mikiy-Funatsu et al., 2004; Hoskins e Hodges,

2005; Mendes et al., 2007), visto que a vorticidade ciclônica associada com o distúrbio transiente perde intensidade ao se aproximar dos Andes devido a redução da coluna atmosférica (Hoskins, 1997), voltando a se intensificar após ultrapassar a cordilheira. Considerando um escoamento adiabático e zonal (vorticidade relativa nula, $\zeta = 0$) de oeste, há um esticamento da coluna atmosférica antes de se aproximar dos Andes, ou seja, a variação da temperatura potencial na vertical diminui e a vorticidade potencial, dada pela soma das vorticidades relativa e planetária, $|(\zeta + f)|$, aumenta. Como em um escoamento zonal f é constante, $|\zeta|$ aumenta tornando o escoamento um pouco ciclônico, no caso do HS, antes de atingir os Andes. Com esse desvio do escoamento para sul, $|f|$ aumenta fazendo com que a $|\zeta|$ pare de aumentar. No topo dos Andes, a coluna atmosférica diminui, a ζ torna-se anticiclônica e o escoamento passa a fluir em direção ao equador. Após cruzar os Andes, quando a coluna atmosférica atinge sua profundidade normal, o escoamento encontra-se em latitudes relativamente baixas fazendo com que a ζ torne-se ciclônica novamente. Na seqüência, o escoamento persiste numa trajetória ondulatória no plano horizontal. Dessa forma, um escoamento permanente de oeste cruzando os Andes resulta em um padrão ciclônico imediatamente a leste da cordilheira, contribuindo para o desenvolvimento de ciclones na área ciclogênética definida para este estudo.

Dentre os eventos ciclogenéticos que ocorrem no mundo, alguns possuem desenvolvimento diferenciado e são chamados de ciclones explosivos ou “bombas”. Os ciclones explosivos (*CEx*), formados pela combinação do processo baroclínico somado a outros mecanismos (Roebber, 1984), se caracterizam pela rápida redução da pressão central e aumento na sua intensificação que, segundo Lim e Simmonds (2002), dificultam o prognóstico e podem causar sérias ameaças à vida humana e a propriedade em áreas próximas à costa ou de navegação. Vários autores são motivados a estudar esse tipo de sistema devido ao tempo severo a eles associados e ao entendimento das estruturas dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera, visto que os *CEx* são raros em comparação com os ciclones de desenvolvimento não explosivo. Em todo o HS ocorrem em média 26 *CEx* por ano, sendo a maior frequência no trimestre de junho, julho e agosto (Lim e Simmonds, 2002). Allen et al. (2010) apresentaram uma climatologia global de *CEx* utilizando quatro reanálises diferentes e também identificaram esse trimestre como o mais frequente.

Nas últimas décadas, vários autores têm pesquisado os *CEx* sob muitos aspectos, tais como, o entendimento das estruturas físicas através de simulações numéricas, estudos climatológicos e estatísticos e, ainda, por meio de estudos de caso. Existem mais publicações sobre *CEx* para o Atlântico Norte (Kuo et al., 1991; Kuo e Nam, 1990; Lackmann et al., 1996; Manobianco, 1989a, 1989b; Sanders, 1986; Lupo et al.,

1992; Wang e Rogers, 2001) em comparação ao número de publicações voltadas ao Atlântico Sul. Jusem e Atlas (1991) realizaram um estudo diagnóstico de um caso de ciclone explosivo ocorrido em maio de 1984 e Seluchi e Saulo (1998) estudaram os possíveis mecanismos envolvidos com uma ciclogênese explosiva. Os casos estudados por Jusem e Atlas (1991) e Seluchi e Saulo (1998), ambos para a América do Sul, apesar de terem apresentado características de rápido desenvolvimento, não foram identificados como *CEx* no presente estudo.

Para outras partes do mundo também foram feitos estudos sobre o desenvolvimento explosivo de ciclones. Chen et al. (1992) estudaram a climatologia de *CEx* no leste da Ásia e região costeira e encontraram uma possível correlação entre frequência de eventos e episódios de El Niño. Chen e Lu (1997) estudaram aspectos climatológicos dos *CEx* no oeste do Pacífico Norte e áreas costeiras do leste da Ásia. Colluci e Alberta (1996) estudaram a relação entre as ciclogêneses explosivas com episódios de bloqueio no Hemisfério Norte (HN). Yoshida e Asuma (2004) classificaram os ciclones com pequena, moderada e forte taxa de aprofundamento no nordeste do Pacífico e, posteriormente, Yoshida e Asuma (2008) investigaram os casos extremos de cada tipo de ciclone explosivo através de simulações numéricas. Kouroutzoglou et al. (2010) construíram uma climatologia objetiva de *CEx* para a região Mediterrânea com 40 anos de dados da reanálise do ERA-40 e identificaram uma frequência de 5,5 sistemas por ano. Gyakum e Danielson (2000) compararam a dinâmica e termodinâmica entre ciclogêneses explosivas e não explosivas no setor oeste do Pacífico Norte.

Nesse artigo, apresenta-se um estudo climatológico das ciclogêneses explosivas, identificadas no período de 1957 a 2010 sobre a área em estudo. Essa área engloba uma das regiões de maior frequência de ciclogênese encontradas por Gan e Rao (1991), Sinclair (1995) e Simmonds e Keay (2000b). Allen et al. (2010) identificaram essa área como sendo a de maior frequência de sistemas explosivos de todo o HS e, considerando apenas o continente sul-americano, Allen et al. (2010) também identificaram uma área ciclogênica no extremo sul da América do Sul, detectada principalmente nas reanálises JRA-25 e ERA-Interim. Entretanto, essa área ciclogênica não é avaliada nesse estudo. O objetivo principal desse artigo é identificar a época de maior frequência e as trajetórias preferenciais dos *CEx*, que ocorrem na área ciclogênica da América do Sul. Em relação ao trabalho de Lim e Simmonds (2002), o presente estudo utiliza diferentes base de dados e período de análise. Além disso, nesse estudo considera-se períodos de 24 h com desenvolvimento explosivo iniciando em qualquer horário da reanálise, enquanto que Lim e Simmonds (2002) identificaram os *CEx* iniciando sempre as 0000 UTC. Análises quantitativas mostram o comportamento médio mensal da variação da pressão

central a cada 6 h do desenvolvimento explosivo. Os *CEx* são comparados com os ciclones não explosivos através da análise da pressão central, profundidade, raio médio e dos campos de velocidade do vento em torno do centro dos sistemas.

2. DADOS E METODOLOGIA

2.1 Dados

Foram utilizados dados de pressão ao nível médio do mar (p) e velocidade do vento (V) em 1000 hPa da reanálise do National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). Esses dados possuem resolução espacial de 2,5° de latitude e longitude e resolução temporal de 6 h (00, 06, 12 e 18 UTC) (Kalnay et al., 1996). A reanálise do NCEP/NCAR é obtida através de dados meteorológicos de superfície em terra, navios, radiossondas, aeronaves, satélites e outros meios, sendo que o controle de qualidade e assimilação desses dados é realizado pelo mesmo sistema desde 1957. Por isso, para esse estudo, a série analisada compreende o período de 1 de janeiro de 1957 a 31 de dezembro de 2010.

2.2 Identificação de toda população de ciclones

Primeiramente foram identificados todos os ciclones extratropicais no domínio entre as latitudes de 45 °S a 15 °S e as longitudes de 60 °W a 20 °W (Figura 1). Utilizou-se o esquema automático de identificação e monitoramento de ciclones desenvolvido na Universidade de Melbourne (Murray e Simmonds, 1991), que requer apenas o campo de pressão ao nível médio do mar (p). O algoritmo utilizado nesse trabalho foi aperfeiçoado no final da década de 90 e todos os detalhes do método e de suas melhorias são mostrados por Simmonds e Murray (1999) e Simmonds et al. (1999). Uma das principais vantagens da identificação automática dos sistemas em dados dispostos em pontos de grade é a utilização de técnicas objetivas com base em informações uniformes ao longo do tempo.

Para este trabalho, o algoritmo foi definido para identificar apenas os sistemas ciclônicos fechados em superfície. Também foram descartados os sistemas com duração inferior a 24 h dentro do domínio mostrado na Figura 1. Simmonds e Murray (1999) trataram o Laplaciano da pressão na vizinhança do centro do ciclone ($\nabla^2 p = \partial^2 p / \partial x^2 + \partial^2 p / \partial y^2$) como uma medida da força do sistema, classificando como “fortes” os sistemas com $\nabla^2 p > 0,7$ hPa °lat⁻² e como “fracos” os sistemas com $0,2 < \nabla^2 p < 0,7$ hPa °lat⁻². Considerando essa classificação, nesse estudo são descartados os sistemas com $\nabla^2 p < 0,2$ hPa °lat⁻², e Δx e Δy utilizados foram iguais a 5° de latitude e longitude, respectivamente.

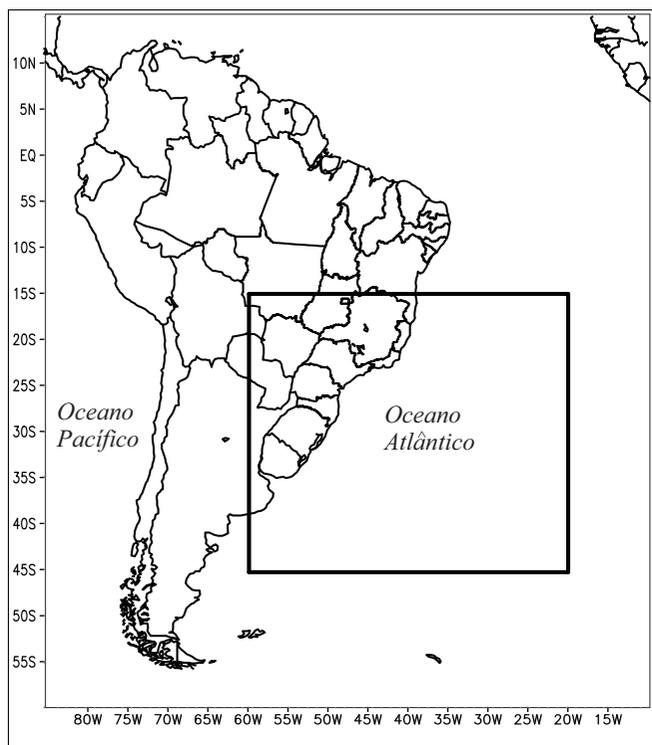


Figura 1 – O quadrado destacado por linhas contínuas indica o setor da América do Sul e Oceano Atlântico definido para identificação dos ciclones.

Apesar do $\nabla^2 p$ ser importante, este parâmetro apresenta dependência implícita da escala horizontal. Um ciclone, com um dado valor de $\nabla^2 p$, será tão mais intenso, quanto menor for a escala horizontal desse sistema (Simmonds e Keay, 2000a). Assim, outros parâmetros, como a profundidade (D) e raio (R) dos ciclones tornam-se necessários para a análise. Todos esses parâmetros são relacionados através da Equação 1:

$$D = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} R^2 = \frac{1}{4} \nabla^2 p R^2 \quad (1)$$

onde $\nabla^2 p$ é o valor médio do Laplaciano da pressão numa área correspondente a região que cerca o máximo $\nabla^2 p$, em que o $\nabla^2 p$ é positivo. A distância média, em °lat, entre o centro do sistema e o limite dessa área ($\nabla^2 p > 0$) é o R do sistema.

Além da D e R , o esquema automático de identificação de Murray e Simmonds (1991) também gera para cada tempo da reanálise a pressão central (p_c), latitude (lat) e longitude (lon) do ciclone. A partir das informações de lat e lon obteve-se a velocidade de deslocamento dos sistemas.

Uma vez identificados os ciclones e calculados os parâmetros supracitados, foram gerados campos de velocidade horizontal do vento (V) em torno do centro de cada sistema, para cada horário (intervalos de 6 h) e com a mesma resolução espacial da reanálise do NCEP/NCAR. O centro do ciclone foi

determinado como sendo o ponto de grade mais próximo da lat e lon centrais do ciclone, conforme identificado pelo esquema de Murray e Simmonds (1991). Posteriormente, calculou-se os campos médios de V para toda a população de ciclones e exclusivamente para os ciclones explosivos. Os campos de V foram gerados através de um sistema de coordenada móvel, que consiste de um domínio com dimensões de $30^\circ \text{ lat} \times 30^\circ \text{ lon}$. Assim, o comportamento da V ao redor do centro do ciclone é avaliado, desconsiderando a região de atuação do sistema. Manobianco (1989a) utilizou técnica similar para estudar ciclogêneses explosivas no Atlântico Norte.

2.3 Identificação dos ciclones explosivos

Todos os ciclones extratropicais, identificados através do esquema de Murray e Simmonds (1991), foram submetidos ao método proposto por Sanders e Gyakum (1980), onde o desenvolvimento do ciclone é expresso pela Taxa Normalizada de Aprofundamento da pressão central (TNA_c), dada por

$$TNA_c = \frac{\Delta p_c}{24 \text{ hPa}} \frac{\text{sen } 60}{|\text{sen } \varphi|} \quad (2)$$

onde Δp_c é a variação da pressão central do ciclone em 24 h e φ é a latitude média de localização do centro do sistema, considerando os pontos inicial e final da trajetória em períodos de 24 h.

O cálculo foi também realizado usando o método proposto por Lim e Simmonds (2002), no qual o desenvolvimento explosivo é representado pela Equação 2, mas substituindo a pressão central (p_c) pela pressão central relativa (p_r), sendo $p_r = p_c - p_{cli}$, onde p_{cli} é o valor climatológico da pressão central obtida do campo de pressão climatológica diária da reanálise do NCEP/NCAR. A p_{cli} foi interpolada para a mesma lat e lon do centro do ciclone, ou seja, o valor da p_{cli} é ajustado exatamente para o ponto do centro do ciclone, com base nos valores obtidos dos quatro pontos de grade ao redor. Assim, a Taxa Normalizada de Aprofundamento da pressão central relativa (TNA_r) é definida como:

$$TNA_r = \frac{\Delta p_r}{24 \text{ hPa}} \frac{\text{sen } 60}{|\text{sen } \varphi|} \quad (3)$$

onde Δp_r é a variação da pressão central relativa do ciclone em 24 h.

Quando as medidas de TNA_c ou TNA_r excedem uma unidade [1 “Bergeron”, de acordo com a terminologia de Sanders e Gyakum (1980)], o sistema tem um desenvolvimento explosivo ou “bomba”. Sanders (1986) classificou a intensidade dos CEx como “fracos” ($1,0 \leq \text{Bergeron} \leq 1,2$), “moderados” ($1,3 \leq \text{Bergeron} \leq 1,8$) e “fortes” ($\text{Bergeron} > 1,8$).

Lim e Simmonds (2002) apresentaram uma discussão abrangente sobre o uso da pressão climatológica na identificação

de ciclogêneses com rápido aprofundamento. De acordo com Simmonds e Wu (1993) e Sinclair (1995, 1997), há vantagens em analisar ciclogêneses explosivas utilizando a pressão relativa (Equação 3). Segundo Sinclair (1995), alguns ciclones podem alcançar uma taxa de aprofundamento maior do que 1 Bergeron, mas com pouco ou nenhum aumento na vorticidade ciclônica. O aprofundamento do sistema ocorre simplesmente porque o ciclone se move, durante um período de 24 h, em direção a uma área com pressões mais baixas. Jones e Simmonds (1993) e Simmonds e Keay (2000a) mostraram que muitos ciclones do HS se desenvolvem em latitudes médias e migram para sudeste, passando por fortes gradientes meridionais de pressão climatológica. Considerando isso, a climatologia apresentada a partir da seção 3.2 desse estudo tem como base apenas os *CEx* identificados através da metodologia TNA_r . Entretanto, com intuito de reforçar as diferenças de resultados obtidos pelas duas metodologias, na primeira seção de resultados e discussão (seção 3.1) analisa-se e compara-se ambos os métodos, TNA_c e TNA_r .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Frequências mensais e intensidade dos ciclones explosivos

A análise das metodologias TNA_c e TNA_r mostram que as frequências de ciclones explosivos na região de estudo apresentam um rápido crescimento a partir do mês de janeiro, mês de menor frequência de ocorrência de todo o ano, com um máximo no mês de junho e um decréscimo um pouco mais lento a partir deste mês (Figura 2a). Estes resultados são concordantes com os encontrados para todo o HS por Allen et al. (2010), os quais demonstram que ciclones explosivos ocorrem preferencialmente nos meses de inverno, seguido de primavera, depois de outono e por fim de verão. De acordo

com Lim e Simmonds (2002), os *CEx* que ocorrem no leste do Uruguai podem ocorrer durante todo o ano, no entanto são dominantes na estação de inverno. Roebber (1984) sugere que a maioria dos *CEx* possuem origem em mecanismos provocados pela instabilidade baroclínica. Entretanto, de acordo com os resultados encontrados por Piva et al. (2008, 2011), obtidos a partir de simulações numéricas, os fluxos de calor latente e sensível no Oceano Atlântico Sul, próximos à costa do sul do Brasil e Uruguai, possuem influência decisiva na intensidade dos ciclones. De acordo com Piva et al. (2008, 2011), as trocas de energia entre o oceano e a atmosfera nessa região ciclogênica da América do Sul são importantes antes da fase de mais rápido desenvolvimento do ciclone, preparando o ambiente, através da maior disponibilidade de energia e umidade, para uma ciclogênese mais intensa.

No presente estudo, aplicando as metodologias TNA_c e TNA_r , foram identificados, em média, 2,7 e 1,57 *CEx* por ano, respectivamente. Se compararmos o número de *CEx* identificados através de TNA_c (144 eventos) e TNA_r (85 eventos) com toda a população de ciclones extratropicais (3.483 eventos) identificados através da metodologia apresentada na seção 2.2, pode-se considerar que os *CEx* são raros na América do Sul. Os *CEx* representam uma taxa de 4,1 % (utilizando TNA_c) e 2,4 % (utilizando TNA_r) do total de ciclones. Entretanto, apesar da taxa de ocorrência dos *CEx* ser baixa, a área ciclogênica abordada nesse estudo é a área de maior frequência de *CEx* do HS (Allen et al., 2010).

Utilizando-se a classificação de Sanders (1986), para os 85 casos identificados nesse estudo através da metodologia TNA_r , encontrou-se a grande maioria, cerca de 81 %, como sistemas “fracos” (Figura 2b). Aproximadamente 16,5 % dos *CEx* foram classificados como “moderados” e apenas 2 eventos explosivos “fortes” ocorreram na área ciclogênica da América do Sul, o que representa cerca de 2,5 % de todos os eventos

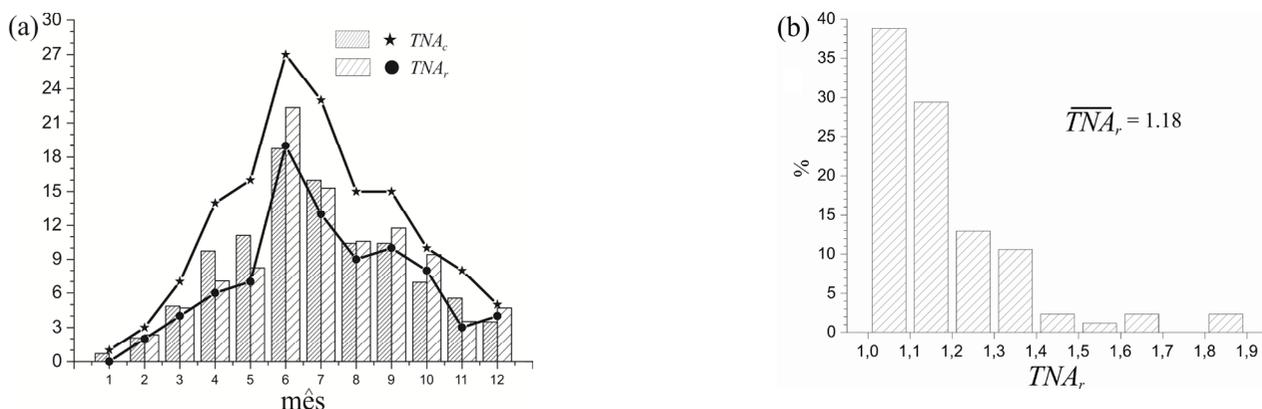


Figura 2 – (a) Número (linhas) e frequência (barras) mensal de *CEx* identificados através dos métodos TNA_c e TNA_r . A escala no eixo vertical do gráfico é adimensional para a representatividade do número mensal de *CEx* e em % para representatividade da frequência mensal de *CEx*. (b) Frequência em % de ocorrência de *CEx*, por faixa de valores de TNA_r .

(Figura 2b). Os dois casos de *CEx* “fortes” foram registrados em julho de 1970, com $TNA_r = 1,85$, e em dezembro de 2003, com $TNA_r = 1,82$. Resultados semelhantes foram encontrados por Lim e Simmonds (2002) em uma climatologia para o HS, onde 87 % são *CEx* “fracos”, 12 % “moderados” e 1 % “fortes”.

Nesse estudo, todos os casos de ciclogênese que foram identificadas como explosivas através do método TNA_r , foram também identificadas como explosivas através do método TNA_c . Entretanto, dependendo da configuração do campo climatológico de pressão e da direção de deslocamento do sistema, um *CEx* pode ser identificado por TNA_c e não por TNA_r . Allen et al. (2010) mostraram dois casos de ciclogêneses, um para cada hemisfério, em que ambos os casos foram considerados *CEx*, quando o campo de pressão é subtraído do campo climatológico (TNA_r), mas não foram identificados como *CEx*, quando foi considerado apenas o campo de pressão (TNA_c). Aqui, a análise feita para a região ciclogênica da América do Sul mostrou que a principal diferença entre as metodologias TNA_c e TNA_r não é com respeito a variabilidade anual da frequência mensal, e sim quanto ao número de *CEx* identificados. Considerando a metodologia TNA_r (Equação 3), o número de *CEx* identificados diminuiu de 144 para 85 eventos, uma diminuição de aproximadamente 41 %. Essa diferença é esperada, visto que o setor mais ao sul da área utilizada nesse estudo é caracterizado por intensos gradientes horizontais de pressão.

3.2 Gênese e trajetória

Geralmente os *CEx* (identificados por TNA_r) possuem deslocamento para sudeste, assim como é verificado para a climatologia de toda população de ciclones extratropicais (Gan e Rao, 1991; Simmonds e Keay, 2000a) (Figuras 3-6). Nesse estudo, a velocidade média de deslocamento encontrada durante a trajetória explosiva foi de $13,8 \text{ m s}^{-1}$. Reboita (2008)

encontrou que os ciclones da costa sul/sudeste do Brasil deslocam-se com velocidade média de 9 m s^{-1} . Em algumas ocasiões, foram verificados trechos de 6 h com uma pequena componente de deslocamento para oeste. Esses deslocamentos para oeste podem ser devido a existência de dois ciclones próximos, situação que favorece um giro horário entre os dois sistemas. Dessa forma, o ciclone que está mais ao sul desloca-se para oeste e o que está mais a norte desloca-se para leste. Outra situação que pode explicar o deslocamento para oeste é quando, em um determinado horário, existe uma grande área com pressões mais baixas e fraco gradiente de pressão, ou seja, apesar de ainda não estar completamente configurado, o sistema ciclônico existe e, portanto, o esquema de identificação detecta um ponto de pressão mínima, identificando esse ponto como o local do centro do ciclone. Quando, no próximo horário da reanálise, ocorre aprofundamento do campo de pressão em um local mais a oeste do ponto identificado anteriormente, o esquema automático de identificação detectará o centro do sistema também mais a oeste, mostrando assim um deslocamento em 6 h com componente oeste. Na sequência, quando o ciclone está mais bem configurado, o sistema, de fato, passa a se deslocar com uma componente de leste. Essa situação foi verificada na trajetória dos *CEx* que ocorreram em junho de 1983 e em agosto de 2007.

Também constata-se que quase a metade dos *CEx*, cerca de 49,4 %, apresentam toda trajetória sobre o oceano e outros 23,5 % apresentam início da ciclogênese sobre o continente, mas passam a ser considerados explosivos somente sobre o oceano, totalizando uma taxa de 72,9 % de ciclones que iniciam o desenvolvimento explosivo sobre o oceano. Dos demais *CEx* identificados nessa área, cerca de 22,4 % iniciam sua trajetória já com características explosivas ($TNA_r \geq 1$) sobre o continente e cerca de 4,7 % iniciam a trajetória como um ciclone não explosivo, passando a ser explosivos ainda sobre o continente. Os meses de junho e agosto (Figuras 5a e 5c) apresentam

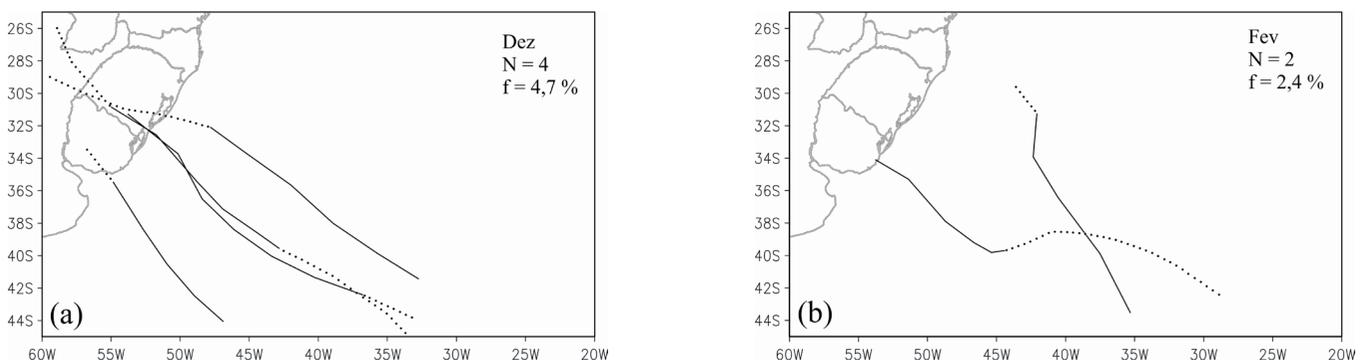


Figura 3 – *CEx* (identificados por TNA_r) nos meses de (a) dezembro e (b) fevereiro, no período de 1957 a 2010. As linhas tracejadas e contínuas mostram a trajetória completa dos ciclones. A linha contínua mostra exclusivamente a trajetória com desenvolvimento explosivo. N é o número e f é a frequência de *CEx* no mês. Os mapas não mostram a faixa latitudinal entre 25 e 15 °S porque não foram identificados *CEx* nessa área.

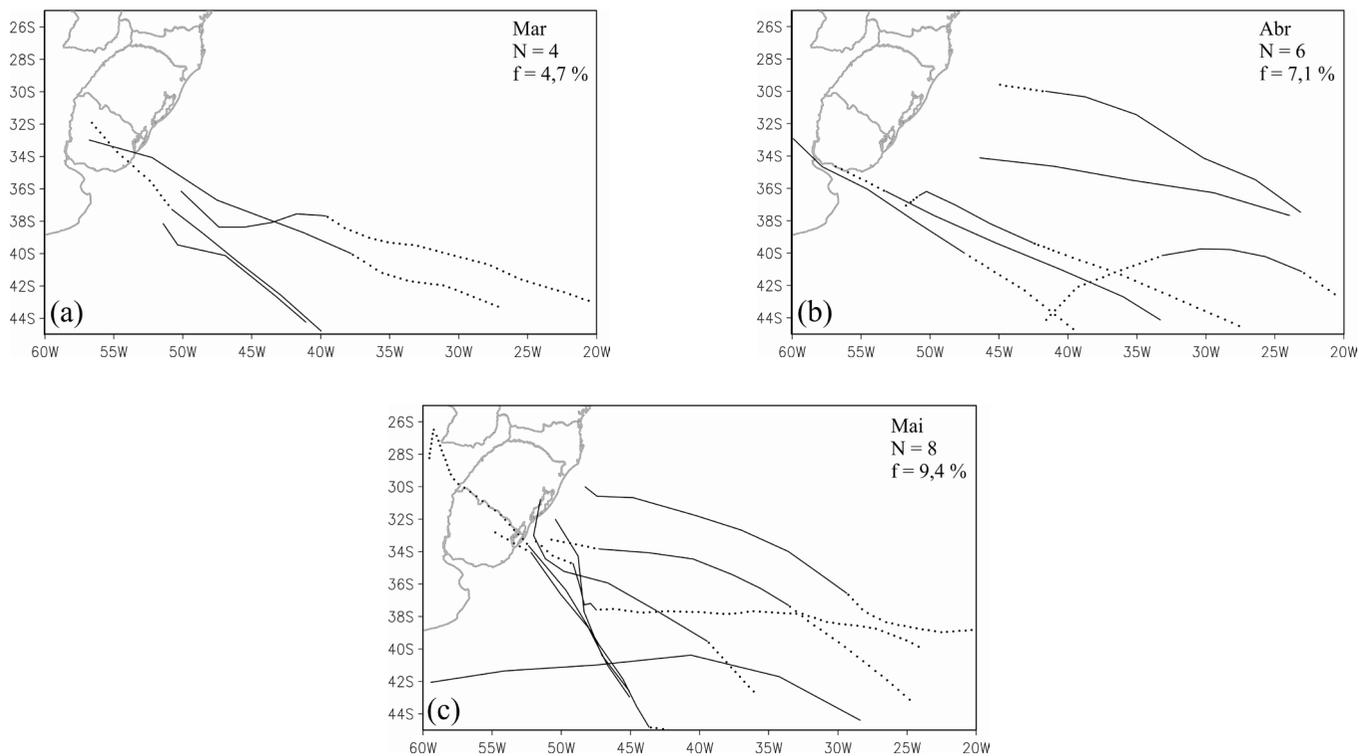


Figura 4 – Mesmo que a figura 3, mas para os meses de (a) março, (b) abril e (c) maio.

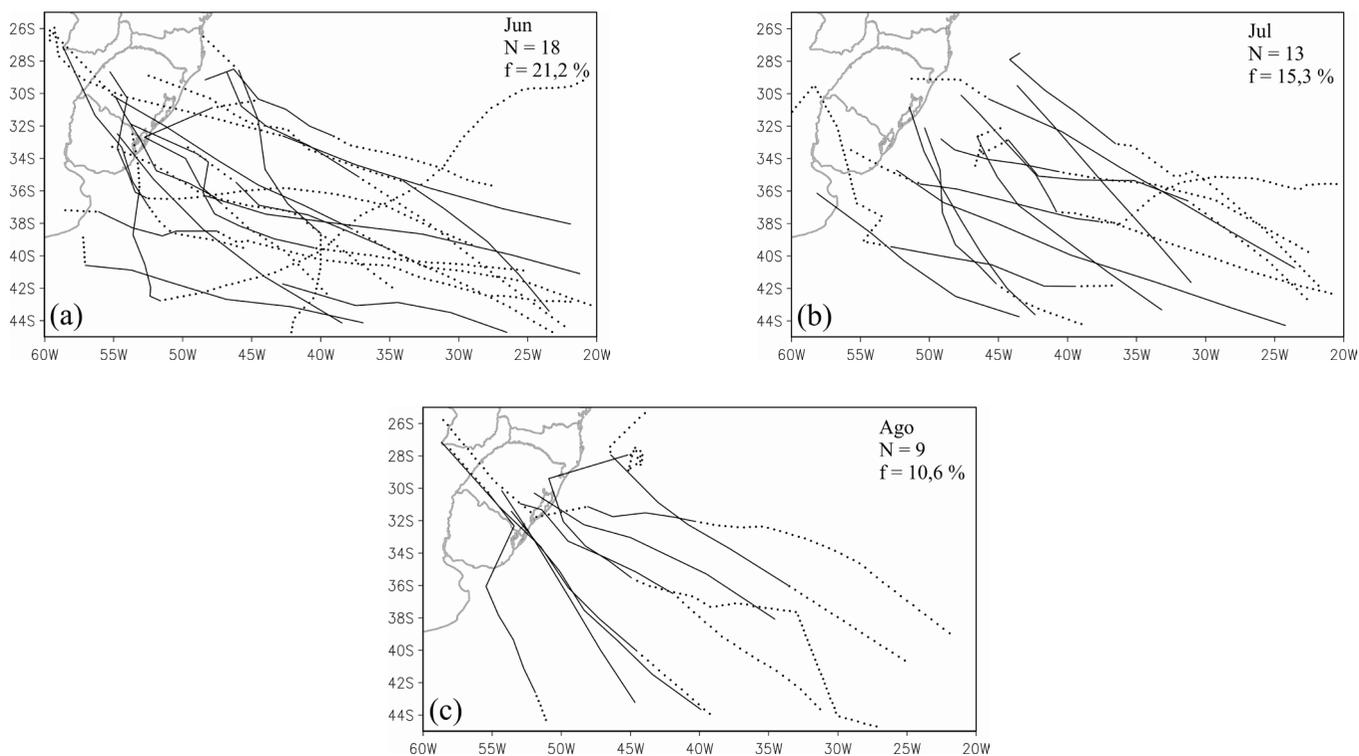


Figura 5 – Mesmo que a figura 3, mas para os meses de (a) junho, (b) julho e (c) agosto.

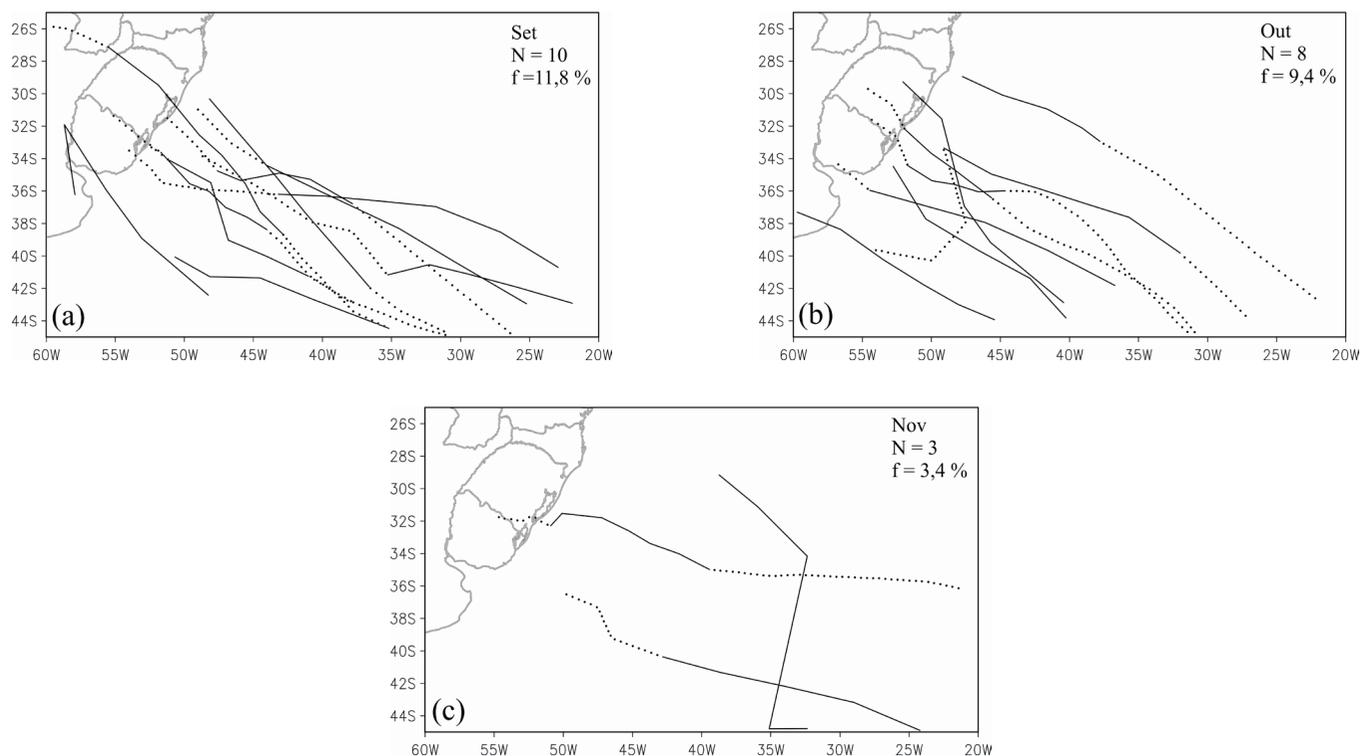


Figura 6 – Mesmo que a figura 3, mas para os meses de (a) setembro, (b) outubro e (c) novembro.

um maior número de *CEEx* com gênese continental. Sanders e Gyakum (1980) também constataram através de estudo sinótico-dinâmico, que os *CEEx* são fenômenos predominantemente marítimos e de estação fria. A ocorrência de *CEEx* especialmente sobre o oceano (Figuras 3-6) indica que a troca de energia entre a superfície e a baixa atmosfera é importante (Kuo et al., 1991).

O fato da gênese “explosiva” dos sistemas ciclônicos ocorrer sobre o continente predominantemente nos meses mais frios, sugere a importância da baroclinicidade atmosférica, assim como, da posição e intensidade do jato subtropical. A combinação das forçantes geradas pela liberação de calor latente, trocas de energia entre a superfície e a atmosfera, topografia e distúrbios de altos níveis favorecem o desenvolvimento das chamadas ciclogênese de costa leste. Por outro lado, a constatação de que a maioria dos *CEEx* são marítimos, aponta para a importância das trocas de calor entre a superfície e a baixa atmosfera como fonte de energia para a intensificação desses sistemas.

O gráfico da Figura 7 sintetiza o posicionamento geográfico da gênese “explosiva”, ou seja, a posição média, mais ao norte e mais ao sul do início da trajetória dos ciclones com desenvolvimento explosivo ($TNA_r \geq 1$). Percebe-se que durante o ano, em média, o início do desenvolvimento dos *CEEx* ocorre na faixa longitudinal de 53°W a 44°W, sem apresentar uma posição preferencial em meses frios ou quentes (Figura 7a). Por

outro lado, a média mensal da latitude mostra que o início do desenvolvimento explosivo ocorre mais ao sul (36°S) no mês de março e mais ao norte (30°S) no mês de agosto, com uma tendência de um posicionamento mais ao sul no final do verão e mais ao norte no final do inverno (Figura 7b), provavelmente acompanhando a posição da confluência Brasil-Malvinas (Goni e Wainer, 2001). Entretanto, a alta amplitude entre os valores mínimos e máximos, tanto da latitude como da longitude inicial do desenvolvimento explosivo, indicam que as forçantes de baroclinia e de trocas de calor entre a superfície e atmosfera atuam conjuntamente e, dependendo da época do ano e da característica individual de cada sistema, uma forçante pode apresentar maior importância em relação à outra. Para a área restrita desse estudo, não foi encontrado *CEEx* ao norte de 27°S.

3.3 Variação da pressão central em 6 h

Essa seção apresenta uma análise da intensificação da p_c a cada 6 h e do tempo de duração dos *CEEx* mês a mês. Essa análise é realizada com base nos *CEEx* identificados através do método TNA_r (Equação 3) e calcula a Δp_c , ou seja, sem a consideração do campo de p_{cli} . O fato do cálculo ser feito para Δp_c não influencia significativamente os resultados dessa análise em específico, a qual aborda picos de intensificação e o tempo de duração dos *CEEx*, porque em períodos de 6 h o

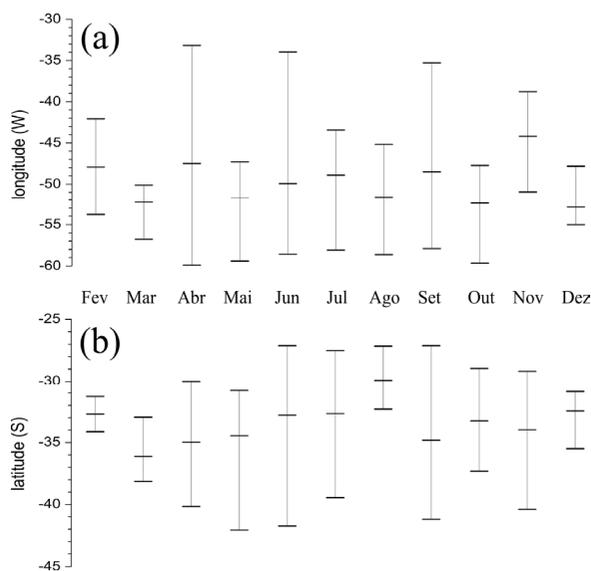


Figura 7 – (a) Longitude e (b) latitude média (\pm), máxima (\top) e mínima (\perp) inicial do desenvolvimento dos CEx (identificados por TNA_r). A legenda dos meses é mostrada entre os dois gráficos.

deslocamento dos CEx são relativamente pequenos (média de 300 km). Percebe-se primeiramente que o tempo de duração desses sistemas é menor nos meses mais quentes e maior nos meses mais frios (Figura 8). Os CEx possuem duração de 24 h em fevereiro e março, de até 30 h em abril e novembro, de até 36 h em agosto, outubro e dezembro, de até 42 h em maio, julho e setembro e de até 48 h em junho. Esses períodos de duração, apresentados na Figura 8, são referentes exclusivamente às trajetórias explosivas e são considerados aqui como ciclo de vida dos CEx. Aproximadamente na metade desse ciclo de vida, ocorre a máxima intensificação, dada pela maior variação da p_c em 6 h (Δp_c 6 h⁻¹). Apesar do pico de intensificação ocorrer aproximadamente no meio do ciclo de vida, nota-se através dos valores máximos plotados nos gráficos da Figura 8, que na maioria das vezes ocorre diminuição da p_c ao longo de todo o ciclo de vida. A maior intensificação na metade do ciclo de vida dos CEx é mais perceptível nos meses de abril a outubro e em dezembro (Figura 8). Nota-se ainda, que esse pico de intensificação apresenta tendência de ser mais pronunciado nos meses mais quentes, tais como, fevereiro, novembro e dezembro.

3.4 Ciclones explosivos versus ciclones não explosivos.

Nesta seção as estatísticas de média e o desvio padrão da profundidade (D), pressão central (p_c) e raio (R) dos CEx (identificados por TNA_r) foram comparadas com as estatísticas de toda a população de ciclones (ciclones não explosivos -

$CnEx$), a qual não inclui os 85 CEx identificados nesse estudo. Além disso, compara-se os campos de velocidade de vento característicos aos CEx com os campos de vento dos $CnEx$.

Percebe-se através da Figura 9a, que a média e o desvio padrão da D dos $CnEx$ são maiores nos meses mais frios do ano (Figura 9a). Com relação a p_c (Figura 9b) a média dos $CnEx$ apresenta dois picos de mínima, um em maio e outro em dezembro, enquanto que o desvio padrão em torno da média é relativamente maior nos meses mais frios. A climatologia do R dos $CnEx$ (Figura 9c) mostra pouca variabilidade no decorrer do ano, com uma pequena tendência para existência de sistemas de maior escala espacial em maio. O desvio padrão em torno da média do R é bastante elevado e isso não varia muito no decorrer do ano.

Quando se avalia os CEx, percebe-se que a variabilidade anual das estatísticas de média e desvio padrão não apresentam o mesmo comportamento encontrado para a climatologia dos $CnEx$. Entretanto, fica claro que a D e R médios dos CEx são sempre maiores que as médias desses parâmetros encontrados em $CnEx$ (Figuras 9a e 9c). Essas diferenças mostraram que os CEx são de 4,5 a 5,7 hPa mais profundos do que os $CnEx$, e que os CEx apresentam R de 0,22 a 0,59 °lat maior do que os $CnEx$. A p_c dos CEx é sempre menor do que a p_c dos $CnEx$ (Figura 9b), com diferenças variando de 12,2 a 18,8 hPa. Ou seja, em média, os CEx possuem maior escala espacial e são mais intensos que os $CnEx$.

Comparando as estatísticas de desvio padrão da D (Figura 9a), observa-se que os valores entre a média e o desvio padrão abaixo (negativo) da média mensal dos CEx são coincidentes com os valores entre a média e desvio padrão acima (positivo) da média mensal dos $CnEx$. Essa interseção de valores de desvio padrão é maior nos meses mais frios, mostrando que, principalmente no inverno, podem ocorrer $CnEx$ com D observada em alguns CEx. Por outro lado, alguns ciclones, apesar de terem classificação de “explosivo”, podem ter intensidade característica de $CnEx$ mais fortes. A interseção de valores dos desvios padrões também é percebida para as demais variáveis analisadas. No caso da p_c (Figura 9b), isso é mais perceptível entre maio e agosto. No caso do R (Figura 9c), a coincidência de valores ocorre o ano todo, podendo, inclusive, o desvio padrão positivo dos $CnEx$ coincidir com o desvio padrão positivo dos CEx. Também verifica-se que o R médio dos $CnEx$ e CEx podem apresentar valores muito próximos.

A velocidade do vento (V) em torno do centro dos CEx é maior no setor nordeste, com valores superiores a 14 m s⁻¹, num raio de aproximadamente 4 a 8 °lat (Figura 10a), no entanto esta área de ventos intensos se alonga pelo leste até o setor sul do CEx. A área na direção nordeste do centro dos ciclones é onde classicamente encontra-se o setor quente, na fase anterior à oclusão do sistema (Bjerknes e Solberg, 1922). Essa é a área em que o ar quente ascende devido ao avanço

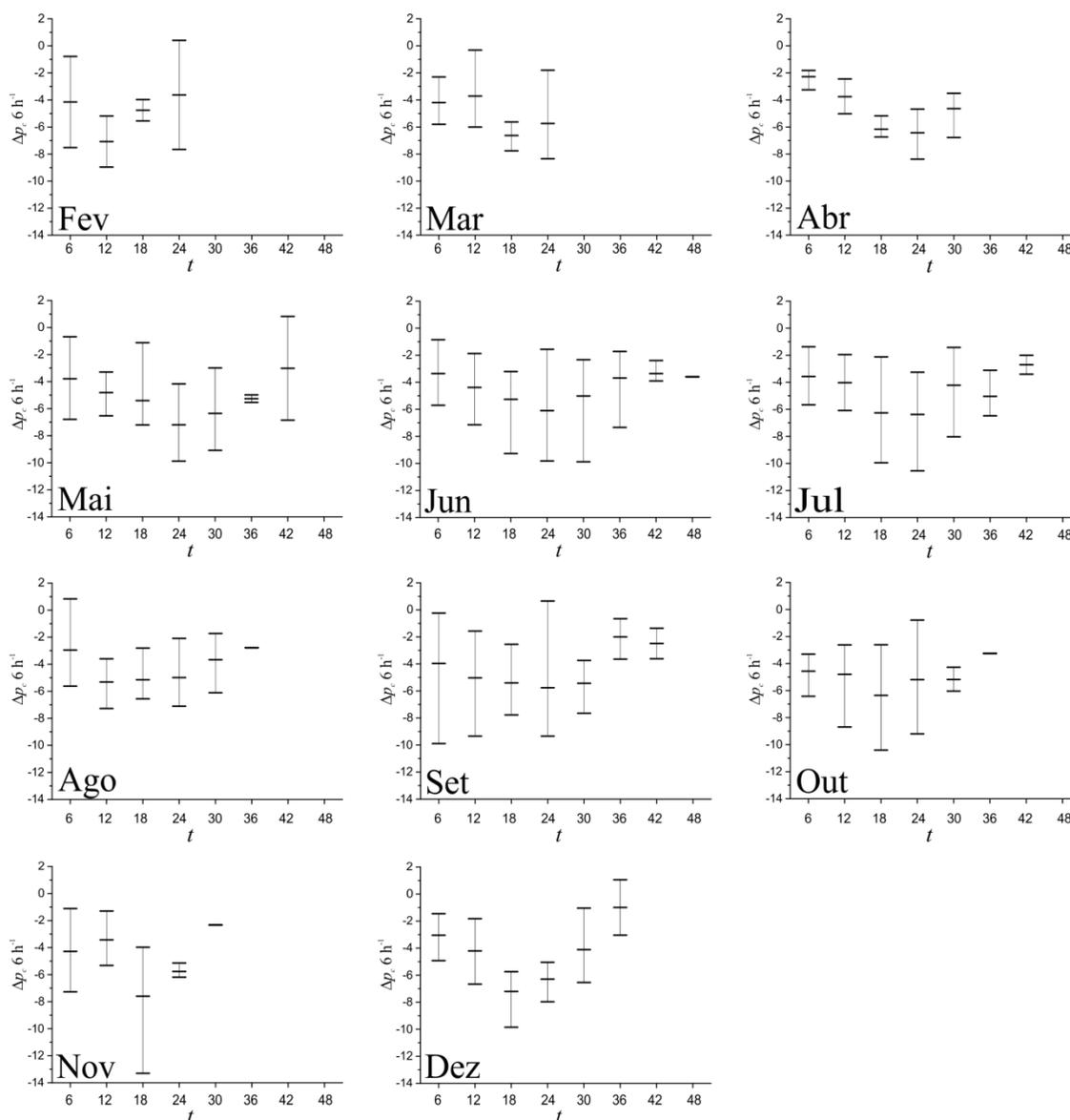


Figura 8 – Valores mensais médio ($\bar{\Delta p_c}$), máximo ($\Delta p_{c,max}$) e mínimo ($\Delta p_{c,min}$) da variação da pressão central (hPa) em intervalos de 6 h dos *CEx* (identificados por *TNA*, e somente para o trecho de desenvolvimento explosivo). O mês é indicado no canto inferior esquerdo de cada painel. t é o tempo de vida do desenvolvimento explosivo.

do ar frio, contribuindo para a redução do setor quente, queda da pressão atmosférica e aumento da convergência horizontal (Bjerknes, 1919). A substituição do ar quente pelo ar frio induz ao decréscimo da energia potencial disponível do ciclone e aumento simultâneo de sua energia cinética. Próximo ao centro dos *CEx* a V decresce em direção ao centro do sistema, ficando em torno de 6 m s^{-1} .

O campo de vento composto para os *CnEx* apresenta aproximadamente a mesma configuração espacial apresentada pelos *CEx*. O vento máximo em torno do centro dos sistemas, também encontra-se na direção nordeste do centro, onde classicamente localiza-se o setor quente (Figura 10b). Entretanto, os valores da V máxima nessa área é de pouco mais de 10 m s^{-1} .

O campo espacial da diferença percentual entre a V de *CEx* e *CnEx* mostra que as maiores diferenças são percebidas entre as direções sudoeste e sudeste, passando pela direção norte do centro dos sistemas (Figura 10c). Onde classicamente é localizado o setor quente, os *CEx* geram ventos de 40 a 50 % mais intensos do que os *CnEx*. Mas, a maior diferença está na direção noroeste do centro dos sistemas, onde os *CEx* geram ventos de aproximadamente 60 % mais intensos que os *CnEx*.

4. CONCLUSÕES

Com base em metodologia objetiva de identificação e obtenção de estatísticas, apresentou-se nesse trabalho um

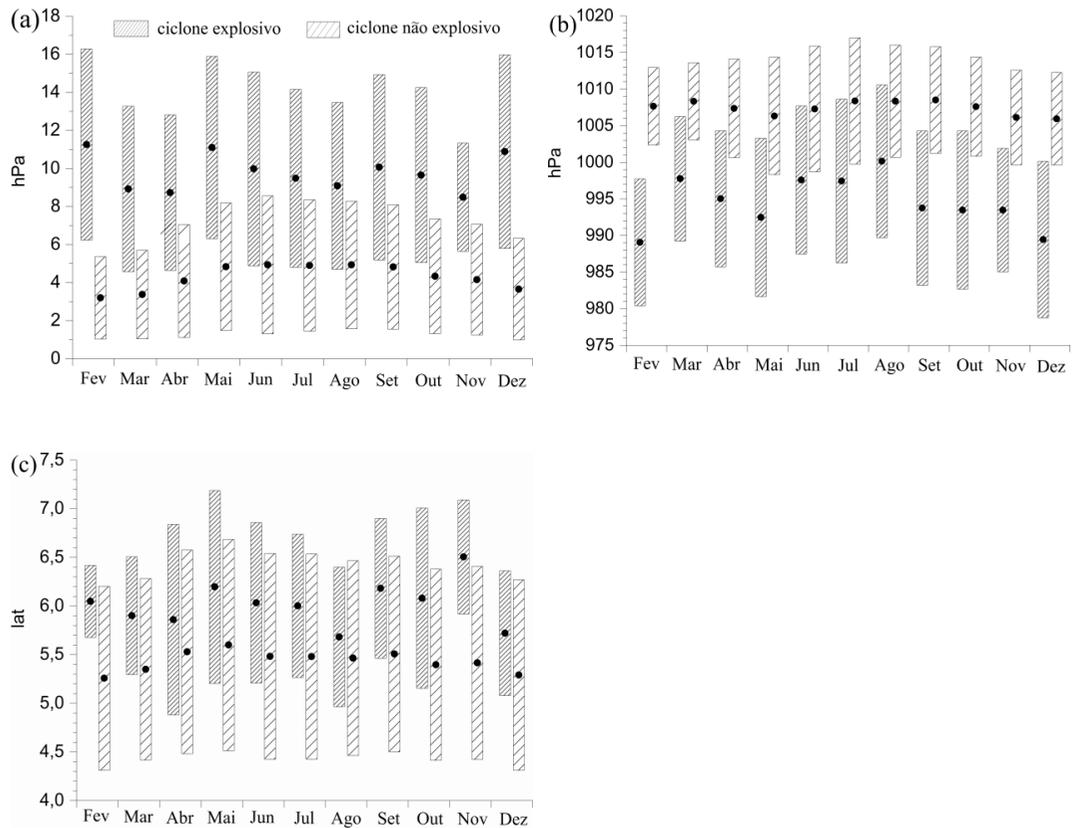


Figura 9 – Média (•) e desvio padrão (barras) mensal da (a) profundidade, (b) pressão central e (c) raio, para CEx (identificados por TNA_r) e CnEx (legenda no topo do primeiro gráfico).

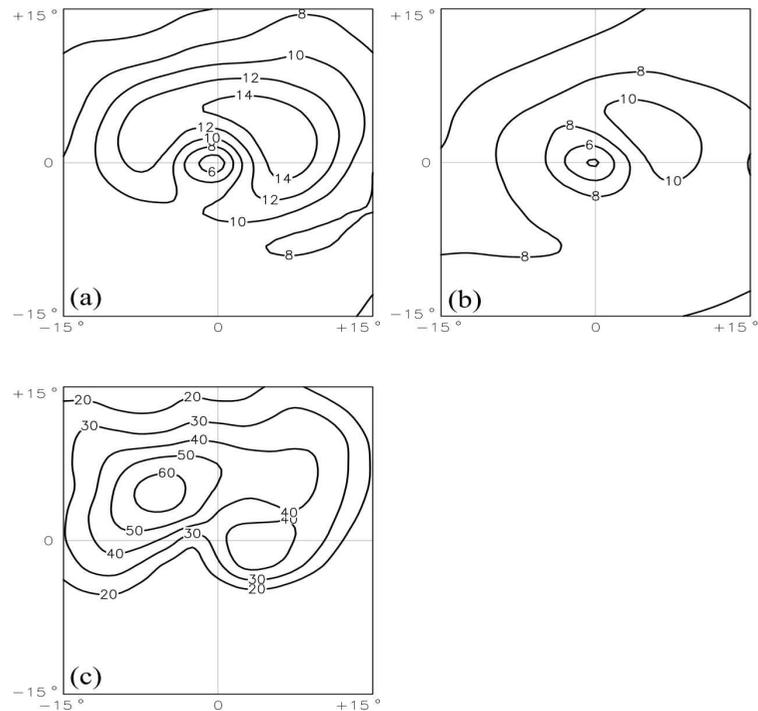


Figura 10 – Valores médios da velocidade do vento em torno do centro do sistema, calculados para (a) CEx (identificados por TNA_r) e (b) CnEx. Isolinhas com intervalos de $2 m s^{-1}$. A diferença (%) entre esses dois campos é apresentada no painel (c). Valores médios da velocidade do vento em torno do centro do sistema, calculados para (a) CEx (identificados por TNA_r) e (b) CnEx. Isolinhas com intervalos de $2 m s^{-1}$. A diferença (%) entre esses dois campos é apresentada no painel (c).

estudo climatológico de ciclogêneses explosivas para a região ciclogênica da América do Sul. Considerou-se como principais contribuições desse artigo, o detalhamento da climatologia dos ciclones explosivos para essa área restrita do globo e a comparação dos principais parâmetros desses sistemas com os sistemas ciclônicos de desenvolvimento não explosivo. Os dados de pressão foram da reanálise do NCEP/NCAR e a aplicação do método de Sanders e Gyakum (1980), mudando a pressão central do ciclone pela pressão central relativa, diminuiu de 144 para 85 o número de ciclogêneses explosivas identificadas no período de 1957 a 2010. Assim como, nas outras regiões do globo, o *CEx* na América do Sul é um fenômeno raro, com cerca de 4,1 % (TNA_c) e 2,4 % (TNA_r) de frequência entre todos os ciclones que se formam nessa área. Porém, embora raros, essa área ciclogênica da América do Sul é considerada a de maior frequência de *CEx* do HS (Allen et al., 2010). De uma maneira geral, os resultados encontrados nesse estudo coincidem com os resultados encontrados por Lim e Simmonds (2002), que utilizaram outra base de dados.

A maior frequência de *CEx* acontece nos meses mais frios, em junho, julho e agosto, com 47,1 % dos casos. Dentro da área escolhida para esse estudo, os *CEx* se formam apenas ao sul de 27 °S e a maioria dos sistemas, 72,9 %, apresentam início da trajetória com desenvolvimento explosivo sobre o oceano. Quase a totalidade dos *CEx* tem deslocamento para sudeste e a velocidade média desse deslocamento encontrada foi de 13,8 m s⁻¹.

As comparações realizadas entre os parâmetros dos *CEx* e *CnEx* permitiram algumas constatações importantes. A primeira delas é que as médias mensais da profundidade e do raio são sempre maiores em *CEx* do que em *CnEx*. Os *CEx* são de 4,5 a 5,7 hPa mais profundos e possuem raio de 0,22 a 0,59 °lat maior que os *CnEx*. A pressão central dos *CEx* é de 12,2 a 18,8 hPa menor do que a pressão central dos *CnEx*. Os resultados desses parâmetros indicam que os *CEx* são, em média, mais fortes e de maior escala espacial que os *CnEx*, apesar de existirem alguns *CnEx* com profundidade, pressão central ou raio também observados em *CEx* mais fracos. Por fim, a distribuição espacial da velocidade do vento em torno do centro dos sistemas mostrou que ambos *CEx* e *CnEx* apresentam as maiores velocidades a nordeste do centro, onde classicamente encontra-se o setor quente. As maiores diferenças, entre os campos de velocidade dos *CEx* e *CnEx*, encontram-se entre as direções sudoeste e sudeste, passando pela direção norte a partir do centro do sistema. Entretanto, na direção noroeste do centro a velocidade do vento provocada pelos *CEx* é cerca de 60 % mais forte que a velocidade do vento provocada pelos *CnEx*.

Sugere-se mais pesquisas envolvendo os *CEx* que ocorrem na área ciclogênica da América do Sul, sendo particularmente

interessante mostrar uma climatologia abordando a estrutura vertical, além de estudos sobre as estruturas dinâmica e termodinâmica responsável pelo desenvolvimento explosivo. Também é interessante identificar e detalhar as características dos *CEx* que ocorrem sobre a área ciclogênica da América do Sul utilizando outras bases de dados.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao “National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research” (NCEP/NCAR) pelos dados meteorológicos. Também agradecemos aos pesquisadores Ian Simmonds e Kevin Keay pela assistência no uso do esquema de identificação de ciclones e aos revisores anônimos desse artigo pelas críticas úteis e construtivas. Agradecemos o suporte financeiro do CNPq (processo 471917/2008-7) e da FINEP (processo 2442008).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, J.T.; PEZZA, A.B.; BLACK, M.T.. Explosive cyclogenesis: A global climatology comparing multiple reanalysis. **Journal of Climate**, v. 23, n. 24, p.6468–6484, 2010.
- BITENCOURT, D.P.; ACEVEDO, O.C.; GAN, M.A.; FUENTES, M.V.; MUZA, M.N.; RODRIGUES, M.L.; QUADRO, M.F.L.. Relating winds along the Southern Brazilian coast to extratropical cyclones. **Meteorological Applications**, v. 18, n. 2, p.223–229, 2011.
- BJERKNES, J.. On the structure of moving cyclones. **Geofysiske Publikationer**, v. 1, n. 2, p.1–8., 1919.
- BJERKNES, J.; SOLBERG, H.. Life cycle of cyclones and the Polar Front theory of atmospheric circulation. **Geofysiske Publikationer**, v. 3, n. 1, p.3–18, 1922.
- CHEN, G.T.J.; LU, C.F.. On the climatological aspects of explosive cyclones over the Western North Pacific and East Asia Coastal areas. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 8, n. 4, p.427–442, 1997.
- CHEN, S.J.; KUO, Y.H.; ZHANG, P.Z.; BAI, Q.F.. Climatology of explosive cyclones of the East Asian Coast. **Monthly Weather Review**, v. 120, n. 12, p.3029–3035, 1992.
- COLLUCI, S.J.; ALBERTA, T.L.. Planetary-Scale Climatology of explosive cyclogenesis and blocking. **Monthly Weather Review**, v. 124, n. 11, p.2509–2520, 1996.
- CRESCENTI, G.H.; WELLER, R.A.. Analysis of surface fluxes in the marine atmospheric boundary layer in the vicinity of rapidly intensifying cyclones. **Journal of Applied Meteorology**, v. 31, p.831–848, 1992.
- DAVIS, C.A.; EMANUEL, K.A.. Observational evidence for the influence of surface heat fluxes on rapid maritime

- cyclogenesis. **Monthly Weather Review**, v. 116, n. 12, p.2649–2659, 1988.
- GAN, M.A.; RAO, V.B.. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p.1293–1302, 1991.
- GAN, M.A.; RAO, V.B.. The influence of the Andes Cordillera on transient disturbances. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 6, p.1141–1157, 1994.
- GONI, G.J.; WAINER, I.. Investigation of the Brazil Current front variability from altimeter data. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. C12, p. 31,117–31,128, 2001.
- GYAKUM, J.R.; DANIELSON, R.E.. Analysis of meteorological precursors to ordinary and explosive cyclogenesis in the Western North Pacific. **Monthly Weather Review**, v. 128, p.851–863, 2000.
- HOSKINS, B.. A potential vorticity view of synoptic development. **Meteorological Applications**, v. 4, n. 4, p.325–334, 1997.
- HOSKINS, B.J.; HODGES, K.I.. A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. **Journal of Climate**, v. 18, n. 20, p.4108–4129, 2005.
- JONES, D.A.; SIMMONDS, I.. A climatology of Southern Hemisphere extratropical cyclones. **Climate Dynamics**, v. 9, n. 3, p.131–145, 1993.
- JUSEM, J.C.; ATLAS, R.. Diagnostic evaluation of numerical model simulations using the tendency equation. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 12, p.2936–2955, 1991.
- 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.. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 3, p.437–471, 1996.
- KOUROUTZOGLOU, J.; FLOCAS, H.A.; KEAY, K.; SIMMONDS, I.; HATZAKI, M.. Climatological aspects of explosive cyclones in the Mediterranean. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 12, p.1785–1802, 2010.
- KUO, Y-H.; LOW-NAM, S.. Prediction of nine explosive cyclones over the western Atlantic Ocean with a regional model. **Monthly Weather Review**, v. 118, n. 1, p.3–25, 1990.
- KUO, Y-H.; REED, R.J.; LOW-NAM, S.. Effects of surface energy during the early development and rapid intensification stages of seven explosive cyclones in the Western Atlantic. **Monthly Weather Review**, v. 119, n.2, p.457–476, 1991.
- LACKMANN, G.M.; BOSART, L.F.; KEYSER, D.. Planetary- and synoptic-scale characteristics of explosive wintertime cyclogenesis over the Western North Atlantic Ocean. **Monthly Weather Review**, v. 124, p.2672–2702, 1996.
- LIM, E.P.; SIMMONDS, I.. Explosive cyclone development in the Southern Hemisphere and a comparison with Northern Hemisphere Events. **Monthly Weather Review**, v. 130, n. 9, p.2188–2209, 2002.
- LUPO, A.R.; SMITH, P.J.; ZWACK, P. A diagnosis of the explosive development of two extratropical cyclones. **Monthly Weather Review**, v. 120, n. 8, p.1490–1523, 1992.
- MANOBIANCO, J.. Explosive east coast cyclogenesis over the west-central North Atlantic Ocean: A composite study derived from ECMWF operational analysis. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 11, p.2365–2383, 1989a.
- MANOBIANCO, J.. Explosive east coast cyclogenesis: Numerical experimentation and model-based diagnostics. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 11, p.2384–2405, 1989b.
- MENDES, D.; SOUZA, E.P.; TRIGO, I.F.; MIRANDA, P.M.A.. On precursors of South American cyclogenesis. **Tellus A**, v. 59, 1, p.114–121, 2007.
- MENDES, D.; SOUZA, E.P.; MARENGO, J.A.; MENDES, M.C.D.. Climatology of extratropical cyclones over the South American-southern oceans sector. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3–4, p.239–250, 2010.
- MIKY-FUNATSU, B.; GAN, M.A.; CAETANO, E.. A case study of orographic cyclogenesis over South America. **Atmosfera**, v. 17, n. 2, p.91–113, 2004.
- MURRAY, R.J.; SIMMONDS, I.. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. **Australian Meteorological Magazine**, v. 39, p.155–166, 1991.
- NEIMAN, P.J.; SHAPIRO, M.A.. The life cycle of an extratropical marine cyclone. Part I: Frontal-cyclone evolution and thermodynamic air-sea interaction. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 8, p.2153–2176, 1993.
- NUSS, W.A.; ANTHES, R.A.. A numerical investigation of low-level processes in rapid cyclogenesis. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 11, p.2728–2743, 1987.
- PEZZI, L.P.; SOUZA, R.B.; ACEVEDO, O.C.; WAINER, I.; MATA, M.M.; GARCIA, C.A.E.; CAMARGO, R.. Multiyear measurements of the oceanic and atmospheric boundary layers at the Brazil-Malvina confluence region. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, p. 1–19, 2009.
- PIVA, E.D.. Estudo de caso sobre o papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície em processos de ciclogênese de costa leste ocorrido na costa da América do Sul. 2001. 162 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - INPE-8498-TDI/781, INPE, São José dos Campos, Brasil, 2001.
- PIVA, E.D.; MOSCATI M.C.L.; GAN M.A. Papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície associado a um caso de ciclogênese na costa leste da América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 4, p.450–476, 2008.

- PIVA, E.; GAN, M. A.; MOSCATI, M. C. L.. The role of latent and sensible heat fluxes in an explosive cyclogenesis over South America. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, 89(6), 1–27, 2011, DOI:10.2151/jmsj.2011-604.
- REBOITA, M.S.. Ciclones estratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação climática e experimentos de sensibilidade. IAG-USP: São Paulo, Brasil; 359 pp., 2008.
- ROEBBER, P.J.. Statistical analysis and updated climatology of explosive cyclones. **Monthly Weather Review**, v. 112, n. 8, p.1577-1589, 1984.
- SANDERS, F.. Explosive cyclogenesis in the West-Central North Atlantic Ocean, 1981–84. Part I: Composite structure and mean behavior. **Monthly Weather Review**, v. 114, n. 10, p.1781-1794, 1986.
- SANDERS, F.; GYAKUM, J.R.. Synoptic–dynamic climatology of the “Bomb”. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 10, p.1589–1606, 1980.
- SARAIVA, J.M.B.. Previsão de tempo na Região Sul: Efeitos Locais e Influência da Liberação de Calor Latente. 1996. 322 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - IAG-USP, São Paulo, 1996.
- SATYAMURTY, P.; SANTOS, R.P.; LEMS, M.A.M.. On the stationary trough generated by the Andes. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 4, p.510-520, 1980.
- SELUCHI, M.; SAULO, A.C.. Possible mechanisms yielding an explosive coastal cyclogenesis over South America: experiments using a limited area model. **Australian Meteorological Magazine**, v. 47, n. 4, p.309-320, 1998.
- SELUCHI, M.; SERAFINI, Y.V.; LE TREUT, H.. The impact of the Andes on transient atmospheric systems: A comparison between observations and GCM results. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 4, p.895-913, 1998.
- SIMMONDS, I.; KEAY, K.. Variability of Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior, 1958-1997. **Journal of Climate**, v. 13, n. 3, p.550-561, 2000a.
- SIMMONDS, I.; KEAY, K.. Mean Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-Year NCEP-NCAR reanalysis. **Journal of Climate**, v. 13, n. 5, p.873-885, 2000b.
- SIMMONDS, I.; MURRAY, R.J.. Southern extratropical cyclone behavior in ECMWF analyses during the FROST special observing periods. **Weather and Forecasting**, v. 14, n. 14, p.878-891, 1999.
- SIMMONDS, I.; MURRAY, R.J.; LEIGHTON, R.M.. A refinement of cyclone tracking methods with data from FROST. **Australian Meteorological Magazine**, v. Special Edition, p.35–49, 1999.
- SIMMONDS, I.; WU, X.. Cyclone behavior response to changes in winter Southern Hemisphere sea-ice concentration. Quarterly **Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 119, n. 513, p.1121–1148, 1993.
- SINCLAIR, M.R.. An Objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 10, p.2239-2256, 1994.
- SINCLAIR, M.R.. A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 6, p.1601–1619, 1995.
- SINCLAIR, M.R.. Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. **Weather and Forecasting**, v. 12, n.3, p.595–612, 1997.
- SMITH, P.J.. The importance of the horizontal distribution of heating during extratropical cyclone development. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 10, p.3692-3694, 2000.
- VERA, C.S.; VIGLIAROLO P.K.; BERBERY E.H.. Cold season synoptic scale waves over subtropical South America. **Monthly Weather Review**, v. 130, n. 3, p.684–699, 2002.
- WANG, C.C.; ROGERS, J.C.. A composite study of explosive cyclogenesis in different sectors of the North Atlantic. Part I: Cyclone structure and evolution. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 6, p.1481–1499, 2001.
- YOSHIDA, A.; ASUMA, Y.. Structures and environment of explosively developing extratropical cyclones in the Northwestern Pacific region. **Monthly Weather Review**, v. 132, n. 5, p.1121-1142, 2004.
- YOSHIDA, A.K.; ASUMA, Y.. Numerical study of explosively developing extratropical cyclones in the Northwestern Pacific region. **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 2, p.712–740, 2008.