

AVALIAÇÃO DE MUDANÇAS NA FREQUÊNCIA DE SISTEMAS FRONTAIS SOBRE O SUL DA AMÉRICA DO SUL EM PROJEÇÕES DO CLIMA FUTURO

Kelen Martins Andrade ¹, Gabriela V. Müller ², Iracema F.A Cavalcanti ¹, María E. Fernandez Long ³, Mario Bidegain ⁴ y Guillermo Berri ⁵

¹ Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE, Cachoeira Paulista, Brasil.

² Centro de Investigación Científica y de Transferencia Tecnológica a la Producción (CICYTTP-CONICET), Diamante, Argentina.

³ Facultad de Agronomía, Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas, Universidad de Buenos Aires (FA-UBA), Argentina.

⁴ Universidad de la Republica - Facultad de Ciencias – Uruguay.

⁵ Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires, Argentina/CONICET.

(Manuscrito recibido el 11 de marzo de 2010, aceptado el 6 de junio de 2011)

RESUMO

A frequência de sistemas frontais sobre o sul da América do Sul identificada na reanálise do NCEP/NCAR é comparada com as simulações dos modelos GFDL e Hadley e projetadas no clima futuro. As análises para identificar casos de sistemas frontais foram feitas em três regiões que cobrem áreas do Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina. Esta análise foi realizada com o fim de investigar as características de eventos extremos no clima presente e em projeções do clima futuro. Para o clima presente observou-se que os modelos analisados simularam bem as características sinóticas dos sistemas frontais. No entanto, quando se compara a frequência de ocorrência das frentes entre a reanálise e as simulações, observa-se que os modelos GFDL e Hadley superestimam seu número e apenas o GFDL consegue reproduzir a variabilidade mensal. O modelo Hadley superestima ainda mais em relação ao NCEP e GFDL no clima presente. A tendência positiva no número de frentes observada na área 3 (65°W-60°W, 33°S-38°S) nos resultados da reanálise não é simulada pelos modelos. Quando os casos mais intensos são selecionados, o modelo GFDL é o que superestima mais o número de sistemas frontais. Os dois modelos indicam aumento na frequência de sistemas frontais no futuro nas três áreas, porém em menor proporção na área 3.

Palavras-Chave: sistemas frontais, clima futuro, América do Sul.

CHANGES IN FREQUENCY OF FRONTAL SYSTEMS OVER SOUTHERN OF SOUTH AMERICA IN PROJECTIONS OF FUTURE CLIMATE

ABSTRACT

The frequency of frontal systems reaching the south of South America is compared with reanalysis NCEP/NCAR and results of GFDL and Hadley models for the future climate. Three regions were analyzed to identify the frontal systems, in areas of Brazil, Uruguay, Paraguay and Argentina. The following criteria were used: increase of sea surface pressure, reduction of the temperature and change of the meridional wind at 850hPa, in two consecutive days. Selected cases with temperature drop above five degrees, considered the most intense, were also analyzed. For the present climate it was observed that the models simulated well the synoptic characteristics of frontal systems. However, when comparing the frequency of frontal occurrence between reanalysis data and models

simulations, the GFDL and Hadley models overestimated their numbers. The Hadley model overestimates further more than the NCEP and GFDL in present climate. The positive trend observed in area 3 (65°W-60°W, 33°S-38°S) from NCEP reanalysis is not simulated by the models. When the most intense systems are selected, the GFDL model shows higher overestimation in number of frontal systems. Both models indicate an increase of frontal systems frequency in future in the three areas, although less in area 3.

Keywords: frontal systems, climate change, South America.

1. INTRODUÇÃO

A passagem de sistemas frontais em diversas regiões do globo é muito importante na determinação das condições do tempo. Na América do Sul estes sistemas são responsáveis principalmente por acumulados significativos de chuva e incursões de ar frio (Seluchi e Marengo 2000), com impactos na agricultura, recursos hídricos, setor econômico e social. Alguns sistemas se formam associados ao escoamento ondulatório das latitudes médias, cujo cavado se amplifica ao se deslocar sobre a Cordilheira dos Andes. Vários estudos anteriores discutiram o papel dos Andes nas condições associadas a incursões de ar frio sobre a América do Sul (Gan e Rao 1994; Seluchi et al. 1998; Garreaud 2000). Nesses estudos também mostraram a influência das montanhas no deslocamento dos centros de pressão de sudoeste para nordeste ao longo da costa leste da América do Sul (Seluchi et al. 1998, 2006). Os sistemas frontais podem avançar sobre o continente ou deslocar-se para o oceano Atlântico (Cavalcanti 1985; Satyamurty et al. 1998, Seluchi et al. 1998; Andrade 2005; Müller e Berri 2007, 2011; Müller e Ambrizzi 2007). Uma climatologia da passagem de frentes frias bem como o comportamento no deslocamento dos sistemas frontais durante o período de 1980 a 2002, sobre várias áreas da América do Sul, foi apresentada em Andrade e Cavalcanti (2004). Naquele estudo foi observada uma diminuição da frequência desses sistemas das latitudes mais altas para as mais baixas. Em relação à sazonalidade, observou-se que as frentes frias são mais frequentes de maio a setembro e menos frequentes durante o verão no Hemisfério Sul (Cavalcanti e Kousky 2003; Andrade 2005). No inverno, as massas de ar frio penetram sobre o continente na retaguarda das frentes frias, podendo causar geadas fortes ao sul de 30°S e moderadas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso do Sul, São Paulo e sul de Minas Gerais, às vezes, com prejuízos para a agricultura (Marengo et al. 1997).

Na América do Sul as análises de tendência baseadas em índices de extremos diários de temperatura obtidos a partir da temperatura máxima e mínima, indicam um menor número de dias frios e ocorrência de noites mais quentes no leste deste continente (Vincent et al. 2005; Alexandre et al. 2006). Resultados similares foram obtidos para a Argentina (Rusticucci e Barrucand 2004) e para o Uruguai (Rusticucci e Renom 2008). No Brasil as análises indicam aumento das temperaturas do ar à superfície durante o Século XX, compatíveis com o aquecimento global experimentado pelo planeta (Marengo 2007, Ambrizzi 2007, IPCC, 2007). No sul do Brasil, a tendência de temperatura nas últimas décadas indica forte aumento da temperatura mínima comparada com a máxima, resultando em um decréscimo da variação diurna da temperatura (Marengo e Camargo 2007). Recentemente, Marengo et al. (2010) e Rusticucci et al. (2010) analisaram as tendências de alguns extremos durante a segunda metade do século XX. Em Rusticucci et al. (2009) foram comparadas as tendências observadas e simuladas na América do Sul durante 1960-2000 usando alguns dos índices de extremos definidos por Frich et al. (2002) e oito MCGs do IPCC AR4 do WCRP CMIP3 Multimodel Dataset. O índice de temperatura que foi melhor simulado foi o de número de noites quentes, o qual teve um aumento durante o período analisado. Foi notado também que a região da Bacia La Plata foi onde o modelo simulou melhor os índices, provavelmente pela maior quantidade de dados observados na região.

Alguns estudos como Marengo e Camargo (2005) sugerem que nos últimos anos o aquecimento tem sido maior no inverno que no verão. Embora a temperatura média do ar próximo à superfície tenha aumentado no inverno dos últimos anos, casos extremos continuam a ocorrer, com o deslocamento de sistemas frontais acompanhados de massas de ar muito frio. Esses episódios específicos são os que afetam diretamente a agricultura. Tem sido discutido que em uma atmosfera com temperaturas mais altas haveria também mais vapor de água disponível e

as tempestades seriam mais severas (Trenberth, 1999). As projeções climáticas com o efeito estufa indicam um aumento de temperatura principalmente nas regiões de latitudes mais altas (IPCC 2007), o que reduziria o gradiente norte-sul e a baroclinia da atmosfera, mudando a frequência e intensidade dos sistemas frontais.

Neste estudo, o objetivo é comparar a frequência de sistemas frontais sobre o sudeste da América do Sul, áreas 1, 2 e 3 mostradas na Figura 1, em simulações climáticas do clima presente e futuro, com a finalidade de investigar o comportamento destes sistemas no clima futuro. Com os resultados das simulações e projeções dos modelos, é analisado o impacto das mudanças climáticas no número destes sistemas sobre as áreas citadas, bem como a posição das frentes e a configuração dos campos atmosféricos. As configurações dos campos foram obtidas utilizando uma composição dos casos extremos em cada área, para os resultados de reanálise e GFDL no clima presente e projeção do clima futuro.

2. DADOS E MÉTODOS

Neste estudo foram escolhidas três áreas compreendendo regiões do Brasil, Uruguai e Argentina, com a dimensão de 5° latitude X 5° longitude: área 1 (52°W-57°W, 23°S-28°S), área 2 (52°W-57°W; 28°S-33°S) e área 3 (65°W-60°W, 33°S-38°S), como mostrado na Figura 1.

Os dados diários correspondem a períodos do clima presente da reanálise do NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996) e dos modelos GFDL e Hadley (HadCM3) no período 1961- 1990 para os meses de maio a setembro. O modelo acoplado do Hadley Center (HadCM3) tem resolução horizontal de 2.5° latitude × 3.75° longitude para a componente atmosférica e 1.25° latitude × 1.25° longitude no oceano. A resolução vertical do modelo é de 19 níveis (atmosfera) e 20 níveis (oceano). Maiores detalhes estão disponíveis em Gordon et al. (2000).

Foi utilizada a versão CM2.0 do modelo GFDL com resolução horizontal de 2° latitude × 2.5° longitude e 24 níveis na vertical. Outros detalhes deste modelo e os resultados obtidos em experimentos são descritos em Delworth et al. (2006). Para o clima futuro foi considerado o cenário do experimento A2 do IPCC (IPCC 2007), que é o de condições extremas de aquecimento global, do modelo GFDL e Hadley para o período 2081-2100.

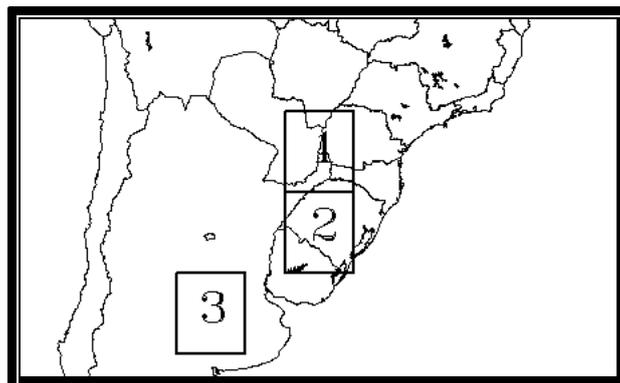


Figura 1: Áreas com as três regiões utilizadas na determinação das frentes

Para a identificação dos sistemas frontais foi utilizado o seguinte critério para as áreas em estudo: aumento da pressão ao nível médio do mar; queda da temperatura e mudança na direção do vento de quadrante norte para quadrante sul em 850 hPa. Essas mudanças devem ser observadas simultaneamente em dois dias consecutivos. Critério semelhante foi utilizado por Cavalcanti e Kousky (2003) e Andrade (2005) em análises climatológicas. Primeiramente foi feita a média mensal da ocorrência de sistemas frontais tanto no presente quanto no futuro utilizando o critério descrito. Neste estudo foram selecionados também casos com queda de temperatura superior a 5 graus no intervalo de 24 horas, para identificar as características dos casos extremos. Casos extremos provocam maiores impactos nas regiões afetadas. Foram feitas composições de campos atmosféricos em superfície, baixos e altos níveis para os cinco casos de sistemas frontais com maiores quedas de temperatura em dias consecutivos escolhidos entre todos os casos identificados.

3. RESULTADOS

A Figura 2 mostra o número médio mensal de sistemas frontais no período entre 1961 e 1990 para as 3 áreas estudadas. Nota-se que os modelos GFDL e Hadley superestimam o número de sistemas frontais em relação à reanálise, principalmente para as áreas 1 e 2. Na área 3 a diferença entre a reanálise e o modelo GFDL é menor que nas demais regiões analisadas.

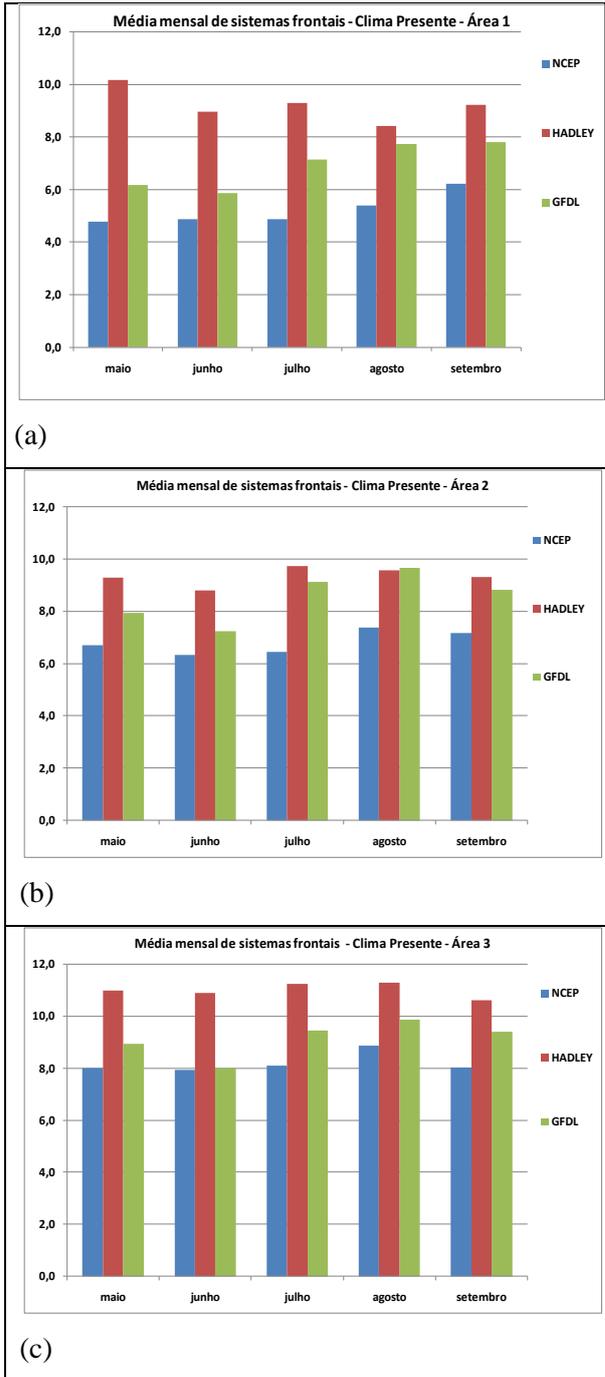


Figura 2: Média mensal de sistemas frontais nas áreas (a) 1; (b) 2 e (c) 3 para o NCEP, GFDL e Hadley para o clima presente.

Observa-se também na Figura 2 uma diminuição de sistemas frontais em direção a latitudes mais baixas, ou seja, maior número na área 3 e menor frequência na área 1. Os dois modelos capturam as frequências maiores nas latitudes mais altas, como as observações, porém apenas o GFDL mostra variabilidade mensal semelhante às observações.

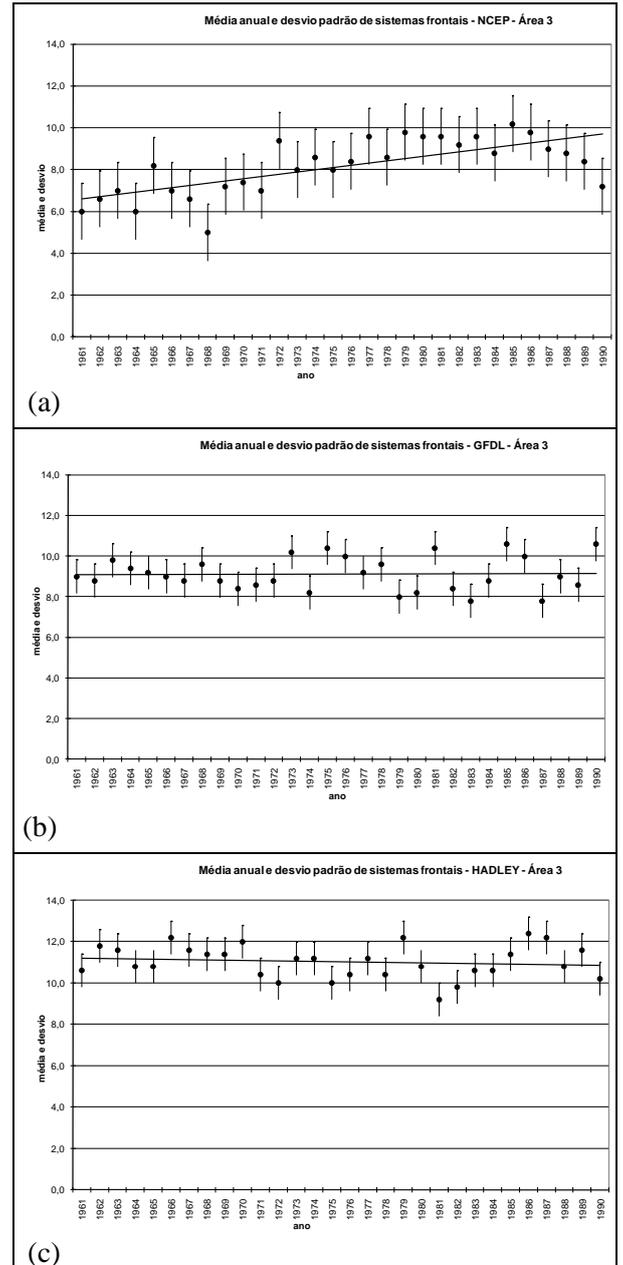


Figura 3: Média de sistemas frontais e desvio padrão para o período de maio a setembro de cada ano (em número/mês) para (a) NCEP (b) GFDL (c) Hadley na área 3 no período entre 1961-1990.

Na figura 3 são apresentados a média anual e o desvio padrão do número de sistemas frontais, bem como a linha de tendência apenas para a Área 3 para o NCEP (3a), GFDL (3b) e Hadley (3c), uma vez que as demais áreas (1 e 2) não apresentam grandes diferenças entre o início e final do período. Verifica-se que para a área 3, a reanálise do NCEP apresenta uma tendência positiva, no período de 1961 a 1990, no número médio mensal de sistemas frontais que ocorrem de maio a setembro. Entretanto, nas simulações do GFDL não há uma tendência evidente e o

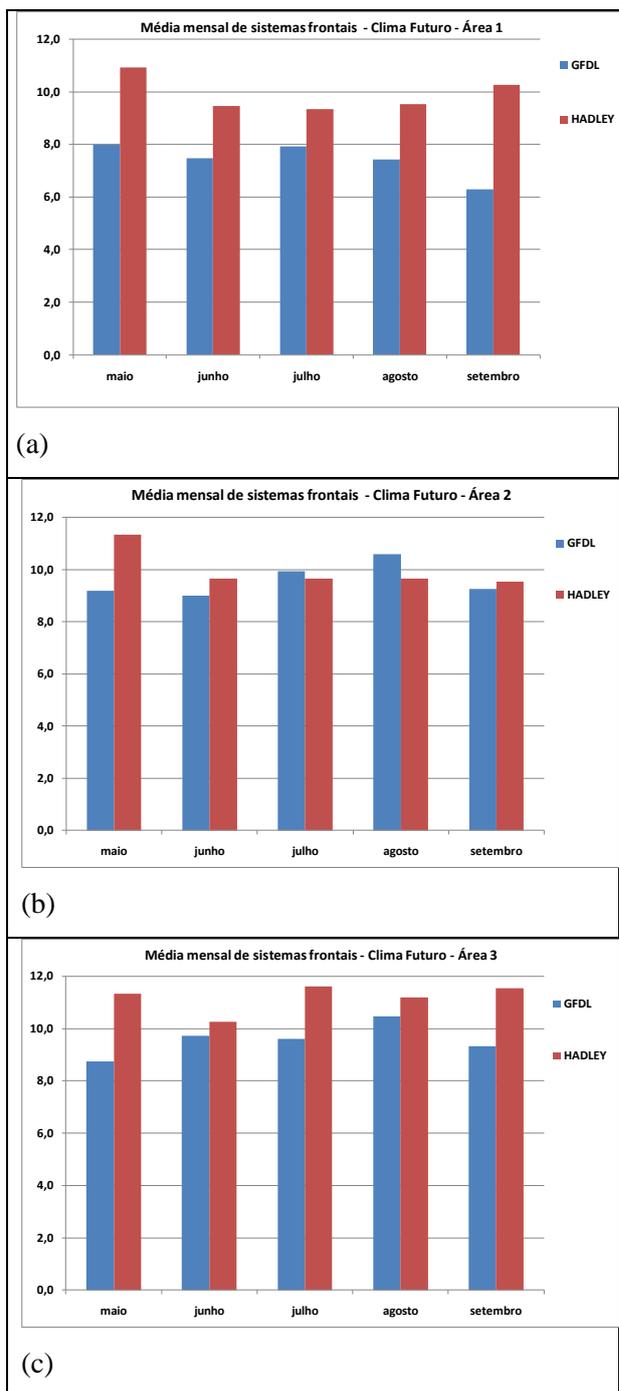


Figura 4: Média mensal de sistemas frontais nas áreas (a) 1; (b) 2 e (c) 3 para o GFDL e Hadley para o clima futuro.

Hadley indica uma ligeira diminuição no número de frentes. A Figura 4 mostra o número médio mensal de sistemas frontais no clima futuro para as 3 áreas estudadas. O modelo Hadley indica um maior número de sistemas frontais que o GFDL em todos os meses, principalmente para as áreas 1 e 3. Na área 2 a frequência de sistemas frontais

do GFDL é superior ao Hadley nos meses de julho e agosto. Assim como no clima presente também é observado no futuro uma diminuição de sistemas frontais em direção a latitudes mais baixas.

A média de ocorrência de sistemas frontais no período entre maio-setembro, no clima presente e futuro, da reanálise do NCEP e das simulações dos modelos GFDL e Hadley para as 3 áreas em estudo é mostrada na figura 5a. Nota-se que o modelo Hadley é o que mais superestima a frequência de sistemas, no clima presente, principalmente na Área 1, onde a diferença no valor médio de frentes frias em relação ao NCEP é de aproximadamente 4 e para as demais áreas o valor fica em torno de 2,5. Na Área 2 não há muita diferença entre as simulações do Hadley e GFDL, embora ainda superestimando o valor obtido pelo NCEP no clima presente. Na Área 3 a diferença entre a reanálise e o modelo GFDL é menor que nas demais regiões analisadas. Os valores projetados para o clima futuro são maiores do que os simulados no clima presente, nos resultados dos dois modelos, para as áreas 1 e 2. Para essas áreas os modelos GFDL e Hadley apresentam um valor médio de cerca de 1 sistema frontal a mais no clima futuro comparado com as simulações no presente. Na área 3 a variação é menor que 1 nas projeções futuras dos dois modelos, em comparação com as simulações do presente.

No entanto, quando se analisa o número de sistemas frontais associados à queda de temperatura maior que 5 graus de um dia para o outro, ou seja, os casos extremos (Figura 5b) o modelo GFDL é o que apresenta a maior estimativa tanto no clima presente quanto futuro em todas as áreas analisadas. O modelo Hadley simula bem os resultados da reanálise no clima presente, para os casos extremos, e apresenta pequeno aumento de casos nas projeções do clima futuro.

Na tabela I são mostrados os 5 valores de queda de temperatura mais intensos que ocorreram em dois dias consecutivos. Nota-se que na área mais ao sul (área 3), a simulação do Hadley no presente é que apresenta maior queda de temperatura. Enquanto, para as áreas 1 e 2 as simulações do GFDL indicam maior queda de temperatura de um dia para o outro. No clima futuro isso fica mais evidente, ou seja, como o modelo indica temperaturas mais altas em um cenário de clima futuro (aquecimento global), pode-se inferir que quando há entrada de um sistema frontal com ar relativamente frio o declínio da temperatura é maior.

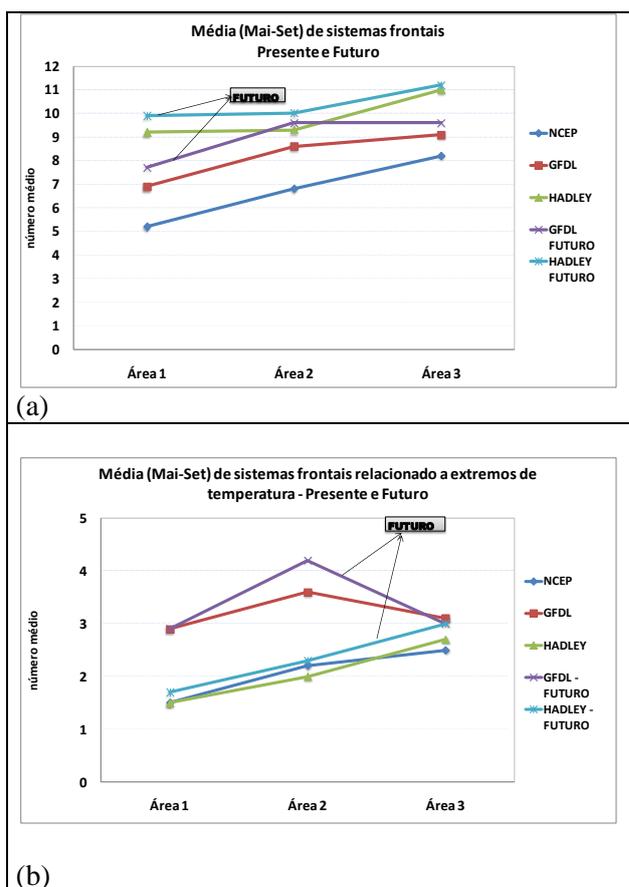


Figura 5: (a) Média do número de sistemas frontais no período entre maio e setembro (n° /mês) no clima presente e futuro. (b) Mesmo que em (a), mas para os casos extremos de temperatura.

	PRESENTE			FUTURO	
	NCEP	GFDL	HADLEY	GFDL	HADLEY
ÁREA 1	12,7	18,4	12,6	19,3	16,1
	12,6	15,7	12,6	18,3	14,9
	11,3	15,3	11,8	15,9	13,6
	11,1	15,2	11,7	13,8	12,3
	10,9	15,2	10,9	13,6	12,2
ÁREA 2	15,1	18,5	14,9	19,5	15,2
	13,7	18,1	13	17,5	14
	13	17	11,5	16,9	12,8
	12,5	16,3	11,4	15,7	12,8
	12,1	15,9	11,3	14,9	12,7
ÁREA 3	12,4	13,6	14,8	17,2	14,7
	12,2	13,5	14	14,6	14,6
	11,8	13,2	13,9	13,7	14,3
	11,8	13	12,7	13,7	14,1
	11,3	12,9	12,5	13,7	13,6

Tabela I: Valores de queda de temperatura (graus) para as áreas 1, 2 e 3 no clima presente (NCEP, GFDL e HADLEY) e clima futuro (GFDL e HADLEY)

Composições foram feitas para os cinco casos de ocorrência de sistemas frontais com maior queda de temperatura em 2 dias consecutivos para todas as áreas em estudo, tanto no clima presente quanto futuro. As análises das composições foram feitas em campos de pressão ao nível médio do mar e anomalias, temperatura e vento em 850 hPa, escoamento e magnitude do vento em 200 hPa. Para as análises dos extremos escolhemos a situação em que as simulações mostram o maior número de extremos tanto para o clima presente como para o futuro, o que ocorre com o GFDL. As discussões se referem às características associadas a um sistema frontal no dia em que o sistema passou em cada área, ou seja, o dia em que a temperatura caiu.

Na passagem de um sistema frontal é esperado um abaixamento de pressão na frente do sistema e um aumento atrás, assim como confluência entre ventos do quadrante norte (noroeste/nordeste) e ventos do quadrante sul (sudoeste/sudeste) em baixos níveis, e advecção de ar frio também em baixos níveis. Em altos níveis um cavado se posiciona a oeste do sistema de baixa à superfície. Essas características são observadas nos campos da reanálise e também das simulações do modelo GFDL para o clima presente e futuro (Figuras 6, 7, 8). As diferenças notadas entre modelo e observação se referem às posições dos centros de alta e baixa pressão, e às intensidades das anomalias das variáveis analisadas. A figura 6 mostra o campo de pressão ao nível médio do mar (PNMM) e anomalias para a reanálise e modelo GFDL presente e futuro. Nos campos da reanálise se destacam os centros de pressão baixa e alta associados aos sistemas, afetando as três áreas. Nota-se que para a área 1 a frente fria encontra-se no Estado de São Paulo e a alta pressão pós-frontal adentrando o continente e atuando em parte da Argentina, Paraguai e sul do Brasil. Essa configuração da alta pressão também foi notada em diversos trabalhos sobre incursões de ar frio como Marengo et. al, 1997, Garreaud, 2000, Seluchi e Marengo, 2000. O sistema frontal na área 2 posiciona-se entre o sul do Estado de São Paulo e o Paraná e na área 3 a frente fria encontra-se no Uruguai. Nos campos do GFDL os centros de pressão estão deslocados para oeste nos resultados das três áreas e a frente fria mais ao sul em relação à reanálise. O modelo apresenta anomalias de PNMM tanto positivas quanto negativas mais intensas e em uma extensão maior que o NCEP. No entanto, os valores de pressão simulados, são em geral da mesma ordem que os observados. Porém, observa-se que o gradiente

de pressão é mais intenso nos campos simulados pelo modelo, tanto no clima presente quanto no futuro.

Nota-se que a confluência dos ventos (Figura 7 a-c e 7 d-f) está bem definida, tanto nos campos do NCEP quanto nos campos GFDL, indicando que a composição está representando bem a posição dos sistemas. Entretanto, assim como nos campos de anomalias de pressão, a confluência dos ventos e advecção de ar frio são simuladas ao sul do mostrado na reanálise, indicando a posição dos sistemas ao sul do observado.

Notam-se também ventos intensos de sudoeste sobre a região sul até as três áreas analisadas, nas composições do NCEP e do GFDL, enquanto fortes ventos de noroeste são simulados pelo GFDL. Nota-se que o modelo simula o escoamento atmosférico da região do oceano Atlântico para o continente, em uma circulação anticiclônica mais intenso do que na reanálise. Em altos níveis (Figura 8 a-c e 8 d-f), os cavados associados aos sistemas frontais nos campos simulados também ficam posicionados a oeste em relação ao NCEP.

Para as projeções do GFDL do clima futuro, as anomalias de PNMM associadas à baixa pressão sobre o continente atingem latitudes mais baixas, nas 3 áreas, e são mais intensas com relação à simulação do clima presente (Figura 6 g-i). Em relação à temperatura (Figura 7 g-h), o modelo GFDL indica advecção de ar frio mais intensa para o clima futuro do que no clima presente e advecção de ar quente associada ao escoamento de norte, menos intenso na projeção para o clima futuro. A magnitude do vento em altos níveis na projeção do clima futuro indica uma maior extensão latitudinal do jato subtropical sobre a América do Sul (Figura 8).

4. CONCLUSÃO

Neste estudo a frequência de sistemas frontais sobre o sul da América do Sul foi identificada na reanálise do NCEP/NCAR e comparada com as simulações dos modelos GFDL e Hadley. As simulações do clima presente também foram comparadas com as projeções do clima futuro.

A frequência mensal de sistemas frontais para o período de maio a setembro é superestimada pelos dois modelos, porém melhor simulada pelo modelo GFDL. O modelo Hadley indica frequências muito acima do observado, superando a simulação do GFDL. O aumento do número de sistemas com o aumento da latitude é bem representado pelo GFDL, enquanto o Hadley apresenta esse aumento só na área 3. A tendência

de aumento no número de frentes na área 3 no período de 1961 a 1990 não é reproduzida pelos dois modelos.

Nas áreas 1 e 2 os dois modelos indicam um aumento de 1 sistema por mês no clima futuro com relação ao clima presente. Isso equivale a 5 sistemas a mais no período de maio a setembro. Na área 3 o aumento é bem menor. Para os casos extremos o modelo GFDL indica uma frequência muito maior do que a reanálise para o clima presente, isso é consequência deste modelo simular a queda de temperatura, associada a passagem de uma frente fria, mais intensa tanto no clima presente quanto futuro. O Hadley indica uma frequência e valores de queda de temperatura em dias consecutivos próximos ao NCEP nas 3 áreas. Nas projeções para o clima futuro, o modelo GFDL não indica mudança no número de sistemas intensos nas áreas 1 e 3, e o Hadley indica uma pequena variação nas 3 áreas.

Os campos atmosféricos dos cinco casos com sistemas frontais mais intensos, considerando as maiores quedas de temperatura indicaram configurações semelhantes entre o modelo GFDL e a reanálise. O modelo simulou as principais características atmosféricas que acompanham um sistema frontal, ou seja, no campo de pressão, um par alta/ baixa pressão, confluência dos ventos em baixos níveis, advecção de ar frio, e um cavado em altos níveis, nas 3 áreas estudadas, porém em localizações mais a oeste e sul comparadas com a reanálise. Em baixos níveis o modelo GFDL simulou, principalmente, na área 1 anomalias positivas mais intensas na PNMM, porém não atingindo latitudes mais ao norte como indicada na reanálise, ou seja, a incursão de ar frio embora intensa posiciona-se mais ao sul.

Nas projeções para o clima futuro, os centros de baixa pressão são mais intensos e se estendem para latitudes mais baixas, a advecção de ar frio é mais intensa, e o jato subtropical sobre a América do Sul apresenta uma extensão latitudinal maior do que na simulação para o clima presente. Em uma atmosfera mais aquecida, como indica os modelos de mudanças climáticas, alterações na circulação atmosférica poderia afetar o número de sistemas frontais. Embora a temperatura seja mais alta, com a entrada de um ar mais frio a queda de temperatura seria maior, como mostrado neste estudo, principalmente pelo modelo GFDL. As projeções futuras de maior frequência de sistemas frontais e incursões de ar frio mais intenso nas áreas estudadas iriam produzir um forte impacto na agricultura e consequentemente na economia dessas regiões, a qual é altamente dependente da produção

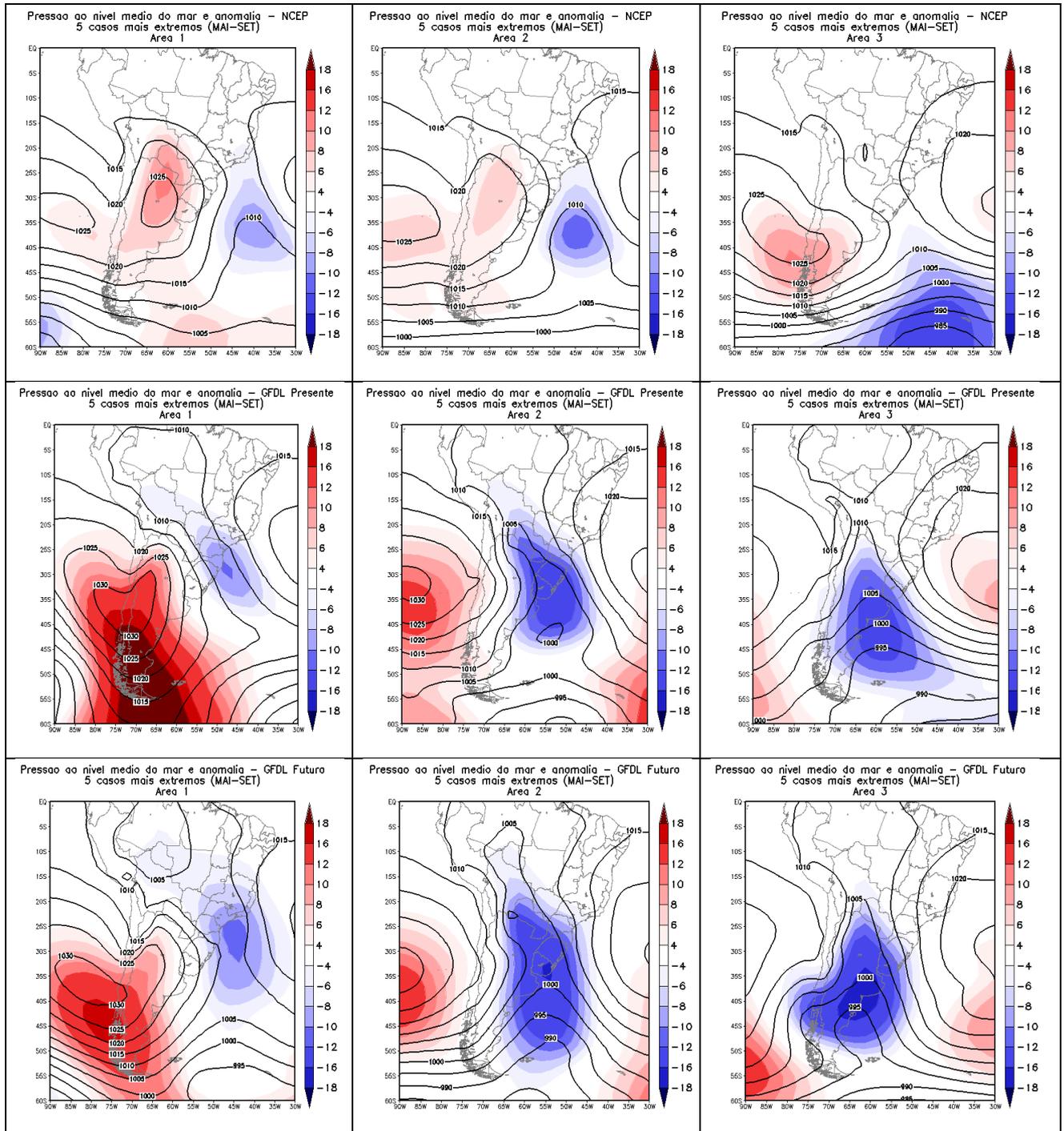


Figura 6: Pressão ao nível médio do mar e anomalia (hPa): área 1 (primeira coluna), área 2 (segunda coluna), área 3 (terceira coluna) para reanálise (primeira linha); GFDL presente (segunda linha); GFDL-Futuro (terceira linha).

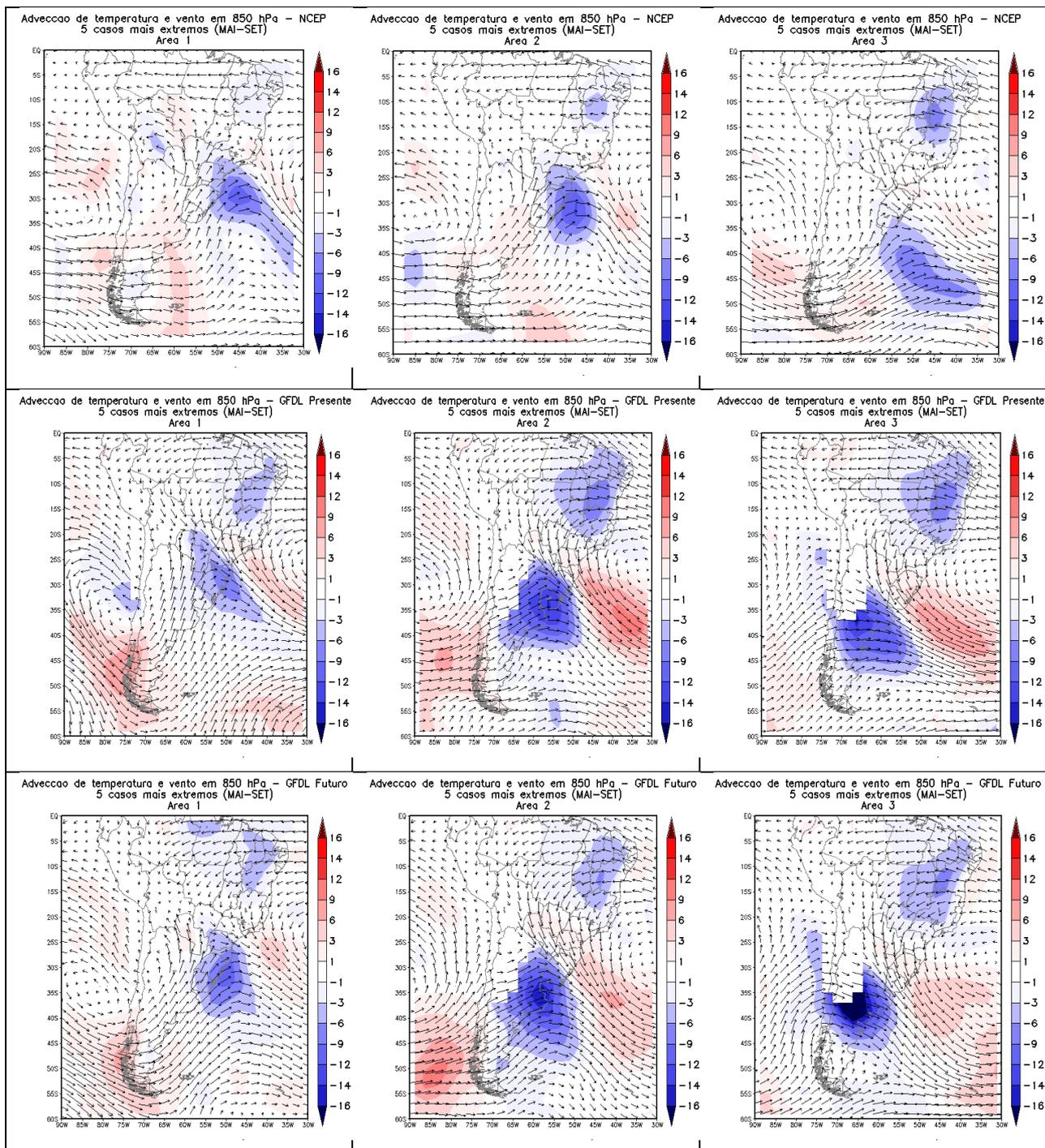


Figura 7: Adveção de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{dia}$) e vetor vento (m/s) em 850 hPa: área 1 (primeira coluna), área 2 (segunda coluna), área 3 (terceira coluna) para reanálise (primeira linha; GFDL presente (segunda linha); GFDL-Futuro (terceira linha).

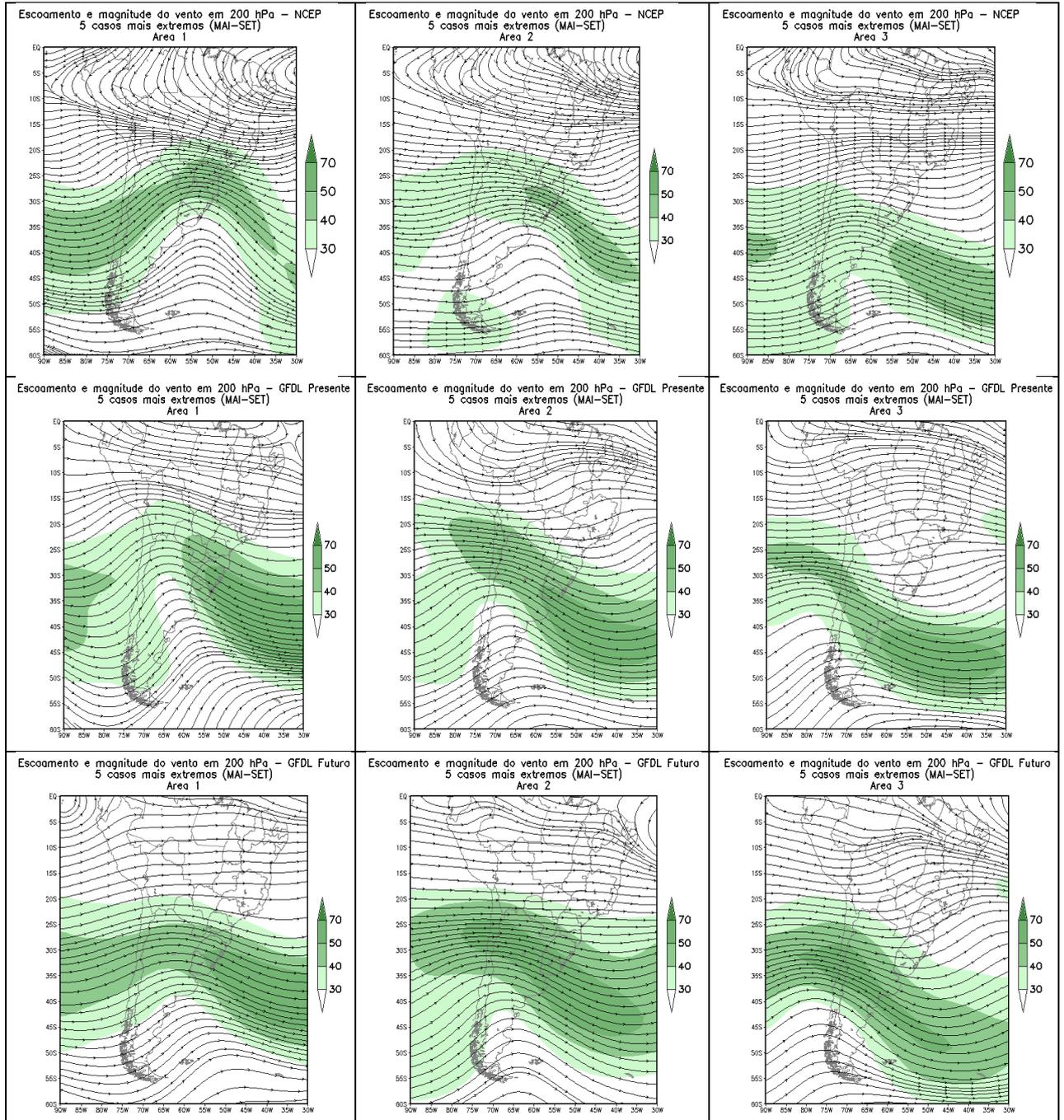


Figura 8: Escoamento e magnitude do vento (m/s) em 200 hPa: área 1 (primeira coluna), área 2 (segunda coluna), área 3 (terceira coluna) para reanálise (primeira linha; GFDL presente (segunda linha); GFDL-Futuro (terceira linha).

agrícola. Outros modelos deverão ser analisados em futuros estudos para análise de incertezas relacionadas aos presentes resultados.

Agradecimentos: International modeling groups for providing their data for analysis, the Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) for collecting and archiving the model data, the JSC/CLIVAR

Working Group on Coupled Modelling (WGCM) and their Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) and Climate Simulation Panel for organizing the model data analysis activity, and the IPCC WG1 TSU for technical support. The IPCC Data Archive at Lawrence Livermore National Laboratory is supported by the Office of Science, U.S. Department of Energy. Esta publicação recebeu auxílio do: European

Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) sob o Grant Agreement N° 212492: CLARIS LPB; CNPq: 490466/2006-0; CONICET: PIP-114-200801-00591; ANPCYT: PICT2005-38193 e PICT2011-0023.

Os autores agradecem também aos revisores anônimos que contribuíram significativamente para o aprimoramento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Ambenje, P., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M. and Vazquez-Aguirre J. L., 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *J. Geophys Res.*, 111, D05109, DOI:10.1029/2005JD006290.
- Ambrizzi, T. 2007. Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI: Projeções de clima usando três modelos regionais. Relatório 3. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio). Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, fevereiro 2007.
- Andrade, K. M., 2005. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. INPE-14056-TDI/1067. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)-INPE, São José dos Campos.
- Andrade, K. M.; Cavalcanti, I. F. A., 2004. Climatologia dos sistemas frontais e padrões de comportamento para o verão na América do Sul. Congresso Brasileiro De Meteorologia, Fortaleza-CE. Anais. Fortaleza: SBMet, 2004. 1 CD-ROM. (INPE-12090-PRE/7436).
- Cavalcanti, I. F. A., 1985. Casos de intensa precipitação nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil no período de inverno de 1979 a 1983. INPE-3743-RPE/498, São José dos Campos.
- Cavalcanti, I. F. A; Kousky, V. E., 2003. Climatology of South American cold fronts. In: VII International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, AMS. Wellington, New Zealand.
- Delworth, Thomas L., and Coauthors, 2006. GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models. Part I: Formulation and Simulation Characteristics. *J. Climate*, 19, 643–674.
- Frich P, Alexander LV, Della-Marta P, Gleason B, HaylockM, Klein Tank AMG, Peterson T., 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim Res.*, 19, 193–212.
- Gan, M. A e Rao, V. B., 1994. The Influence of the Andes Cordillera on Transient Disturbances. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 1141–1157.
- Garreaud, R. D., 2000. Cold air incursions over subtropical South America: mean structure and dynamics. *Monthly Weather Review*, 128 (7), 2544-2559.
- Gordon C, Cooper C, Senior CA, Banks H, Gregory JM, Johns TC, Mitchell JFB, Wood RA. 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16, 147–168.
- IPCC, 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: HOUGHTON, J.T. (Ed.). *Climate Change*. New York: Cambridge University Press.
- Kalnay E. e co-autores, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Marengo, J.; Cornejo, A.; Satyamurty, P.; Nobre, C. A.; Sea, W. 1997. Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. *Monthly Weather Review*, 125 (11), 2759-2786.
- Marengo, J., 2007. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade – caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, v.1, 214.
- Marengo, J. e Camargo, C. G. C., 2007. Trends in Extreme air temperatures in Southern Brazil. *Int. J. Climatology*, DOI:10.1002/joc.1863.
- Marengo, J. e Camargo, C. G. C, 2008. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. *Int. J. Climatology*, 28, 893–904.
- Marengo, J., Rusticucci, M., Penalba, O. and Renom, M., 2010. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. *Climatic Change*, 98 (3), 509-529.

- Müller, G. V. and G. J. Berri, 2007. Atmospheric Circulation Associated with Persistent Generalized Frosts in Central-Southern South America. *Mon. Wea. Rev.*, 135 (4), 1268–1289.
- Müller, G. V. and T. Ambrizzi, 2007. Teleconnection Patterns and Rossby Wave Propagation Associated to Generalized Frosts over Southern South America. *Clim. Dyn.*, 29 (6), 633–645.
- Müller, G. V. and G. J. Berri, 2011. Atmospheric Circulation Associated with Extreme Generalized Frosts Persistence in Central-Southern South America. *Clim. Dyn.*, DOI: 10.1007/s00382-011-1113-2.
- Rusticucci, M. and Barrucand, M., 2004. Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina, *Journal of Climate*, 17 (20), 4099–4107.
- Rusticucci, M. and Renom, M., 2008. Variability and trends in indices of quality-controlled daily temperature extremes in Uruguay. *Int. J. Climatology*, 28, DOI: 10.1002/joc.1607
- Rusticucci, M., Marengo, J., Penalba, O. and Renom, M., 2010. An intercomparison of model-simulated in extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century. Part 1: mean values and variability. *Climatic Change*, 98 (3), 493–508
- Satyamurty, P., C. A. Nobre, P. L. Silva Dias. South America, 1998. In: Karoly, D. J., Vincent, D. G. ed. *Meteorology of the Southern Hemisphere*. American Meteorological Society, 119–139. *Meteorological Monographs*, 27, (49).
- Seluchi, M., Y. V. Serafini, H. Le Treut, 1998. The Impact of the Andes on Transient Atmospheric Systems: A Comparison between Observations and GCM Results. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 895–912.
- Seluchi, M. E., Garreaud, R. D., Norte, A. F., Celeste Saulo, A., 2006. Influence of the Subtropical Andes on Baroclinic Disturbances: A Cold Front Case Study. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 3317–3335. DOI: 10.1175/MWR3247.1
- Trenberth, K. E., 1999. Atmospheric Moisture Recycling: Role of Advection and Local Evaporation. *J. Climate*, 12, 1368–1381.
- Vincent, L., Peterson, T., Barros, V., Marino, M., Rusticucci, M., Carrasco, G., Ramirez, E., Alves, L., Ambrizzi, T., Berlato, M., Grimm, A., Marengo, M., Molion, L., Moncunill, D., Rebello, E., Anunciacao, Y., Quintana, J., Santos, J., Baez, J., Coronel, G., Garcia, J., Trejo, I., Bidegain, M., Haylock, M., Karoly, D., 2005. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000, *Journal of Climate*, 18 (10) ,5011–5023.