

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Ciências Atmosféricas

AMANDA SABATINI DUFEK

**Índices de extremos climáticos de temperatura e chuva na América do Sul:
clima presente e validação do modelo RegCM3**

São Paulo
2008

AMANDA SABATINI DUFEK

**Índices de extremos climáticos de temperatura e chuva na América do Sul:
clima presente e validação do modelo RegCM3**

Dissertação desenvolvida como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Meteorologia junto ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Tércio Ambrizzi

São Paulo
2008

Às pessoas que mais amo,
minha família e meu namorado.

Agradecimentos

- Ao professor Dr. Tércio Ambrizzi, pela orientação e confiança.
- Aos meus pais, José Dufek Netto e Marcelina Sabatini Dufek, pelo amor e dedicação, pelas palavras de apoio e incentivo, pela paciência e por acreditarem sempre em mim.
- Ao meu namorado, Renan Torres Pereira, pelo amor e amizade, pelo companheirismo e compreensão e por tornar os meus dias mais felizes e sorridentes.
- A todos os professores do Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP, pelos ensinamentos e amizade.
- A todos os funcionários do IAG, pela atenção e paciência.
- A todos aqueles que me ajudaram e incentivaram.
- À FAPESP pelo apoio financeiro.
- Ao laboratório do GrEC.

Resumo

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a capacidade do modelo RegCM3 (Regional Climate Model – versão 3), para três diferentes simulações, em simular os padrões espaciais de tendência de alguns índices climáticos anuais e sazonais de temperatura e chuva na América do Sul para o clima presente (1961-1990). Para atingir o objetivo principal, desenvolveu-se um algoritmo baseado no software RClimDex para calcular os índices e investigou-se a habilidade dos dados de reanálise do NCEP/NCAR e do conjunto de dados de chuva produzido por Liebmann e Allured (2005) em estimar os índices anuais e sazonais de temperatura e chuva para a mesma região e período. A metodologia concentrou-se em análises dos coeficientes de correlação e de regressão linear. De maneira geral, os dois conjuntos de dados foram considerados válidos para representar os índices anuais e sazonais de temperatura e chuva observados na América do Sul durante o período de 1961-1990. Contudo, a reanálise do NCEP/NCAR mostrou sinais de tendência opostos às observações para os índices de temperatura e chuva sobre a Argentina. Dentre as três simulações com o modelo RegCM3, as simulações RegCM3(s2), com o esquema de convecção Emanuel, e RegCM3(s1), com o esquema de Grell, apresentaram um melhor desempenho em representar as tendências dos índices de temperatura e chuva, respectivamente, sobre a América do Sul. O modelo RegCM3(s1) simulou a predominante tendência de aumento das condições de umidade observadas na América do Sul através dos índices anuais r95p, prcptot e rx5day, particularmente na estação de inverno. As tendências opostas dos índices anuais cwd e cdd, que sugerem um aumento no número de dias com chuva, ao contrário, não foram bem detectadas pelo modelo RegCM3(s1). O aquecimento da temperatura mínima como consequência do aumento de noites quentes e diminuição de noites frias identificado em quase todo o continente foi simulado corretamente pelo modelo RegCM3(s2). Com relação à temperatura máxima, embora as observações não apresentem um padrão característico, a simulação do modelo RegCM3(s2) se mostra bastante semelhante ao apresentado pela reanálise do NCEP/NCAR. As distribuições espaciais de tendência dos índices anuais de temperatura e chuva resultantes das simulações do RegCM3(s2 e s1, respectivamente) e do HadAM3 sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 são bastante semelhantes entre si, embora o HadAM3 seja caracterizado por tendências mais suavizadas. Para os índices anuais e sazonais de temperatura, a simulação do HadAM3 se mostrou ligeiramente melhor à do RegCM3, enquanto que o inverso é encontrado para os índices anuais e sazonais de chuva.

Palavras-chave: Índices climáticos, modelo RegCM3, reanálise do NCEP/NCAR

Abstract

The main goal of this study is to investigate if the RegCM3 model (Regional Climate Model – version 3) is able to simulate the spatial patterns of some annual and seasonal climate indices of temperature and precipitation trend over South America for the present climate (1961-1990). The analysis is done for three different simulations where the model was running with different cumulus parametrization, i.e, Grell and Emanuel. An algorithm based on the software RClimDex was developed to calculate the indices. Different data sources such as the NCEP/NCAR reanalysis, individual observational stations and others were used to estimate the annual and seasonal indices of temperature and precipitation for the same region and period. Correlation and linear regression coefficients analysis were used in the results comparison. In general, the results suggest that the datasets can provide useful information about annual and seasonal indices of temperature and precipitation at individual grid cells in South America during the period 1961-1990. However, the NCEP/NCAR reanalysis showed reversal trend signals for some indices over Argentina. Within the three simulations with the RegCM3 model, the trends of the annual and seasonal indices of temperature and precipitation over South America are better reproduced by the Emanuel (s2) and Grell (s1) schemes, respectively. The RegCM3(s1) simulates the change to wetter conditions in South America through the r95p, preptot and rx5day annual indices, particularly in the austral winter. On the other hand, the opposite signal of the trends in cdd and cwd indices, that indicates an increase in the number of days with precipitation, was not well represented by the model. The warming in minimum temperature as a consequence of the increase in the frequency of warm nights and the decrease of cold nights observed all over the South American continent was correctly simulated by the RegCM3(s2). Although the observed maximum temperature extremes did not show any special feature, the simulations with Grell scheme were able to represent the spatial patterns of the warm and cold days indices trend similar to the NCEP/NCAR reanalysis. The spatial distributions of the annual indices of temperature and precipitation trend obtained from the RegCM3(s2 and s1, respectively) and HadAM3 simulations over South America during the period 1961-1990 are very similar, though the HadAM3 shows a trend less intense. For the annual and seasonal indices of temperature, the HadAM3 simulation is slightly better than the RegCM3 running, while the opposite is found to the annual and seasonal indices of precipitation.

Keywords: Climate indices, RegCM3 model, NCEP/NCAR reanalysis.

Lista de Figuras

Fig. 2.1	Distribuição geográfica das estações de superfície e as grades correspondentes à reanálise do NCEP/NCAR, painéis à esquerda, e à análise do BRANT, painéis à direita.....	08
Fig. 2.2	Topografia (m) e domínio de simulação. As caixas identificam as sub-regiões AM, NE, SDE e SUL.....	12
Fig. 4.1	Série temporal dos índices anuais wn (%), à esquerda, e cn (%), à direita, baseados nos dados diários de temperatura mínima, para a estação IAC-15. Cada gráfico apresenta duas curvas: algoritmo (linha contínua) e software RClimDex (linha tracejada).....	23
Fig. 4.2	Idem Fig. 4.1 para os índices anuais wd (%), à esquerda, e cd (%), à direita, baseados nos dados diários de temperatura máxima.....	24
Fig. 4.3	Idem Fig. 4.1 para os índices anuais: prcptot (mm), r95p (mm), rx5day (mm), cdd (dias) e cwd (dias), baseados nos dados diários de chuva.....	24
Fig. 4.4	Coeficientes de correlação entre o índice anual wn (%) observado e derivado da reanálise do NCEP/NCAR durante o período de 1961-1990 (a) sobre o Brasil e (b) o Estado de São Paulo. A correlação positiva é representada por ‘+’ e a negativa por ‘o’, sendo os seus tamanhos proporcionais à magnitude da correlação, conforme escala indicada nos mapas. Os símbolos em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.....	26
Fig. 4.5	Tendência do índice anual wn (%) durante o período de 1961-1990 obtida a partir da (a) renálise do NCEP/NCAR, (b) análise do CPTEC (1959-2000) sobre a América do Sul, (c) estações de superfície no Brasil e (d) no Estado de São Paulo. (a-b) O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados. (c-d) A tendência positiva é representada por ‘+’ e a negativa por ‘o’, sendo os seus tamanhos proporcionais à magnitude da tendência, conforme escala indicada nos mapas. Os símbolos em negrito indicam tendência estatisticamente significativa no nível de 5%.....	31
Fig. 4.6	Idem Fig. 4.5 para o índice anual cn (%)......	32
Fig. 4.7	Idem Fig. 4.5 para o índice anual wd (%)......	33
Fig. 4.8	Idem Fig. 4.5 para o índice anual cd (%)......	33
Fig. 4.9	Tendência do índice sazonal wn (%) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 obtida a partir da renálise do NCEP/NCAR: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.....	35

Fig. 4.10	Idem Fig. 4.9 para o índice sazonal cn (%).....	37
Fig. 4.11	Idem Fig. 4.9 para o índice sazonal wd (%).....	37
Fig. 4.12	Idem Fig. 4.9 para o índice sazonal cd (%).....	38
Fig. 4.13	Distribuição de freqüência da temperatura mínima diária em intervalos de classe nas quatro sub-regiões: AM, NE, SDE e SUL. Cada gráfico apresenta as seguintes curvas: reanálise do NCEP/NCAR (linha contínua em negrito) e as simulações do HadAM3 (linha traço ponto), RegCM3(s1) (linha pontilhada), RegCM3(s2) (linha tracejada) e do RegCM3(s3) (linha contínua).....	41
Fig. 4.14	Idem Fig. 4.13 para a temperatura máxima diária.....	41
Fig. 4.15	Tendência dos índices anuais de temperatura: (a) wn (%), (b) cn (%), (c) wd (%) e (d) cd (%) simulada pelo modelo RegCM3(s2) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990. O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.....	46
Fig. 4.16	Tendência do índice sazonal cn (%) simulada pelo modelo RegCM3(s2) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.....	48
Fig. 4.17	Idem Fig. 4.16 para o índice sazonal wd (%).....	49
Fig. 5.1	Coeficientes de correlação entre o índice anual prcptot (mm) observado e derivado dos conjuntos de dados (NCEP/NCAR, na coluna da esquerda, e BRANT, na coluna da direita) durante o período de 1961-1990 (a-b) sobre o Brasil e (c-d) o Estado de São Paulo. A correlação positiva é representada por ‘+’ e a negativa por ‘o’, sendo os seus tamanhos proporcionais à magnitude da correlação, conforme escala indicada nos mapas. Os símbolos em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.....	54
Fig. 5.2	Tendência do índice anual r95p (mm) durante o período de 1961-1990 obtida a partir da (a) renálise do NCEP/NCAR, (b) análise do CPTEC (1959-2000) e (c) análise do BRANT sobre a América do Sul, estações de superfície no Brasil e (d) no Estado de São Paulo. (a-b) O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados. (c-d) A tendência positiva é representada por ‘+’ e a negativa por ‘o’, sendo os seus tamanhos proporcionais à magnitude da tendência, conforme escala indicada nos mapas. Os símbolos em negrito indicam tendência estatisticamente significativa no nível de 5%.....	61
Fig. 5.3	Idem Fig. 5.2 para o índice anual cdd (dias).....	62

Fig. 5.4	Tendência do índice sazonal prcptot (mm) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 obtida a partir da renálise do NCEP/NCAR: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.....	64
Fig. 5.5	Idem Fig. 5.4 para o índice sazonal cdd (dias).....	65
Fig. 5.6	Tendência do índice sazonal prcptot (mm) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 obtida a partir da análise do BRANT: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O intervalo e a escala de intensidade são mostrados no rodapé da figura.....	66
Fig. 5.7	Idem Fig. 5.6 para o índice sazonal cdd (dias).....	66
Fig. 5.8	Distribuição de frequência da chuva diária em intervalos de classe nas quatro sub-regiões: AM, NE, SDE e SUL. Cada gráfico apresenta as seguintes curvas: reanálise do NCEP/NCAR (linha contínua em negrito) e as simulações do HadAM3 (linha traço ponto), RegCM3(s1) (linha pontilhada), RegCM3(s2) (linha tracejada) e do RegCM3(s3) (linha contínua).....	70
Fig. 5.9	Idem Fig. 5.8 para a análise do BRANT.....	70
Fig. 5.10	Tendência dos índices anuais de chuva: (a) prcptot (mm), (b) r95p (mm), (c) rx5day (mm), (d) cdd (dias) e (e) cwd (dias) simulada pelo modelo RegCM3(s1) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990. O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.....	77
Fig. 5.11	Tendência do índice sazonal r95p (mm) simulada pelo modelo RegCM3(s1) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.....	78
Fig. 5.12	Idem Fig. 5.11 para o índice sazonal cdd (dias).....	79

Lista de Tabelas

Tabela 4.1	Número de estações de superfície com coeficientes de correlação positivos/negativos estatisticamente significativos/não-significativos no nível de 5% entre os índices anuais de temperatura (wn, cn, wd e cd) observados e derivados da reanálise no período de 1961-1990 (a) sobre o Brasil e (b) o Estado de São Paulo. O número total de estações usadas no Brasil foi 15 e, no Estado de São Paulo, 6.....	27
Tabela 4.2	Número de estações de superfície onde sinal da tendência dos índices anuais de temperatura (wn, cn, wd e cd) no período de 1961-1990 concorda com a reanálise do NCEP/NCAR (a) sobre o Brasil e (b) o Estado de São Paulo. A concordância entre o sinal da tendência observado e da reanálise é representada por ‘Δ’ ou ‘▲’ e, os sinais de tendência opostos, por ‘○’ ou ‘●’. Os símbolos abertos indicam igual significância estatística e, os fechados, significância estatística oposta. O número total de estações usadas no Brasil foi 15 e, no Estado de São Paulo, 6.....	28
Tabela 4.3	Idem Tabela 4.2 para os índices sazonais de temperatura.....	29
Tabela 4.4	Coeficientes de correlação entre os índices anuais de temperatura (wn, cn, wd e cd) observados (NCEP/NCAR) e simulados pelos modelos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 durante o período de 1961-1990 nas sub-regiões: (a) AM, (b) NE, (c) SDE e (d) SUL. Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.....	43
Tabela 4.5	Coeficientes de correlação entre os índices sazonais de temperatura (wn, cn, wd e cd) observados (NCEP/NCAR) e simulados pelos modelos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 durante o período de 1961-1990 na sub-região AM. Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.....	44
Tabela 4.6	Idem Tabela 4.5 para a sub-região NE.....	44
Tabela 4.7	Idem Tabela 4.5 para a sub-região SDE.....	45
Tabela 4.8	Idem Tabela 4.5 para a sub-região SUL.....	45
Tabela 5.1	Número de estações de superfície com coeficientes de correlação positivos/negativos estatisticamente significativos/não-significativos no nível de 5% entre os índices anuais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) observados e derivados dos conjuntos de dados do NCEP/NCAR e BRANT no período de 1961-1990 (a) sobre o Brasil e (b) o Estado de São Paulo. O número total de estações usadas no Brasil foi 18 – reanálise e 9 – BRANT e, no Estado de São Paulo, 160 – reanálise e 162 – BRANT.....	55
Tabela 5.2	Idem Tabela 5.1 para os índices sazonais de chuva.....	56

Tabela 5.3	Número de estações de superfície onde sinal da tendência dos índices anuais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) no período de 1961-1990 concorda com a reanálise do NCEP/NCAR (a) sobre o Brasil e (b) o Estado de São Paulo. A concordância entre o sinal da tendência observado e da reanálise é representada por ‘ Δ ’ ou ‘ \blacktriangle ’ e, os sinais de tendência opostos, por ‘ \circ ’ ou ‘ \bullet ’. Os símbolos abertos indicam igual significância estatística e, os fechados, significância estatística oposta. O número total de estações usadas no Brasil foi 18 – reanálise e 9 – BRANT e, no Estado de São Paulo, 164 – reanálise e 162 – BRANT.....	57
Tabela 5.4	Idem Tabela 5.3 para os índices sazonais de chuva.....	59
Tabela 5.5	Coefficientes de correlação entre a distribuição de frequência da chuva diária observada (NCEP/NCAR e BRANT) e simulada pelos modelos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 nas quatro sub-regiões (AM, NE, SDE e SUL) durante o período de 1961-1990. Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.....	69
Tabela 5.6	Coefficientes de correlação entre os índices anuais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) simulados pelos modelos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 e observados (NCEP/NCAR e BRANT) durante o período de 1961-1990 nas sub-regiões: (a) AM, (b) NE, (c) SDE e (d) SUL. Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.....	72
Tabela 5.7	Coefficientes de correlação entre os índices sazonais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) simulados pelos modelos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 e observado (NCEP/NCAR) durante o período de 1961-1990 na sub-região AM. Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.....	74
Tabela 5.8	Coefficientes de correlação entre os índices sazonais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) simulados pelos modelos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 e observados (NCEP/NCAR e BRANT) durante o período de 1961-1990 na sub-região NE. Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.....	74
Tabela 5.9	Idem Tabela 5.8 para a sub-região SDE.....	75
Tabela 5.10	Idem Tabela 5.8 para a sub-região SUL.....	75

Sumário

1. Introdução	01
1.1. Tendências na temperatura.....	02
1.2. Tendências na chuva.....	03
1.3. Os modelos climáticos.....	05
2. Dados	07
2.1. Observações.....	07
2.2. O modelo RegCM3.....	09
2.2.1. Parametrização de Grell.....	10
2.2.2. Parametrização de Emanuel.....	11
2.3. Simulações climáticas.....	11
3. Metodologia	14
3.1. Algoritmo desenvolvido.....	14
3.2. Índices de extremos climáticos de temperatura e chuva.....	14
3.2.1. Índices de temperatura.....	14
3.2.1.1. Estimativa do “threshold”.....	15
3.2.1.2. Procedimento “bootstrap”.....	15
3.2.1.3. Definições.....	16
3.2.2. Índices de chuva.....	18
3.3. Coeficientes de correlação e de regressão linear.....	20
3.4. Validação da reanálise do NCEP:NCAR e da análise do BRANT.....	21
3.5. Validação dos modelos RegCM3 e HadAM3.....	22
4. Resultados – Parte I: Validação do algoritmo desenvolvido e Índices de extremos climáticos de temperatura	23
4.1. Validação do algoritmo desenvolvido.....	23
4.2. Validação da reanálise do NCEP/NCAR.....	25
4.2.1. Análise pontual.....	25
4.2.1.1. Coeficientes de correlação.....	25
a. Índices anuais de temperatura.....	25
b. Índices sazonais de temperatura.....	27
4.2.1.2. Coeficientes de regressão linear.....	27
a. Índices anuais de temperatura.....	27

b. Índices sazonais de temperatura.....	28
4.2.2. Análise espacial.....	30
a. Índices anuais de temperatura.....	30
b. Índices sazonais de temperatura.....	34
c. Discussão.....	39
4.3. Simulado versus observado.....	40
4.3.1. Distribuição de frequência.....	40
4.3.2. Coeficientes de correlação na área.....	42
a. Índices anuais de temperatura.....	42
b. Índices sazonais de temperatura.....	43
c. Discussão.....	45
4.3.3. Análise espacial.....	46
a. Índices anuais de temperatura.....	46
b. Índices sazonais de temperatura.....	47
c. HadAM3 versus RegCM3.....	50
4.4. Conclusão – Parte I.....	50
5. Resultados – Parte II: Índices de extremos climáticos de chuva.....	53
5.1. Validação da reanálise do NCEP/NCA e da análise do BRANT.....	53
5.1.1. Análise pontual.....	53
5.1.1.1. Coeficientes de correlação.....	53
a. Índices anuais de chuva.....	53
b. Índices sazonais de chuva.....	55
5.1.1.2. Coeficientes de regressão linear.....	57
a. Índices anuais de chuva.....	57
b. Índices sazonais de chuva.....	58
5.1.2. Análise espacial.....	60
a. Índices anuais de chuva.....	60
b. Índices sazonais de chuva.....	63
c. Discussão.....	67
5.2. Simulado versus observado.....	68
5.2.1. Distribuição de frequência.....	69
5.2.2. Coeficientes de correlação na área.....	71
a. Índices anuais de chuva.....	71

b. Índices sazonais de chuva.....	73
c. Discussão.....	75
5.2.3. Análise espacial.....	76
a. Índices anuais de chuva.....	76
b. Índices sazonais de chuva.....	78
c. HadAM3 versus RegCM3.....	80
5.3. Conclusão – Parte II.....	81
Referências bibliográficas.....	83
Apêndice A.....	89
Apêndice B.....	94

1. Introdução

A principal evidência científica da mudança do clima mundial vem das medidas de temperatura de estações meteorológicas em todo o globo, que tem despertado um grande interesse no público e na comunidade científica em geral. O Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC 2001) indica um aumento da temperatura média da atmosfera de $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ durante o século XX. Evidências secundárias (IPCC 2001) são obtidas através dos eventos extremos, como secas, enchentes, ondas de calor e de frio, furacões e tempestades, que têm afetado diferentes partes do planeta e produzido enormes perdas econômicas e de vidas. Há, ainda, impactos relacionados, como alterações na biodiversidade, aumento no nível do mar e impactos na saúde, na agricultura e na geração de energia hidrelétrica que já podem estar afetando o Brasil, assim como o restante do planeta. O aquecimento também deve exacerbar o problema das ilhas de calor em todas as grandes cidades, uma vez que prédios e asfaltos retêm muito mais radiação térmica do que as áreas não-urbanas.

O Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2007) indica a ocorrência inequívoca do aquecimento global e apresenta as novas evidências sobre a real contribuição humana para o agravamento do efeito estufa. A variabilidade climática observada nas diversas regiões do globo é resultante do forçamento natural do clima, que inclui as variações nas atividades vulcânica e solar e perturbações internas do sistema climático, como o aquecimento sistemático do oceano Atlântico Sul desde 1950 descrito em Venegas et al. (1996, 1998); e/ou dos efeitos atribuídos à ação humana, como a poluição atmosférica, a liberação de gases de efeito estufa, o crescimento urbano nas cidades, o desmatamento e outras atividades associadas às mudanças no uso do solo, como a agricultura.

De forma geral, é consenso atualmente que mudanças climáticas na temperatura e na chuva têm um impacto direto e significativo na humanidade, cujas variações freqüentemente resultam em repercussões econômicas, no meio ambiente, sociais e políticas. No entanto, poucos estudos se dedicaram ao entendimento dos extremos climáticos de temperatura e chuva na América do Sul e de seus impactos sobre o sistema climático (IPCC, 2007). Alguns destes trabalhos são apresentados a seguir.

1.1. Tendências na temperatura

Sobre praticamente todo o globo, tem-se observado taxas de aquecimento similares nos extremos esquerdo e direito da cauda de distribuição de temperatura mínima no século XX. Os extremos de temperatura máxima também mostram uma tendência de aquecimento, embora seja inferior a observada nos extremos de temperatura mínima (Alexander et al. 2005). Estes resultados concordam com o estudo de Frich et al. (2002) que indica um aumento no número de noites quentes e uma diminuição da amplitude térmica e do número de dias com geadas sobre grande parte da América do Norte, Europa, Ásia e Pacífico durante a segunda metade do século XX.

O estudo observacional dos índices de extremos climáticos de temperatura na América do Sul durante o período de 1960-2000 desenvolvido por Vincent et al. (2005) mostra que o comportamento dos índices anuais baseados nos dados diários de temperatura máxima é bastante complexo, uma vez que as tendências apresentadas são, em sua grande maioria, não-significativas e mostram uma mistura de sinais positivos e negativos entre os países, dificultando a identificação. Sobre o norte da Argentina, a análise de tendência dos extremos de temperatura indica um forte aquecimento da temperatura mínima como consequência do aumento de noites quentes e diminuição de noites frias no período de 1960-2000 (Rusticucci e Barrucand 2004). No entanto, também foi observado um aumento dos dias frios e uma diminuição dos dias quentes, particularmente na estação de verão, que não concordam com os resultados de Vincent et al. (2005) para a mesma região. Na Colômbia e Venezuela, Quintana-Gomez (1999) identificou um aquecimento da temperatura mínima para um conjunto de dados de aproximadamente 40 anos (meados de 1960-1990).

Estudos de tendência de temperatura máxima e mínima têm sido amplamente realizados sobre diversas regiões do Brasil. Na bacia Amazônica, Victoria et al. (1998) estimou um aquecimento de $0.63^{\circ}\text{C}/100$ anos até 1997, enquanto Marengo (2003), em um trabalho estendido até 2002, obteve um aumento da temperatura de $0.85^{\circ}\text{C}/100$ anos. Sansigolo et al. (1992) mostraram que, desde o início do século XX, as regiões sul e sudeste do Brasil têm apresentado um aquecimento sistemático. Marengo e Camargo (2007) detectaram tendências positivas na temperatura máxima e mínima sobre a região sul do Brasil durante o período de 1960-2002. A amplitude térmica apresentou tendências negativas significativas neste período, especialmente no verão, que estão relacionadas ao aumento mais acentuado da temperatura mínima em relação ao da máxima. De acordo com Marengo (2001), as maiores taxas de aquecimento foram observadas nas grandes cidades da região sudeste do Brasil, São Paulo e Rio de Janeiro, em comparação com as cidades da Amazônia, como Manaus e Cuiabá. No entanto, mais recentemente, Dufek e Ambrizzi (2005)

fizeram um estudo utilizando estações meteorológicas localizadas tanto nos grandes centros urbanos do Estado de São Paulo, quanto em cidades menores do interior, cujos resultados mostraram um aumento da temperatura mínima associado à diminuição no número de noites frias e ao aumento de noites quentes no período de 1955-2002.

1.2. Tendências na chuva

Estudos recentes de tendência dos índices de chuva indicam uma fraca tendência positiva da precipitação global continental durante o século XX, embora este padrão não seja homogêneo, uma vez que grandes áreas são caracterizadas por tendências negativas (IPCC 2001, 2007; Alexander et al. 2005).

O estudo observacional desenvolvido por Haylock et al. (2006) sobre tendências nos totais e extremos de chuva para a América do Sul, particularmente ao sul de 12°S, durante o período de 1960-2000 mostra que o comportamento dos índices anuais de extremos de chuva (r_{10mm} , r_{20mm} , cdd , cwd , r_{95p} , r_{99p} entre outros) na grande maioria das estações de superfície estudadas é semelhante ao da chuva total anual ($prcptot$) e indicam uma tendência de aumento das condições de umidade no Equador, no norte do Peru, na região sul do Brasil, no Paraguai, no Uruguai e na região central e norte da Argentina. Sobre o sul do Peru e do Chile, ao contrário, foram observadas tendências de diminuição tanto nos totais de chuva quanto nos seus extremos. As tendências positivas de chuva no sul do Brasil, Uruguai e norte da Argentina concordam com os resultados de Barros et al. (2000). Minetti (1998) e Minetti et al. (2003), analisando as tendências de chuva em algumas estações do sul da América do Sul, identificaram uma diminuição da chuva anual em uma grande área a oeste dos Andes e um aumento no leste da Argentina central no período de 1931-1999. Sobre o norte da Argentina, foi observado um aumento da chuva anual até a década de 1980 seguido por um declínio causado por eventos fortes de El Niño. Na estação chilena Valdivia, Rusticucci e Penalba (2000) notaram tendências negativas da chuva anual durante o período de 1901-1990, atribuídas, principalmente, à estação de inverno. Os autores sugerem que o referido resultado pode estar relacionado com mudanças nos sistemas frontais de médias latitudes, conforme observado na Austrália (Allan e Haylock 1993).

Liebmann et al. (2004), analisando as tendências sazonais de chuva sobre a região central e sul do Brasil, detectaram fortes tendências positivas ao sul de 20°S nos meses de janeiro a março durante o período de 1976–1999, observadas também no período de 1948–1975, embora com menores intensidades. Este resultado é atribuído às tendências positivas de TSM no Oceano Atlântico e ao aumento no percentual de dias chuvosos. Mais recentemente,

Dufek e Ambrizzi (2007) analisaram tendências de extremos de chuva no Estado de São Paulo durante o período de 1950-1999 e concluíram que o aumento da precipitação total anual está associado ao aumento na intensidade da precipitação. Em particular, os resultados de Groissman et al. (2005) indicam um aumento na frequência de chuvas intensas desde 1940 no sudeste do Brasil. Carvalho et al. (2002) observou que no Estado de São Paulo ocorrem mais eventos extremos de chuvas durante períodos de El Niño. Na bacia Amazônica, estudos observacionais realizados por Marengo (2004) identificaram uma fraca tendência positiva de chuva, com tendências negativa/positiva nas seções norte/sul da bacia. No entanto, segundo o autor, a variabilidade decadal exerce um papel de maior importância que as tendências na distribuição de chuva na região. O estudo realizado por Santos e Brito (2007), utilizando a metodologia adotada por Haylock et al. (2006), mostra um aumento no número de dias com chuvas, na precipitação total anual e no número de dias extremamente úmidos nos Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba durante o período de 1935-2000 e, em algumas regiões, também se verifica um aumento na ocorrência de chuvas superiores a 50mm.

As análises de extremos climáticos de temperatura e chuva descritas nas seções 1.1 e 1.2, respectivamente, apresentam uma visão de aquecimento e da intensificação de eventos extremos de chuva em diversas regiões da América do Sul. Apesar da técnica empregada no cálculo dos índices climáticos estar bem estabelecida (Alexander et al. 2005, Vincent et al. 2005, Haylock et al. 2006, Dufek e Ambrizzi 2007, Santos e Brito 2007 entre outros), o tamanho e a qualidade das séries de dados interferem significativamente nos resultados. Atualmente, muitos trabalhos científicos vêm utilizando dados de reanálise produzidos pelos grandes centros de previsão meteorológica (National Centers for Environmental Prediction – NCEP; European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF; etc) e conjuntos de dados em grade regular derivados de estações de superfícies (Liebmann e Allured 2005). Em função dessa ampla utilização e da falta de séries históricas diárias e confiáveis de fácil acesso, é conveniente investigar a capacidade destes conjuntos de dados em reproduzir os índices climáticos de temperatura e chuva em algumas regiões de interesse. Como parte dos objetivos propostos no presente trabalho encontra-se a validação da reanálise do NCEP/NCAR e do conjunto de dados de chuva produzido por Liebmann e Allured (2005) em estimar os índices climáticos de temperatura e chuva e de suas respectivas tendências sobre a América do Sul, particularmente ao sul de 12°S, durante o período de 1961-1990. Essa validação se faz necessária, pois tais conjuntos de dados podem conter erros sistemáticos para a América do Sul. Por exemplo, Costa e Foley (1998) e Rocha (2001) mostraram que a reanálise do NCEP/NCAR contém erros substanciais no posicionamento dos centros de máxima precipitação na Amazônia.

1.3. Os modelos climáticos

Os modelos de clima são usados como ferramentas para obter e avaliar projeções climáticas futuras, como resposta a mudanças na concentração de gases de efeito estufa e de aerossóis. As fontes de incerteza associadas ao futuro cenário climático do planeta consistem: nas emissões futuras de gases de efeito estufa e aerossóis, atividades vulcânica e solar que afetam o forçamento radiativo do sistema climático e na resolução espacial dos modelos e conseqüente representação dos processos físicos e dos mecanismos do sistema climático. Uma fonte adicional de incerteza relaciona-se à variabilidade natural do clima, uma vez que as previsões climáticas ainda não distinguem ou separam os efeitos da variabilidade natural observada da variabilidade forçada por atividades humanas que induzem as mudanças climáticas, entre outras.

A baixa resolução horizontal dos modelos climáticos globais limita a possibilidade de simular e prever as mudanças no clima em escala regional (Menéndez et al. 2001, Nicolini et al. 2002, Misra et al. 2003, Qian et al. 2003). Atualmente, diferentes técnicas de “downscaling” têm sido desenvolvidas baseadas em métodos dinâmicos e/ou estatísticos, buscando adicionar características regionais do clima, como a topografia, a cobertura do solo, entre outras, aos resultados dos modelos climáticos globais (Qian et al. 2003, Frías et al. 2005).

O método dinâmico de “downscaling” consiste de modelos climáticos regionais com resolução horizontal mais alta e usando, como condições de contorno, o resultado das simulações dos modelos climáticos globais, no modo de previsão, ou as análises observacionais, no modo de pesquisa (Giorgi e Mearns 1999). Desta forma, os modelos climáticos regionais podem produzir circulações ausentes nos modelos climáticos globais (Druyan et al. 2002, Giorgi e Mearns 1999) e, portanto, espera-se uma melhora significativa nas previsões/simulações climáticas, principalmente das variáveis que sofrem forte controle fisiográfico, tais como, precipitação e temperatura do ar próxima à superfície. No entanto, deve ser destacado que os cenários regionais de mudança climática apresentam incertezas provenientes do modelo global.

Utilizando dois modelos climáticos regionais (RegCM3 e ETACLIM) com resolução de 80km em uma simulação de 10 anos, Fernandez (2004) explorou as circulações quase-estacionárias que se desenvolvem sobre a América do Sul durante o verão e os efeitos das anomalias de grande escala (El Niño 97/98 e La Niña 98/99). Com relação às simulações do modelo RegCM3, a Alta da Bolívia mostrou-se deslocada para sul e menos intensa que o observado enquanto que o vórtice no leste do nordeste foi posicionado corretamente. Este resultado causa um efeito direto nas simulações da distribuição da precipitação. Desta forma, o modelo RegCM3 tende a subestimar a precipitação sobre grande parte da América do Sul e superestimar na região dos Andes. Segundo o autor, as

deficiências encontradas podem ser atribuídas aos parâmetros de convecção, processos de superfície e radiação. Seth e Rojas (2003) investigaram a capacidade do RegCM3 em reproduzir a variabilidade interanual de precipitação e circulação sobre a América do Sul. Comparando simulações para anos de El Niño (1983) e La Niña (1985), o RegCM3 simulou corretamente os diferentes padrões da circulação em grande escala e as anomalias de precipitação associadas. Os autores concluíram também que o domínio utilizado nas simulações climáticas influencia os resultados do modelo, sendo que um domínio maior, cobrindo a América do Sul tropical e oceanos adjacentes, permite a evolução temporal da precipitação mais semelhante à observação. Ambrizzi et al. (2007) descreveram o desempenho de três modelos climáticos regionais (HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC) em simular as características climatológicas da América do Sul para as quatro estações do ano durante o período de 1961-1990. De maneira geral, os resultados mostraram que os modelos climáticos regionais com condições de contorno fornecidas pelo modelo climático global HadAM3P conseguem simular os padrões climatológicos característicos da América do Sul, apesar de algumas diferenças encontradas entre eles. Desta forma, o objetivo principal do presente trabalho consiste na investigação da capacidade dos modelos climáticos RegCM3 e HadAM3 em simularem os índices de extremos climáticos de temperatura e chuva na América do Sul para o clima presente (1961-1990).

2. Dados

2.1. Observações

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram utilizados dados diários de chuva e de temperatura máxima e mínima observados em pontos de grade na América do Sul e em estações de superfície localizadas no Brasil durante o período de 1961-1990.

Foram utilizadas 28 estações distribuídas no Brasil pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a estação meteorológica de Pinhais (PR). Desta forma, os dados diários de chuva e temperatura máxima e mínima apresentam uma baixa cobertura espacial no Brasil, particularmente na região Amazônica. No Estado de São Paulo, ao contrário, observa-se uma densa rede de postos pluviométricos com distribuição geográfica uniforme, totalizando 173 estações, pertencentes ao Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), ao Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE) e à estação meteorológica da Água Funda. No entanto, para os dados diários de temperatura máxima e mínima há apenas 6 estações localizadas na região leste do Estado, fornecidas pelo IAC e pela estação meteorológica da Água Funda. Deve-se ressaltar que um número menor de estações foi considerado no cálculo dos índices anuais e sazonais e dos coeficientes de correlação e de regressão linear, conforme critérios adotados e que serão discutidos na seção 3. A distribuição geográfica das estações é mostrada na Fig. 2.1.

Neste estudo utilizaram-se três conjuntos de dados, conforme descrito a seguir. Utilizou-se os dados diários de chuva e de temperatura máxima e mínima provenientes da reanálise do National Centers for Environmental Predictions/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) sobre a América do Sul relativo ao período de 1961-1990 (Kalnay et al. 1996). Estes dados estão em grade Gaussiana T62 global com 192 x 94 pontos e foram adquiridos a partir do endereço <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>. Foram também utilizados os dados diários de chuva derivados da análise de Liebmann and Allured (2005) – denominada análise do BRANT – obtida a partir de estações meteorológicas da América do Sul para o mesmo período (1961-1990), com resolução de 1,0° x 1,0° latitude-longitude. Esses dados foram obtidos no endereço www.cdc.noaa.gov/people/brant.liebmann/south_america_precip.html. Um terceiro conjunto de dados é resultado da interpolação pelo método Kriging, em uma grade regular de 1,0°x 1,0° latitude-longitude, da tendência dos índices anuais de extremos climáticos de temperatura (wn, cn, wd e cd) e chuva (r95p, rx5day e cdd) obtidas a partir dos dados diários de 105 estações de superfície localizadas na América do Sul no domínio entre 12°S–53°S e 42°W–76°W durante o

período de 1959-2000. Esses dados foram fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) - denominados análise do CPTEC.

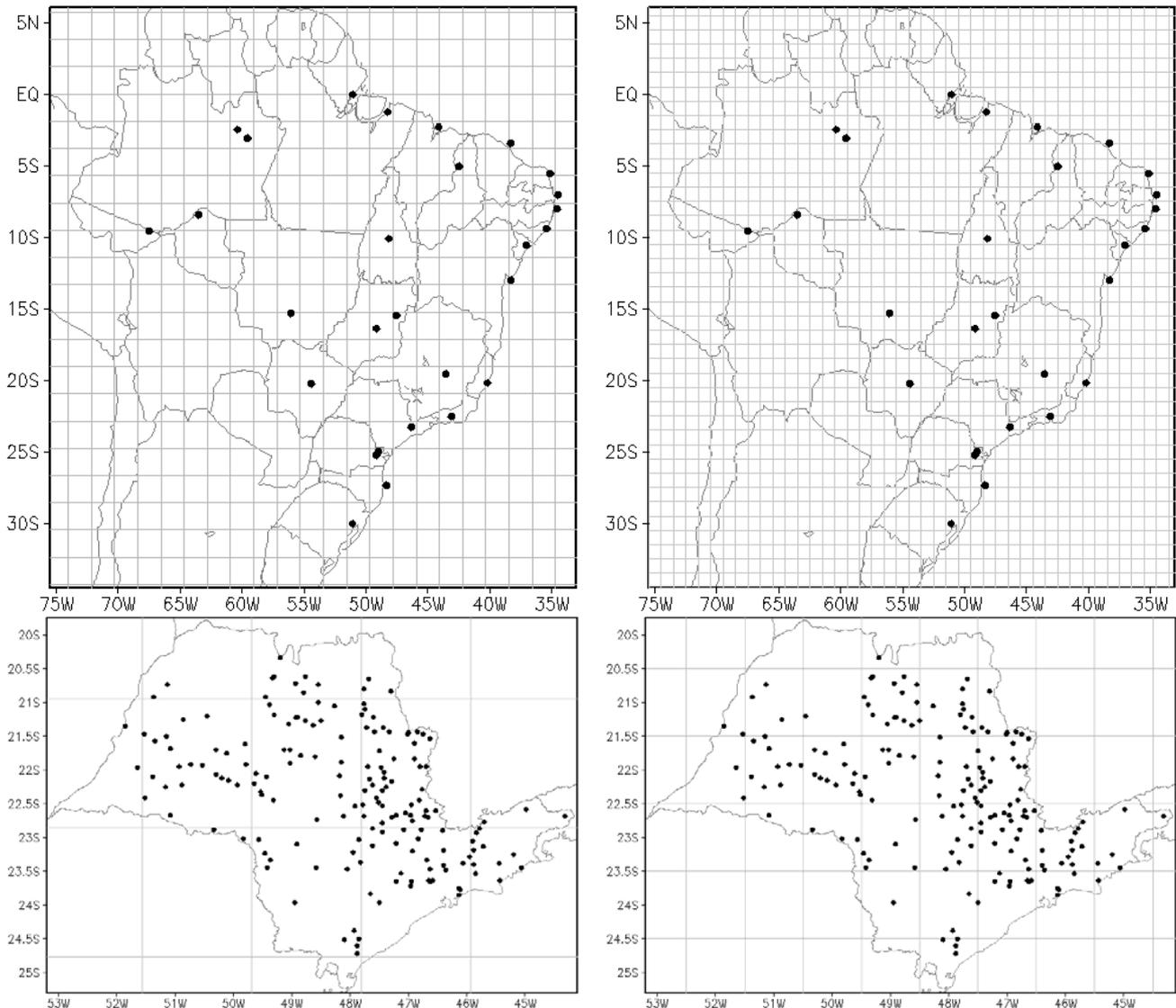


Fig. 2.1. Distribuição geográfica das estações de superfície e as grades correspondentes à reanálise do NCEP/NCAR, painéis à esquerda, e à análise do BRANT, painéis à direita.

Durante este trabalho, o maior problema encontrado foi a falta de informação meteorológica diária e confiável na América do Sul, especialmente na região tropical, durante um período longo, particularmente de 1961-1990, assim como o acesso restrito as informações armazenadas nos bancos de dados dos serviços meteorológicos, conforme exemplificado a seguir.

A análise diária de precipitação do Global Precipitation Climatology Project (GPCP), que considera estimativas de precipitação por satélite e medições em estações de superfície, compreende apenas o período de outubro de 1996 a junho de 2007. O mesmo acontece com a análise de precipitação diária para a América do Sul produzida pelo Climate Prediction Center (CPC),

disponível durante o período de 1978-2004, e com os dados diários de precipitação e temperatura máxima e mínima provenientes da reanálise do NCEP/DOE – a versão atualizada da reanálise do NCEP/NCAR, iniciando em janeiro de 1979. Já a análise diária de precipitação do CPC para o Brasil, baseada nas observações da rede de pluviômetros do Brasil, embora apresente dados durante o período de 1948-2005, a presença de “zeros” em substituição aos dados faltantes justifica a sua não utilização. O conjunto de dados de precipitação do Climate Research Unit (CRU) disponibiliza somente a climatologia mensal sobre o continente sul americano. Somado aos problemas apresentados com os conjuntos de dados diários de precipitação tem-se a inexistência de dados diários de temperatura máxima e mínima observados em pontos de grade.

2.2. O modelo RegCM3

A primeira geração do RegCM (Regional Climate Model) foi desenvolvida na década de 80 pelo NCAR-PSU (National Center for Atmospheric Research-Pennsylvania State University), a partir do modelo atmosférico MM4 (Mesoscale Model version 4) (MM4, Anthes et al. 1987). A componente dinâmica do RegCM3 é semelhante a do MM4 (Mesoscale Model version 4), ou seja, é um modelo compressível, com balanço hidrostático, em coordenada vertical sigma e de área limitada em diferenças finitas. As principais modificações implementadas no MM4 para utilizá-lo no modo climático estão descritas em Giorgi et al 1993a-b. Para integração no tempo o RegCM utiliza o esquema “split--explicit” e na presença de intensos gradientes topográficos inclui um esquema para reduzir a difusão horizontal (Giorgi et al. 1993a-b).

Os processos de interação solo-planta-atmosfera no RegCM3 são representados através do esquema BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, Dickinson et al. 1993). Este esquema considera a presença de vegetação e a interação com o solo nas trocas turbulentas de momento, energia e vapor d’água entre a superfície e a atmosfera. Atualmente, o BATS possui uma camada de vegetação, uma de neve, uma de solo de 10cm de espessura, uma na zona de raiz, com 1-2m de espessura e uma terceira camada de 3m de profundidade. Cada ponto de grade do modelo possui apenas uma classe de vegetação e solo, com a vegetação fornecida por arquivos globais. Os transportes turbulentos de calor, momento e umidade na camada limite planetária (CLP) resultam do produto entre o gradiente vertical destas variáveis e o coeficiente de difusão vertical turbulenta.

O esquema de transferência radiativa do RegCM3 é o mesmo do CCM3 (Community Climate Model 3, Kiehl et al. 1996). Este esquema calcula separadamente as taxas de aquecimento e fluxos na superfície de radiação solar e no infravermelho sob condições de céu claro e nublado. As contribuições dos gases CO₂, H₂O, O₃ e nuvens estão incluídas nos cálculos de transferência

radiativa na banda do infravermelho. Os efeitos do CO_2 , H_2O , O_3 e O_2 são considerados para a radiação solar. Esta parametrização inclui ainda os efeitos dos gases de efeito estufa (NO_2 , CH_4 , CFCs), aerossóis atmosféricos e gelo de nuvem.

Na região de fronteira, é aplicada uma relaxação entre a previsão do RegCM3 e os campos de fronteira (análises de observações ou previsões de modelos globais). Normalmente, as simulações com o RegCM3 utilizam relaxação exponencial, já que possibilita uma transição mais suave entre a previsão do modelo e os campos de fronteira, resultando em um impacto positivo na simulação como um todo (Giorgi et al. 1993b).

Para tratamento dos processos úmidos, o modelo considera dois esquemas diferentes: um para a convecção em cumulus profundo e outro para a precipitação que é resolvida na escala da grade. O esquema na escala da grade resolve apenas uma equação para previsão de água de nuvem (Pal et al. 2000), que permite a formação de água de nuvem, advecção e mistura turbulenta, re- evaporação em condições sub-saturadas e conversão para precipitação através de um termo de auto-conversão. Os esquemas de cumulus profundo que foram utilizados são: Grell (1993) ou Emanuel (1991), e estão descritos a seguir.

2.2.1. Parametrização de Grell

O esquema de Grell (Grell 1993), similar à parametrização de Arakawa e Schubert (Grell et al. 1994a) (AS74), considera a nuvem através de duas circulações estacionárias, uma corrente ascendente e uma descendente, que só se misturam com o ambiente no topo e na base destas circulações. O fluxo de massa na corrente ascendente é constante com a altura e nenhum entranhamento ou desentranhamento ocorre ao longo das bordas da nuvem. Os níveis de origem das correntes ascendente e descendente são aqueles de máxima e mínima energia estática úmida, respectivamente. O esquema de Grell é ativado quando uma parcela levantada atinge a adiabática úmida e a condensação na corrente ascendente resulta do levantamento de uma parcela saturada. O fluxo de massa na corrente descendente é proporcional ao da ascendente através de um parâmetro β , que representa o quanto do condensado na corrente ascendente será evaporado. O aquecimento e umedecimento do ambiente no esquema de Grell são determinados pelos fluxos de massa e desentranhamento no topo e na base da nuvem. Além disso, o esquema inclui o efeito de resfriamento da corrente ascendente úmida.

Devido à natureza simplista deste esquema, diversas suposições de fechamento podem ser adotadas. A versão padrão do RegCM3 implementa diretamente a suposição do quase-equilíbrio de AS74. Outra opção de fechamento é a de Fritsch e Chappell (Fritsch e Chappell 1980). Este

fechamento considera que a convecção remove a energia de empuxo disponível para convecção (CAPE) durante certo tempo. O presente estudo utilizou esta opção com período de tempo de 30 minutos para remover a CAPE.

2.2.2. Parametrização de Emanuel

Este esquema assume que a mistura na nuvem é altamente episódica e não-homogênea e considera fluxos convectivos baseados em um modelo idealizado de correntes ascendente e descendente na escala de sub-nuvem. A convecção é disparada quando o nível de empuxo neutro é maior que o nível da base da nuvem. Entre esses dois níveis, o ar é levantado e uma fração da umidade condensada é convertida em precipitação enquanto a fração restante é convertida em nuvem. A nuvem se relaciona com o ar do ambiente segundo um espectro de mistura uniforme que acende e descende para seus respectivos níveis de empuxo neutro. As taxas de mistura (entranhamento e desentranhamento) dependem dos gradientes verticais de empuxo na nuvem. A fração do fluxo de massa total na base da nuvem que se mistura com o ambiente em cada nível é proporcional à taxa de mudança de empuxo não diluído com a altitude. O fluxo de massa na corrente ascendente na base da nuvem é relaxado para valores de quase-equilíbrio da camada de sub-nuvem.

2.3. Simulações climáticas

Na Fig. 2.2, que mostra o domínio utilizado nas simulações climáticas e a topografia da região, destacam-se quatro sub-regiões, cujas localizações visam englobar as principais regiões da América do Sul: 1) a região Amazônica, 2) parte do nordeste, 3) do sudeste e do centro-oeste do Brasil e 4) uma região mais ao sul abrangendo o centro-sul do Paraguai, o nordeste da Argentina e parte da região sul do Brasil, referidas daqui por diante, respectivamente, como AM (12.5°S-0.5°S; 68.5°W-50.5°W), NE (12.5°S-4.5°S; 49.5°W-38°W), SDE (23°S-15°S; 55°W-40.5°W) e SUL (31°S-23°S; 62°W-50.5°W).

Foram realizadas três simulações com o modelo climático regional RegCM3, assim como uma análise comparativa, a fim de identificar a melhor simulação de tendência dos índices anuais e sazonais de temperatura e chuva sobre a América do Sul. As duas primeiras simulações climáticas com o RegCM3(s1, s2) se diferenciaram no esquema de convecção adotado: parametrização de Grell e de Emanuel, respectivamente. Na terceira simulação com o RegCM3(s3) também foi usado

o esquema de convecção Grell, sendo que para a simulação (s1) utilizou-se 23 níveis na vertical e para (s3), apenas 18.

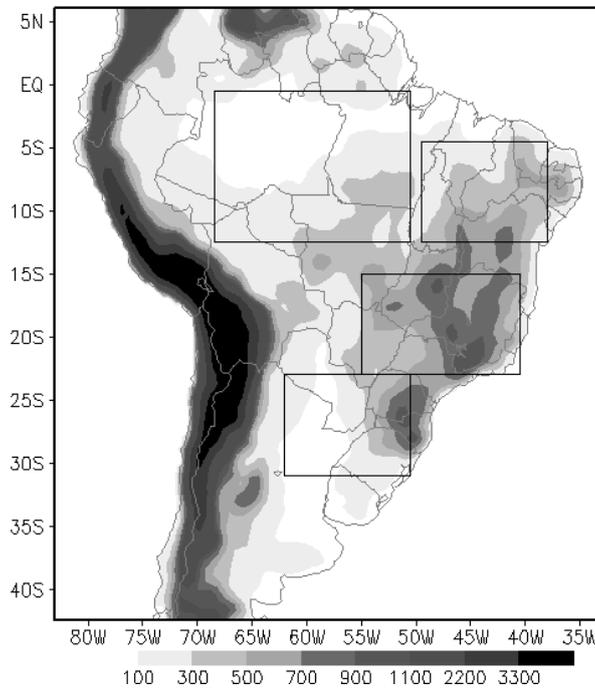


Fig. 2.2. Topografia (m) e domínio de simulação. As caixas identificam as sub-regiões AM, NE, SDE e SUL.

O modelo climático regional RegCM3 foi iniciado em 00:00 UTC de 01 de janeiro de 1960 e integrado até 18:00 UTC de 30 de dezembro de 1990, cobrindo um período de 31 anos. As simulações foram realizadas sobre a América do Sul com resolução horizontal de 60km e 23 níveis sigma na vertical, com o topo do modelo em 50hPa. A topografia e uso do solo no domínio de simulação foram especificados a partir dos dados fornecidos pelo USGS (United States Geological Survey) e GLCC (Global Land Cover Characterization; Loveland et al. 2000), respectivamente, com resolução espacial de 10 minutos. Neste trabalho foram utilizados 30 anos de dados (1961-1990), sendo o primeiro ano da simulação (1960) considerado um período de spin-up.

O conjunto de dados gerado pelo modelo climático global HadAM3, usado para fornecer as condições iniciais e de contorno, bem como a temperatura da superfície do mar (TSM), para o RegCM3, também será utilizado na análise dos índices anuais e sazonais de temperatura e chuva. Os dados do modelo HadAM3, relativo ao período de 1960-1990, foram fornecidos pelo Hadley Centre for Climate Research and Prediction, a uma resolução de 1,25° x 1,875° de latitude-longitude. A dinâmica do modelo HadAM3 é baseada no HadAM2b, descrito por Stratton (1999). O modelo HadAM3 é forçado com as anomalias de TSM geradas pela componente oceânica do modelo acoplado oceano-atmosfera HadCM3 do Hadley Centre. Uma descrição mais

detalhada sobre o modelo climático global HadAM3 pode ser encontrada em Jones et al. (2001), Gordon et al. (2000), Pope et al. (2000), Cox et al (1999) e no website do Hadley Centre: <http://www.metoffice.gov.uk/research/hadleycentre/models/HadCM3.html>.

3. Metodologia

3.1. Algoritmo desenvolvido

Para calcular alguns dos índices anuais e sazonais de temperatura e chuva definidos por Frich et al. (2002), desenvolveu-se primeiramente um algoritmo em linguagem FORTRAN, cuja metodologia foi baseada no software RClimDex elaborado por Xuebin Zhang e Feng Yang (Zhang e Yang 2004). A utilização do algoritmo aqui apresentado em substituição do software RClimDex é devido a sua aplicação a observações e saídas de modelo de área limitada em pontos de grade.

Embora o software RClimDex calcule os índices anuais somente para anos com no máximo 15 dias com dados faltantes, o critério empregado pelo algoritmo consistiu no cálculo dos índices anuais somente para anos com, no mínimo, 70% dos dados completos. A escolha do referido critério pode ser justificada pela má distribuição geográfica e baixa densidade das estações de superfície no Brasil, uma vez que ao aplicar o critério adotado pelo software RClimDex, o número de estações reduzia significativamente. O mesmo critério foi adotado para o cálculo dos índices sazonais.

O algoritmo desenvolvido no presente trabalho foi validado através de um estudo comparativo entre os seus resultados para os índices anuais de temperatura e chuva na estação IAC-15 durante o período de 1958-2002 e os obtidos através do software RClimDex. A validação do algoritmo permitiu sua aplicação às simulações com o RegCM3 e com o HadAM3, assim como aos dados de reanálise do NCEP/NCAR, à análise do BRANT e às 201 estações de superfície mencionadas na seção 2, durante o período de 1961-1990. Tanto do ponto de vista observacional como de modelagem, foram avaliadas as tendências dos índices anuais e sazonais de temperatura e chuva.

3.2. Índices de extremos climáticos de temperatura e chuva

Foram calculados nove índices anuais e sazonais de extremos climáticos, sendo dois índices derivados dos dados diários de temperatura máxima, dois dos dados diários de temperatura mínima e cinco índices derivados dos dados diários de chuva, sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990. As descrições dos índices de temperatura e chuva encontram-se a seguir.

3.2.1. Índices de temperatura

A seção 3.2.1.1 apresenta a metodologia adotada no cálculo de estimativa dos limites (“thresholds”) diários necessários para calcular os quatro índices anuais e sazonais de temperatura

(noites quentes - wn, noites frias - cn, dias quentes - wd e dias frios - cd) baseados em percentil. A seção 3.2.1.2 descreve o procedimento “bootstrap” (Zhang et al. 2005) proposto para calcular os índices anuais de temperatura no período base (1961-1990). E, por fim, na seção 3.2.1.3, encontram-se as definições dos índices de temperatura.

3.2.1.1. Estimativa do “threshold”

Os “thresholds” diários são percentis estimados a partir de um conjunto de dados formado por cinco dias consecutivos centrado no dia de interesse (referido como 5CD), ou seja, para um período climatológico base de 30 anos (1961-1990 – recomendado pela Organização Meteorológica Mundial - WMO), tem-se não mais de $5 \times 30 = 150$ dias de dados. Por exemplo, para estimar o “threshold” do dia 13 de janeiro pelo método 5CD, são selecionados todos os dados referentes aos dias 11-15 de janeiro no período base de 1961-1990 (Zhang et al. 2005). Este procedimento garante uma melhora da estabilidade das estimativas dos parâmetros da distribuição de probabilidade (Folland et al. 1999) e vem sendo amplamente utilizado para as mais diversas aplicações (Frich et al. 2002, Klein Tank e Können 2003 e Kiktev et al. 2003).

O método adotado para estimar um “threshold” característico de um determinado conjunto de dados consistiu na utilização de quantis empíricos (Hyndman e Fan 1996), descritos a seguir.

Seja $y_{(1)} \leq y_{(2)} \leq \dots \leq y_{(n)}$ as n observações diárias de temperatura do dia i no período base de 1961-1990 organizadas em ordem crescente, portanto $n \leq 5 \times 30 = 150$. O quantil empírico (Q_p) correspondente ao p^{th} percentil é obtido a partir da interpolação linear dos dois valores da série ordenada mais próximos do percentil, definido como:

$$Q_p = (1 - f) * y_{(k)} + f * y_{(k+1)} \quad (\text{equação 3.1})$$

onde $k = \text{int}\left(p * \left(n + \frac{1}{3}\right) + \frac{1}{3}\right)$, sendo $k \leq p * (n - 1)$, $f = p * (n - 1) - k$ e $y_{(k)}$ é o k^{th} maior valor da amostra, para $1 \leq k \leq n$. O quantil empírico (Q_p) é definido como o menor ou maior valor da amostra quando $k < 1$ ou $k > n$, respectivamente. No entanto, deve-se ressaltar a existência de diversas formas de estimar Q_p , associada as diferentes definições dadas para k (Frich et al. 2002, Folland e Anderson 2002, Zhang et al. 2005).

3.2.1.2. Procedimento “bootstrap”

De acordo com Zhang et al. (2005), as séries dos índices anuais de temperatura baseados em percentil apresentam uma descontinuidade entre os índices calculados para os anos que compõem o

período base de 1961-1990 e para aqueles que não estão incluídos nesta base de dados (1961-1990). A solução proposta por Zhang et al. (2005) para este problema consiste no procedimento “bootstrap” aplicado somente no cálculo dos índices para os anos inseridos na base de dados (1961-1990), que é constituído das seguintes etapas:

(a) O período base (1961-1990) é dividido em dois conjuntos de dados: o primeiro formado pelo ano (nomeado “out”) para o qual será calculado o seu respectivo índice e, o outro, composto pelos 29 anos restante do período base.

(b) Uma nova base de 30 anos de dados é construída com o segundo conjunto de dados definido em (a) e a repetição de um dos seus 29 anos, que será utilizada para a estimativa dos “thresholds” diários, conforme mostrado na seção 3.2.1.1.

(c) Compara-se, então, o ano “out” com os “thresholds” obtidos a partir da base de dados definida em (b) e, calcula-se o índice referente ao ano “out”.

(d) As etapas (b) e (c) são repetidas mais 28 vezes, sendo que as bases de 30 anos de dados construídas em (b) diferem entre si no ano repetido.

(e) O índice para o ano “out” é obtido através da média dos 29 valores encontrados através das etapas (b), (c) e (d).

Desta forma, o ano “out”, cujo índice foi calculado, não está inserido na base de dados utilizada para estimar os “thresholds”. A repetição dos 29 anos assegura que o erro associado aos “thresholds” diários usados para calcular os índices dos anos “out” é comparável com o erro dos “thresholds” correspondentes aos anos fora da base de dados (1961-1990), removendo, assim, a não homogeneidade das séries dos índices.

Como as diferenças encontradas nas séries dos índices com e sem o procedimento “bootstrap” não são suficientemente relevantes para interferir significativamente no cálculo de tendências e, devido o procedimento “bootstrap” requer um tempo computacional muito maior que o exigido sem a aplicação do método, o procedimento “bootstrap” foi realizado somente no cálculo dos índices anuais de temperatura.

3.2.1.3. Definições

1 – Noites quentes - w_n

O índice climático w_n fornece informação sobre o extremo direito da cauda de distribuição de temperatura mínima, ou seja, representa as noites muito quentes, e pode ser definido como a porcentagem de dias no período j , anual ou sazonal, em que

$$TN_{ij} > TN_{in} 90 \text{ para } TN_{ij} \neq \text{MISSING}$$

onde TN_{ij} é a temperatura mínima diária no dia i e período j , $TN_{in}90$ é o percentil 90th da temperatura mínima do dia i no período climatológico base de 1961-1990 e MISSING corresponde aos dados faltantes. O índice wn é dado em %.

Para o cálculo do índice wn , de acordo com a seção 3.2.1.1, tem-se $Q_p = TN_{in} 90$, onde $p=0.90$.

2 – Noites frias - cn

O índice climático cn é similar ao wn , mas corresponde ao extremo esquerdo da cauda de distribuição de temperatura mínima, ou seja, representa as noites muito frias, e pode ser definido como a porcentagem de dias no período j , anual ou sazonal, em que

$$TN_{ij} < TN_{in} 10 \text{ para } TN_{ij} \neq \text{MISSING}$$

onde TN_{ij} é a temperatura mínima diária no dia i e período j , $TN_{in}10$ é o percentil 10th da temperatura mínima do dia i no período climatológico base de 1961-1990 e MISSING corresponde aos dados faltantes. O índice cn é dado em %.

Para o cálculo do índice cn , de acordo com a seção 3.2.1.1, tem-se $Q_p = TN_{in} 10$, onde $p=0.10$.

3 – Dias quentes - wd

O índice climático wd fornece informação sobre o extremo direito da cauda de distribuição de temperatura máxima, ou seja, representa os dias muito quentes, e pode ser definido como a porcentagem de dias no período j , anual ou sazonal, em que

$$TX_{ij} > TX_{in} 90 \text{ para } TX_{ij} \neq \text{MISSING}$$

onde TX_{ij} é a temperatura máxima diária no dia i e período j , $TX_{in}90$ é o percentil 90th da temperatura máxima do dia i no período climatológico base de 1961-1990 e MISSING corresponde aos dados faltantes. O índice wd é dado em %.

Para o cálculo do índice wd , de acordo com a seção 3.2.1.1, tem-se $Q_p = TX_{in} 90$, onde $p=0.90$.

4 – Dias frios - cd

O índice climático cd é similar ao wd, mas corresponde ao extremo esquerdo da cauda de distribuição de temperatura máxima, ou seja, representa os dias muito frios, e pode ser definido como a porcentagem de dias no período j, anual ou sazonal, em que

$$TX_{ij} < TX_{in}10 \text{ para } TX_{ij} \neq \text{MISSING}$$

onde TX_{ij} é a temperatura máxima diária no dia i e período j, $TX_{in}10$ é o percentil 10th da temperatura máxima do dia i no período climatológico base de 1961-1990 e MISSING corresponde aos dados faltantes. O índice cd é dado em %.

Para o cálculo do índice cd, de acordo com a seção 3.2.1.1, tem-se $Q_p = TX_{in}10$, onde $p=0.10$.

3.2.2. Índices de chuva

1 – Chuva total - prcptot

Seja RR_{ij} a quantidade diária de chuva no dia i e período j. Se I representa o número de dias em j, então:

$$\text{prcptot}_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \text{ para } RR_{ij} \geq 1 \text{ mm e } RR_{ij} \neq \text{MISSING}$$

onde MISSING corresponde aos dados faltantes. A unidade do índice prcptot é mm.

Como neste trabalho realizou-se uma abordagem anual e sazonal, o índice prcptot indica a chuva total no ano (I=365 ou 366 dias) e, nas seguintes composições sazonais: SON (setembro-outubro-novembro – I= 91), DJF (dezembro-janeiro-fevereiro – I=90 ou 91), MAM (março-abril-maio – I=92) e JJA (junho-julho-agosto – I=92).

2 – Dias muito úmidos – r95p

O índice climático r95p corresponde ao extremo direito da cauda de distribuição de chuva, ou seja, representa os dias muito úmidos, e pode ser definido como:

$$r95p_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \text{ para } RR_{ij} \geq RR_{in95}; RR_{ij} \geq 1\text{mm e } RR_{ij} \neq \text{MISSING}$$

onde RR_{ij} é a quantidade diária de chuva no dia i e período j , I representa o número de dias em j , RR_{in95} é o percentil 95th da precipitação durante o período climatológico base de 1961 a 1990 e $MISSING$ corresponde aos dados faltantes. A unidade do índice $r95p$ é mm.

Seja $y_{(1)} \leq y_{(2)} \leq \dots \leq y_{(n)}$ as n observações diárias de chuva no período base de 1961-1990 organizadas em ordem crescente, respeitando os seguintes critérios: $RR_{in} \geq 1\text{mm}$ e $RR_{in} \neq \text{MISSING}$. Em particular, para o cálculo do índice $r95p$, o quantil empírico ($Q_p = RR_{in95}$) correspondente ao p^{th} percentil ($p=0.95$) é obtido através da equação (3.1) da seção 3.2.1.1.

3 – Chuva máxima em cinco dias – rx5day

O índice de extremo climático $rx5day$ representa a chuva máxima registrada em cinco dias consecutivos no período j , então:

$$rx5day_j = \max(RR_{kj})$$

onde RR_{kj} é a quantidade de chuva para o intervalo de cinco dias terminando em k dentro do período j , sendo j uma estação específica do ano ou o ano como um todo. A unidade do índice $rx5day$ é mm.

Considere a seguinte seqüência de dados diários de chuva no período j :

$$\underbrace{9.8 \ 0.0 \ 5.0 \ 10.2 \ 6.7}_{\text{I}} \ 1.0 \ 0.5 \ 13.3 \ 25.0 \dots j$$

II

a quantidade de chuva acumulada nos primeiros cinco dias foi (I) $RR_{kj}=31.7\text{mm}$ para $k=5$, o valor seguinte corresponde a (II) $RR_{kj}=22.9\text{mm}$ para $k=6$ e, assim sucessivamente. Desta forma, o índice $rx5day$ receberá o valor máximo de RR_{kj} no período j .

Considere agora uma seqüência de dados diários de chuva no período j , onde existem alguns dados faltantes ($MISSING=-99.9$):

$$\underbrace{9.8 \ -99.9 \ 5.0 \ 10.2 \ 6.7 \ 1.0}_{\text{I}} \ -99.9 \ 13.3 \ 25.0 \dots j$$

II

neste caso, (I) $RR_{kj}=32.7\text{mm}$ para $k=6$ e (II) $RR_{kj}=22.9\text{mm}$ para $k=7$, ou seja, no cálculo do índice $rx5day$ não foram considerados os dados faltantes no intervalo de cinco dias inicial.

4 – Dias secos consecutivos – cdd

Seja RR_{ij} a quantidade diária de chuva no dia i e período j . O índice de extremo climático cdd indica o número máximo de dias consecutivos em que a chuva diária foi menor que 1mm ($RR_{ij} < 1\text{mm}$) no período j . A unidade do índice cdd é dia.

Diferentemente do tratamento dado às séries temporais com valores faltantes no cálculo do índice rx5day, o critério adotado para o cálculo do índice cdd desconsidera apenas o primeiro dado faltante encontrado, ou seja,

$$0.5 \quad 0.0 \quad -99.9 \quad 0.8 \quad 0.2 \quad -99.9 \quad 2.0 \quad 0.8 \quad 1.0 \quad 0.0 \quad 0.5 \quad 0.3 \quad 0.8 \quad 0.5 \quad 23.0 \quad \dots \quad j$$

para (I) somou-se quatro dias consecutivos onde $RR_{ij} < 1\text{mm}$, que foi interrompido pelo segundo dado faltante no sexto dia; em (II) obteve-se apenas um dia; (III) contabilizou-se cinco dias com $RR_{ij} < 1\text{mm}$ e, assim sucessivamente. Desta forma, o índice cdd receberá o número máximo de dias consecutivos com $RR_{ij} < 1\text{mm}$ no período j . Portanto, o índice cdd, assim como o índice cwd (discutido a seguir), definem períodos de excessiva seca e umidade, respectivamente.

5 – Dias úmidos consecutivos – cwd

Seja RR_{ij} a quantidade diária de chuva no dia i e período j . O índice de extremo climático cwd indica o número máximo de dias consecutivos em que a chuva diária foi maior ou igual a 1mm ($RR_{ij} \geq 1\text{mm}$) no período j . A unidade do índice cwd é dia. No cálculo do índice cwd aplicou-se a mesma metodologia descrita em 4 – índice cdd para os dados faltantes.

3.3. Coeficientes de correlação e de regressão linear

O cálculo do coeficiente de correlação temporal (Costa Neto 1977), que considera a fase e a amplitude entre duas variáveis, possibilita a comparação entre as séries temporais dos índices anuais e sazonais de temperatura e chuva observados e simulados pelos modelos RegCM3 e HadAM3, assim como entre observações provenientes de diferentes fontes de informação. O coeficiente de correlação (r) pode ser visto como a razão entre a covariância de duas variáveis pelo produto dos desvios-padrão de cada uma delas, ou seja,

$$r = \frac{\sum_{t=1}^T (X_s - \bar{X}_s)(X_o - \bar{X}_o)}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (X_s - \bar{X}_s)^2 \sum_{t=1}^T (X_o - \bar{X}_o)^2}}$$

onde X é genérico para qualquer variável, o sub-índice S indica o valor simulado (X_s) e o O, o valor observado (X_o), t indica o índice do tempo, T o número total de tempos considerados e a barra superior indica a média no tempo, ou seja,

$$\bar{X} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T X_t$$

As análises também incluem estudos de tendência dos índices com a finalidade de avaliar o desempenho dos modelos em simular as tendências observadas nos extremos de temperatura e chuva na América do Sul. O grau de inclinação da reta de tendência das séries temporais dos índices anuais e sazonais de temperatura e chuva é determinado segundo o método dos mínimos quadrados (Costa Neto 1977). Os coeficientes de correlação e de regressão linear não foram calculados para as séries temporais com mais de 30% de dados faltantes no período de 1961-1990 e considerou-se somente os coeficientes diferentes de zero. Para obter a significância estatística dos coeficientes de correlação (distribuição uni-lateral) e de regressão linear (distribuição bi-lateral) aplicou-se o teste t de Student, considerando o número de graus de liberdade como o tamanho da amostra (i.e. 30 para o período de 1961-1990) (Costa Neto 1977). O nível de confiança adotado foi de 95%.

3.4. Validação da reanálise do NCEP/NCAR e da análise do BRANT

Em função da utilização dos dados de reanálise do NCEP/NCAR e da análise do BRANT na avaliação do desempenho dos modelos RegCM3 e HadAM3 no clima presente, é conveniente verificar primeiramente se os dois conjuntos de dados reproduzem adequadamente os índices anuais e sazonais de temperatura e chuva na América do Sul durante o período de 1961-1990. A metodologia adotada consiste na comparação dos índices derivados da reanálise do NCEP/NCAR e da análise do BRANT com informações das estações de superfícies, através do cálculo de coeficientes de correlação e de regressão linear. Analisou-se também a distribuição espacial de tendência dos índices anuais e sazonais de temperatura e chuva na América do Sul resultante das diferentes fontes de dados (NCEP/NCAR, BRANT, CPTEC e estações de superfície). Como os pontos de grade dos dados observados (NCEP/NCAR e BRANT) não coincidem com as coordenadas geográficas das estações, as comparações foram realizadas a partir da interpolação bi-linear dentro da grade do NCEP/NCAR e do BRANT. A Fig.2.1 ilustra a grade Gaussiana usada

na reanálise do NCEP/NCAR e na análise do BRANT e as localizações das estações utilizadas. É importante ressaltar que como os dados do BRANT foram fornecidos em uma grade com resolução $1,0^\circ \times 1,0^\circ$ de latitude-longitude e a reanálise do NCEP/NCAR possui uma resolução aproximada de $1,9^\circ \times 1,875^\circ$ de latitude-longitude, a aproximação mencionada anteriormente pode gerar erros na análise.

3.5. Validação dos modelos RegCM3 e HadAM3

A validação dos dados de reanálise do NCEP/NCAR e da análise do BRANT possibilitou o estudo da capacidade dos modelos RegCM3 e HadAM3 em reproduzirem os eventos de extremos de chuva e temperatura no clima presente (1961-1990). A comparação entre os índices anuais e sazonais de temperatura e chuva observados e simulados pelos modelos RegCM3 e HadAM3 foi feita através da análise da configuração espacial da tendência dos índices na América do Sul, particularmente ao sul de 12°S , assim como através do cálculo de coeficientes de correlação das séries temporais de médias espaciais nas quatro sub-regiões definidas na Fig. 2.2. Foi analisada também a distribuição de frequência da chuva diária e da temperatura máxima e mínima diária em intervalos de classes nas quatro sub-regiões (Fig. 2.2).

Um estudo comparativo entre as simulações dos modelos RegCM3 e HadAM3, com resolução horizontal inferior a do modelo RegCM3, irá permitir uma avaliação da melhora nas previsões climáticas, obtida através da técnica de “downscaling”.

4. Resultados – Parte I: Validação do algoritmo desenvolvido e Índices de extremos climáticos de temperatura

4.1. Validação do algoritmo desenvolvido

As Figs. 4.1 a 4.3 mostram as séries temporais dos índices anuais de temperatura (wn,cn, wd e cd) e de chuva (preptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) resultantes do algoritmo e do software RClmDex para a estação meteorológica IAC-15.

Resultados mostram que o algoritmo reproduziu os índices anuais de temperatura e de chuva coerente com o software RClmDex (Figs. 4.1 a 4.3). As pequenas diferenças na magnitude dos índices podem estar associadas aos diferentes limiares adotados para o número de dados faltantes: o algoritmo não calcula os índices anuais para anos com mais de 30% de dias com dados faltantes; e, o software RClmDex utiliza somente os anos com no máximo 15 dias de dados faltantes. Através das Figs. 4.1 a 4.3, verifica-se que os padrões de variabilidade e possíveis tendências são claramente identificados na série reproduzida pelo algoritmo.

A validação do algoritmo permitiu sua aplicação às simulações com o RegCM3 e com o HadAM3, assim como aos dados da reanálise do NCEP/NCAR e à análise do BRANT sobre a América do Sul e às 201 estações de superfície do Brasil.

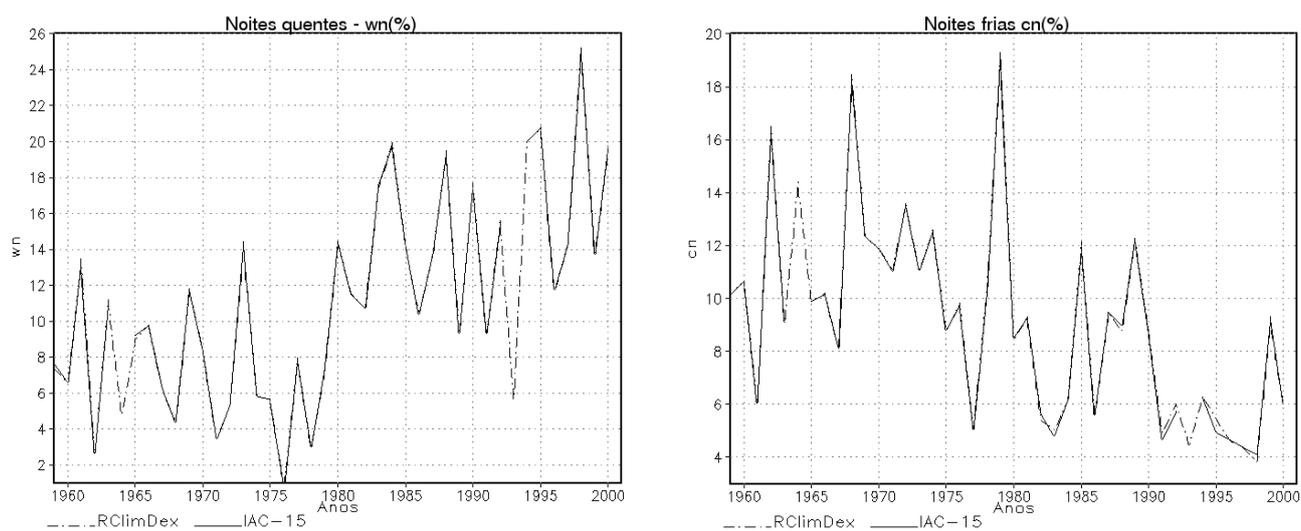


Fig. 4.1. Série temporal dos índices anuais wn (%), à esquerda, e cn (%), à direita, baseados nos dados diários de temperatura mínima, para a estação IAC-15. Cada gráfico apresenta duas curvas: algoritmo (linha contínua) e software RClmDex (linha tracejada).

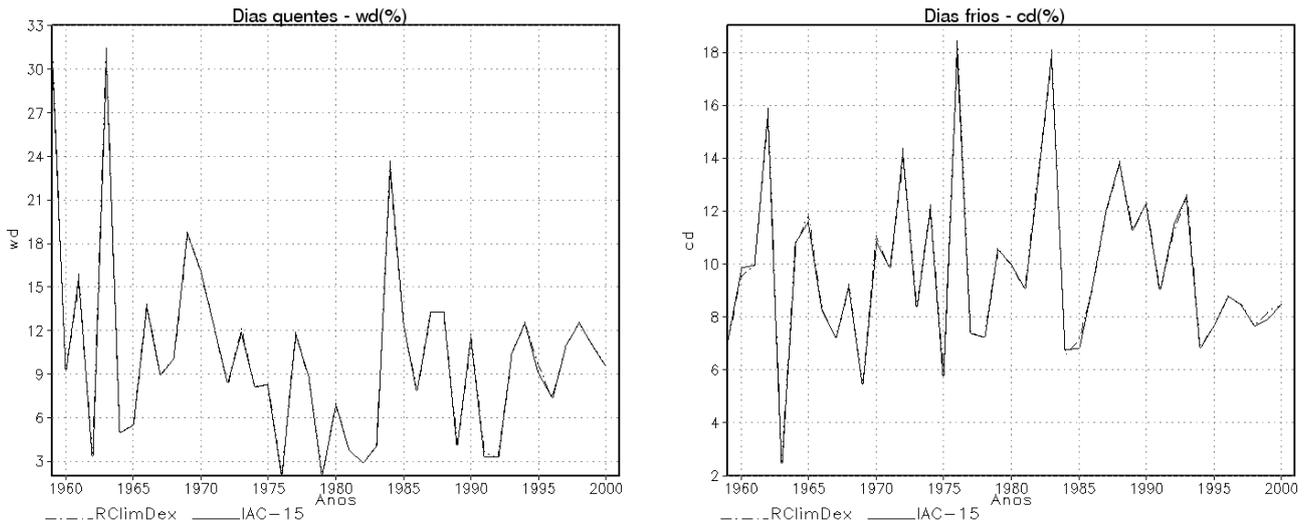


Fig. 4.2. Idem Fig. 4.1 para os índices anuais wd (%), à esquerda, e cd (%), à direita, baseados nos dados diários de temperatura máxima.

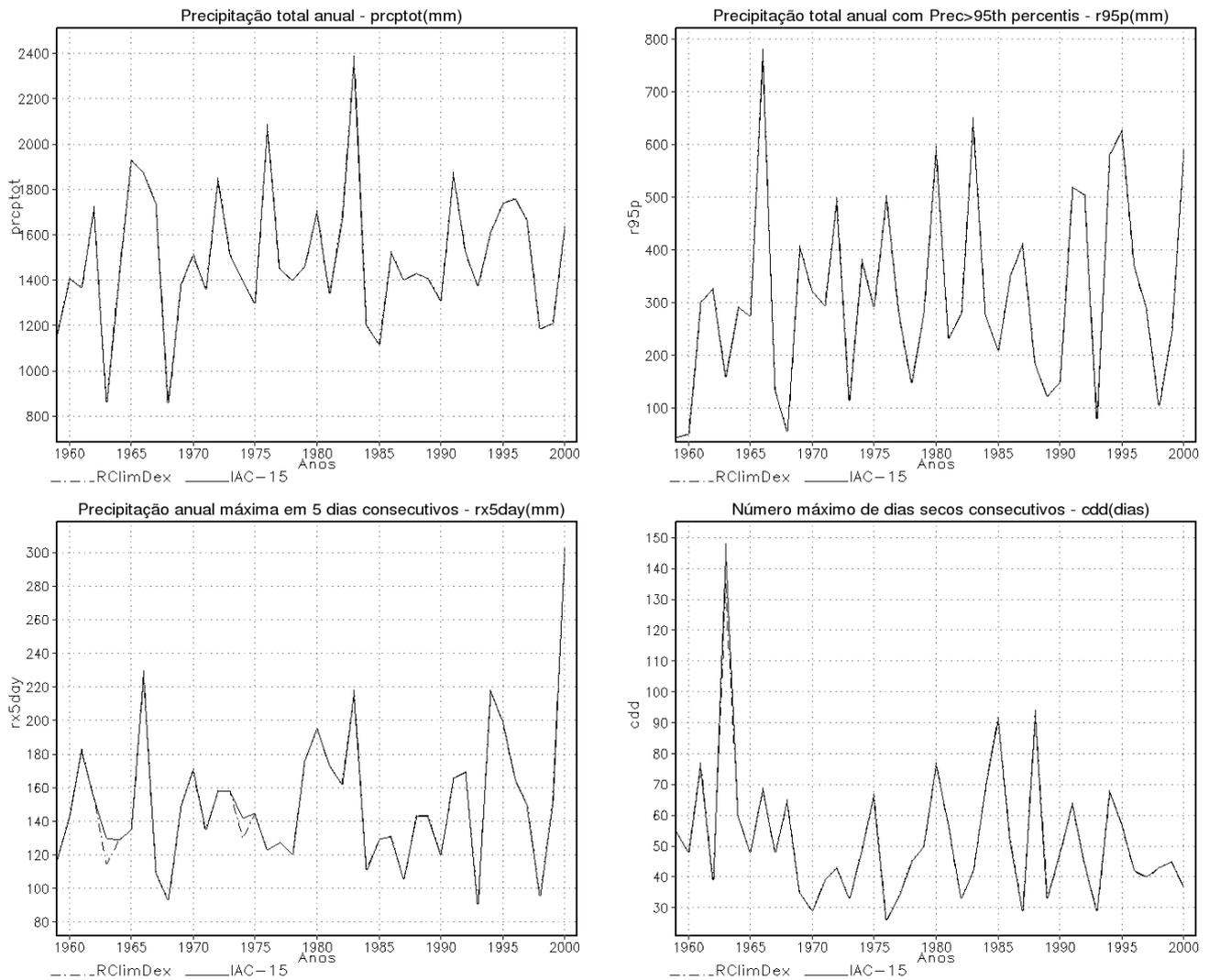


Fig. 4.3. Idem Fig. 4.1 para os índices anuais prcptot (mm), r95p (mm), rx5day (mm), cdd (dias) e cwd (dias), baseados nos dados diários de chuva.

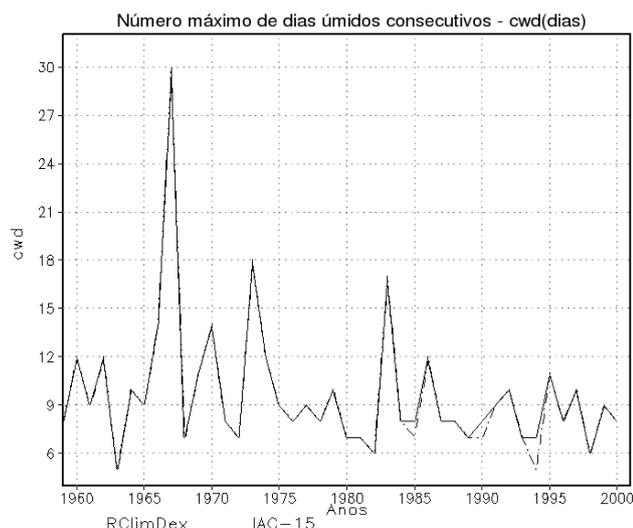


Fig. 4.3. (continuação).

4.2. Validação da reanálise do NCEP/NCAR

Esta seção, que tem como principal objetivo avaliar o desempenho da reanálise do NCEP/NCAR em estimar os índices de extremos climáticos de temperatura na América do Sul durante o período de 1961-1990, está dividida em duas partes: análise pontual e espacial, sendo que em cada uma delas desenvolve-se uma discussão anual e sazonal.

4.2.1. Análise pontual

A análise pontual consiste na validação da reanálise do NCEP/NCAR através da comparação dos seus índices anuais e sazonais de temperatura com os obtidos a partir de dados observacionais provenientes de algumas estações de superfície localizadas sobre o Brasil. A metodologia adotada consiste no cálculo de coeficientes de correlação e de regressão linear.

4.2.1.1. Coeficientes de correlação

a) Índices anuais de temperatura

A Fig 4.4 mostra a distribuição espacial dos coeficientes de correlação entre as séries temporais do índice anual de temperatura mínima, noites quentes (wn), observadas nas estações de superfície e extraídas da reanálise do NCEP/NCAR durante o período de 1961-1990. A correlação positiva é representada por '+' e a negativa por 'o', sendo os seus tamanhos proporcionais à

magnitude da correlação, conforme escala indicada nos mapas. Os símbolos em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.

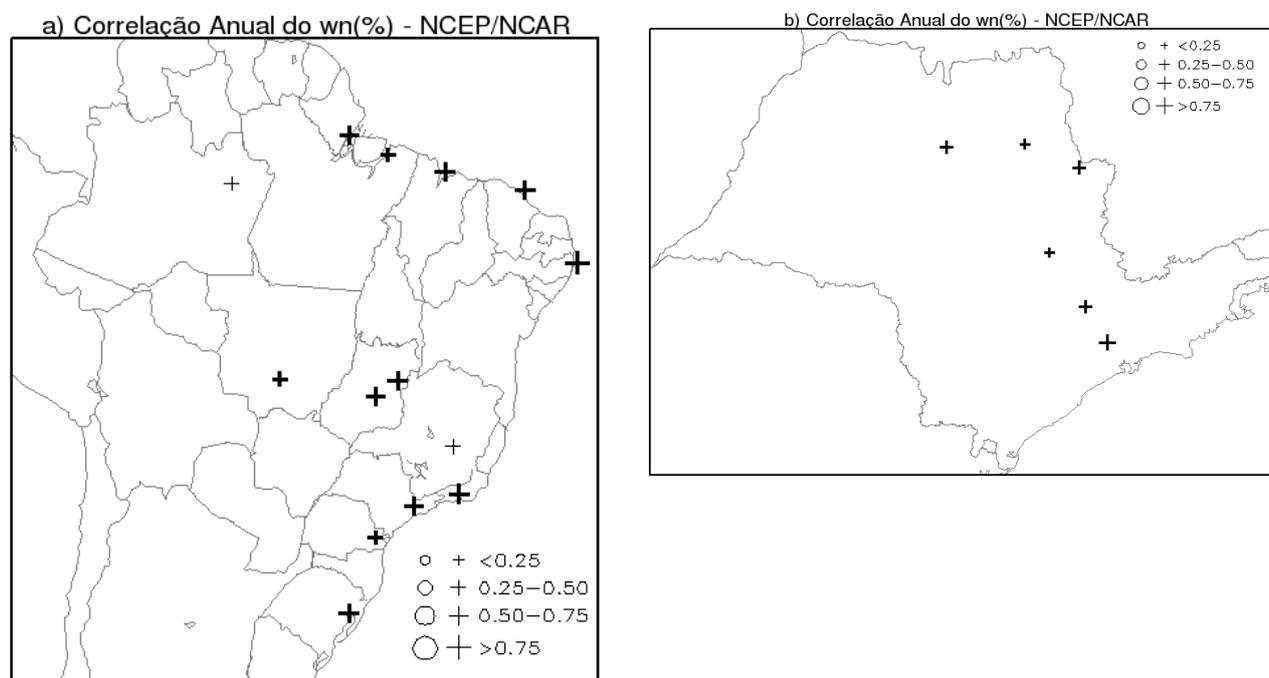


Fig. 4.4. Coeficientes de correlação entre o índice anual wn (%) observado e derivado da reanálise do NCEP/NCAR durante o período de 1961-1990 (a) sobre o Brasil e (b) o Estado de São Paulo. A correlação positiva é representada por '+' e a negativa por 'o', sendo os seus tamanhos proporcionais à magnitude da correlação, conforme escala indicada nos mapas. Os símbolos em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.

Para auxiliar na interpretação dos mapas de correlação, calculou-se o número de estações de superfície com correlação positiva/negativa estatisticamente significativa/não-significativa no nível de 5% para os índices anuais de temperatura (wn, cn, wd e cd) sobre duas regiões: o Brasil e o Estado de São Paulo. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1. Os mapas dos coeficientes de correlação entre os índices anuais de temperatura (cn, wd e cd) observados e derivados da reanálise não serão mostrados, uma vez que as informações neles contidas foram resumidas na Tabela 4.1, sendo a Fig. 4.4 apenas um demonstrativo da distribuição espacial dos coeficientes de correlação quantificados na Tabela 4.1.

Através da Tabela 4.1 e da Fig. 4.4, nota-se que a correlação entre os índices anuais de temperatura observados e provenientes da reanálise do NCEP/NCAR é positiva em todas as estações localizadas no Brasil e no Estado de São Paulo e, na sua maioria, estatisticamente significativa, com valores variando de 0.30 a 0.80, com exceção do índice noites frias (cn), que mostra uma correlação negativa não-significativa na estação situada na Amazônia.

Tabela 4.1. Número de estações de superfície com coeficientes de correlação positivos/negativos estatisticamente significativos/não-significativos no nível de 5% entre os índices anuais de temperatura (wn, cn, wd e cd) observados e derivados da reanálise no período de 1961-1990 (a) sobre o Brasil e (b) o Estado de São Paulo. O número total de estações usadas no Brasil foi 15 e, no Estado de São Paulo, 6.

Índice	a) Correlação Anual (NCEP/NCARxSTN) - Brasil			
	positiva significativa	positiva não significativa	negativa significativa	negativa não significativa
Noites quentes (wn)	13	2	0	0
Noites frias (cn)	9	5	0	1
Dias quentes (wd)	11	4	0	0
Dias frios (cd)	12	3	0	0
Índice	b) Correlação Anual (NCEP/NCARxSTN) - São Paulo			
	positiva significativa	positiva não significativa	negativa significativa	negativa não significativa
Noites quentes (wn)	6	0	0	0
Noites frias (cn)	6	0	0	0
Dias quentes (wd)	5	1	0	0
Dias frios (cd)	6	0	0	0

b) Índices sazonais de temperatura

O mesmo procedimento descrito na seção 4.2.1.1a foi utilizado para analisar os coeficientes de correlação entre as séries temporais dos índices sazonais de temperatura (wn, cn, wd e cd) observadas nas estações de superfície e extraídas da reanálise do NCEP/NCAR durante o período de 1961-1990 sobre o Brasil e o Estado de São Paulo.

Resultado semelhante ao da seção 4.2.1.1a é obtido para os índices sazonais de temperatura, indicando que a boa correlação encontrada para os índices anuais não está associada a uma ou mais estações específicas do ano. A tabela similar a Tabela 4.1 da seção 4.2.1.1a para os índices sazonais de temperatura (wn, cn, wd e cd) não será mostrada por não apresentar nenhum resultado relevante.

Os resultados apresentados nas seções 4.2.1.1a-b sugerem que os dados de temperatura da reanálise são capazes de reproduzir os índices de extremos climáticos de temperatura observados nas estações de superfície.

4.2.1.2. Coeficientes de regressão linear

a) Índices anuais de temperatura

As Figs. 4.5 a 4.8 mostram os mapas de tendência para os índices anuais de temperatura (noites quentes - wn, noites frias - cn, dias quentes - wd e dias frios - cd) durante o período de 1961-1990 obtidos a partir da (a) reanálise do NCEP/NCAR e (b) análise do CPTEC (1959-2000) sobre a América do Sul, (c) estações de superfície no Brasil e (d) no Estado de São Paulo. Para

auxiliar na comparação dessas figuras, a Tabela 4.2 mostra o número de estações de superfície onde sinal da tendência dos índices anuais de temperatura (wn, cn, wd e cd) concorda com o extraído da interpolação bi-linear dentro da grade da reanálise do NCEP/NCAR nas duas regiões de estudo: Brasil e Estado de São Paulo. A concordância entre o sinal da tendência observado e da reanálise é representada por ‘ Δ ’ ou ‘ \blacktriangle ’ e, os sinais de tendência opostos, por ‘ \circ ’ ou ‘ \bullet ’. Os símbolos abertos indicam igual significância estatística (sim x sim ou não x não, sendo sim – significativo e não – não significativo) e, os fechados, significância estatística oposta (sim x não ou não x sim).

Em geral, os índices anuais noites quentes (wn) e noites frias (cn), baseados nos dados diários de temperatura mínima, apresentam uma melhor concordância dos sinais de tendência entre observação e reanálise no Estado de São Paulo (em 100% das estações – Tabela 4.2b) em relação aos índices baseados nos dados diários de temperatura máxima, com resultados satisfatórios em apenas 50% (índice cd) e 33% (índice wd) das estações (Tabela 4.2b). Analisando a Tabela 4.2a, em média, 70% das estações de superfície do Brasil tiveram as tendências dos índices anuais de temperatura bem representadas pela reanálise, chegando a 80% para o índice wn.

Tabela 4.2. Número de estações de superfície onde sinal da tendência dos índices anuais de temperatura (wn, cn, wd e cd) no período de 1961-1990 concorda com a reanálise do NCEP/NCAR (a) sobre o Brasil e (b) o Estado de São Paulo. A concordância entre o sinal da tendência observado e da reanálise é representada por ‘ Δ ’ ou ‘ \blacktriangle ’ e, os sinais de tendência opostos, por ‘ \circ ’ ou ‘ \bullet ’. Os símbolos abertos indicam igual significância estatística e, os fechados, significância estatística oposta. O número total de estações usadas no Brasil foi 15 e, no Estado de São Paulo, 6.

Índice	a) Tendência Anual (NCEP/NCARxSTN) - Brasil			
	Δ	\blacktriangle	\circ	\bullet
Noites quentes (wn)	3	9	1	2
Noites frias (cn)	3	7	4	1
Dias quentes (wd)	7	4	2	2
Dias frios (cd)	4	5	4	2
Índice	b) Tendência Anual (NCEP/NCARxSTN) - São Paulo			
	Δ	\blacktriangle	\circ	\bullet
Noites quentes (wn)	1	5	0	0
Noites frias (cn)	5	1	0	0
Dias quentes (wd)	0	2	1	3
Dias frios (cd)	0	3	1	2

b) Índices sazonais de temperatura

As Figs. 4.9 a 4.12 mostram os mapas de tendência para os índices sazonais de temperatura (noites quentes - wn, noites frias - cn, dias quentes - wd e dias frios - cd) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 obtidos a partir da reanálise do NCEP/NCAR, com as seguintes composições sazonais: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d)

primavera (SON). A comparação entre os sinais da tendência dos índices sazonais de temperatura observados e da reanálise do NCEP/NCAR foi resumida na Tabela 4.3, seguindo os mesmo critérios adotados na análise anual (seção 4.2.1.2a).

Tabela 4.3. Idem Tabela 4.2 para os índices sazonais de temperatura.

Índice		a) Tendência Sazonal (NCEP/NCARxSTN) - Brasil			
		Δ	▲	○	●
Noites quentes (wn)	verão	6	6	1	1
	outono	2	13	0	0
	inverno	5	9	0	1
	primavera	2	7	1	4
Noites frias (cn)	verão	9	5	0	0
	outono	4	7	4	0
	inverno	5	2	5	3
	primavera	2	7	3	2
Dias quentes (wd)	verão	4	3	1	4
	outono	4	5	4	1
	inverno	2	4	2	5
	primavera	6	3	0	5
Dias frios (cd)	verão	6	3	2	1
	outono	7	3	2	2
	inverno	6	4	2	2
	primavera	2	3	4	5

Índice		b) Tendência Sazonal (NCEP/NCARxSTN) - São Paulo			
		Δ	▲	○	●
Noites quentes (wn)	verão	3	2	1	0
	outono	0	6	0	0
	inverno	4	2	0	0
	primavera	1	1	0	4
Noites frias (cn)	verão	5	1	0	0
	outono	2	4	0	0
	inverno	3	2	0	1
	primavera	0	3	2	1
Dias quentes (wd)	verão	0	1	3	2
	outono	2	1	0	3
	inverno	1	2	1	2
	primavera	0	2	1	3
Dias frios (cd)	verão	3	0	1	2
	outono	0	2	2	2
	inverno	1	5	0	0
	primavera	0	3	0	3

No Brasil (Tabela 4.3a), destacam-se o índice noites quentes (wn) nas quatro estações do ano, exceto na primavera, e o índice noites frias (cn) no verão, cujas tendências foram bem representadas pela reanálise em praticamente todas as estações de superfície estudadas. Os resultados menos satisfatórios são encontrados para o índice dias frios (cd) na primavera, seguido pelos índices dias quentes (wd) nas estações extremas e cn no inverno (Tabela 4.3a). Quando se considera apenas o Estado de São Paulo (Tabela 4.3b), além dos bons resultados mencionados na análise do Brasil, incluem-se as tendências dos índices cd e cn no inverno e, no outono, para o último. Já o resultado menos consistente foi identificado no verão para o índice wd (Tabela 4.3b).

Para a maioria dos índices anuais e sazonais de temperatura, os resultados da tendência, discutidos nas seções 4.2.1.2a-b, foram inferiores aos apresentados na correlação discutida nas seções 4.2.1.1a-b tanto para o Brasil quanto para o Estado de São Paulo.

4.2.2. Análise espacial

Através das Figs. 4.5 a 4.12, foram identificadas algumas regiões com padrões espaciais similares de tendência dos índices anuais e sazonais de temperatura (descritas a seguir) e chuva (descritas na seção 5) entre os mapas da reanálise do NCEP/NCAR, análise do BRANT, análise do CPTEC e das observações em estações de superfície sobre a América do Sul.

Nesta seção e na seção 5.1.2 consideraram-se os recentes estudos observacionais de extremos de temperatura e chuva desenvolvidos por Vincent et al. (2005), Haylock et al. (2006), Alexander et al. (2006) entre outros. Como os trabalhos de Vincent et al. (2005) e de Haylock et al. (2006) são mais direcionados para a América do Sul e o trabalho de Alexander et al. (2006) estuda o globo como um todo, priorizou-se os resultados de Vincent et al. (2005) e de Haylock et al. (2006).

As figuras que se encontram nos Apêndices A e B serão identificadas pelas letras “A” e “B”, respectivamente, no final da referência das mesmas.

a) Índices anuais de temperatura

De acordo com o trabalho de Vincent et al. (2005), as Figs. 4.5a-d mostram o predomínio de tendências positivas significativas do índice wn (noites quentes) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990, indicando um aumento expressivo de noites quentes no continente, particularmente ao sul de 12°S. Um padrão inverso é encontrado para o índice anual noites frias (cn) (Fig. 4.6a), com tendências negativas sobre o Brasil, destacando-se o sul e partes do sudeste, consistentes com as Figs. 4.6b-d e os resultados encontrados por Vincent et al. (2005). Por outro lado, as tendências positivas observadas sobre o Uruguai (Figs. 4.6a-b) e o sul do Paraguai (Fig. 4.6b) são opostas às de Vincent et al. (2005). Os referidos resultados sugerem mudanças significativas nos extremos da temperatura mínima. Sobre a região central e norte da Argentina, incluindo partes do Chile, Rusticucci e Barrucand (2004) identificaram um forte aquecimento da temperatura mínima como consequência do aumento de noites quentes e diminuição de noites frias no período de 1960-2000. Este resultado concorda com o mapa de tendência do índice anual cn

(noites frias) obtido a partir da análise do CPTEC (Fig. 4.6b) e com Vincent et al. (2005), porém não está de acordo com o mapa referente à reanálise do NCEP/NCAR (Fig. 4.6a).

Rusticucci e Barrucand (2004) observaram uma diminuição dos dias quentes sobre a região central e norte da Argentina, incluindo partes do Chile, estando de acordo com o mapa de tendência do índice anual dias quentes (wd) obtido a partir da análise do CPTEC (Fig. 4.7b) e com Vincent et al. (2005), porém este resultado não concorda com o mapa referente à reanálise do NCEP/NCAR (Fig. 4.7a). Ainda que a configuração espacial de tendência do índice anual wd na região central e norte da Argentina seja oposta entre as Figs. 4.7a e 4.7b, verifica-se alguns padrões similares de tendência em outras regiões, como a tendência positiva observada no Estado do Rio Grande do Sul, no Uruguai, no Paraguai e em parte do sudeste do Brasil, que são consistentes com o trabalho de Vincent et al. (2005). Para o índice anual dias frios (cd), nota-se claramente algumas diferenças nas distribuições espaciais de tendência entre os resultados das Figs. 4.8a-d e os obtidos por Vincent et al. (2005), com exceção do sul do Chile, sul da Argentina e parte do sul e do nordeste do Brasil, indicando a existência de um sinal não consistente e não homogêneo. Desta forma, não é seguro afirmar que esteja ocorrendo mudanças nos extremos da temperatura máxima.

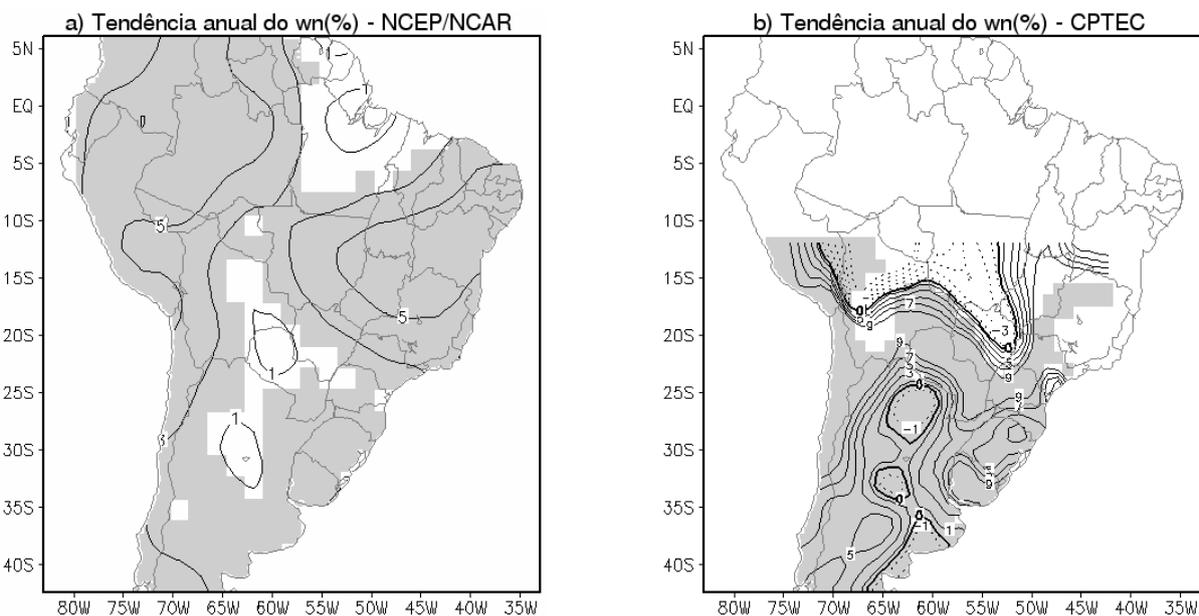


Fig. 4.5. Tendência do índice anual wn (%) durante o período de 1961-1990 obtida a partir da (a) renálise do NCEP/NCAR, (b) análise do CPTEC (1959-2000) sobre a América do Sul, (c) estações de superfície no Brasil e (d) no Estado de São Paulo. (a-b) O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados. (c-d) A tendência positiva é representada por '+' e a negativa por 'o', sendo os seus tamanhos proporcionais à magnitude da tendência, conforme escala indicada nos mapas. Os símbolos em negrito indicam tendência estatisticamente significativa no nível de 5%.

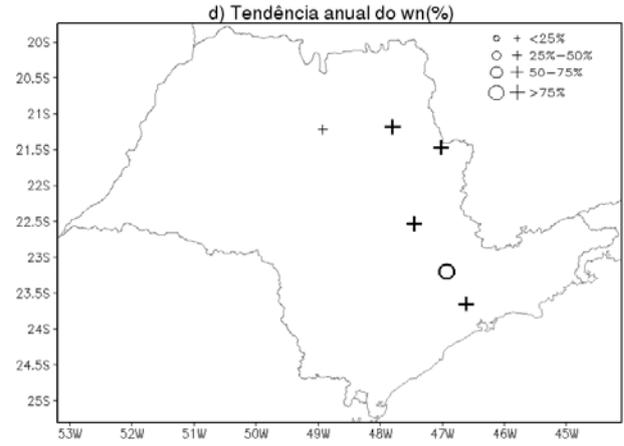
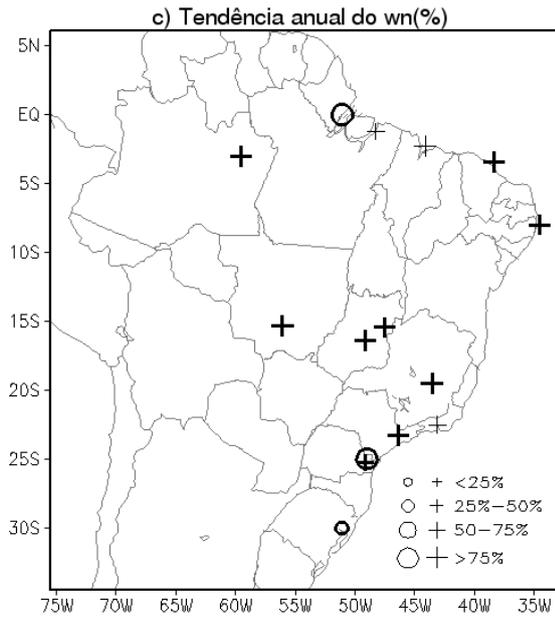


Fig. 4.5. (continuação).

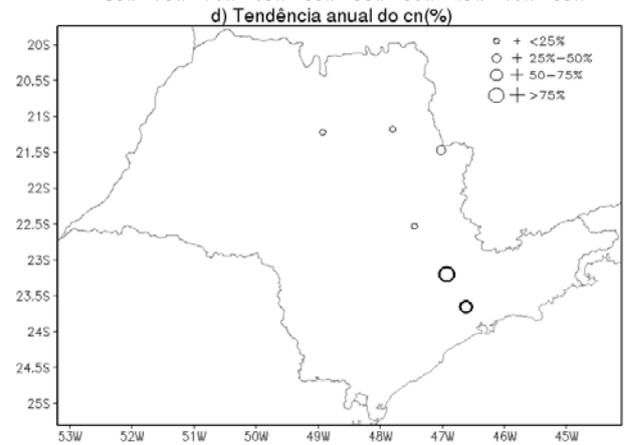
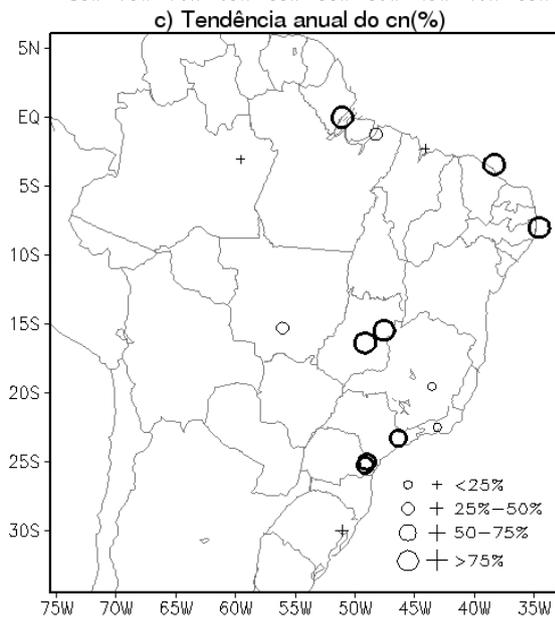
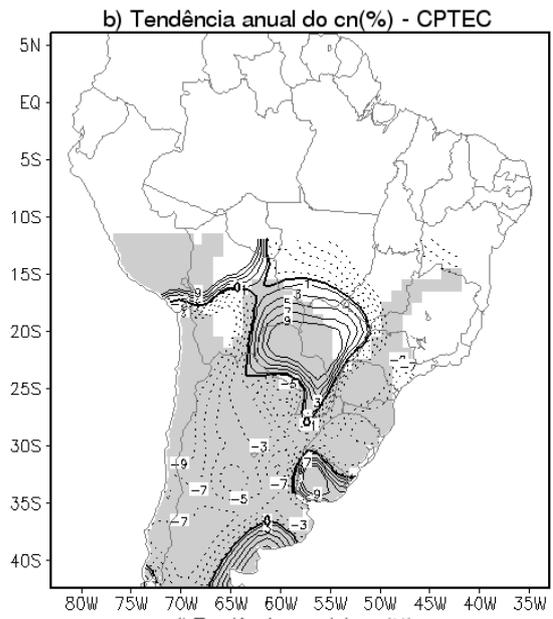
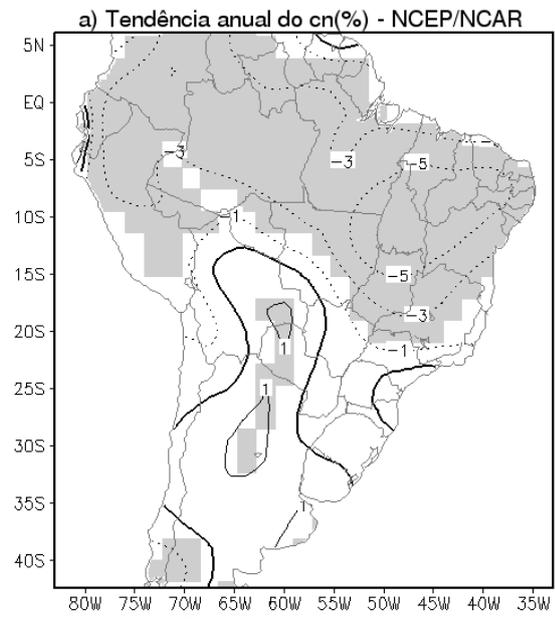


Fig. 4.6. Idem Fig. 4.5 para o índice anual cn (%).

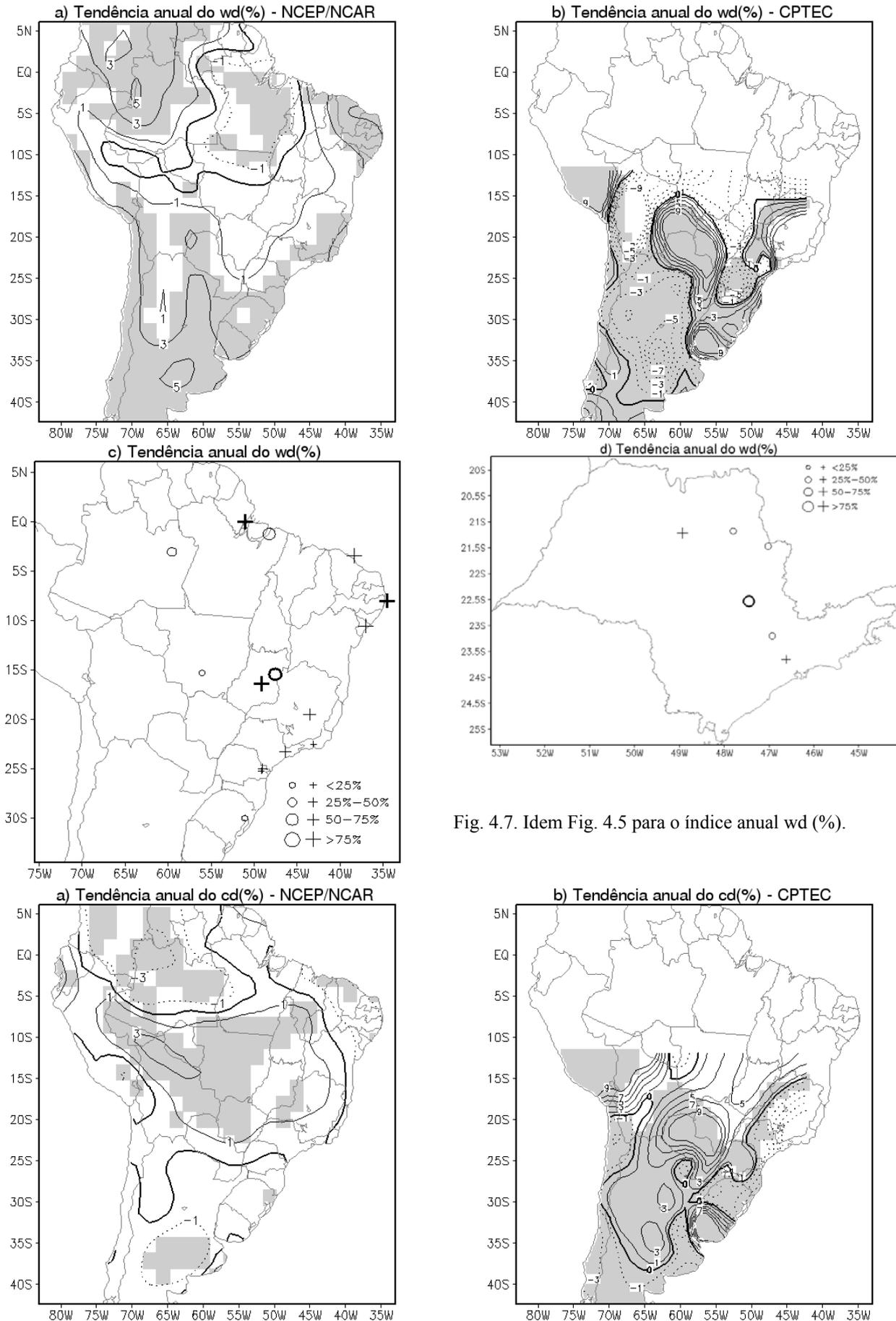


Fig. 4.7. Idem Fig. 4.5 para o índice anual wd (%).

Fig. 4.8. Idem Fig. 4.5 para o índice anual cd (%).

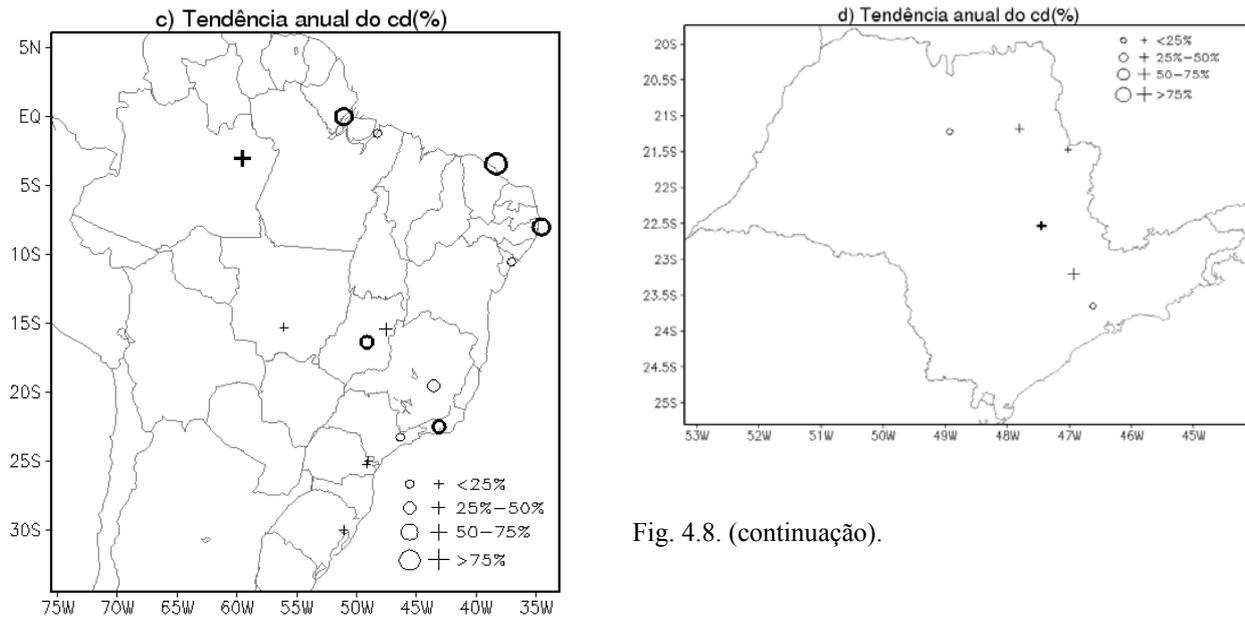


Fig. 4.8. (continuação).

b) Índices sazonais de temperatura

De acordo com o trabalho de Vincent et al. (2005), o aumento de noites quentes e a diminuição de noites frias na América do Sul identificado através dos índices anuais *wn* e *cn*, respectivamente, na seção 4.2.2a, é atribuído, principalmente, às estações de verão e outono. Sobre a mesma região, Alexander et al. (2005) concluíram que o aquecimento observado durante o período de 1951-2003 ocorre nas quatro estações do ano, sendo mais pronunciado nas estações de verão e outono. Por outro lado, Vincent et al. (2005) mostra um número pequeno de estações de superfície com tendências significativas dos índices sazonais baseados nos dados diários de temperatura máxima (dias quentes - *wd* e dias frios - *cd*). Entretanto, o trabalho não fornece detalhes do sinal das tendências não-significativas dos índices sazonais (*wn*, *cn*, *wd* e *cd*) e de suas respectivas distribuições espaciais, com exceção apenas do índice noites quentes (*wn*). Desta forma, os mapas de tendência dos índices sazonais de temperatura máxima (Figs. 4.11 e 4.12a-d) serão analisados de acordo com a validação realizada na seção 4.2.1.2b e, comparando-os com os padrões espaciais obtidos na análise anual (seção 4.2.2a).

Através dos mapas de tendência do índice *wn* (noites quentes) para as quatro estações do ano (Figs. 4.9a-d) obtidos a partir da reanálise do NCEP/NCAR no período de 1961-1990, verifica-se a existência de baixa variabilidade sazonal, com uma configuração espacial bastante similar à análise anual (Fig. 4.5a), especialmente nas estações de verão e outono (Figs. 4.9a e 4.9c), sendo a maior diferença detectada na primavera (Fig. 4.9d). Este resultado concorda com o trabalho de Vincent et al. (2005). Pequenas diferenças são observadas na primavera e nas estações extremas,

como as tendências negativas do índice no verão sobre a região mais ao norte da Argentina (Vincent et al. 2005), não detectadas pela reanálise (Fig. 4.9a).

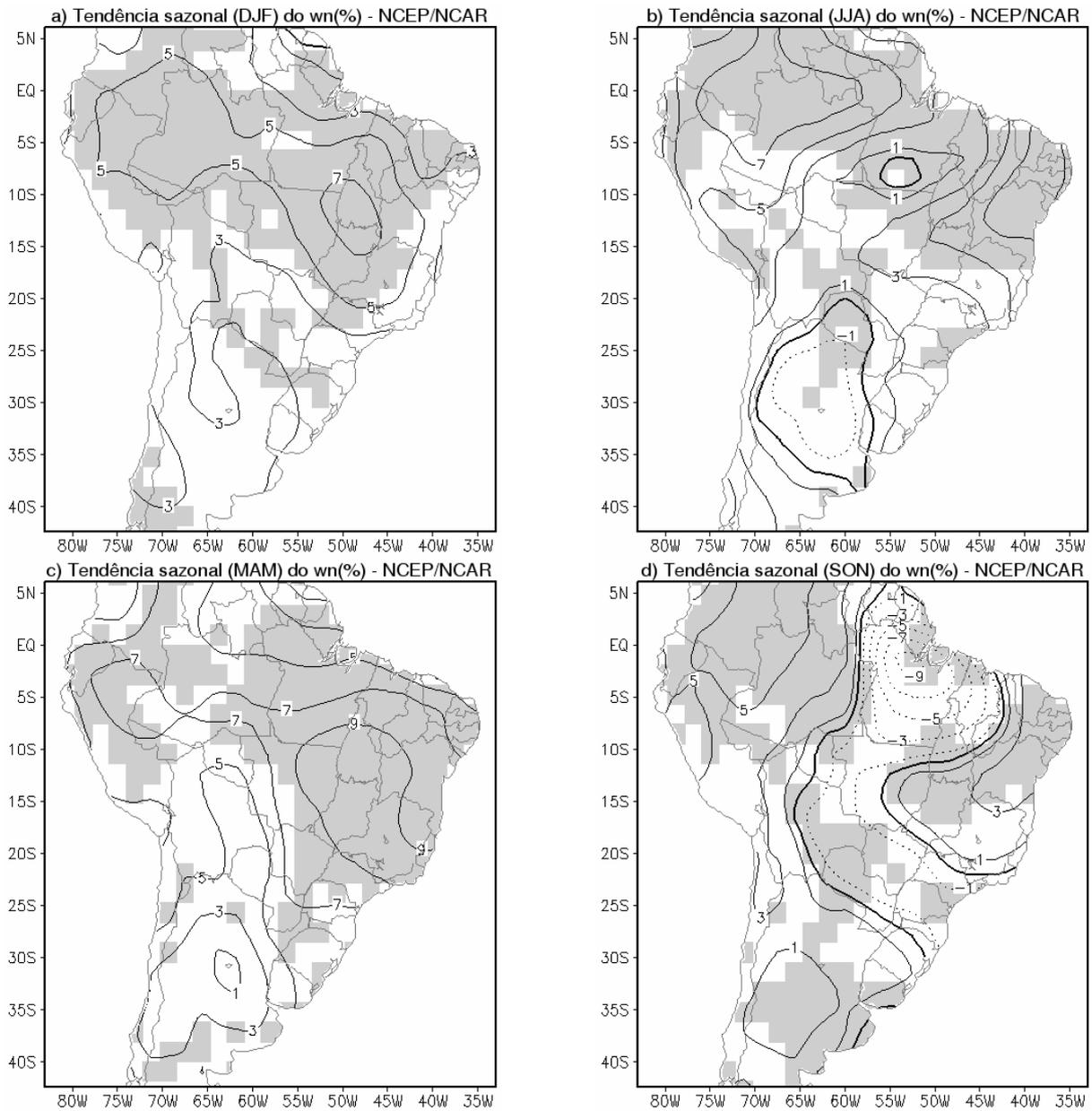


Fig. 4.9. Tendência do índice sazonal wn (%) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 obtida a partir da reanálise do NCEP/NCAR: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

De forma geral, a distribuição espacial de tendência dos demais índices sazonais (cn, wd e cd) derivada da reanálise do NCEP/NCAR (Figs. 4.10 a 4.12a-d) pode ser dividida em dois grupos: o primeiro formado pelo verão e outono e, o segundo, pelo inverno e primavera. O agrupamento baseou-se nos padrões semelhantes de tendência e, os grupos são caracterizados por tendências

praticamente opostas. Este resultado não está completamente de acordo com obtido por Alexander et al. (2005), mencionado acima.

Diferentemente do mapa de tendência do índice anual cn (noites frias) (Fig. 4.6a), o primeiro grupo (Figs. 4.10a e 4.10c) mostra o predomínio de tendências negativas do índice na América do Sul, inclusive sobre toda a Argentina, o Chile, o Uruguai, o Paraguai e a Bolívia, concordando, assim, com a análise sazonal realizada por Vincent et al. (2005) e aproximando-se da configuração anual do CPTEC (Fig. 4.6b). Já o segundo grupo (Figs. 4.10b e 4.10d) é marcado por um padrão de tendências negativas do índice no centro norte do continente e, positivas, no centro sul, que se assemelha ao obtido na análise anual (Fig. 4.6a).

De acordo com a seção 4.2.1.2b, para o índice sazonal wd (dias quentes), destacaram-se apenas as estações de transição no Brasil, com concordância dos sinais de tendência entre observação e reanálise em 64.3% das estações de superfície e, as estações de outono e inverno no Estado de São Paulo, com 50%. Diante destas limitações, verificamos que as tendências negativas do índice anual wd (dias quentes) (Fig. 4.7b) sobre a região central e norte da Argentina, incluindo partes do Chile, não foram detectadas por nenhuma das quatro estações do ano (Figs. 4.11a-d), sendo o inverno (Fig. 4.11b) a estação que mais se aproximou de tal configuração. Por outro lado, para as demais regiões, o mapa de tendência do índice sazonal wd que mais se assemelha ao da análise anual do CPTEC (Fig. 4.7b) corresponde à estação da primavera (Fig. 4.11d).

Através da análise sazonal do índice cd (dias frios) na seção 4.2.1.2b, nota-se que, em média, 70% das estações de superfície no Brasil tiveram a tendência do índice bem representada pela reanálise do NCEP/NCAR nas estações extremas e no outono, com destaque para o inverno sobre o Estado de São Paulo. O primeiro grupo (verão e outono) (Figs. 4.12a e 4.12c) é marcado por uma predominante tendência negativa do índice cd na América do Sul, com tendências positivas em algumas regiões isoladas. O mapa de tendência do índice sazonal cd (dias frios) que mais se aproxima da configuração anual obtida a partir da reanálise do NCEP/NCAR (Fig. 4.8a) e da análise do CPTEC (Fig. 4.8b) corresponde à estação de inverno (Fig. 4.12b).

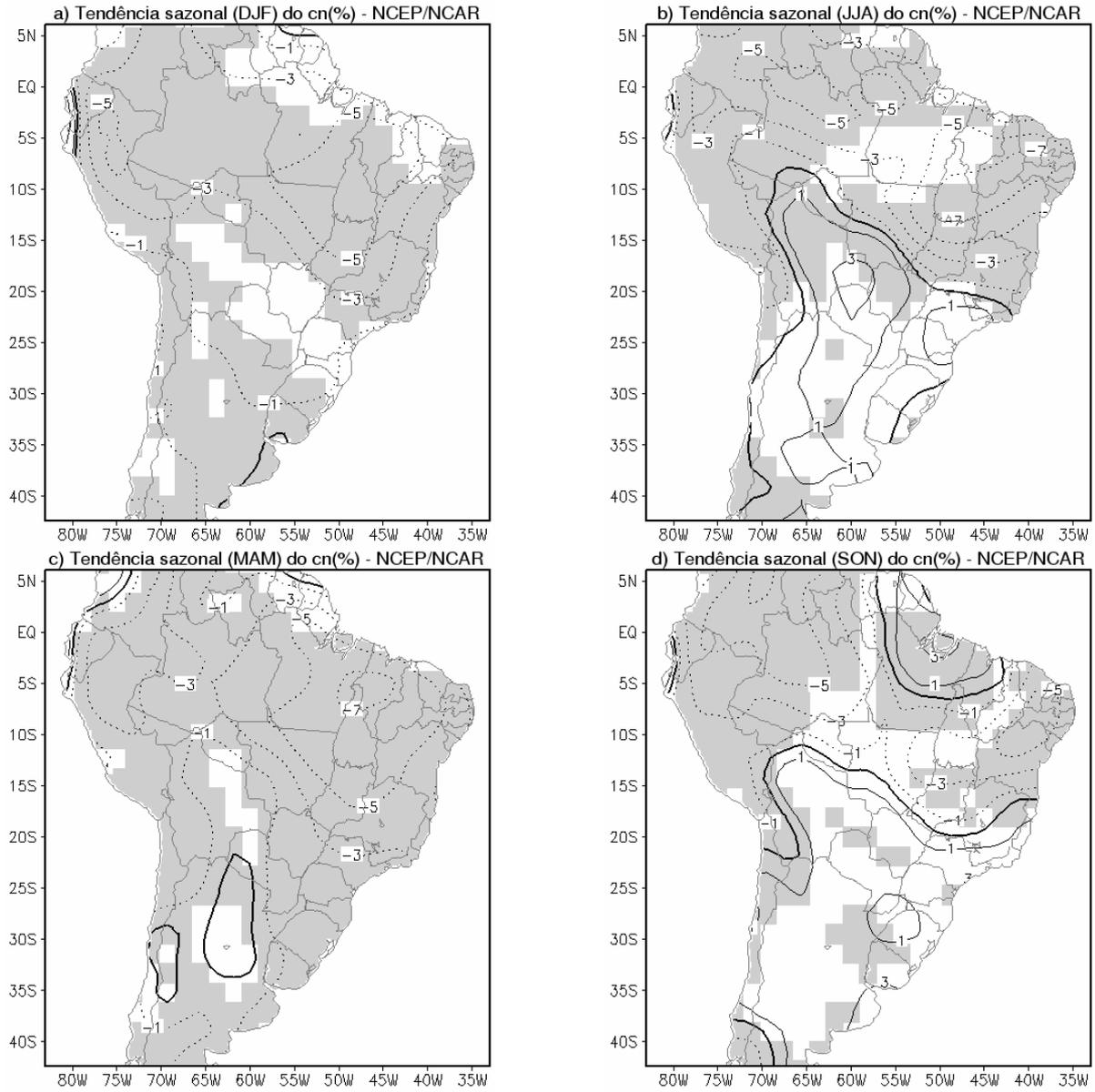


Fig. 4.10. Idem Fig. 4.9 para o índice sazonal cn (%).

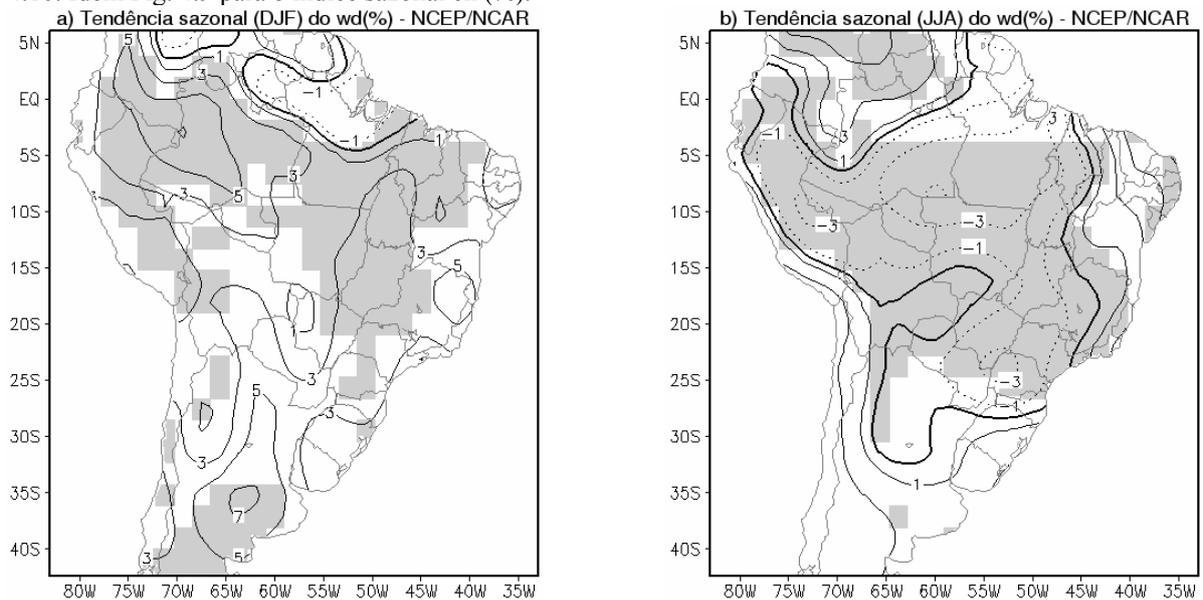


Fig. 4.11. Idem Fig. 4.9 para o índice sazonal wd (%).

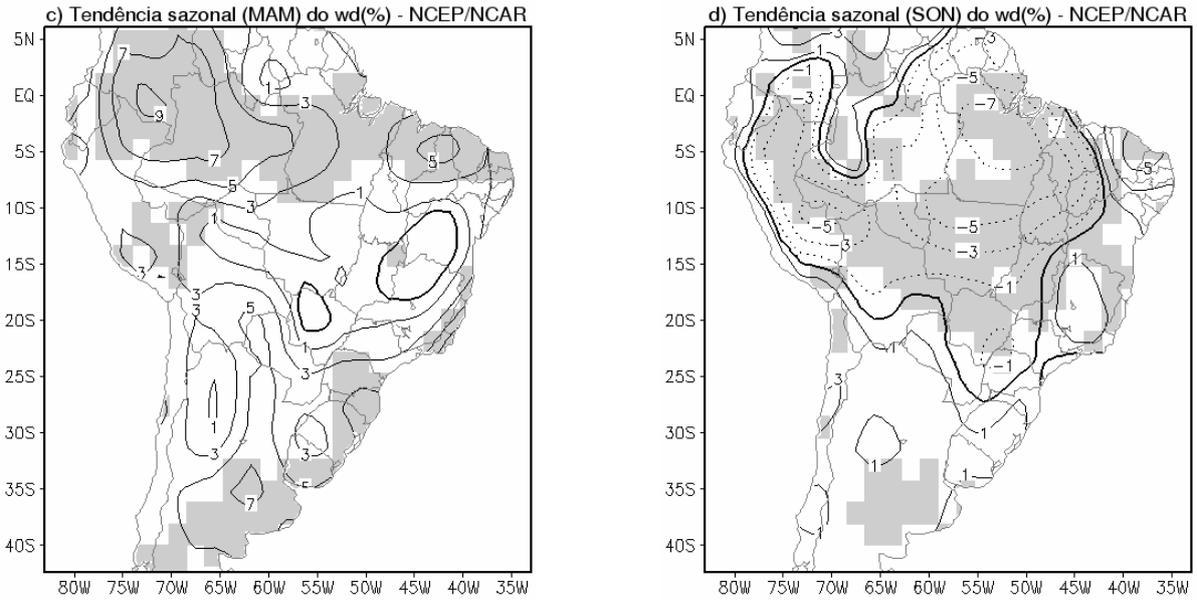


Fig. 4.11. (continuação).

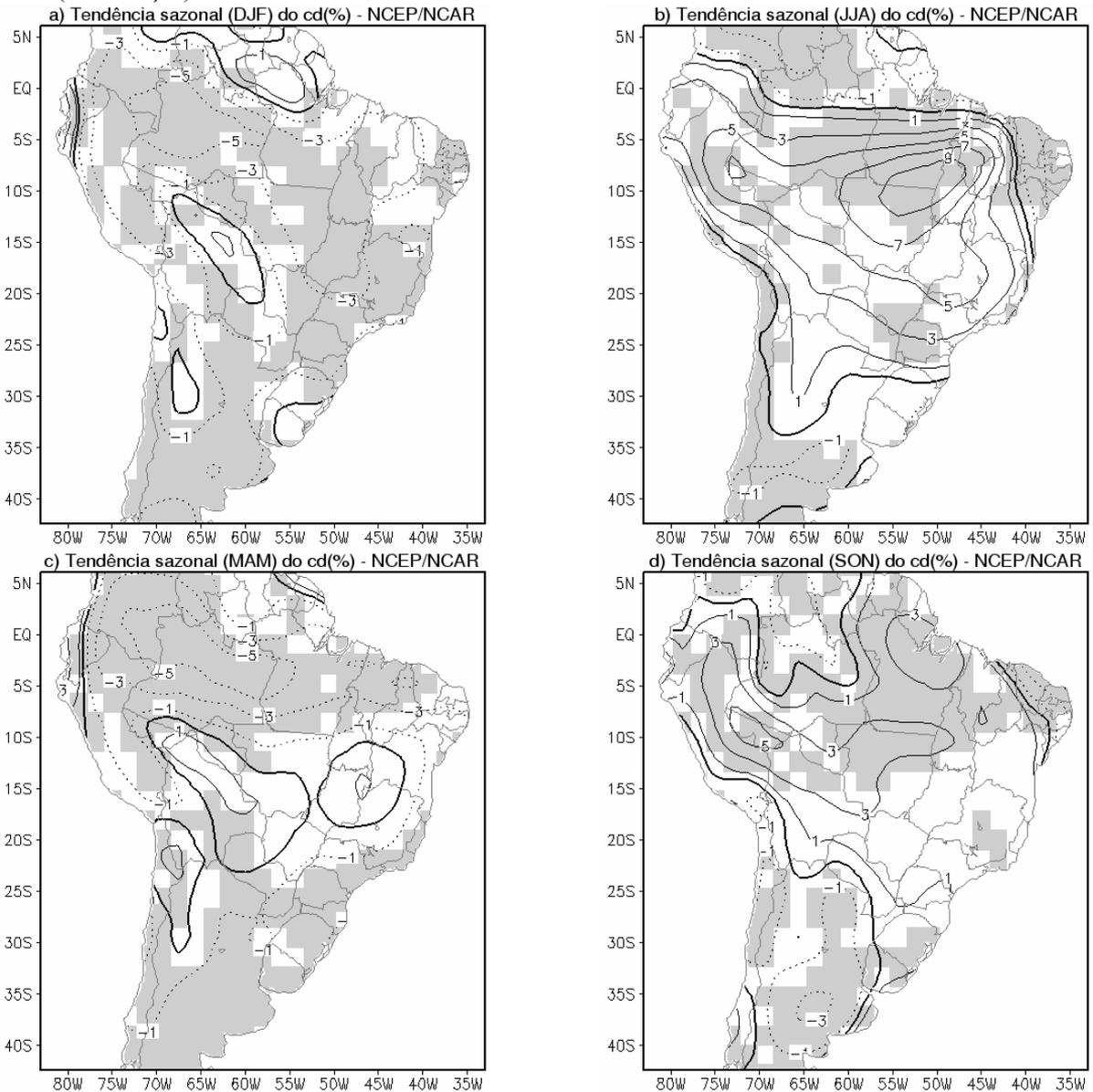


Fig. 4.12. Idem Fig. 4.9 para o índice sazonal cd (%).

c) Discussão

De acordo com as seções 4.2.1 e 4.2.2a-b, os dados de temperatura mínima e máxima da reanálise do NCEP/NCAR podem ser considerados válidos para representar os índices anuais e sazonais de extremos climáticos observados na América do Sul no clima presente (1961-1990), principalmente os índices noites quentes (wn) e noites frias (cn), baseados nos dados diários de temperatura mínima. Embora sobre a região mais ao norte do continente, abrangendo o nordeste e norte do Brasil e se estendendo até a Colômbia e a Venezuela, a falta de informação meteorológica no período de 1961-1990 dificulta a validação da reanálise do NCEP/NCAR, o prosseguimento do trabalho nestas áreas pode ser considerado válido, uma vez que representou de forma satisfatória os índices anuais e sazonais de temperatura nas demais regiões estudadas (ver seções 4.2.2a-b).

Como a reanálise do NCEP/NCAR não reproduziu o sinal das tendências dos índices anuais de temperatura (cn, wd e cd) sobre a região central e norte da Argentina, incluindo partes do Chile, como visto na seção 4.2.2a, não é seguro avaliar a capacidade dos modelos RegCM3 e HadAM3 em simular tais índices nesta região através deste conjunto de dados. Este resultado é um indicativo da dificuldade dos dados de temperatura da reanálise em reproduzir algumas características regionais identificadas através das tendências dos índices de temperatura na análise do CPTEC e no trabalho de Vincent et al. (2005), que pode estar relacionada com a baixa resolução dos dados da reanálise do NCEP/NCAR.

Conforme visto na seção 4.2.2b, a falta de estudos publicados na literatura nacional e internacional sobre as tendências dos índices sazonais de temperatura máxima (wd e cd), assim como a consistência de moderada a fraca dos sinais de tendência da reanálise do NCEP/NCAR com as observações nas estações de superfície (ver seção 4.2.1.2b), diminuem a confiabilidade da validação dos mapas de tendência dos índices sazonais wd (dias quentes) e cd (dias frios) obtidos a partir da reanálise do NCEP/NCAR (Figs. 4.11 e 4.12a-d) e, conseqüentemente, dificultam a análise do desempenho dos modelos RegCM3 e HadAM3 em simular tais índices. Entretanto, como o Brasil está representado por apenas 15 estações de superfície e, o Estado de São Paulo, por apenas 6 (especialmente mal distribuídas), os resultados da seção 4.2.1.2b são somente um indicativo da dificuldade da reanálise em reproduzir as tendências dos índices sazonais de temperatura máxima (wd e cd). Portanto, nas seções que seguem será discutido o comportamento dos quatro índices sazonais de temperatura, respeitando as limitações discutidas na seção 4.2.1.2b.

4.3. Simulado versus observado

As quatro sub-regiões (AM, NE, SDE e SUL), Fig. 2.2, foram selecionadas para examinar a habilidade dos modelos RegCM3 e HadAM3 em simular os dados diários de temperatura máxima e mínima e de chuva no clima presente (1961-1990), assim como seus respectivos índices anuais e sazonais de extremos climáticos, possibilitando uma análise mais regional. O estudo em sub-regiões é discutido nas seções 4.3.1 (Distribuição de frequência) e 4.3.2 (Coeficientes de correlação na área). Uma análise espacial das tendências dos índices é apresentada na seção 4.3.3. Nas seções 4.3.2 e 4.3.3, realiza-se uma abordagem anual e sazonal.

4.3.1. Distribuição de frequência

As Figs. 4.13 e 4.14 mostram as distribuições de frequência da temperatura máxima e mínima diária observada (NCEP/NCAR) e simulada (RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3) em intervalos de classe nas quatro sub-regiões (AM, NE, SDE e SUL) durante o período de 1961-1990.

Para a temperatura mínima diária (Fig. 4.13), as quatro simulações (RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3) representaram bem a distribuição de frequência observada nas quatro sub-regiões, com valores de coeficientes de correlação estatisticamente significativos no nível de 5% superiores a 0.95, com exceção da simulação do RegCM3(s3) nas sub-regiões AM e NE, cujos valores são de 0.67 e 0.68, respectivamente. Este resultado ocorreu porque o máximo da distribuição de frequência da simulação do RegCM3(s3) estava incorretamente estimado e deslocado para a esquerda nas sub-regiões AM e NE (Fig.4.13).

Na sub-região NE (Fig. 4.14), as simulações do RegCM3(s1, s2, s3) para a temperatura máxima diária mostram uma distribuição bimodal e, embora a simulação do HadAM3 mostre apenas um máximo, este se encontra subestimado e deslocado para a direita. Resultado semelhante ocorre na sub-região AM (Fig. 4.14), com uma distribuição bimodal bem caracterizada pela simulação do RegCM3(s2) e outra unimodal da simulação do HadAM3, com o máximo superestimado e também deslocado para a direita. Este resultado se reflete nos coeficientes de correlação, que apresentam valores significativos variando de 0.66 a 0.88. Nas demais sub-regiões (SDE e SUL – Fig. 4.14), o resultado mais discrepante ocorre na simulação do RegCM3(s2) na sub-região SUL, com coeficiente de correlação de 0.84.

De forma geral, os modelos RegCM3 e HadAM3 capturaram a tendência central, a forma e a variabilidade das distribuições de frequência da temperatura mínima (Fig. 4.13) e máxima (Fig. 4.14) nas sub-regiões. Em particular, os modelos reproduziram satisfatoriamente a distribuição

assimétrica com concentração à direita da temperatura mínima na sub-região SUL (Fig. 4.13) e as distribuições simétricas nas sub-regiões AM (Fig. 4.13), com baixa dispersão dos dados de temperatura mínima em relação ao valor central, e SUL (Fig. 4.14), com grande dispersão dos dados de temperatura máxima.

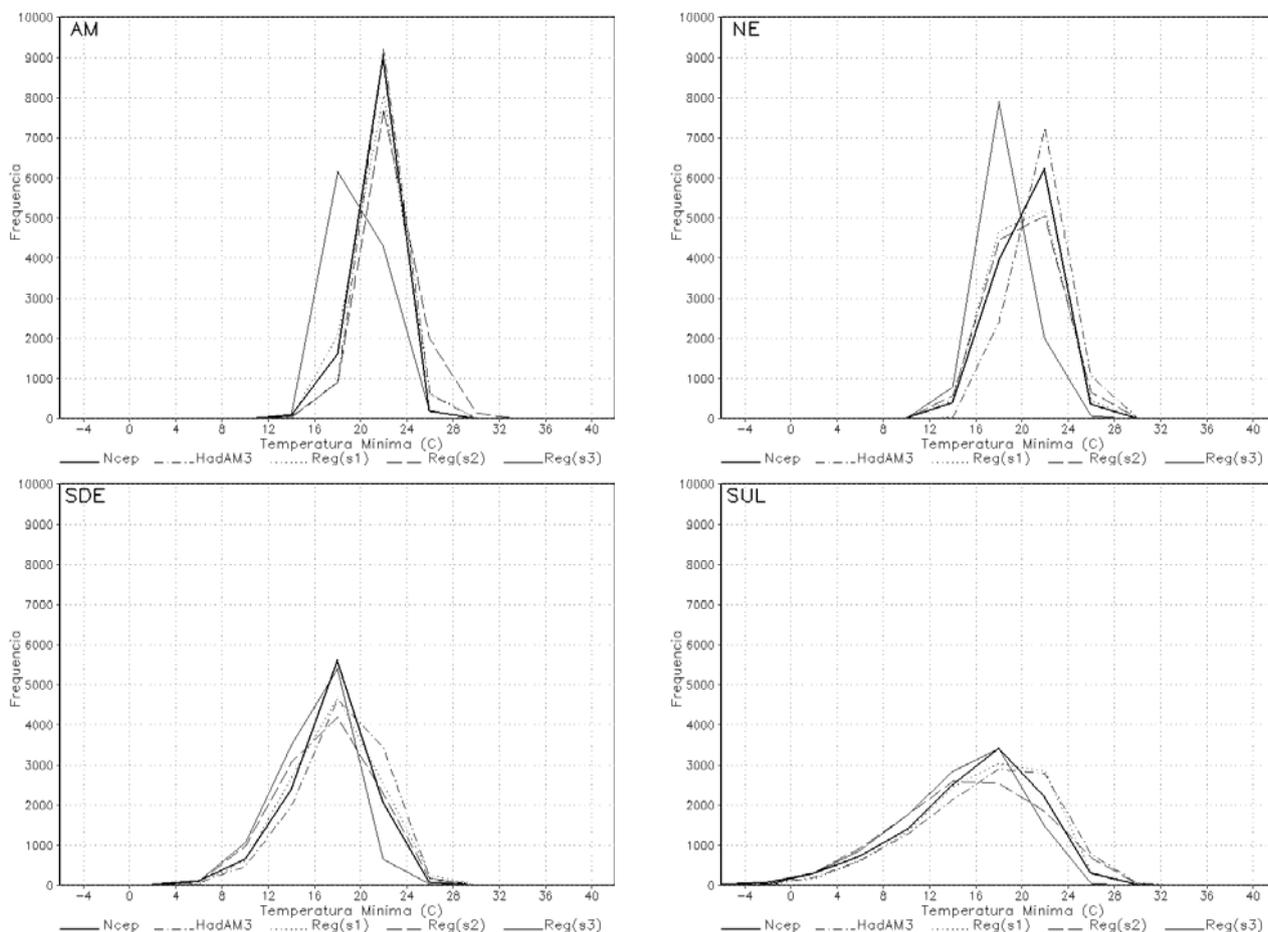


Fig. 4.13. Distribuição de frequência da temperatura mínima diária em intervalos de classe nas quatro sub-regiões: AM, NE, SDE e SUL. Cada gráfico apresenta as seguintes curvas: reanálise do NCEP/NCAR (linha contínua em negro) e as simulações do HadAM3 (linha traço ponto), RegCM3(s1) (linha pontilhada), RegCM3(s2) (linha tracejada) e do RegCM3(s3) (linha contínua).

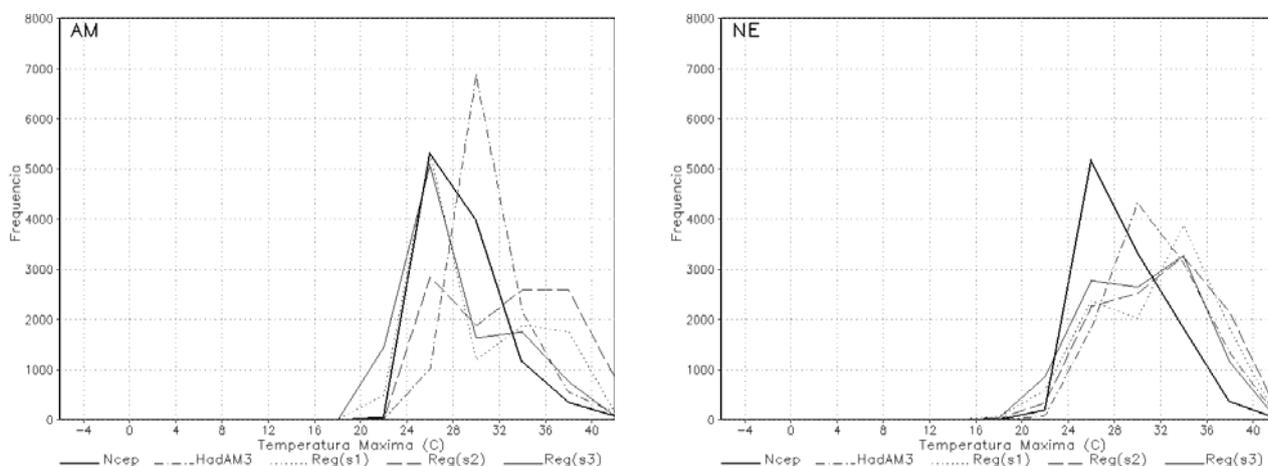


Fig. 4.14. Idem Fig. 4.13 para a temperatura máxima diária.

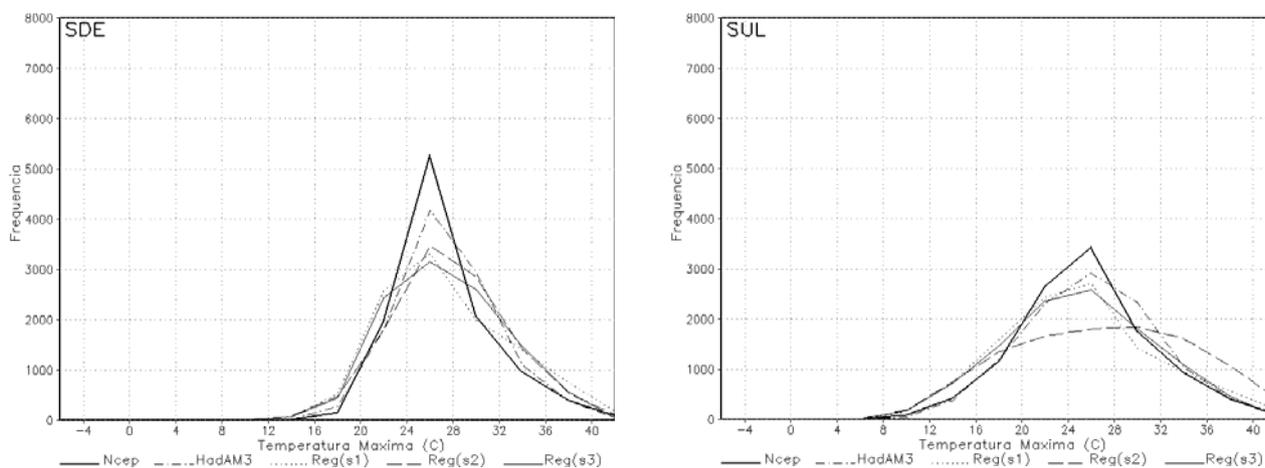


Fig. 4.14. (continuação).

4.3.2. Coeficientes de correlação na área

Os coeficientes de correlação entre as séries temporais dos índices anuais de temperatura (wn, cn, wd e cd) simuladas pelos modelos RegCM3 e HadAM3 e observadas (NCEP/NCAR) nas quatro sub-regiões (AM, NE, SDE e SUL) durante o período de 1961-1990 são mostrados na Tabela 4.4, enquanto os dos índices sazonais de temperatura são apresentados nas Tabelas 4.5 a 4.8.

a) Índices anuais de temperatura

A forte coerência entre a observação (NCEP/NCAR) e as simulações (RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3) dos índices anuais de temperatura nas sub-regiões AM (Tabela 4.4a) e NE (Tabela 4.4b) é refletida nos coeficientes de correlação, que apresentam valores estatisticamente significativos no nível de 5%, superiores a 0.30, com exceção da simulação do RegCM3(s2) para o índice anual dias quentes (wd) na sub-região AM, cujo valor é de 0.25.

Nas demais regiões (SDE e SUL – Tabelas 4.4c-d), pode-se detectar alguns resultados semelhantes entre as diferentes simulações, apesar de também existirem algumas divergências. Na sub-região SDE (Tabela 4.4c), nota-se que os modelos RegCM3 e HadAM3 obtiveram um melhor desempenho nas simulações dos índices anuais noites quentes (wn) e noites frias (cn), com coeficientes de correlação significativos variando de 0.30 a 0.80. Resultado semelhante ocorre na sub-região SUL (Tabela 4.4d), com a maioria dos coeficientes de correlação acima de 0.20 para os índices anuais wn, cn e cd.

Tabela 4.4. Coeficientes de correlação entre os índices anuais de temperatura (wn, cn, wd e cd) observados (NCEP/NCAR) e simulados pelos modelos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 durante o período de 1961-1990 nas sub-regiões: (a) AM, (b) NE, (c) SDE e (d) SUL. Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.

Índice	a) Área - AM			
	RegCM3(s1)	RegCM3(s2)	RegCM3(s3)	HadAM3
Noites quentes (wn)	0.66	0.54	0.54	0.61
Noites frias (cn)	0.50	0.51	0.62	0.65
Dias quentes (wd)	0.35	0.25	0.41	0.44
Dias frios (cd)	0.68	0.34	0.55	0.41
Índice	b) Área - NE			
	RegCM3(s1)	RegCM3(s2)	RegCM3(s3)	HadAM3
Noites quentes (wn)	0.64	0.65	0.69	0.67
Noites frias (cn)	0.54	0.48	0.56	0.39
Dias quentes (wd)	0.65	0.65	0.71	0.63
Dias frios (cd)	0.63	0.52	0.60	0.40
Índice	c) Área - SDE			
	RegCM3(s1)	RegCM3(s2)	RegCM3(s3)	HadAM3
Noites quentes (wn)	0.52	0.68	0.79	0.54
Noites frias (cn)	0.17	0.23	0.31	0.36
Dias quentes (wd)	0.08	0.16	0.20	0.07
Dias frios (cd)	0.15	0.24	0.17	0.08
Índice	d) Área - SUL			
	RegCM3(s1)	RegCM3(s2)	RegCM3(s3)	HadAM3
Noites quentes (wn)	0.09	0.13	0.22	0.37
Noites frias (cn)	0.29	0.38	0.32	0.12
Dias quentes (wd)	0.18	-0.02	0.05	0.19
Dias frios (cd)	0.29	0.11	0.22	0.21

b) Índices sazonais de temperatura

Através dos coeficientes de correlação nas sub-regiões AM e NE (Tabelas 4.5 e 4.6) para as quatro simulações (RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3), é bastante evidente que os índices sazonais de temperatura mantiveram valores acima de 0.30, com significância estatística na maioria das estações do ano. Na sub-região NE (Tabela 4.6), constatou-se uma correlação negativa significativa de -0.53 para o índice cn (noites frias) na primavera referente à simulação do RegCM3(s1).

Na sub-região SDE (Tabela 4.7), os resultados sugerem uma maior habilidade dos modelos (RegCM3 e HadAM3) em simular o índice noites quentes (wn) nas quatro estações do ano, assim como o índice dias frios (cd) na primavera, com coeficientes de correlação variando de 0.18 a 0.75. Já as simulações do RegCM3(s1, s2, s3) também mostraram coeficientes de correlação positivos significativos em torno de 0.45 para o índice dias quentes (wd) no verão (Tabela 4.7). Por outro lado, foram encontradas correlações baixas e não-significativas, além de negativas, para o índice noites frias (cn) no verão (Tabela 4.7). Com relação às simulações do RegCM3(s2, s3) e do HadAM3, destaca-se o índice cn na primavera, com uma moderada correlação positiva significativa – coeficientes próximos de 0.40 (Tabela 4.7).

A sub-região SUL (Tabela 4.8) é marcada, em sua grande maioria, por correlações positivas fracas e não-significativas entre a observação (NCEP/NCAR) e as simulações (RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3) dos índices sazonais de temperatura. Na estação de verão, os índices cd (dias frios) e wd (dias quentes) apresentaram coeficientes de correlação negativos significativos da ordem de -0.30 para as simulações RegCM3(s1) e RegCM3(s3), respectivamente. A Tabela 4.8 indica que os coeficientes de correlação positivos mais expressivos não estão associados a um determinado índice, estação do ano e/ou simulação, como observado anteriormente, ocorrendo de forma mais aleatória.

Tabela 4.5. Coeficientes de correlação entre os índices sazonais de temperatura (wn, cn, wd e cd) observados (NCEP/NCAR) e simulados pelos modelos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 durante o período de 1961-1990 na sub-região AM. Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.

Índice	Área - AM				
	RegCM3(s1)	RegCM3(s2)	RegCM3(s3)	HadAM3	
Noites quentes (wn)	verão	0.63	0.53	0.37	0.49
	outono	0.75	0.68	0.68	0.69
	inverno	0.66	0.57	0.57	0.68
	primavera	0.31	0.18	0.15	0.42
Noites frias (cn)	verão	0.20	0.53	0.41	0.78
	outono	0.58	0.43	0.72	0.52
	inverno	0.67	0.51	0.60	0.39
	primavera	0.06	0.47	0.31	0.60
Dias quentes (wd)	verão	0.72	0.26	0.39	0.48
	outono	0.81	0.76	0.76	0.83
	inverno	0.34	0.09	0.39	0.22
	primavera	0.19	-0.06	0.04	0.17
Dias frios (cd)	verão	0.61	0.47	0.54	0.56
	outono	0.67	0.57	0.53	0.38
	inverno	0.46	-0.01	0.35	0.26
	primavera	0.18	0.22	0.18	0.43

Tabela 4.6. Idem Tabela 4.5 para a sub-região NE.

Índice	Área - NE				
	RegCM3(s1)	RegCM3(s2)	RegCM3(s3)	HadAM3	
Noites quentes (wn)	verão	0.38	0.32	0.30	0.42
	outono	0.64	0.53	0.50	0.51
	inverno	0.76	0.65	0.69	0.71
	primavera	0.10	0.74	0.62	0.68
Noites frias (cn)	verão	0.27	0.53	0.43	0.49
	outono	0.71	0.23	0.30	0.26
	inverno	0.58	0.45	0.63	0.45
	primavera	-0.53	0.51	0.46	0.25
Dias quentes (wd)	verão	0.78	0.85	0.75	0.54
	outono	0.75	0.71	0.69	0.63
	inverno	0.52	0.61	0.57	0.57
	primavera	0.28	0.28	0.43	0.41
Dias frios (cd)	verão	0.83	0.46	0.66	0.24
	outono	0.65	0.68	0.64	0.28
	inverno	0.32	0.18	0.07	0.04
	primavera	0.56	0.21	0.20	0.55

Tabela 4.7. Idem Tabela 4.5 para a sub-região SDE.

Índice	Área - SDE				
	RegCM3(s1)	RegCM3(s2)	RegCM3(s3)	HadAM3	
Noites quentes (wn)	verão	0.66	0.61	0.65	0.44
	outono	0.75	0.64	0.71	0.29
	inverno	0.18	0.62	0.57	0.54
	primavera	0.30	0.32	0.32	0.69
Noites frias (cn)	verão	-0.22	-0.08	-0.02	0.04
	outono	0.56	0.02	0.14	0.33
	inverno	0.26	0.16	0.25	0.10
	primavera	0.04	0.37	0.34	0.44
Dias quentes (wd)	verão	0.47	0.40	0.44	0.04
	outono	0.07	0.19	0.16	0.10
	inverno	0.02	0.10	-0.11	0.06
	primavera	0.29	-0.01	0.09	0.16
Dias frios (cd)	verão	0.48	0.13	0.18	0.32
	outono	-0.06	0.07	0.18	0.05
	inverno	-0.14	0.15	-0.10	0.16
	primavera	0.22	0.35	0.23	0.33

Tabela 4.8. Idem Tabela 4.5 para a sub-região SUL.

Índice	Área - SUL				
	RegCM3(s1)	RegCM3(s2)	RegCM3(s3)	HadAM3	
Noites quentes (wn)	verão	-0.09	0.40	0.42	0.11
	outono	0.52	0.09	0.26	0.06
	inverno	-0.17	0.19	0.06	0.57
	primavera	0.07	-0.14	-0.13	0.50
Noites frias (cn)	verão	-0.13	0.21	0.16	0.26
	outono	0.18	0.13	0.00	-0.12
	inverno	0.06	0.14	0.15	0.04
	primavera	0.04	0.07	0.05	0.08
Dias quentes (wd)	verão	-0.18	-0.20	-0.35	0.04
	outono	0.40	0.07	0.30	-0.08
	inverno	0.00	0.27	0.13	0.14
	primavera	0.18	0.15	0.08	0.30
Dias frios (cd)	verão	-0.33	0.13	0.20	0.01
	outono	0.28	0.10	0.09	-0.31
	inverno	0.09	0.37	0.28	0.37
	primavera	0.00	0.01	0.18	0.14

c) Discussão

De forma geral, não foram observadas grandes discrepâncias entre os resultados das simulações do RegCM3(s1, s2, s3) nas seções 4.3.1 e 4.3.2a-b. No entanto, no estudo dos coeficientes de correlação dos índices sazonais de temperatura nas quatro sub-regiões (ver seção 4.3.2b) a simulação do RegCM3(s1) mostrou-se ligeiramente inferior às outras duas, com um maior número de coeficientes de correlação negativos abaixo de -0.20. Embora, dependendo do índice e/ou da sub-região, o resultado de uma simulação pode estar mais próximo do esperado do que outra, optou-se por escolher a simulação do RegCM3(s2) para dar continuidade aos estudos dos índices anuais e sazonais de temperatura, uma vez que os coeficientes de correlação positivos mais baixos da seção 4.3.1 correspondem à simulação do RegCM3(s3).

4.3.3. Análise espacial

a) Índices anuais de temperatura

As Figs. 4.15a-d mostram os mapas de tendência para os índices anuais de temperatura mínima (wn e cn) e de temperatura máxima (wd e cd) simulados pelo modelo RegCM3(s2) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990.

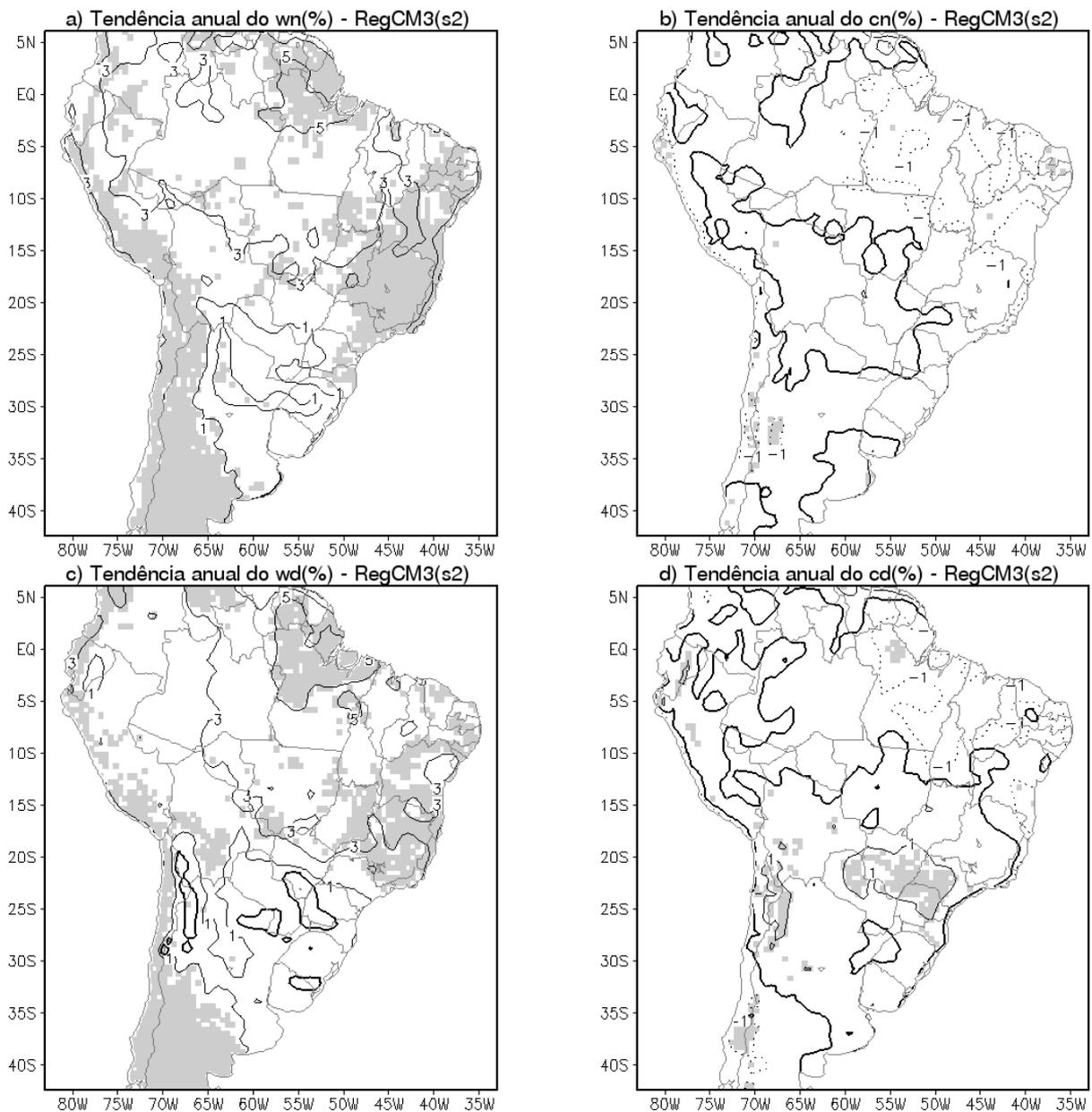


Fig. 4.15. Tendência dos índices anuais de temperatura: (a) wn (%), (b) cn (%), (c) wd (%) e (d) cd (%) simulada pelo modelo RegCM3(s2) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990. O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

Com relação à temperatura mínima, as simulações da tendência dos índices anuais wn (noites quentes) e cn (noites frias) (Figs. 4.15a-b) são bastante semelhantes às observações (Figs. 4.5 e 4.6a-d da seção 4.2.2a). As Figs. 4.15a-b mostram que o RegCM3(s2) simulou corretamente as tendências positivas do índice anual wn em praticamente toda a América do Sul (Fig. 4.15a) e as negativas do cn sobre quase todo o Brasil, estendendo-se até a região central e norte da Argentina, incluindo partes do Chile (Fig. 4.15b).

Na simulação da tendência do índice anual wd (dias quentes) pelo RegCM3(s2) obteve-se uma configuração espacial uniforme, caracterizada por tendências positivas em toda a área estudada (Fig. 4.15c). Desta forma, a simulação do modelo não capturou as tendências negativas do índice anual wd observadas na região central e norte da Argentina entre outras (Fig. 4.7b da seção 4.2.2a).

Para o índice anual cd (dias frios) (Fig. 4.15d), identificou-se, na simulação do RegCM3(s2), a existência de uma grande área, formada pela região central da América do Sul, incluindo o sul do Brasil e partes da Argentina, com tendências positivas do índice, intercaladas por tendências negativas, que abrangem as regiões nordeste e norte do Brasil e o sul da América do Sul. Este resultado concorda com as observações (Figs. 4.8a-b da seção 4.2.2a), com exceção apenas de parte do sul do Brasil.

b) Índices sazonais de temperatura

As Figs. 4.16 e 4.17a-d mostram os mapas de tendência para os índices sazonais de temperatura (noites frias – cn e dias quentes – wd) simulados pelo modelo RegCM3(s2) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990, com as seguintes composições sazonais: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON).

A predominante tendência positiva do índice noites quentes (wn) observada nas quatro estações do ano, mais marcante nas estações de verão e outono (Figs. 4.9a e c da seção 4.2.2b), sobre a América do Sul foi simulada satisfatoriamente pelo RegCM3(s2) (Fig. 1A), apesar da presença de pequenas regiões isoladas, localizadas próximas do norte da Argentina, da região sul do Brasil, do Uruguai e do Paraguai, com tendências negativas nas estações de outono e inverno. Resultado semelhante ocorre para o índice sazonal noites frias (cn), cujas tendências negativas observadas (Figs. 4.10a-d da seção 4.2.2b) sobre o Brasil e o extremo norte do continente foram bem representadas pelas estações de inverno (Fig. 4.16b) e primavera (Fig. 4.16d), respectivamente, enquanto que no extremo oeste e centro-sul da América do Sul, abrangendo a Argentina, o Chile e o sul do Brasil, as estações de verão (Fig. 4.16a) e outono (Fig. 4.16c) mostraram um melhor desempenho.

A simulação da tendência do índice wd (dias quentes) no inverno (Fig. 4.17b) conseguiu capturar parcialmente a tendência negativa do índice observada sobre o norte da Argentina e em partes do Chile na análise anual (Fig. 4.7b da seção 4.2.2a) e na estação de inverno (Fig. 4.11b da seção 4.2.2b). De forma geral, a simulação do RegCM3(s2) aponta para tendências positivas do índice sobre toda a área estudada nas quatro estações do ano (Figs. 4.17a-d). Este resultado concorda com as observações referentes aos meses de verão e outono (Figs. 4.11a e c da seção 4.2.2b), mas discorda nos meses de inverno e primavera (Figs. 4.11b e d da seção 4.2.2b). No entanto, deve-se ressaltar que, conforme visto na seção 4.2.1.2b, apenas as estações de transição apresentaram uma consistência de moderada a fraca nos sinais de tendência do índice sazonal wd (dias quentes) entre a reanálise e as observações das estações de superfície sobre o Brasil; e o mapa de tendência do índice sazonal wd obtido a partir da reanálise do NCEP/NCAR que mais se aproxima da configuração anual (Fig. 4.7b da seção 4.2.2a) corresponde à estação da primavera (Fig. 4.11d da seção 4.2.2b).

Uma análise comparativa entre o mapa de tendência do índice sazonal cd (dias frios) observado (Figs. 4.12a-d da seção 4.2.2b) e simulado pelo RegCM3(s2) (Fig. 2A) mostra, embora as delimitações das áreas com tendências positivas e negativas não coincidam exatamente, que o modelo reproduziu de forma bastante eficiente o padrão espacial observado.

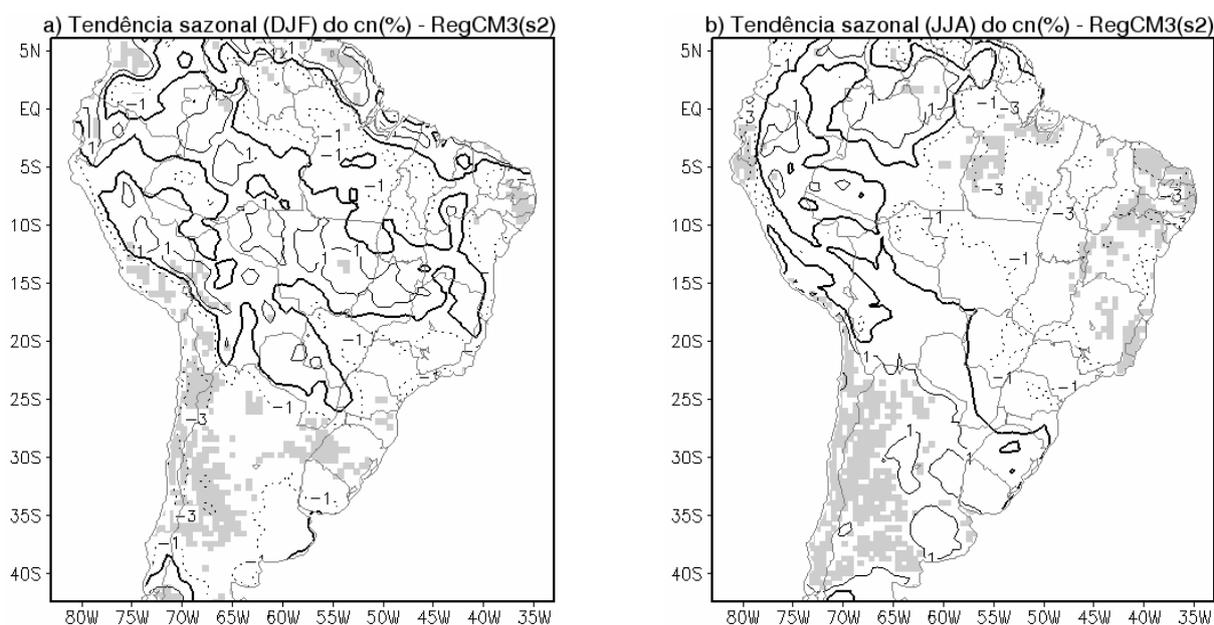


Fig. 4.16. Tendência do índice sazonal cn (%) simulada pelo modelo RegCM3(s2) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

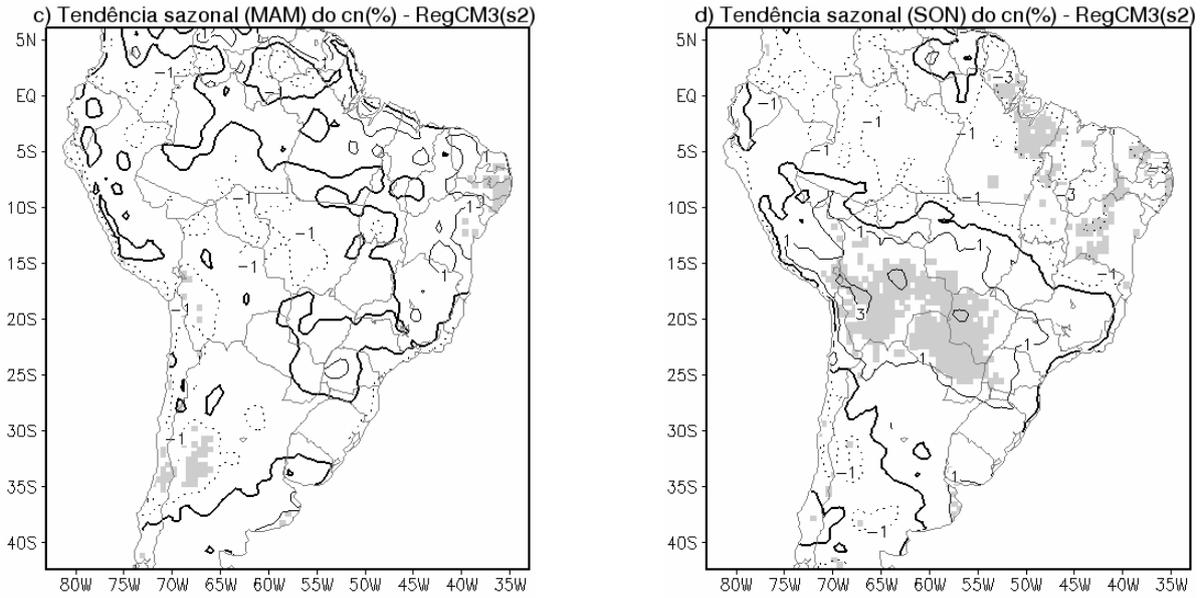


Fig. 4.16. (continuação).

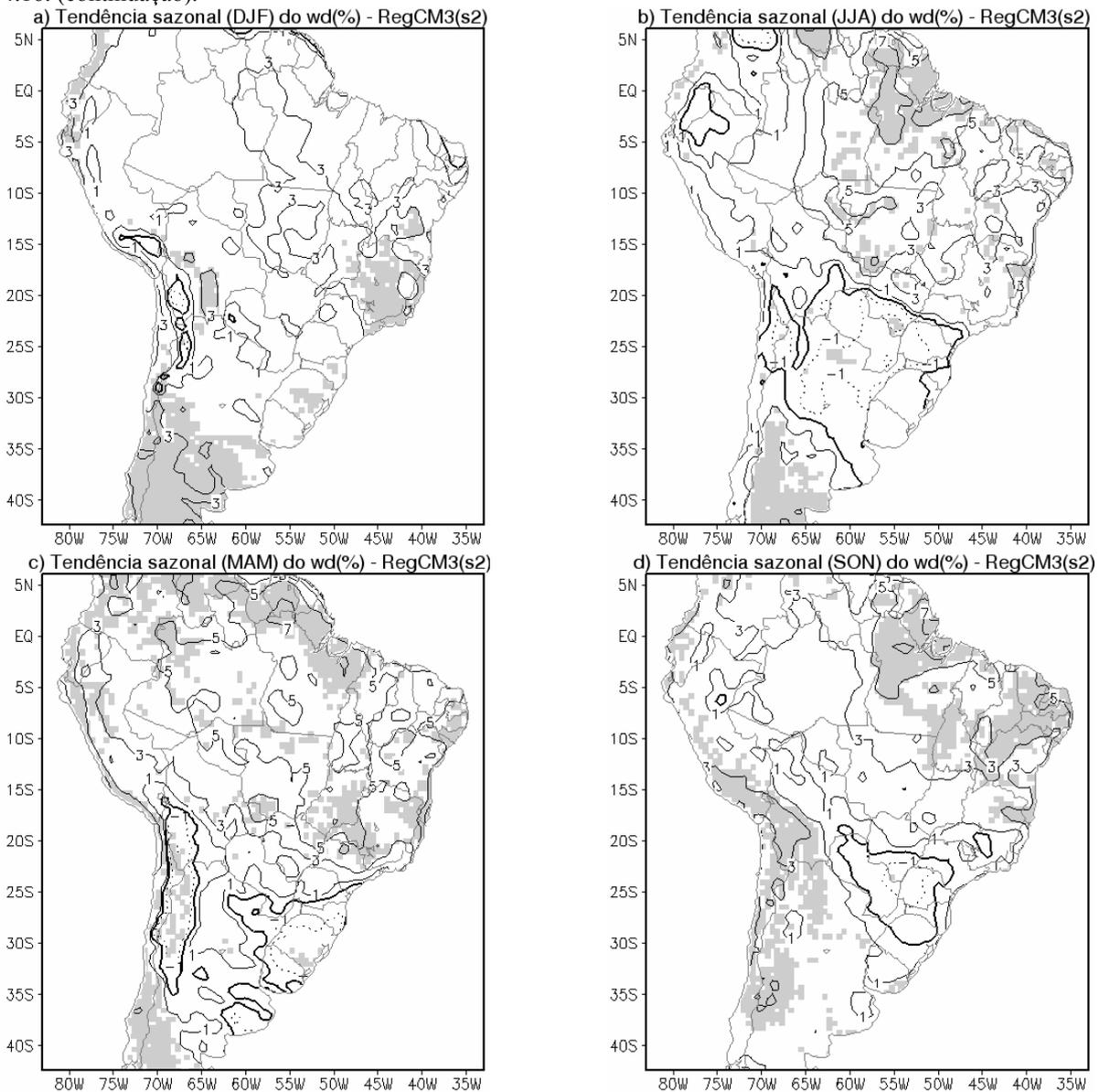


Fig. 4.17. Idem Fig. 4.16 para o índice sazonal wd (%).

c) HadAM3 versus RegCM3

Os mapas de tendência para os índices anuais de temperatura (wn, cn, wd e cd) simulados pelo modelo HadAM3 sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 (Fig. 3A) se aproximam dos gerados pelo modelo RegCM3(s2) (Figs. 4.15a-d), principalmente para os índices noites quentes (wn) e dias quentes (wd), embora sejam caracterizados por tendências mais suavizadas. Por outro lado, os padrões espaciais de tendência dos índices sazonais de temperatura simulados pelos RegCM3(s2) (Figs. 4.16 e 4.17a-d; Figs. 1 e 2A) e HadAM3 (Figs. 4 a 7A) que mais se assemelham correspondem ao índice dias frios (cd) nas estações extremas e, aos índices wn e wd nas quatro estações do ano, enquanto que para o índice noites frias (cn) nas quatro estações do ano e, cd nas estações de transição, nota-se diferenças significativas entre as simulações de ambos.

Através das seções 4.3.1 e 4.3.2a-b, nota-se que, de maneira geral, os modelos RegCM3(s2) e HadAM3 apresentaram resultados coerentes entre si. No entanto, foi no estudo dos coeficientes de correlação dos índices anuais e sazonais de temperatura nas quatro sub-regiões (ver seções 4.3.2a-b) que a simulação do HadAM3 mostrou-se ligeiramente melhor à do RegCM3(s2) para a maioria dos índices anuais e sazonais e sub-regiões (ver Tabelas 4.4 a 4.8).

4.4. Conclusão – Parte I

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a capacidade do modelo RegCM3(Regional Climate Model – versão 3) em simular os padrões espaciais de tendência de alguns índices climáticos anuais e sazonais de temperatura e chuva na América do Sul para o clima presente (1961-1990). Foram realizadas três simulações com o RegCM3, que se diferenciam no esquema de convecção adotado e no número de níveis na vertical. Através do algoritmo desenvolvido, cuja metodologia baseou-se no software RClimeDex, os índices foram calculados a partir dos dados diários de temperatura e chuva provenientes das simulações (RegCM3 e HadAM3) e de observações, como a reanálise do NCEP/NCAR, estações de superfície entre outras.

Os índices climáticos de temperatura derivados dos dados de reanálise do NCEP/NCAR para a América do Sul no período de 1961-1990 foram validados através da comparação de seus resultados com os obtidos a partir de outras fontes de dados, como observações provenientes de algumas estações de superfície localizadas sobre o Brasil. Os resultados sugerem que os dados de temperatura da reanálise são capazes de reproduzir os índices anuais e sazonais de temperatura observados nas estações de superfície. Com relação aos padrões espaciais de tendência dos índices anuais de temperatura, a reanálise do NCEP/NCAR apresenta uma boa concordância com os

resultados encontrados na análise do CPTEC e em trabalhos anteriores (Alexander et al. 2005, Vincent et al. 2005). Sobre a região central e norte da Argentina, incluindo partes do Chile, a reanálise mostrou sinais de tendência opostos ao identificado por Rusticucci e Barrucand (2004), Vincent et al. (2005) e pela análise do CPTEC para os índices anuais noites frias (cn), dias quentes (wd) e dias frios (cd). Com exceção do índice noites quentes (wn), a configuração espacial de tendência dos índices sazonais (cn, wd e cd) é caracterizada por padrões semelhantes de tendência nas estações de verão e outono, invertendo de sinal no inverno e primavera. Para os índices wn e cn, as distribuições espaciais de tendência correspondentes às estações de verão e outono são as que mais se aproximam da análise anual do CPTEC e, para os índices wd e cd, são as estações de primavera e inverno, respectivamente. De maneira geral, os resultados da reanálise do NCEP/NCAR para os índices anuais e sazonais baseados nos dados diários de temperatura mínima (noites quentes – wn e noites frias – cn) são mais confiáveis que os de temperatura máxima (dias quentes – wd e dias frios – cd), uma vez que os dois últimos não apresentam um sinal consistente e homogêneo (Alexander et al. 2005, Vincent et al. 2005), dificultando a validação da reanálise e, conseqüentemente, das simulações dos modelos RegCM3 e HadAM3 em estimar tais índices.

As simulações dos índices de temperatura pelos modelos climáticos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 foram analisadas em quatro sub-regiões (AM, NE, SDE e SUL) e na América do Sul como um todo através da comparação dos seus resultados com os obtidos a partir dos dados observados. Através do estudo realizado nas quatro sub-regiões, verifica-se que as simulações do RegCM3(s1, s2, s3) não apresentaram resultados muito discrepantes entre si, com forte coerência entre a observação (NCEP/NCAR) e as simulações (RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3) dos índices anuais e sazonais de temperatura nas sub-regiões AM e NE e, mais fraca, na sub-região SUL. Dentre as três simulações com o RegCM3, a simulação RegCM3(s2), com o esquema de convecção Emanuel, apresentou um melhor desempenho em representar as tendências dos índices anuais e sazonais de temperatura nas sub-regiões. O RegCM3(s2) simulou corretamente a tendência de aumento de noites quentes e de diminuição de noites frias observadas em praticamente toda a América do Sul durante o período de 1961-1990. Com um resultado um pouco inferior, pode-se mencionar também a semelhança entre os padrões espaciais de tendência dos índices anuais dias quentes (wd) e dias frios (cd) observados e simulados pelo modelo. Com relação aos índices sazonais de temperatura, as simulações do RegCM3(s2) para os índices wn, cn e wd nas estações de verão e outono apresentam uma boa concordância com a reanálise do NCEP/NCAR, particularmente sobre o extremo oeste e o centro-sul da América do Sul. Em particular, as configurações espaciais de tendência dos índices noites quentes (wn) e dias frios (cd) observadas

(NCEP/NCAR) nas quatro estações do ano sobre a América do Sul foram simuladas satisfatoriamente pelo RegCM3(s2).

As distribuições espaciais de tendência dos índices anuais de temperatura resultantes das simulações do RegCM3(s2) e do HadAM3 sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 são bastante semelhantes entre si, principalmente para os índices noites quentes (wn) e dias quentes (wd), embora o HadAM3 seja caracterizado por tendências mais suavizadas. Por outro lado, para os índices noites frias (cn) nas quatro estações do ano e dias frios (cd) nas estações de transição, nota-se diferenças significativas entre as simulações dos modelos. Para a maioria dos índices anuais e sazonais de temperatura e sub-regiões, a simulação do HadAM3 se mostrou ligeiramente melhor à do RegCM3(s2).

5. Resultados – Parte II: Índices de extremos climáticos de chuva

5.1. Validação da reanálise do NCEP/NCAR e da análise do BRANT

Esta seção, que tem como principal objetivo avaliar o desempenho da reanálise do NCEP/NCAR e da análise do BRANT em estimar os índices de extremos climáticos de chuva na América do Sul durante o período de 1961-1990, está dividida em duas partes: análise pontual e espacial, sendo que em cada uma delas desenvolve-se uma discussão anual e sazonal.

5.1.1. Análise pontual

A análise pontual consiste na validação da reanálise do NCEP/NCAR e da análise do BRANT através da comparação dos seus índices anuais e sazonais de chuva com os obtidos a partir de dados observacionais provenientes de algumas estações de superfície localizadas sobre o Brasil. A metodologia adotada consiste no cálculo de coeficientes de correlação e de regressão linear.

5.1.1.1. Coeficientes de correlação

a) Índices anuais de chuva

A distribuição espacial dos coeficientes de correlação entre as séries temporais do índice anual de chuva *prcptot* (chuva total anual) observadas nas estações de superfície e extraídas dos conjuntos de dados (reanálise do NCEP/NCAR, painel à esquerda, e análise do BRANT, painel à direita) durante o período de 1961-1990 é mostrada na Fig. 5.1. A Tabela 5.1 é similar à Tabela 4.1 da seção 4.2.1.1a e mostra o número de estações de superfície com correlação positiva/negativa estatisticamente significativa/não-significativa no nível de 5% para os índices anuais de chuva (*prcptot*, *r95p*, *rx5day*, *cdd* e *cwd*) sobre duas regiões: o Brasil e o Estado de São Paulo. Os mapas dos coeficientes de correlação entre os índices anuais de chuva (*r95p*, *rx5day*, *cdd* e *cwd*) observados e derivados da reanálise e do BRANT não serão mostrados, uma vez que as informações neles contidas foram resumidas na Tabela 5.1, sendo a Fig. 5.1 apenas um demonstrativo da distribuição espacial dos coeficientes de correlação quantificados na Tabela 5.1.

Analisando as correlações entre os índices anuais de chuva observados e obtidos a partir da reanálise do NCEP/NCAR (Tabela 5.1a-b e Fig. 5.1, painéis à esquerda), destacam-se os índices

cdd, prcptot e r95p pelo maior número de correlações positivas diante dos demais índices anuais de chuva sobre o Brasil e, particularmente, sobre o Estado de São Paulo. Com relação à análise do BRANT (Tabela 5.1a-b e Fig. 5.1, painéis à direita), os índices anuais de chuva apresentam correlações positivas na maioria das estações de superfície no Brasil e no Estado de São Paulo, enfatizando os índices cdd, prcptot, rx5day e r95p. Em geral, a análise do BRANT mostra resultados melhores que a reanálise, embora o número de estações localizadas no Brasil seja inferior para o primeiro. Este resultado sugere que os conjuntos de dados originados a partir da interpolação de dados observados em estações de superfície podem ser mais representativos que os derivados de reanálises.

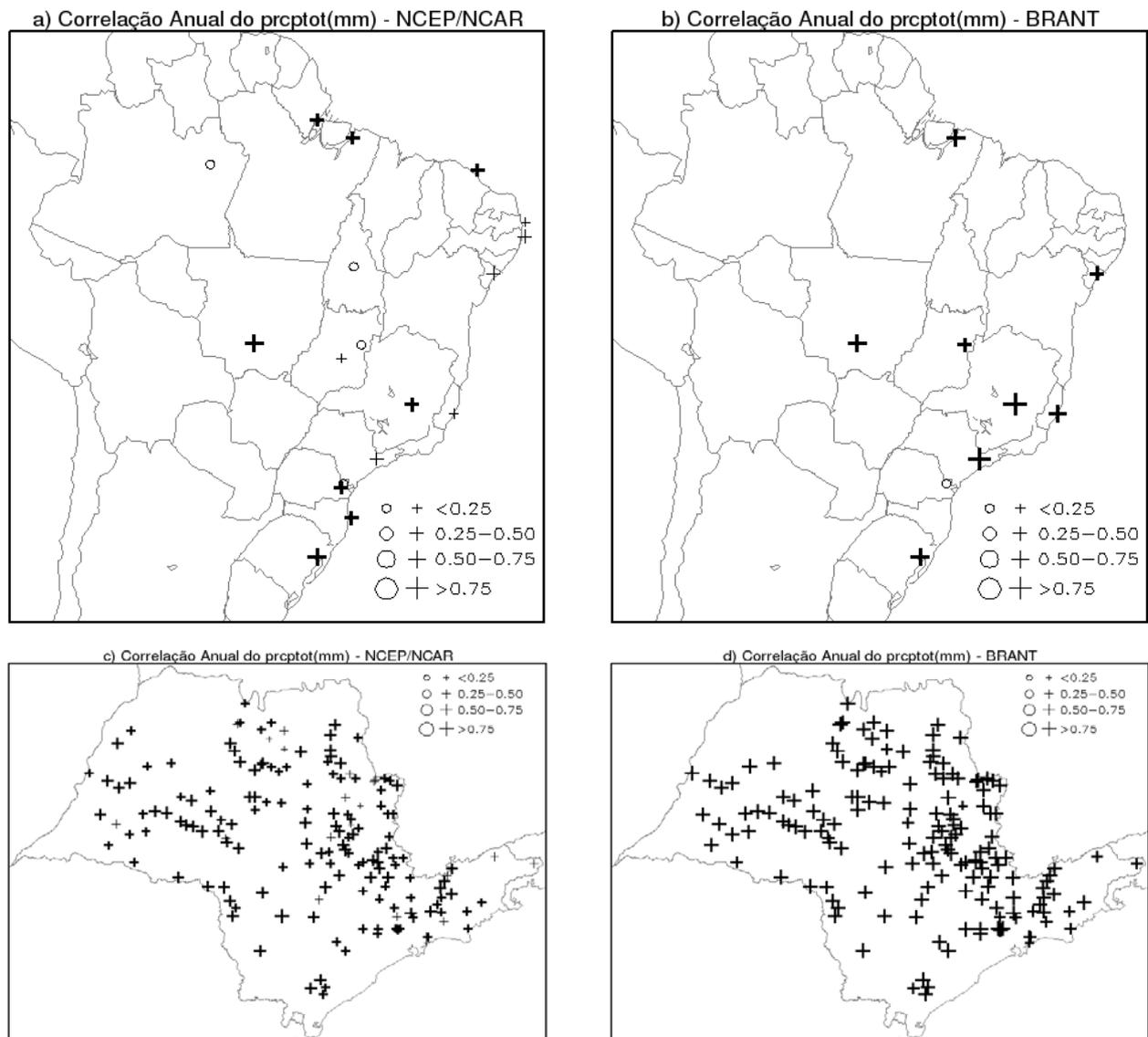


Fig. 5.1. Coeficientes de correlação entre o índice anual prcptot (mm) observado e derivado dos conjuntos de dados (NCEP/NCAR, na coluna da esquerda, e BRANT, na coluna da direita) durante o período de 1961-1990 (a-b) sobre o Brasil e (c-d) o Estado de São Paulo. A correlação positiva é representada por '+' e a negativa por 'o', sendo os seus tamanhos proporcionais à magnitude da correlação, conforme escala indicada nos mapas. Os símbolos em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.

Tabela 5.1. Número de estações de superfície com coeficientes de correlação positivos/negativos estatisticamente significativos/não-significativos no nível de 5% entre os índices anuais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) observados e derivados dos conjuntos de dados do NCEP/NCAR e BRANT no período de 1961-1990 (a) sobre o Brasil e (b) o Estado de São Paulo. O número total de estações usadas no Brasil foi 18 – reanálise e 9 – BRANT e, no Estado de São Paulo, 160 – reanálise e 162 – BRANT.

Índice	a) Correlação Anual - Brasil							
	positiva significativa		positiva não significativa		negativa significativa		negativa não significativa	
	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (prcptot)	8	8	6	0	0	0	4	1
Precipitação total com PRCP $>$ 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	5	5	6	4	1	0	6	0
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	5	6	3	2	2	0	7	1
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	9	7	8	2	0	0	1	0
Número máximo de dias consecutivos com PRCP \geq 1mm (cwd)	3	2	8	5	0	0	7	2
Índice	b) Correlação Anual - São Paulo							
	positiva significativa		positiva não significativa		negativa significativa		negativa não significativa	
	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (prcptot)	143	162	21	0	0	0	0	0
Precipitação total com PRCP $>$ 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	76	141	72	19	0	0	14	2
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	23	151	95	11	0	0	40	0
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	130	162	32	0	0	0	2	0
Número máximo de dias consecutivos com PRCP \geq 1mm (cwd)	12	31	61	97	4	0	78	33

b) Índices sazonais de chuva

O mesmo procedimento descrito na seção 5.1.1.1a foi utilizado para analisar os coeficientes de correlação entre as séries temporais dos índices sazonais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) observadas nas estações de superfície e extraídas dos conjuntos de dados (NCEP/NCAR e BRANT) durante o período de 1961-1990 sobre o Brasil e o Estado de São Paulo (Tabela 5.2).

Para a reanálise do NCEP/NCAR (Tabela 5.2a-b), a boa correlação obtida na análise anual para os índices prcptot e cdd (Tabela 5.1a-b) se repete nas quatro estações do ano, com exceção do verão para o último. Com relação à sazonalidade dos índices cwd e rx5day, que na análise anual (Tabela 5.1a-b) não apresentaram resultados relevantes, observa-se correlações positivas em praticamente todas as estações localizadas no Brasil e no Estado de São Paulo durante o inverno (Tabela 5.2a-b). Resultado semelhante foi obtido no outono para os índices rx5day e r95p sobre o Estado de São Paulo e, no verão, para o índice rx5day sobre o Brasil (Tabela 5.2a-b). O número máximo de correlações negativas ocorre na primavera para o índice cwd, com 43.75% das estações de superfície do Brasil, seguido pelo verão dos índices cwd e cdd, com 42% e 41.5% no Estado de

São Paulo, respectivamente. No verão, o índice cwd apresenta 37.5% sobre o Brasil; e, na primavera, o índice r95p totaliza 36.7% das estações de superfície do Estado de São Paulo e 35.7% do Brasil (Tabela 5.2a-b).

Com relação ao BRANT (Tabela 5.2a-b), a análise sazonal mostra um resultado bastante similar ao encontrado na análise anual (Tabela 5.1a-b) para as quatro estações do ano.

Tabela 5.2. Idem Tabela 5.1 para os índices sazonais de chuva.

Índice		a) Correlação Sazonal - Brasil							
		positiva significativa		positiva não significativa		negativa significativa		negativa não significativa	
		NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (prcptot)	verão	8	7	7	0	0	0	1	1
	outono	7	7	8	1	1	0	1	0
	inverno	13	6	3	1	0	0	0	1
	primavera	6	6	9	1	0	0	1	0
Precipitação total com PRCP $>$ 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	verão	8	6	3	1	0	0	4	1
	outono	2	4	11	4	0	0	4	0
	inverno	6	5	6	0	0	0	3	2
	primavera	1	4	8	3	1	0	4	0
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	verão	6	7	9	0	0	1	1	0
	outono	1	4	11	3	0	0	5	1
	inverno	8	7	8	1	0	0	1	0
	primavera	5	7	7	0	0	0	4	0
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	verão	9	4	2	2	0	0	5	2
	outono	8	4	6	3	1	0	1	1
	inverno	9	7	6	0	0	0	2	1
	primavera	9	5	5	2	0	0	2	0
Número máximo de dias consecutivos com PRCP \geq 1mm (cwd)	verão	2	6	8	2	0	2	6	2
	outono	4	6	10	2	0	2	3	2
	inverno	6	6	9	1	1	1	1	1
	primavera	4	6	5	1	0	1	7	1
Índice		b) Correlação Sazonal - São Paulo							
		positiva significativa		positiva não significativa		negativa significativa		negativa não significativa	
		NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (prcptot)	verão	38	160	110	1	0	0	14	0
	outono	159	162	5	0	0	0	0	0
	inverno	138	162	26	0	0	0	0	0
	primavera	91	162	71	0	0	0	2	0
Precipitação total com PRCP $>$ 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	verão	33	138	83	22	2	0	42	1
	outono	67	143	85	18	0	0	11	1
	inverno	71	152	69	8	0	0	21	2
	primavera	12	121	88	38	1	0	57	2
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	verão	32	152	105	9	0	0	23	0
	outono	71	158	80	4	0	0	11	0
	inverno	53	162	101	0	0	0	8	0
	primavera	21	154	89	8	1	0	50	0
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	verão	24	154	69	7	3	0	63	0
	outono	135	162	29	0	0	0	0	0
	inverno	144	162	20	0	0	0	0	0
	primavera	102	162	61	0	0	0	0	0
Número máximo de dias consecutivos com PRCP \geq 1mm (cwd)	verão	7	55	84	99	2	0	64	6
	outono	31	102	95	52	2	0	36	6
	inverno	42	155	113	6	0	0	6	1
	primavera	43	91	96	64	0	0	23	7

5.1.1.2. Coeficientes de regressão linear

a) Índices anuais de chuva

As Figs. 5.2 e 5.3 mostram os mapas de tendência para os índices anuais de chuva (dias muito úmidos - r95p e dias secos consecutivos - cdd) durante o período de 1961-1990 obtidos a partir da (a) reanálise do NCEP/NCAR, (b) análise do CPTEC (1959-2000) e (c) análise do BRANT sobre a América do Sul, estações de superfície no Brasil e (d) no Estado de São Paulo. A Tabela 5.3 é similar à Tabela 4.2 da seção 4.2.1.2a e mostra o número de estações de superfície onde sinal da tendência dos índices anuais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) concorda com o extraído da interpolação bi-linear dentro da grade do NCEP/NCAR e do BRANT nas duas regiões de estudo: Brasil e Estado de São Paulo.

Tabela 5.3. Número de estações de superfície onde sinal da tendência dos índices anuais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) no período de 1961-1990 concorda com a reanálise do NCEP/NCAR (a) sobre o Brasil e (b) o Estado de São Paulo. A concordância entre o sinal da tendência observado e da reanálise é representada por ‘ Δ ’ ou ‘ \blacktriangle ’ e, os sinais de tendência opostos, por ‘ \circ ’ ou ‘ \bullet ’. Os símbolos abertos indicam igual significância estatística e, os fechados, significância estatística oposta. O número total de estações usadas no Brasil foi 18 – reanálise e 9 – BRANT e, no Estado de São Paulo, 164 – reanálise e 162 – BRANT.

Índice	a) Tendência Anual - Brasil							
	Δ		\blacktriangle		\circ		\bullet	
	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (prcptot)	6	2	4	2	4	0	4	5
Precipitação total com PRCP $>$ 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	3	3	6	3	5	2	4	1
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	3	2	3	4	6	1	6	2
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	6	2	10	6	1	0	1	1
Número máximo de dias consecutivos com PRCP \geq 1mm (cwd)	3	0	6	2	6	2	3	5
Índice	b) Tendência Anual - São Paulo							
	Δ		\blacktriangle		\circ		\bullet	
	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (prcptot)	101	38	41	102	21	1	1	21
Precipitação total com PRCP $>$ 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	56	86	56	29	34	38	18	9
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	29	12	65	90	18	4	52	56
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	95	17	46	120	11	1	12	24
Número máximo de dias consecutivos com PRCP \geq 1mm (cwd)	14	29	85	38	10	41	54	53

A tendência do índice anual cdd (Tabela 5.3a) foi muito bem reproduzida pelos dois conjuntos de dados (NCEP/NCAR e BRANT) em 88,9% das estações de superfície do Brasil. Com um resultado um pouco inferior, pode-se mencionar também a boa concordância dos sinais de tendência dos índices anuais r95p e rx5day entre a observação e a análise do BRANT no Brasil (em 66,7% das estações - Tabela 5.3a). Para os demais índices anuais de chuva, o sinal das tendências dos conjuntos de dados não é consistente com as observações sobre o Brasil, particularmente para os índices rx5day e cwd (Tabela 5.3a – NCEP e BRANT, respectivamente), com resultados satisfatórios em apenas 22% e 33% das estações, respectivamente. No Estado de São Paulo, ao contrário, ambos os conjuntos de dados (NCEP/NCAR e BRANT) representaram de forma eficiente o sinal das tendências dos índices anuais prcptot, cdd e r95p em 68.3% a 86.6% das estações de superfície (Tabelas 5.3b). Este resultado está provavelmente relacionado com a qualidade e quantidade de estações de superfície disponíveis no Estado de São Paulo, que acabam influenciando os dados em pontos de grade.

b) Índices sazonais de chuva

As Figs. 5.4 a 5.7 mostram os mapas de tendência para os índices sazonais de chuva (chuva total – prcptot e dias secos consecutivos - cdd) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 obtidos a partir da reanálise do NCEP/NCAR e da análise do BRANT, com as seguintes composições sazonais: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). A comparação entre os sinais da tendência dos índices sazonais de chuva observados e dos conjuntos de dados foi resumida na Tabela 5.4, seguindo os mesmos critérios adotados na análise anual (seção 5.1.1.2a).

Através da análise sazonal (Tabela 5.4a), nota-se que, em média, 63% das estações de superfície no Brasil tiveram as tendências dos índices de chuva bem representadas pela reanálise nas quatro estações do ano, destacando-se o inverno para os índices prcptot, cdd e rx5day e, o outono para o último, com concordância dos sinais de tendência em 76.5% a 88.2% das estações. Resultado similar ocorre no Estado de São Paulo (Tabela 5.4b), com maior relevância nos meses de outono e inverno para os índices prcptot, cdd, rx5day e r95p e, na primavera, para o índice cdd, para o NCEP/NCAR e BRANT, com exceção apenas do inverno para o índice cdd na análise do último. Quando se considera a análise do BRANT no Brasil (Tabela 5.4a), além dos resultados positivos mencionados acima, incluem-se as tendências dos índices cwd, no inverno, e prcptot, na primavera. Portanto, os melhores resultados de concordância dos sinais da tendência dos índices sazonais de chuva entre observação e reanálise sobre o Brasil referem-se aos índices prcptot, cdd e rx5day no

inverno e, no outono para o último; e, sobre o Estado de São Paulo, aos índices prcptot, cdd, rx5day e r95p nas estações de outono e inverno. Já a análise do BRANT reproduziu de forma bastante eficiente os sinais de tendência dos índices prcptot, cdd, rx5day e r95p observados no outono e inverno sobre o Brasil e o Estado de São Paulo.

Tabela 5.4. Idem Tabela 5.3 para os índices sazonais de chuva.

Índice		a) Tendência Sazonal - Brasil							
		Δ		▲		○		●	
		NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP≥1mm (prcptot)	verão	4	1	4	3	4	1	4	3
	outono	1	1	7	5	5	1	4	1
	inverno	6	2	9	4	1	1	1	1
	primavera	6	2	3	4	3	0	4	1
Precipitação total com PRCP>95th percentis e PRCP≥1mm (r95p)	verão	4	1	5	3	3	2	4	2
	outono	4	2	5	4	4	2	4	0
	inverno	6	2	3	3	1	1	5	1
	primavera	5	1	3	1	2	2	5	3
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	verão	4	1	7	2	2	1	3	4
	outono	2	2	5	3	4	1	6	2
	inverno	7	1	6	5	0	1	4	1
	primavera	4	1	4	2	6	2	2	2
Número máximo de dias consecutivos com PRCP<1mm (cdd)	verão	3	2	7	1	2	2	4	3
	outono	7	3	4	3	4	0	2	2
	inverno	6	2	7	3	2	1	2	2
	primavera	7	0	6	4	0	1	3	2
Número máximo de dias consecutivos com PRCP≥1mm (cwd)	verão	2	1	6	2	6	3	2	2
	outono	5	1	5	1	2	1	5	5
	inverno	5	2	6	5	2	0	4	1
	primavera	5	0	5	1	0	2	6	4
Índice		b) Tendência Sazonal - São Paulo							
		Δ		▲		○		●	
		NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP≥1mm (prcptot)	verão	38	9	29	79	64	2	32	71
	outono	45	39	118	122	1	1	0	0
	inverno	120	35	41	124	3	1	0	2
	primavera	46	9	52	111	20	0	46	42
Precipitação total com PRCP>95th percentis e PRCP≥1mm (r95p)	verão	31	10	49	77	33	7	50	67
	outono	69	72	58	56	14	19	23	15
	inverno	25	65	113	73	0	7	26	17
	primavera	31	49	71	40	8	33	54	40
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	verão	43	11	49	91	31	2	40	57
	outono	75	25	55	100	16	0	18	37
	inverno	97	32	45	122	16	1	6	7
	primavera	17	14	72	90	10	3	64	55
Número máximo de dias consecutivos com PRCP<1mm (cdd)	verão	15	15	72	81	5	8	61	55
	outono	67	47	92	110	3	3	2	2
	inverno	76	7	53	111	15	1	20	42
	primavera	65	36	77	101	6	2	15	22
Número máximo de dias consecutivos com PRCP≥1mm (cwd)	verão	24	20	84	40	13	40	42	61
	outono	77	35	24	40	47	32	14	53
	inverno	35	19	69	57	17	5	41	77
	primavera	13	63	65	34	15	40	63	20

As maiores diferenças entre as tendências dos índices sazonais de chuva obtidas a partir da reanálise e observadas nas estações de superfície correspondem ao índice rx5day no outono

(Tabela 5.4a) e ao índice *prcptot* no verão (Tabela 5.4b), ambos com apenas 41% das estações bem representadas, sobre o Brasil e o Estado de São Paulo, respectivamente. Já para a análise do BRANT, os resultados mais discrepantes ocorrem no verão para o índice *cwd* sobre o Estado de São Paulo (Tabela 5.4b), na primavera para os índices *r95p* e *cwd* e, no outono para o último, sobre o Brasil (Tabela 5.4a).

Entretanto, como o Brasil está representado por um número muito pequeno de estações de superfície (18 – reanálise e 9 – BRANT), especialmente mal distribuídas, os resultados apresentados nesta seção são somente um indicativo da dificuldade da reanálise do NCEP/NCAR e da análise do BRANT em reproduzir as tendências dos índices de chuva (*prcptot*, *r95p*, *rx5day* e *cdd*) nas estações de verão e primavera e, as tendências do índice *cwd*, nas quatro estações do ano. A mesma interpretação é válida para a boa concordância dos sinais de tendência dos índices de chuva (*prcptot*, *r95p*, *rx5day* e *cdd*) entre observação e reanálise nas estações de outono e inverno.

Para a maioria dos índices anuais e sazonais de chuva, os resultados da tendência, discutidos nas seções 5.1.1.2a-b, foram inferiores aos apresentados pela correlação nas seções 5.1.1.1a-b tanto no Brasil quanto no Estado de São Paulo.

5.1.2. Análise espacial

a) Índices anuais de chuva

De forma geral, os mapas de tendência dos índices anuais *r95p* (Fig. 5.2), *prcptot* (Fig. 1B) e *rx5day* (Fig. 2B) durante o período de 1961-1990 obtidos a partir da reanálise do NCEP/NCAR, análise do CPTEC e análise do BRANT sobre a América do Sul e pelas estações de superfície no Brasil e no Estado de São Paulo, apesar de suas singularidades, apresentam algumas áreas com padrões de tendência bastante similares entre si, apontando para condições mais úmidas e intensificação de eventos extremos de chuva sobre o Brasil, particularmente no sul e parte do sudeste, o Paraguai, o Uruguai, na região central e norte da Argentina e em partes do Chile, consistentes com o trabalho de Haylock et al. (2006). Resultado semelhante ocorre para o índice anual *cwd* (Fig. 3B), com exceção apenas do Paraguai, do Chile e norte da Argentina. Por outro lado, tendências negativas para os índices anuais *r95p*, *prcptot*, *rx5day* e *cwd* são observadas no sudoeste da América do Sul derivadas da análise do CPTEC (Fig. 5.2b; Fig. 2B-b), que concordam com os resultados de Haylock et al. (2006), porém não foram detectadas pela reanálise do NCEP/NCAR (Fig. 5.2a; Figs. 1 a 3B-a). Sobre a região central e leste da Argentina, a reanálise do NCEP/NCAR gera uma tendência negativa sistemática para todos os índices anuais mencionados

acima, não observada na análise do CPTEC (Fig. 5.2b; Fig. 2B-b) e no trabalho de Haylock et al. (2006). Sobre o Estado de São Paulo, os mapas de tendência dos índices anuais r95p e rx5day derivados da análise do CPTEC (Fig. 5.2b; Fig. 2B-b) diferem das demais fontes de informação, assim como o mapa referente ao índice anual cwd resultante da análise do BRANT (Fig. 3B-b). Desta forma, não é seguro analisar os índices climáticos de chuva nestas regiões a partir destes conjuntos de dados.

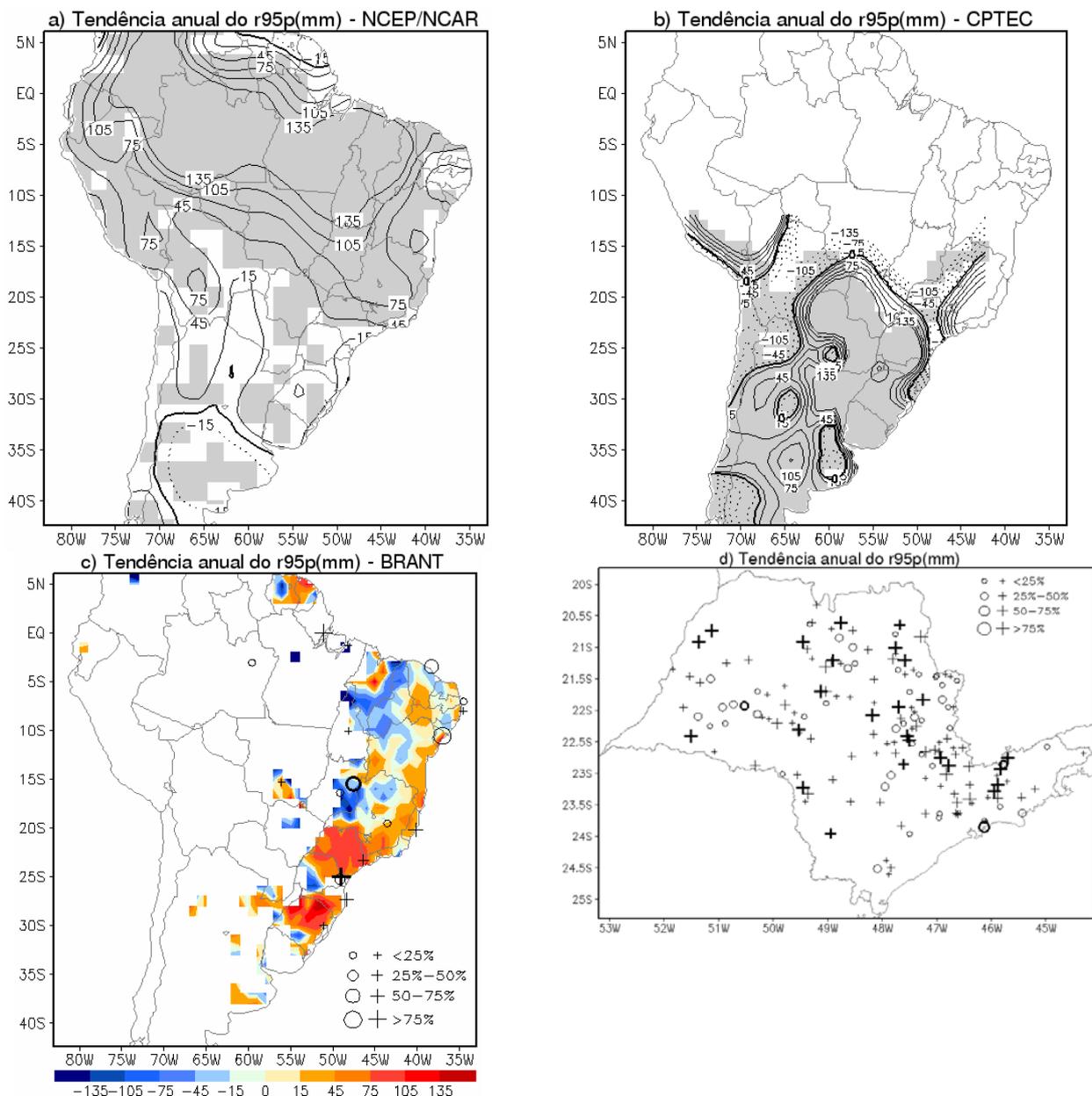


Fig. 5.2. Tendência do índice anual r95p (mm) durante o período de 1961-1990 obtida a partir da (a) renálise do NCEP/NCAR, (b) análise do CPTEC (1959-2000) e (c) análise do BRANT sobre a América do Sul, estações de superfície no Brasil e (d) no Estado de São Paulo. (a-b) O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados. (c-d) A tendência positiva é representada por '+' e a negativa por 'o', sendo os seus tamanhos proporcionais à magnitude da tendência, conforme escala indicada nos mapas. Os símbolos em negrito indicam tendência estatisticamente significativa no nível de 5%.

De acordo com os resultados encontrados por Haylock et al. (2006), as Figs. 5.3a-d mostram duas grandes áreas bem definidas com tendências opostas para o índice anual cdd: a primeira, formada por Uruguai (com exceção da Fig. 5.3b), região central da Argentina, sul e parte do sudeste do Brasil, com tendências negativas do índice; e, a segunda, abrangendo o sudoeste da América do Sul, o norte da Argentina, o Paraguai e partes da Bolívia, Chile e Peru, com tendências positivas. Com relação à reanálise do NCEP/NCAR (Fig. 5.3a), as diferenças mais marcantes ocorrem sobre o Paraguai, o Uruguai, a região central da Argentina, o Estado do Rio Grande do Sul e em parte da Bolívia, onde se verifica uma completa inversão do sinal. Como mencionado anteriormente, a reanálise não se mostra apta para fornecer as tendências de certos índices anuais de chuva em algumas regiões da América do Sul. Este resultado pode estar relacionado com a falta de dados observacionais disponíveis nestas regiões, prejudicando, assim, a qualidade dos dados de reanálise do NCEP/NCAR.

Nos Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, Santos e Brito (2007), durante o período de 1935-2000, diagnosticaram um aumento no número de dias com chuvas, na precipitação total anual e no número de dias extremamente úmidos, como também, em algumas regiões um aumento na ocorrência de chuvas superiores a 50mm. Este resultado concorda com os mapas de tendência dos índices anuais r95p, cdd, prcptot, rx5day e cwd derivados da reanálise (Figs. 5.2 e 5.3a; Figs. 1 a 3B-a) e com os mapas de tendência dos índices anuais cdd e cwd provenientes da análise do BRANT (Fig.5.3c; Fig. 3B-b). Com relação aos demais índices anuais de chuva (r95p, prcptot e rx5day) obtidos a partir da análise do BRANT (Fig. 5.2c; Figs. 1B-b e 2B-c), apenas a região central e leste dos Estados é consistente com Santos e Brito (2007).

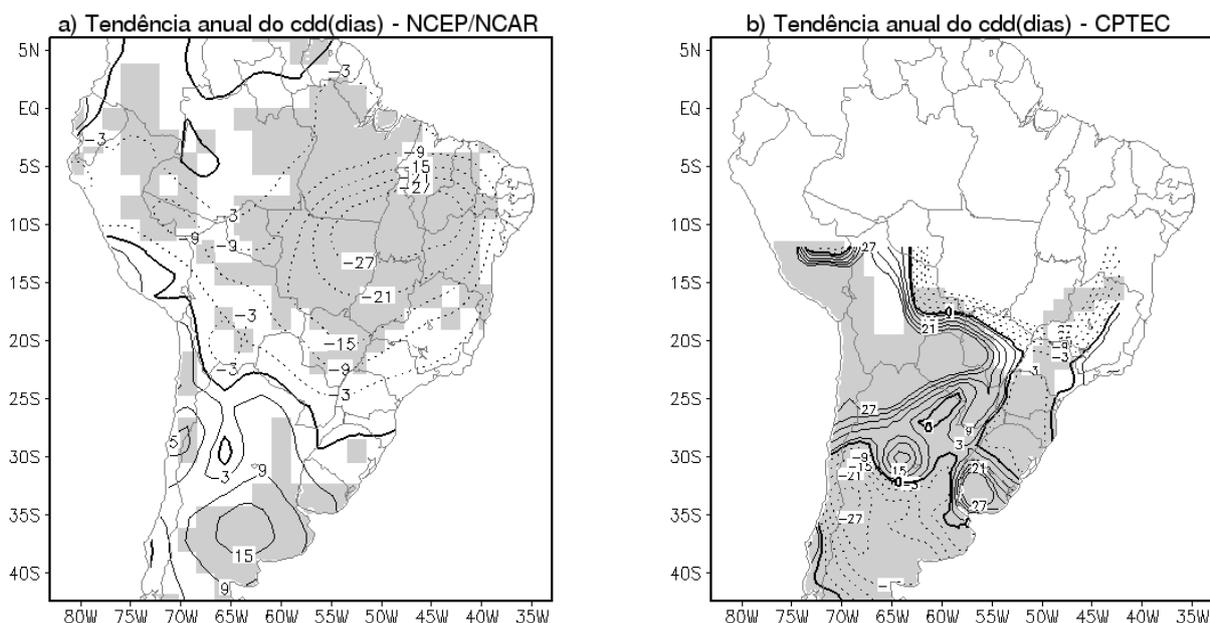


Fig. 5.3. Idem Fig. 5.2 para o índice anual cdd (dias).

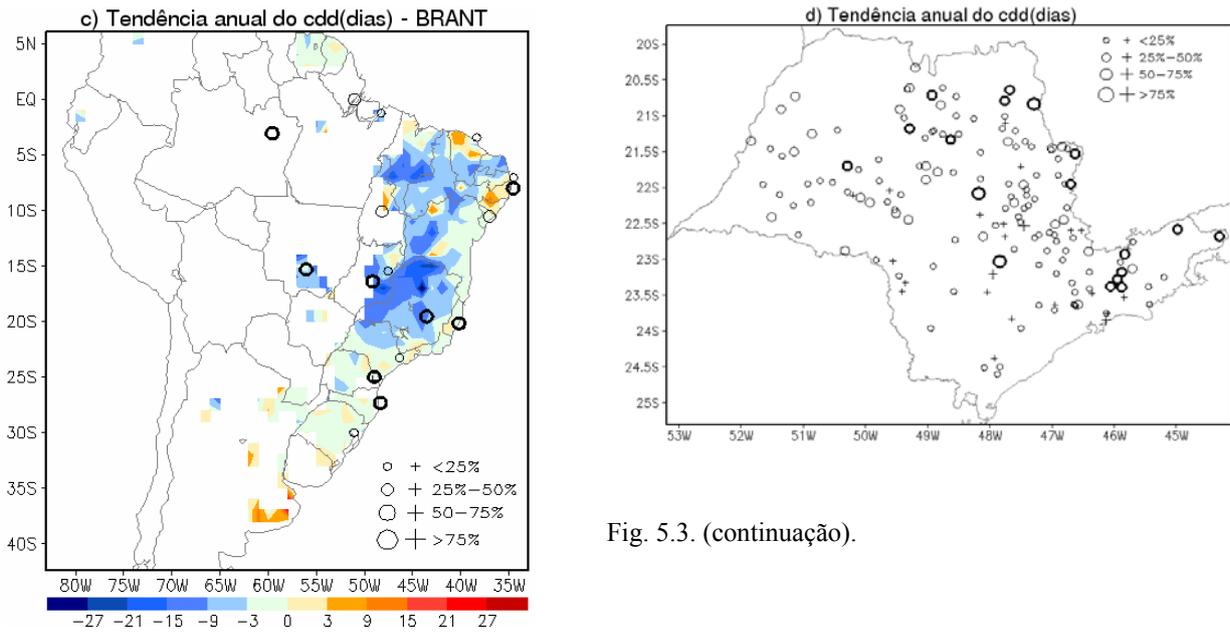


Fig. 5.3. (continuação).

b) Índices sazonais de chuva

Sobre a América do Sul, particularmente ao sul de 12°S, Alexander et al. (2005) estudaram o comportamento do índice sazonal rx5day (precipitação máxima em 5 dias) e concluíram que as tendências positivas observadas durante o período de 1951-2003 ocorrem nas quatro estações do ano, sendo mais (menos) pronunciada no outono (inverno). O mesmo ocorre para as tendências negativas observadas no sul do Chile, com maior (menor) evidência no outono (primavera) seguido pelo inverno (verão). Como o software RCLimDex (Zhang e Yang 2004), muito usado no cálculo de índices de extremos climáticos, fornece resultados mensais e anuais somente para os índices absolutos de chuva, como o rx5day, até o presente momento desconhece-se trabalhos anteriores que abordem o estudo observacional dos demais índices sazonais de extremos climáticos de chuva na América do Sul no clima presente (1961-1990). Portanto, o objetivo desta seção consiste em analisar os mapas de tendência dos índices sazonais de chuva de acordo com a validação realizada na seção 5.1.1.2b, comparando com os padrões espaciais obtidos na análise anual (seção 5.1.2a).

De acordo com a seção 5.1.1.2b, os resultados descritos a seguir apresentam um maior grau de confiabilidade para os meses de outono e inverno e, menor, para o índice cwd nas quatro estações do ano, com exceção do inverno da análise do BRANT sobre o Brasil.

Resultado semelhante ao obtido por Alexander et al. (2005) para o índice sazonal rx5day é observado nos mapas de tendência dos índices sazonais prcptot, r95p, rx5day e cwd obtidos a partir da reanálise do NCEP/NCAR (Figs. 5.4a-d; Figs. 4 a 6B) no período de 1961-1990, com tendências positivas em praticamente toda a América do Sul e com algumas regiões isoladas, concentradas no

sul do continente, com tendências negativas, nas quatro estações do ano. Este padrão é bastante similar ao encontrado para os índices r95p, prcptot, rx5day e cwd na análise anual (Fig. 5.2a; Figs. 1 a 3B-a). Para o índice sazonal cdd, verifica-se uma configuração espacial de tendência do índice nas estações de transição (Figs. 5.5c-d) e no inverno (Fig. 5.5b) obtida a partir da reanálise que muito se aproxima da análise anual (Fig. 5.3a), caracterizada por tendências positivas na Argentina, no Chile e no Uruguai, e, negativas, no restante do continente, sendo o verão (Fig. 5.5a) a estação que mais se diferencia das demais.

Com relação à análise do BRANT, a distribuição espacial de tendência dos diferentes índices sazonais de chuva exibe algumas características em comum, como a configuração espacial uniforme, marcada por tendências negativas para os índices prcptot, r95p, rx5day e cwd e, positivas, para o índice cdd na primavera (Figs. 5.6 e 5.7d; Figs. 7 a 9B-d); no outono (Figs. 5.6 e 5.7c; Figs. 7 a 9B-c), tal configuração difere apenas em algumas regiões do nordeste do Brasil; enquanto que no verão (Figs. 5.6 e 5.7a; Figs. 7 a 9B-a), tendências opostas à da primavera são verificadas principalmente na região sul, incluindo o Estado de São Paulo somente para os índices r95p e rx5day; e, no inverno (Figs. 5.6 e 5.7b; Figs. 7 a 9B-b), o padrão da primavera se inverte por completo, especialmente nas regiões sul e sudeste do Brasil, embora os sinais da tendência variem bastante entre os índices sobre a região nordeste. Comparando a análise sazonal (Figs. 5.6 e 5.7a-d; Figs. 7 a 9B) com a anual (Figs. 5.2 e 5.3c; Figs. 1 a 3B), os resultados indicam uma maior influência da estação de inverno nos mapas de tendência dos índices anuais de chuva.

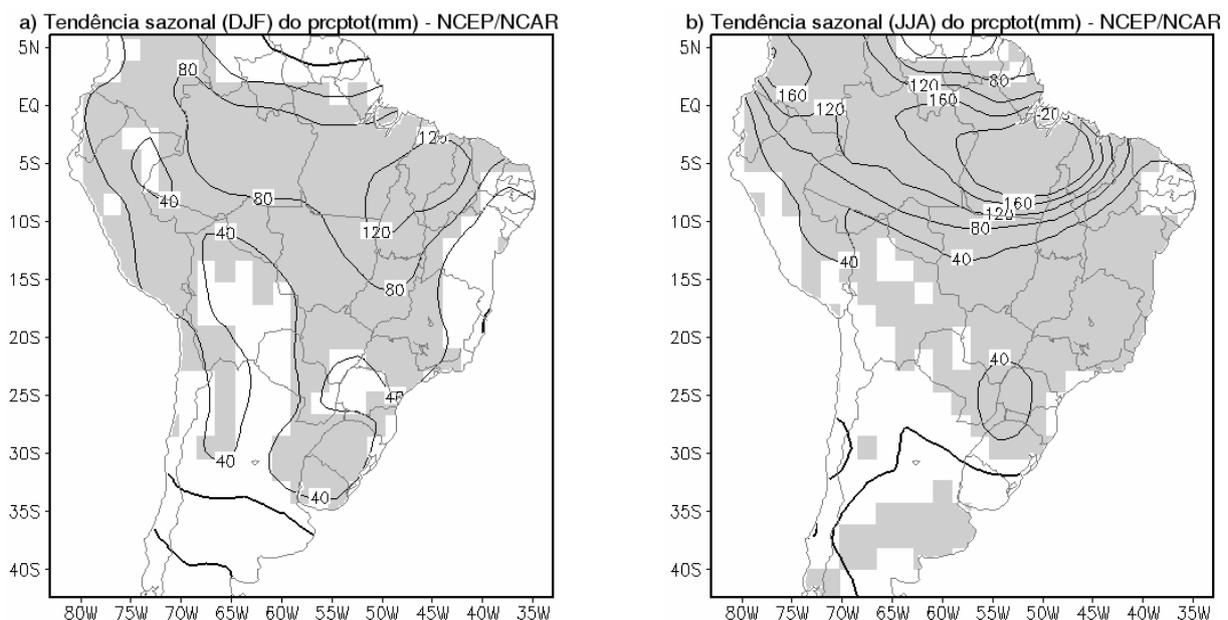
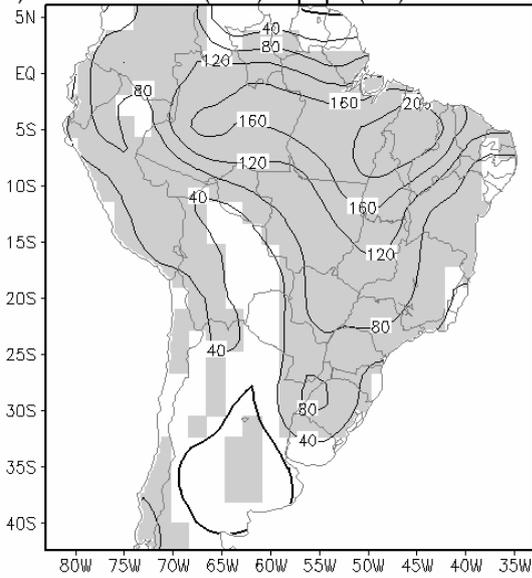


Fig. 5.4. Tendência do índice sazonal prcptot (mm) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 obtida a partir da reanálise do NCEP/NCAR: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

c) Tendência sazonal (MAM) do prcptot(mm) - NCEP/NCAR



d) Tendência sazonal (SON) do prcptot(mm) - NCEP/NCAR

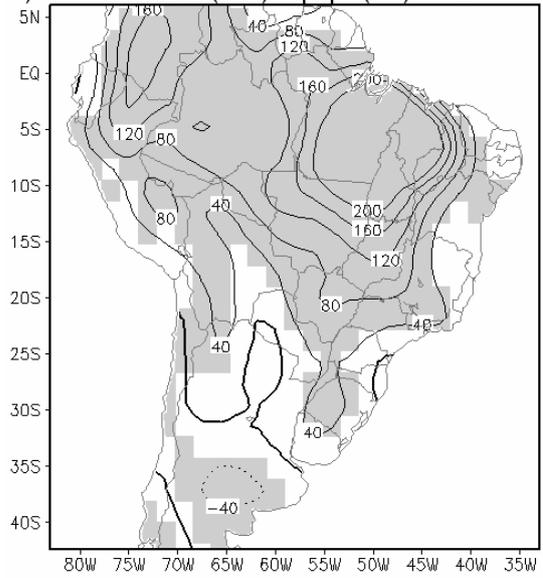
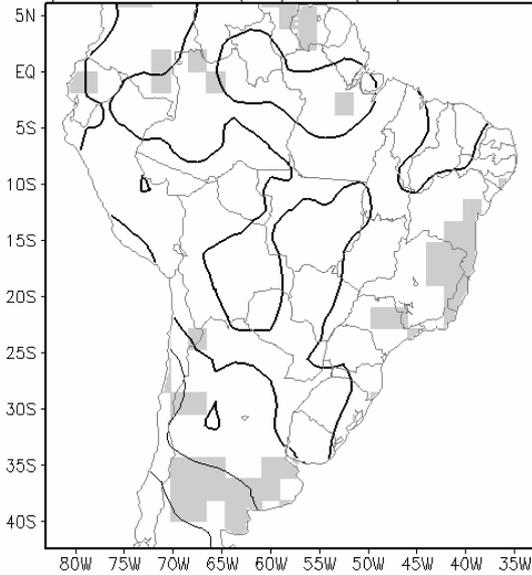
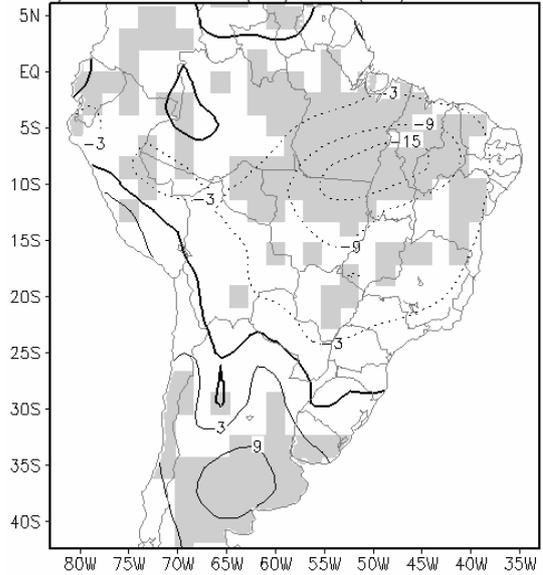


Fig. 5.4. (continuação).

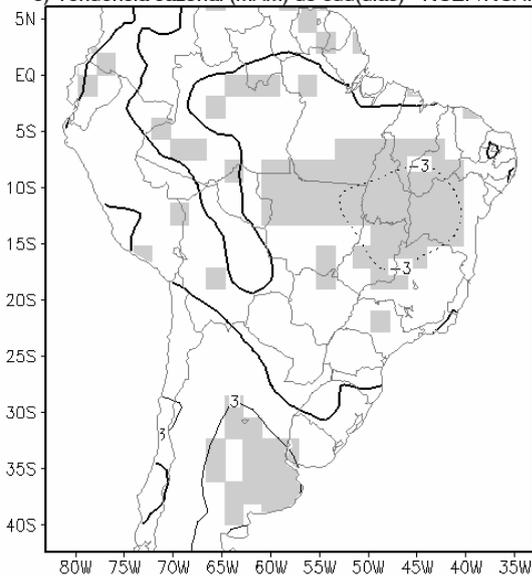
a) Tendência sazonal (DJF) do cdd(dias) - NCEP/NCAR



b) Tendência sazonal (JJA) do cdd(dias) - NCEP/NCAR



c) Tendência sazonal (MAM) do cdd(dias) - NCEP/NCAR



d) Tendência sazonal (SON) do cdd(dias) - NCEP/NCAR

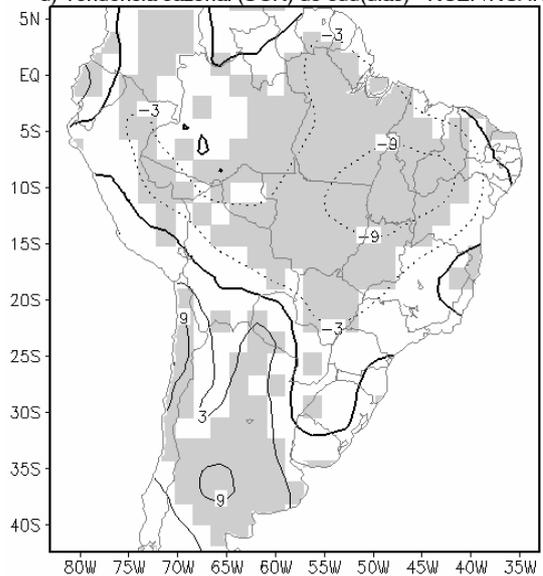


Fig. 5.5. Idem Fig. 5.4 para o índice sazonal cdd (dias).

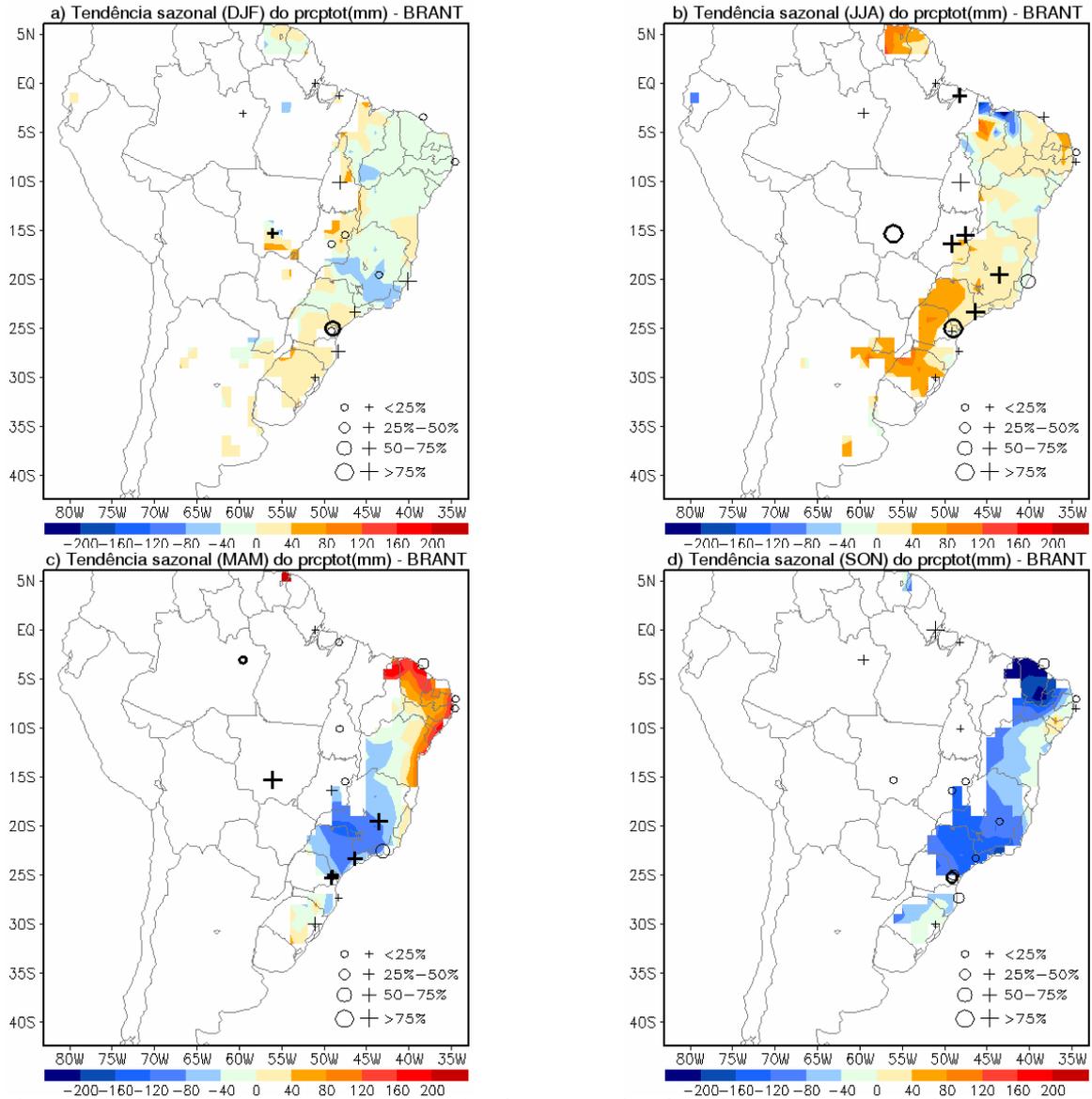


Fig. 5.6. Tendência do índice sazonal prcptot (mm) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 obtida a partir da análise do BRANT: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O intervalo e a escala de intensidade são mostrados no rodapé da figura.

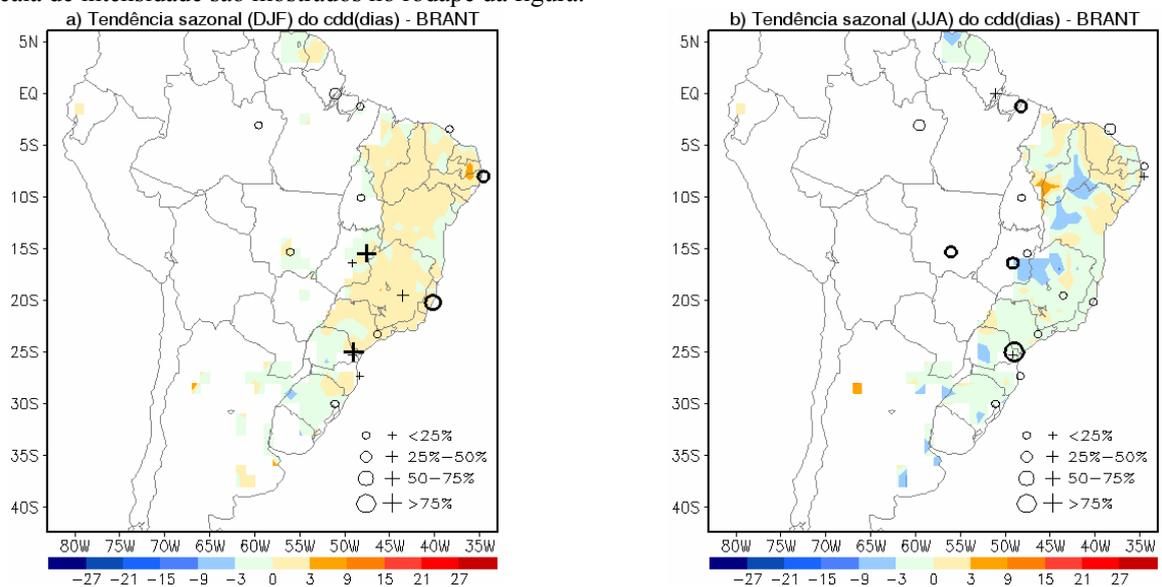


Fig. 5.7. Idem Fig. 5.6 para o índice sazonal cdd (dias).

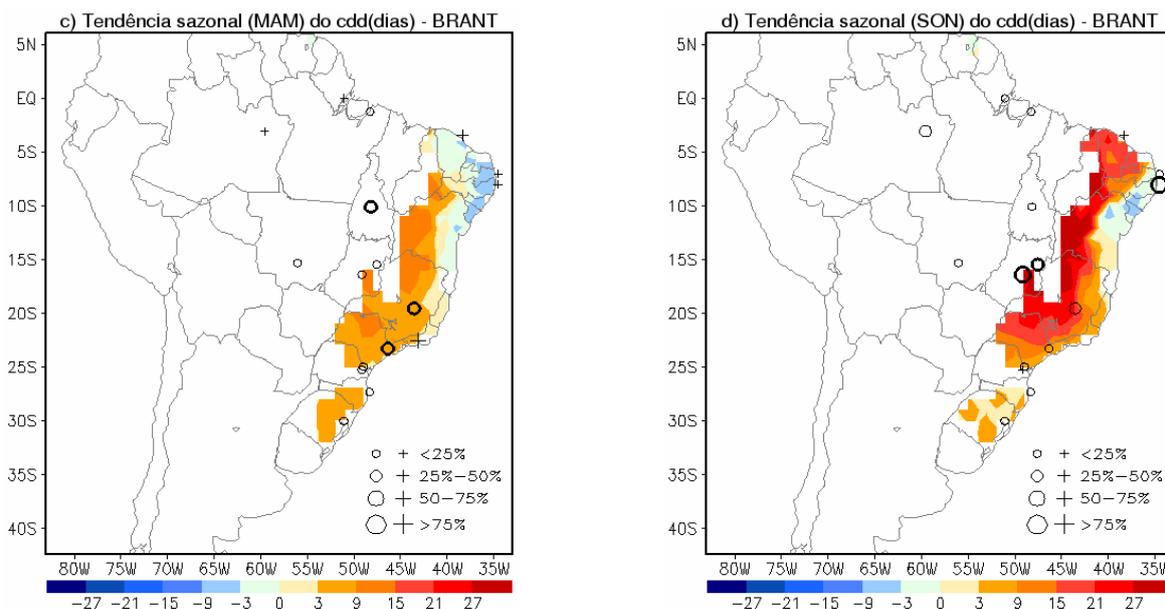


Fig. 5.7. (continuação).

c) Discussão

De acordo com as seções 5.1.2a-b, os mapas de tendência dos índices anuais de chuva derivados da reanálise e da análise do BRANT mostraram padrões muito parecidos entre si, sendo considerados válidos para representar os índices anuais de chuva observados na América do Sul no clima presente (1961-1990).

Por outro lado, os mapas de tendência dos índices sazonais de chuva provenientes da reanálise diferem dos obtidos a partir da análise do BRANT: enquanto no primeiro verifica-se a existência de baixa variabilidade sazonal, com uma configuração espacial bastante similar à análise anual, no segundo, observa-se a inversão de padrões espaciais de tendência entre as estações do ano, atribuindo o aumento das condições de umidade, principalmente, à estação de inverno, seguido pelo verão. Desta forma, a reanálise do NCEP/NCAR apresenta resultados mais coerentes com a análise sazonal do índice rx5day realizada por Alexander et al. (2005) sobre a América do Sul, particularmente ao sul de 12°S, enquanto a análise do BRANT mostra um melhor desempenho em representar as tendências dos índices de chuva (prcptot, cdd, rx5day e r95p) no outono sobre o Brasil (ver seção 5.1.1.2b). Conforme discutido na seção 5.1.1.2b, os dados do NCEP/NCAR e BRANT reproduziram de forma bastante eficiente o sinal das tendências dos índices de chuva (prcptot, cdd, rx5day e r95p) no inverno sobre o Brasil e o Estado de São Paulo, apontando para um aumento tanto nos totais de chuva quanto nos seus extremos (ver seção 5.1.2b).

Apesar da falta de estudos publicados na literatura nacional e internacional sobre as tendências de alguns índices sazonais de chuva específicos, da consistência de moderada a fraca dos

sinais de tendência da reanálise e da análise do BRANT com as observações nas estações de superfície (ver seção 5.1.1.2b) nos meses de primavera e verão, bem como as diferenças encontradas nos mapas de tendência dos índices sazonais de chuva derivados da reanálise e da análise do BRANT (seção 5.1.2b), nas seções que seguem será discutido o comportamento dos índices sazonais de chuva nas quatro estações do ano, respeitando as limitações definidas pelas seções 5.1.1.2b e 5.1.2b.

Vale ressaltar que as tendências negativas observadas no sul do continente nas quatro estações do ano nos mapas de tendência dos índices *prcptot*, *r95p*, *rx5day* e *cwd* derivados da reanálise (Figs. 5.4a-d; Figs. 4 a 6B), não são consideradas confiáveis, uma vez que são encontradas também na análise anual dos índices sobre a região central e leste da Argentina (Fig. 5.2a; Figs. 1 a 3B-a) e não concordam com as observações (Fig. 5.2b; Fig. 2B-b). Portanto, não é seguro avaliar a capacidade dos modelos RegCM3 e HadAM3 em simular tais índices anuais e sazonais nesta região através deste conjunto de dados.

Embora, sobre as sub-regiões AM e NE, a falta de registro meteorológico no período de 1961-1990 dificulte a validação dos dados do NCEP/NCAR e BRANT, o prosseguimento do trabalho nestas áreas pode ser considerado válido, uma vez que representaram de forma satisfatória os índices anuais de chuva nas demais regiões estudadas (ver seção 5.1.2a). A região norte e parte da região centro-oeste do Brasil, assim como alguns países da América do Sul, como o Chile, a Argentina, o Uruguai e o Paraguai, devido ao grande número de dados faltantes na análise do BRANT, ficaram desprovidas de informação sobre os índices anuais e sazonais de chuva (Figs. 5.2, 5.3, 5.6 e 5.7c; Figs. 1 a 3B e 7 a 9B). Desta forma, as simulações dos índices anuais e sazonais de chuva pelos modelos RegCM3 e HadAM3 no clima presente não serão avaliadas na sub-região AM pela análise do BRANT nas seções que seguem. Nas demais sub-regiões, embora a análise do BRANT não preencha completamente as áreas com os dados dos índices anuais e sazonais de chuva, consideraram-se as séries temporais de médias espaciais nas sub-regiões representativas das áreas, principalmente da NE.

5.2. Simulado versus observado

O estudo de comparação entre os índices de chuva observados e simulados pelos modelos RegCM3 e HadAM3 na América do Sul no clima presente (1961-1990) é composto por três seções: distribuição de frequência (seção 5.2.1), coeficientes de correlação na área (seção 5.2.2) e análise espacial das tendências dos índices (seção 5.2.3), sendo que nas duas primeiras o estudo é

desenvolvido para quatro sub-regiões (AM, NE, SDE e SUL), Fig.2.2. Nas seções 5.2.2 e 5.2.3, realiza-se uma abordagem anual e sazonal.

5.2.1. Distribuição de frequência

As Figs. 5.8 e 5.9 mostram as distribuições de frequência da chuva diária observada (NCEP/NCAR e BRANT) e simulada (RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3) em intervalos de classe nas quatro sub-regiões (AM, NE, SDE e SUL) durante o período de 1961-1990. A Tabela 5.5 mostra os coeficientes de correlação entre a distribuição de frequência da chuva diária observada (NCEP/NCAR e BRANT) e simulada pelos modelos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 nas quatro sub-regiões (AM, NE, SDE e SUL) durante o período de 1961-1990.

Tabela 5.5. Coeficientes de correlação entre a distribuição de frequência da chuva diária observada (NCEP/NCAR e BRANT) e simulada pelos modelos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 nas quatro sub-regiões (AM, NE, SDE e SUL) durante o período de 1961-1990. Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.

Área	RegCM3(s1)		RegCM3(s2)		RegCM3(s3)		HadAM3	
	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
AM	0.91	-	0.72	-	0.81	-	0.95	-
NE	0.85	1.00	0.84	1.00	0.85	1.00	0.93	0.96
SDE	0.93	0.99	0.91	0.99	0.93	0.98	0.96	1.00
SUL	0.81	0.75	0.96	0.96	0.84	0.81	0.99	1.00

Comparando a reanálise do NCEP/NCAR com os resultados dos modelos (Fig. 5.8), pode-se destacar as distribuições de frequência da chuva diária simuladas pelo RegCM3(s1) e HadAM3 na sub-região AM e a simulada pelo HadAM3 nas sub-regiões SDE e SUL, pela melhor representação das características (tendência central, forma e variabilidade) da distribuição de frequência da chuva diária observada, além de apresentarem coeficientes de correlação significativos acima de 0.90 (Tabela 5.5). No restante, embora os coeficientes de correlação variem de 0.72 a 0.96 (Tabela 5.5), o segundo máximo está deslocado para a esquerda e subestimado (superestimado) nas sub-regiões AM, NE e SDE (SUL), conforme mostra a Fig. 5.8. Uma análise comparativa das quatro simulações mostra que a simulação do HadAM3 foi a que apresentou os maiores valores de coeficientes de correlação nas quatro sub-regiões, enquanto a simulação do RegCM3(s2) apresentou os menores valores nas sub-regiões AM, NE e SDE (Tabela 5.5).

Por outro lado, as distribuições de frequência da chuva diária simuladas obtiveram um melhor desempenho nas sub-regiões NE e SDE quando comparadas com o BRANT (Fig. 5.9), com coeficientes de correlação significativos muito próximos de 1.00 (Tabela 5.5), com exceção da simulação do HadAM3 na sub-região NE, caracterizada por um perfil bastante diferenciado dos

demaís. Com raras exceções, para ambas as observações (NCEP/NCAR e BRANT), o mínimo em torno dos 1.5mm encontra-se superestimado pelas simulações dos modelos RegCM3 e HadAM3 (Fig. 5.9).

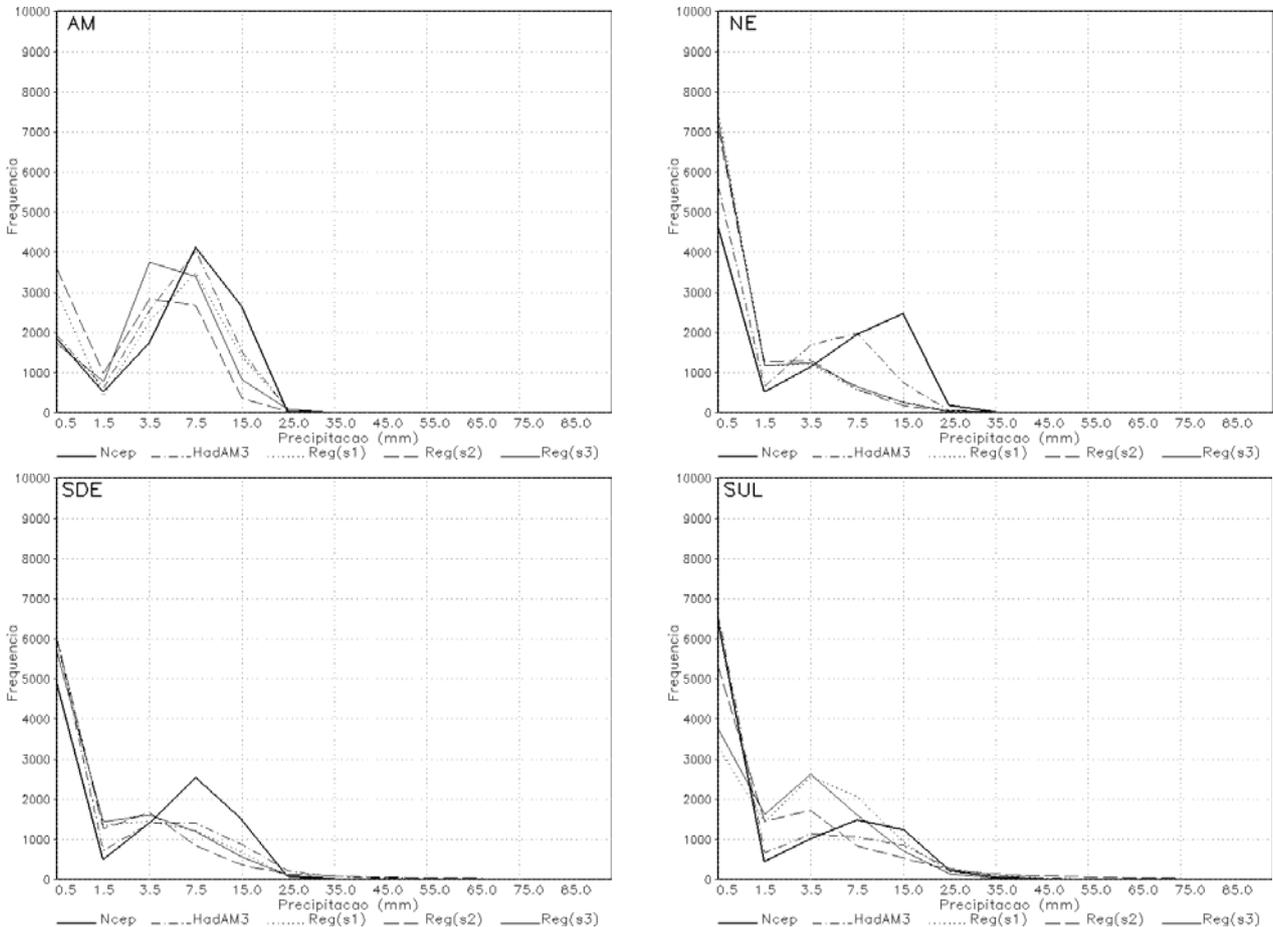


Fig. 5.8. Distribuição de frequência da chuva diária em intervalos de classe nas quatro sub-regiões: AM, NE, SDE e SUL. Cada gráfico apresenta as seguintes curvas: reanálise do NCEP/NCAR (linha contínua em negrito) e as simulações do HadAM3 (linha traço ponto), RegCM3(s1) (linha pontilhada), RegCM3(s2) (linha tracejada) e do RegCM3(s3) (linha contínua).

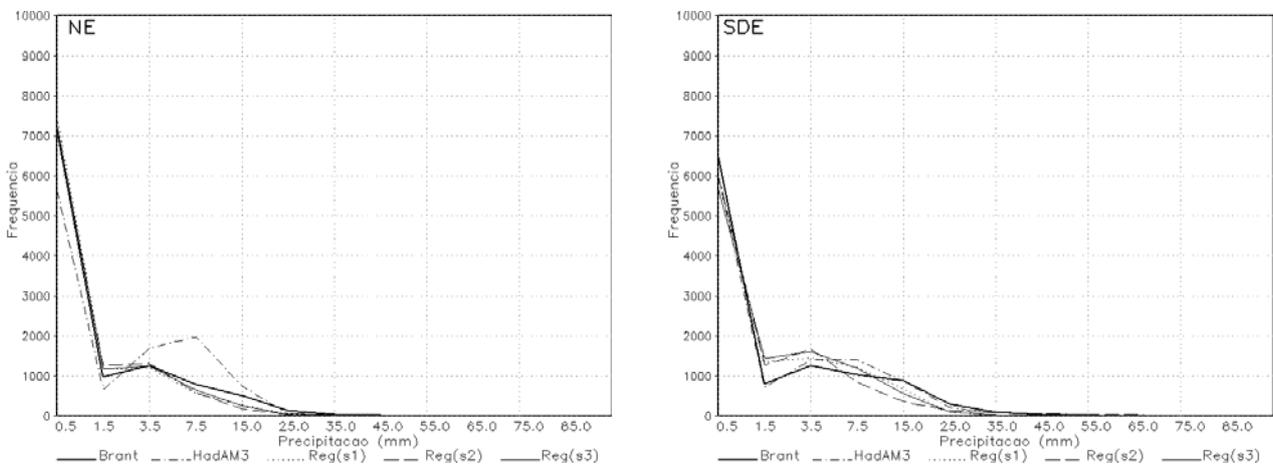


Fig. 5.9. Idem Fig. 5.8 para a análise do BRANT.

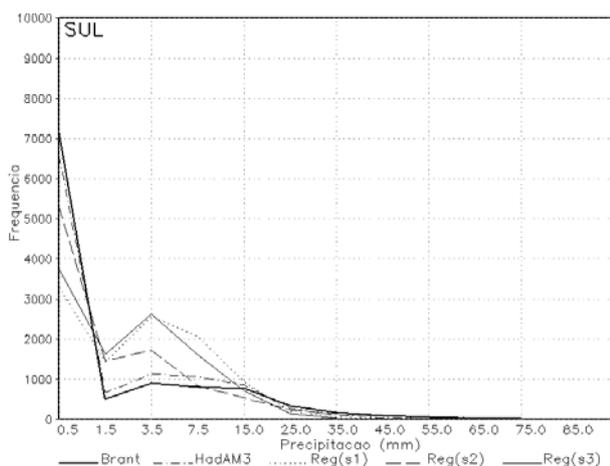


Fig. 5.9. (continuação).

5.2.2. Coeficientes de correlação na área

Os coeficientes de correlação entre as séries temporais dos índices anuais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) simuladas pelos modelos RegCM3 e HadAM3 e observadas (NCEP/NCAR e BRANT) nas quatro sub-regiões (AM, NE, SDE e SUL) durante o período de 1961-1990 são mostrados na Tabela 5.6, enquanto os dos índices sazonais de chuva são apresentados nas Tabelas 5.7 a 5.10.

a) Índices anuais de chuva

Considerando os coeficientes de correlação positivos estatisticamente significativos no nível de 5%, nota-se que a análise do BRANT proporcionou melhores resultados que a reanálise do NCEP/NCAR para os índices anuais de chuva nas sub-regiões NE (Tabela 5.6b) e SUL (Tabela 5.6d), particularmente para os índices prcptot e cwd, na primeira sub-região, e, r95p, prcptot e rx5day, na segunda. Com relação à reanálise, os índices anuais cwd, na sub-região NE (Tabela 5.6b), e rx5day, na sub-região SUL (Tabela 5.6d), exibiram, em sua maioria, coeficientes de correlação acima de 0.20. A fraca coerência entre as observações e as simulações dos índices anuais de chuva nas sub-regiões AM (Tabela 5.6a) e SDE (Tabela 5.6c) é refletida nos coeficientes de correlação, que apresentaram, em sua maioria, valores inferiores a 0.20 e/ou negativos.

Tabela 5.6. Coeficientes de correlação entre os índices anuais de chuva (preptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) simulados pelos modelos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 e observados (NCEP/NCAR e BRANT) durante o período de 1961-1990 nas sub-regiões: (a) AM, (b) NE, (c) SDE e (d) SUL. Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.

Índice	a) Área - AM							
	RegCM3(s1)		RegCM3(s2)		RegCM3(s3)		HadAM3	
	NCEP		NCEP		NCEP		NCEP	
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (preptot)	-0.02		-0.17		0.00		0.01	
Precipitação total com PRCP \geq 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	-0.05		0.23		0.08		-0.14	
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	0.10		0.12		0.08		-0.20	
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	0.16		-0.32		0.37		0.50	
Número máximo de dias consecutivos com PRCP \geq 1mm (cwd)	0.50		-0.21		-0.26		-0.16	
Índice	b) Área - NE							
	RegCM3(s1)		RegCM3(s2)		RegCM3(s3)		HadAM3	
	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (preptot)	0.29	0.59	0.07	0.39	-0.13	0.29	0.26	0.47
Precipitação total com PRCP \geq 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	0.13	0.12	-0.20	0.11	-0.41	-0.05	0.08	0.03
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	0.07	-0.32	-0.16	-0.08	-0.30	-0.34	0.01	-0.27
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	0.13	0.09	0.19	-0.05	0.22	0.10	0.40	0.71
Número máximo de dias consecutivos com PRCP \geq 1mm (cwd)	0.43	0.54	0.45	0.70	0.07	0.36	0.33	0.50
Índice	c) Área - SDE							
	RegCM3(s1)		RegCM3(s2)		RegCM3(s3)		HadAM3	
	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (preptot)	0.32	0.13	-0.20	-0.26	-0.23	0.07	0.02	0.08
Precipitação total com PRCP \geq 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	0.34	0.05	-0.06	-0.09	0.09	0.27	0.04	0.12
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	-0.07	-0.31	-0.07	0.02	-0.31	0.00	-0.04	-0.35
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	-0.47	-0.15	0.15	0.23	0.36	0.18	0.35	0.59
Número máximo de dias consecutivos com PRCP \geq 1mm (cwd)	-0.16	0.01	-0.09	-0.03	-0.02	0.09	0.35	0.01
Índice	d) Área - SUL							
	RegCM3(s1)		RegCM3(s2)		RegCM3(s3)		HadAM3	
	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (preptot)	-0.06	0.28	0.06	0.42	0.15	0.42	0.01	0.28
Precipitação total com PRCP \geq 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	0.33	0.67	0.19	0.46	0.16	0.47	0.03	0.44
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	0.22	0.30	0.24	0.34	0.19	0.41	0.21	0.22
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	0.20	0.16	-0.28	-0.28	0.16	0.05	0.14	0.28
Número máximo de dias consecutivos com PRCP \geq 1mm (cwd)	-0.33	-0.02	-0.01	-0.02	0.02	-0.26	-0.03	0.24

b) Índices sazonais de chuva

De maneira geral, considerando os coeficientes de correlação positivos e estatisticamente significativos no nível de 5% referentes aos índices sazonais de chuva nas quatro sub-regiões para ambos os conjuntos de dados (Tabelas 5.7 a 5.10), os resultados se concentram nas estações de outono e inverno, principalmente para a simulação do RegCM3(s1), sendo que para cada sub-região, simulação e dados observados, os índices apresentam particularidades que serão discutidas a seguir. Através das Tabelas 5.7 a 5.10, observa-se que os coeficientes de correlação entre os índices sazonais de chuva simulados pelo RegCM3(s1) e observados (NCEP/NCAR e BRANT) nas quatro sub-regiões (AM, NE, SDE e SUL) para a estação da primavera são negativos e, em sua maioria, significativos. Este resultado só não se aplica para alguns índices sazonais de chuva na sub-região SUL (Tabela 5.10).

Para a sub-região AM (Tabela 5.7), além dos resultados mais gerais mencionados no início desta seção, incluem-se os coeficientes de correlação negativos e significativos dos índices de chuva nas estações de verão e primavera para as simulações do RegCM3(s1 e s2) e, somente no verão, para a simulação do HadAM3. A fraca coerência entre os dados do NCEP/NCAR e a simulação do RegCM3(s2) para os índices sazonais de chuva na sub-região AM (Tabela 5.7) é refletida nos coeficientes de correlação, que apresentaram valores inferiores a 0.20 e/ou negativos, com destaque para o índice cdd.

Na sub-região NE (Tabela 5.8), destacam-se os índices cdd e cwd no verão, com coeficientes de correlação superiores a 0.20 entre as simulações (RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3) e as observações. Através da Tabela 5.8, observa-se que alguns índices sazonais de chuva exibiram uma boa correlação entre as observações e a simulação do HadAM3, como o *prcptot*, cdd, cwd (BRANT) e *rx5day* (NCEP) na primavera e, *r95p* e *rx5day* no verão (BRANT).

Para ambas as observações (NCEP/NCAR e BRANT), na sub-região SDE (Tabela 5.9), a simulação do HadAM3 apresentou um resultado distinto das demais simulações, caracterizado por correlações positivas, com valores acima de 0.20, nas estações de inverno e primavera para os índices *r95p*, *prcptot*, cdd e cwd, com exceção da primavera na análise do BRANT para o último, e, nas estações de outono e inverno somente para o índice *rx5day*.

Como observado na seção 5.2.2a (Tabela 5.6d), a sub-região SUL (Tabela 5.10) é marcada pelo menor número de correlações positivas estatisticamente significativas entre as séries temporais dos índices sazonais de chuva simuladas e observadas. Com relação à análise do BRANT (Tabela 5.10), os resultados sugerem uma maior habilidade dos modelos (RegCM3 e HadAM3) em simular o índice *r95p* nas quatro estações do ano, particularmente no inverno e primavera, com

exceção do verão para a simulação do HadAM3. Com um resultado um pouco inferior, pode-se mencionar também os índices prcptot e rx5day no inverno e primavera. Já para a reanálise (Tabela 5.10), pode-se citar os índices r95p, também no inverno e primavera, e o cdd no verão.

Tabela 5.7. Coeficientes de correlação entre os índices sazonais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) simulados pelos modelos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 e observado (NCEP/NCAR) durante o período de 1961-1990 na sub-região AM. Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.

Índice		Área - AM			
		RegCM3(s1)	RegCM3(s2)	RegCM3(s3)	HadAM3
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (prcptot)	verão	-0.32	-0.04	-0.21	-0.32
	outono	0.43	-0.19	0.50	-0.16
	inverno	0.86	-0.19	0.63	0.28
	primavera	-0.72	0.02	-0.10	0.28
	verão	-0.25	0.19	-0.22	-0.40
Precipitação total com PRCP $>$ 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	outono	-0.05	0.18	0.39	-0.16
	inverno	0.83	-0.06	0.44	0.33
	primavera	-0.65	0.08	-0.08	0.18
	verão	-0.23	0.18	-0.07	-0.40
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	outono	0.28	0.13	0.27	-0.18
	inverno	0.78	-0.25	0.53	0.35
	primavera	-0.68	0.00	-0.13	0.12
	verão	-0.34	-0.35	-0.12	-0.36
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	outono	-0.17	-0.24	0.32	0.26
	inverno	0.58	-0.45	0.31	0.39
	primavera	-0.53	0.02	-0.54	0.27
	verão	-0.03	0.10	-0.05	-0.09
Número máximo de dias consecutivos com PRCP \geq 1mm (cwd)	outono	0.32	-0.18	0.15	-0.29
	inverno	0.82	-0.28	0.40	0.13
	primavera	-0.65	0.07	-0.11	0.32

Tabela 5.8. Coeficientes de correlação entre os índices sazonais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) simulados pelo RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 e observados (NCEP/NCAR e BRANT) durante o período de 1961-1990 na sub-região NE. Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa no nível de 5%.

Índice		Área - NE							
		RegCM3(s1)		RegCM3(s2)		RegCM3(s3)		HadAM3	
		NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (prcptot)	verão	-0.31	0.08	0.32	0.10	0.04	0.10	-0.09	0.26
	outono	0.53	0.44	0.17	0.54	0.18	0.32	0.33	0.54
	inverno	0.60	0.30	0.10	0.57	0.20	0.47	0.12	0.36
	primavera	-0.20	-0.51	-0.08	-0.12	-0.12	-0.15	0.25	0.36
	verão	-0.36	0.19	-0.10	-0.24	-0.36	-0.19	-0.04	0.32
Precipitação total com PRCP $>$ 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	outono	0.06	-0.02	-0.16	0.32	-0.24	-0.02	-0.12	0.13
	inverno	0.52	0.28	0.04	0.40	0.18	0.26	0.10	0.34
	primavera	-0.12	-0.39	-0.15	-0.13	-0.10	0.02	0.16	-0.10
	verão	-0.27	0.17	0.04	-0.28	-0.16	-0.18	0.00	0.31
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	outono	0.13	-0.12	-0.10	0.00	-0.20	0.01	-0.05	-0.04
	inverno	0.66	0.27	0.22	0.48	0.20	0.34	0.22	0.42
	primavera	-0.19	-0.41	-0.16	-0.28	0.10	0.04	0.32	0.11
	verão	0.09	0.22	0.51	0.33	0.50	0.52	0.22	0.30
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	outono	0.49	0.55	0.32	0.61	0.47	0.63	0.31	0.57
	inverno	0.74	0.24	0.00	-0.12	0.30	0.21	0.32	0.40
	primavera	-0.57	-0.54	0.28	-0.02	-0.13	-0.37	0.32	0.40
	verão	0.19	0.15	0.71	0.37	0.43	0.36	0.34	0.23
Número máximo de dias consecutivos com PRCP \geq 1mm (cwd)	outono	0.56	0.34	0.56	0.62	0.11	0.11	0.47	0.43
	inverno	0.47	0.02	0.11	0.31	0.04	0.22	0.10	0.17
	primavera	-0.22	-0.31	-0.10	-0.19	-0.30	0.08	0.28	0.28

Tabela 5.9. Idem Tabela 5.8 para a sub-região SDE.

Índice		Área - SDE							
		RegCM3(s1)		RegCM3(s2)		RegCM3(s3)		HadAM3	
		NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (preptot)	verão	-0.30	-0.01	-0.29	-0.06	-0.31	-0.11	-0.15	-0.04
	outono	0.65	0.62	0.12	0.15	0.12	0.09	-0.06	-0.07
	inverno	0.52	0.31	0.57	0.31	0.48	0.18	0.40	0.45
	primavera	-0.51	-0.51	-0.01	-0.18	0.06	0.01	0.38	0.20
	verão	-0.05	0.03	-0.17	0.12	-0.14	0.02	-0.17	-0.04
Precipitação total com PRCP $>$ 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	outono	0.51	0.45	0.13	0.20	0.18	0.13	0.06	0.05
	inverno	0.45	0.32	0.21	0.28	0.13	0.18	0.36	0.41
	primavera	-0.49	-0.43	0.06	-0.11	0.08	-0.11	0.27	0.25
	verão	0.02	0.14	-0.07	0.10	-0.24	-0.08	-0.24	-0.10
	outono	0.51	0.39	0.00	-0.02	0.29	0.04	0.21	0.33
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	inverno	0.64	0.38	0.35	0.19	0.31	0.19	0.40	0.43
	primavera	-0.41	-0.40	0.02	0.01	0.01	0.10	0.04	-0.03
	verão	0.42	0.17	-0.08	-0.29	0.15	0.06	-0.08	0.22
	outono	0.52	0.46	0.30	0.36	0.35	0.41	-0.29	-0.15
	inverno	0.47	0.29	-0.01	0.10	0.16	0.05	0.40	0.49
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	primavera	-0.49	-0.41	0.18	0.19	0.39	0.19	0.45	0.44
	verão	-0.22	0.17	-0.07	-0.05	-0.02	0.25	0.01	-0.03
	outono	0.13	0.33	-0.03	0.01	0.03	0.06	0.09	-0.25
	inverno	0.38	-0.03	0.27	0.07	0.02	0.04	0.20	0.24
	primavera	-0.37	-0.39	0.11	-0.23	-0.25	-0.29	0.33	0.09

Tabela 5.10. Idem Tabela 5.8 para a sub-região SUL.

Índice		Área - SUL							
		RegCM3(s1)		RegCM3(s2)		RegCM3(s3)		HadAM3	
		NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT	NCEP	BRANT
Precipitação total com PRCP \geq 1mm (preptot)	verão	0.02	0.07	0.09	0.18	0.12	-0.01	0.14	-0.12
	outono	0.22	0.17	-0.21	-0.02	-0.16	0.06	-0.19	0.07
	inverno	0.42	0.19	0.27	0.33	0.19	0.25	0.36	0.46
	primavera	-0.41	0.16	0.06	0.27	0.07	0.36	-0.03	0.04
	verão	0.04	0.36	0.00	0.18	0.41	0.34	-0.31	-0.22
Precipitação total com PRCP $>$ 95th percentis e PRCP \geq 1mm (r95p)	outono	0.08	0.06	-0.03	0.17	0.03	0.28	-0.05	0.29
	inverno	0.49	0.50	0.44	0.56	0.26	0.29	0.52	0.52
	primavera	0.08	0.27	0.26	0.39	0.25	0.51	0.22	0.04
	verão	-0.01	0.02	0.10	0.15	0.18	0.05	-0.17	-0.29
	outono	0.37	0.14	-0.15	-0.09	-0.18	-0.04	-0.28	0.01
Precipitação máxima em 5 dias consecutivos (rx5day)	inverno	0.42	0.44	0.29	0.47	0.08	0.27	0.29	0.30
	primavera	-0.11	0.21	0.10	0.25	0.14	0.37	0.28	0.04
	verão	0.22	0.07	0.24	0.13	0.05	0.06	0.22	0.06
	outono	0.29	0.10	-0.08	-0.15	0.09	0.08	0.13	-0.03
	inverno	0.05	0.00	-0.19	-0.30	-0.21	-0.27	0.05	0.06
Número máximo de dias consecutivos com PRCP $<$ 1mm (cdd)	primavera	-0.11	0.08	0.16	0.09	0.11	0.12	-0.44	-0.20
	verão	-0.08	-0.29	0.11	0.11	-0.12	-0.14	0.20	0.12
	outono	-0.21	0.16	-0.15	-0.13	-0.34	-0.17	-0.25	-0.15
	inverno	0.16	0.12	-0.07	0.07	0.00	0.21	0.27	0.08
	primavera	-0.31	-0.02	0.19	-0.02	0.07	-0.02	-0.02	-0.06

c) Discussão

Considerando as quatro sub-regiões no estudo dos coeficientes de correlação dos índices anuais de chuva para a reanálise (ver Tabela 5.6a-d da seção 5.2.2a), observa-se que a simulação do RegCM3(s3) mostrou-se ligeiramente inferior às outras duas, com um maior número de coeficientes de correlação negativos abaixo de -0.20, enquanto que a simulação do RegCM3(s1) apresentou um

melhor desempenho, com um maior número de coeficientes de correlação positivos significativos. Este último resultado também se verifica nos meses de outono e inverno para os dados do NCEP/NCAR e BRANT (ver Tabelas 5.7 a 5.10 da seção 5.2.2b). Com relação à análise do BRANT, não foram observadas grandes discrepâncias entre os resultados das simulações do RegCM3(s1, s2, s3) na seção 5.2.2a. Embora, os meses de verão e primavera tenham mostrado correlações negativas, sendo algumas significativas, principalmente para a simulação do RegCM3(s1) nas sub-regiões AM, NE e SDE (Tabela 5.7, 5.8 e 5.9, respectivamente), isto não significa que os modelos RegCM3 e HadAM3 não sejam capazes de simular as tendências dos índices de chuva nestas estações do ano e sub-regiões, pois os conjuntos de dados do NCEP/NCAR e BRANT não se mostraram uma boa referência nestas mesmas condições. A interpretação inversa também é válida. Desta forma, dentre as três simulações do RegCM3, optou-se por escolher a simulação do RegCM3(s1) para dar continuidade aos estudos dos índices anuais e sazonais de chuva, uma vez que reproduziu os índices nas quatro sub-regiões de estudo relativamente melhor, principalmente quando correlacionada com os dados da reanálise.

5.2.3. Análise espacial

a) Índices anuais de chuva

As Figs. 5.10a-e mostram os mapas de tendência para os índices anuais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) simulados pelo modelo RegCM3(s1) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990.

A predominante tendência positiva dos índices anuais r95p, prcptot e rx5day observada na América do Sul (Figs. 5.2a-d da seção 5.1.2a; Figs. 1 e 2B) foi simulada satisfatoriamente pelo RegCM3(s1) (Figs. 5.10a-c), apesar da presença de pequenas regiões isoladas, concentradas no extremo norte e oeste do continente e próximas do norte da Argentina e das regiões sul e sudeste do Brasil, com tendências negativas. Por outro lado, a simulação do modelo (Figs. 5.10a-c) não detectou as tendências negativas dos índices anuais r95p, prcptot e rx5day observadas no sudoeste da América do Sul (Fig. 5.2b da seção 5.1.2a; Fig. 2B-b). Com relação aos Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, as tendências positivas dos índices anuais prcptot, cwd e r95p na Paraíba e do rx5day na região central e leste dos Estados e, as tendências negativas do índice cdd na região central e oeste dos Estados simuladas pelo RegCM3(s1) (Figs. 5.10a-e) são consistentes com o trabalho de Santos e Brito (2007).

A Fig. 5.10e mostra que o RegCM3(s1) simulou tendências negativas para o índice anual cwd no sul e parte do sudeste do Brasil; e, tendências positivas na região norte da Argentina, sendo que

ambas não estão de acordo com as observações, que exibiram tendências opostas para as mesmas regiões (ver seção 5.1.2a; Fig. 3B). Por outro lado, simulou corretamente as tendências negativas no Chile e no sul do Paraguai; e, as tendências positivas nas demais áreas, com exceção apenas do extremo norte da América do Sul. A simulação da tendência do índice anual cdd (Fig. 5.10d) diverge do observado (Figs. 5.3a-d da seção 5.1.2a) em não reproduzir o padrão de tendências negativas que caracteriza as observações, embora apresente algumas regiões com tendências positivas semelhantes às observações, como o sudoeste da América do Sul, o norte da Argentina, o Paraguai e parte da Bolívia, Chile e Peru.

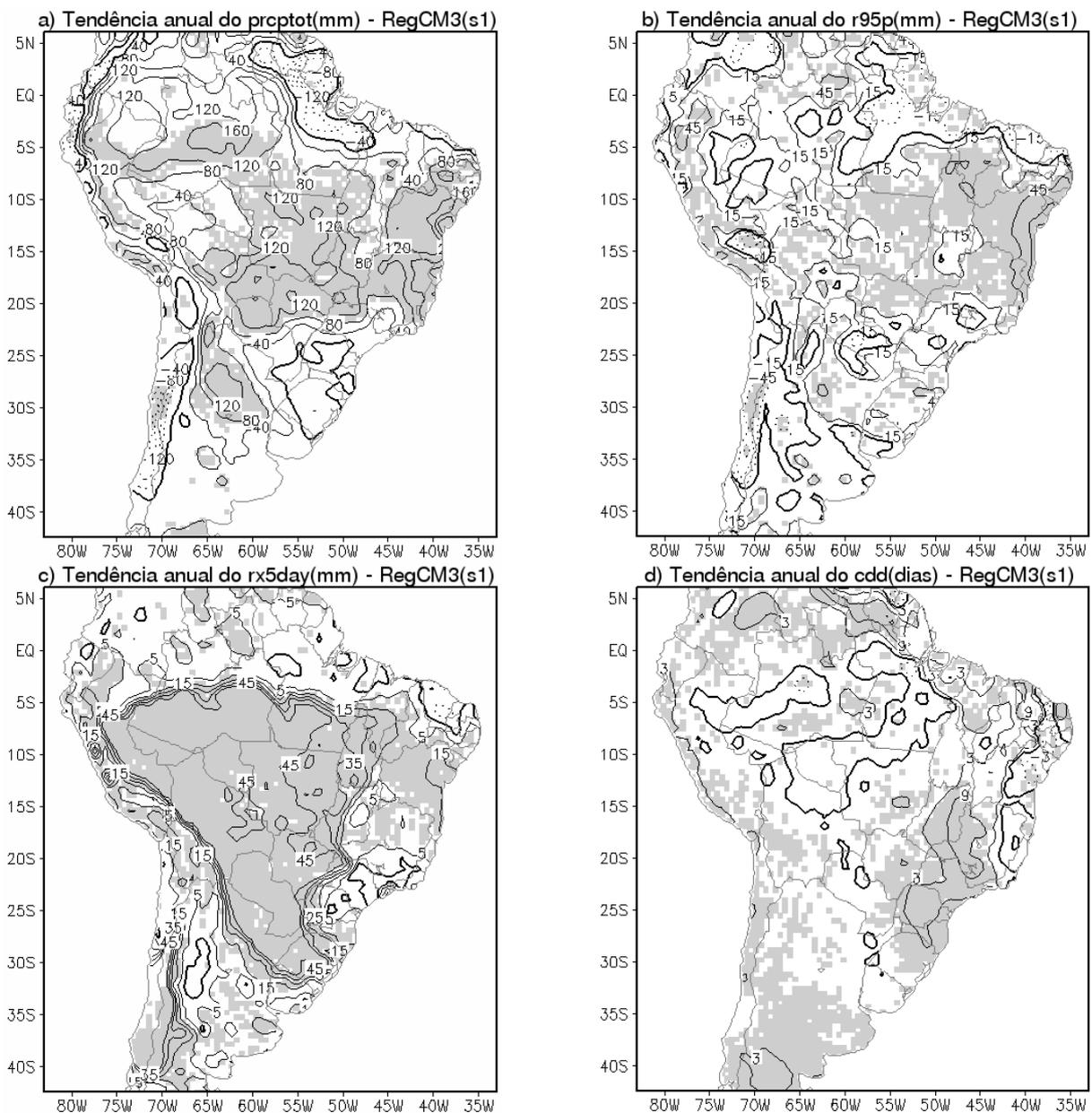


Fig. 5.10. Tendência dos índices anuais de chuva: (a) prcptot (mm), (b) r95p (mm), (c) rx5day (mm), (d) cdd (dias) e (e) cwd (dias) simulada pelo modelo RegCM3(s1) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990. O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

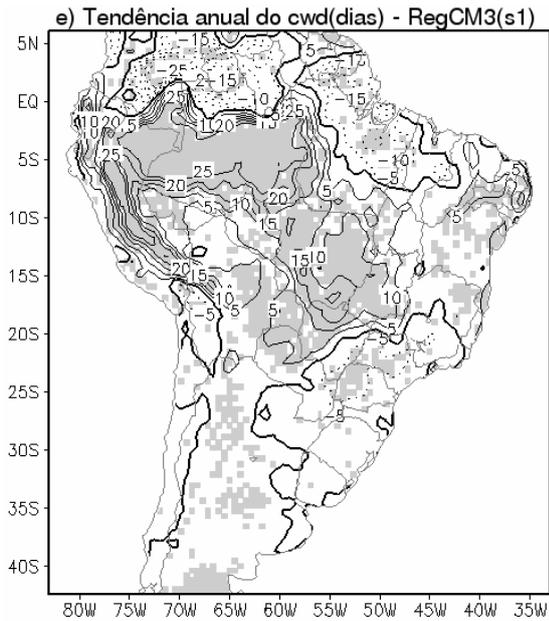


Fig. 5.10. (continuação).

b) Índices sazonais de chuva

As Figs. 5.11 e 5.12a-d mostram os mapas de tendência para os índices sazonais de chuva (dias muito úmidos - r95p e dias secos consecutivos - cdd) simulados pelo modelo RegCM3(s1) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990, com as seguintes composições sazonais: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON).

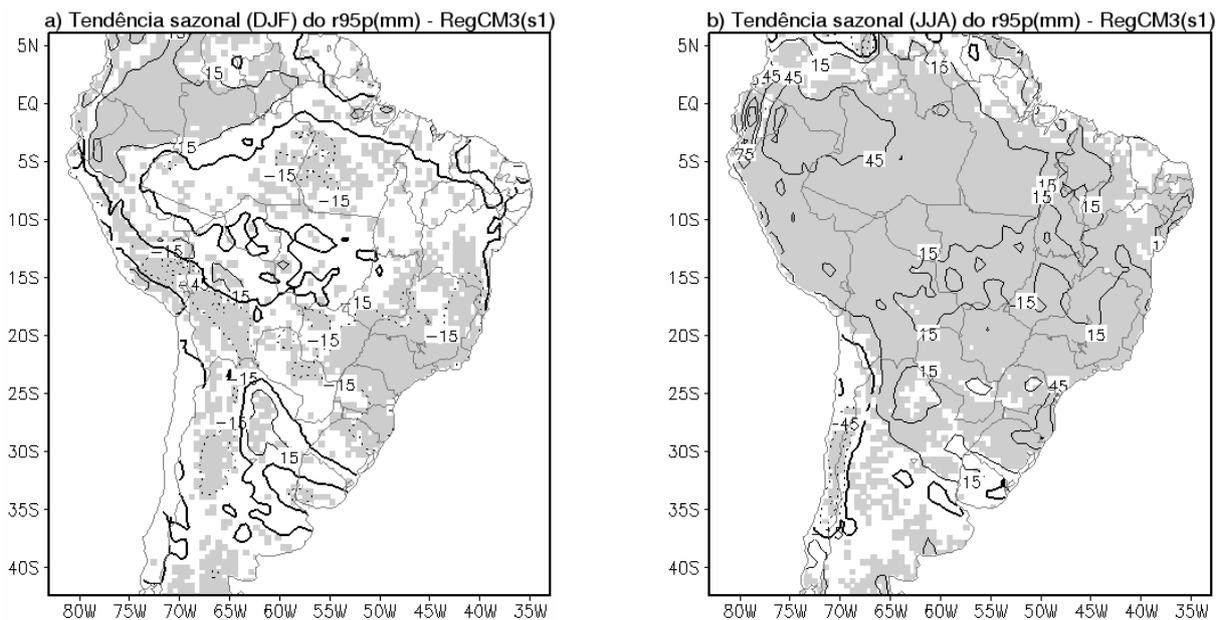


Fig. 5.11. Tendência do índice sazonal r95p (mm) simulada pelo modelo RegCM3(s1) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

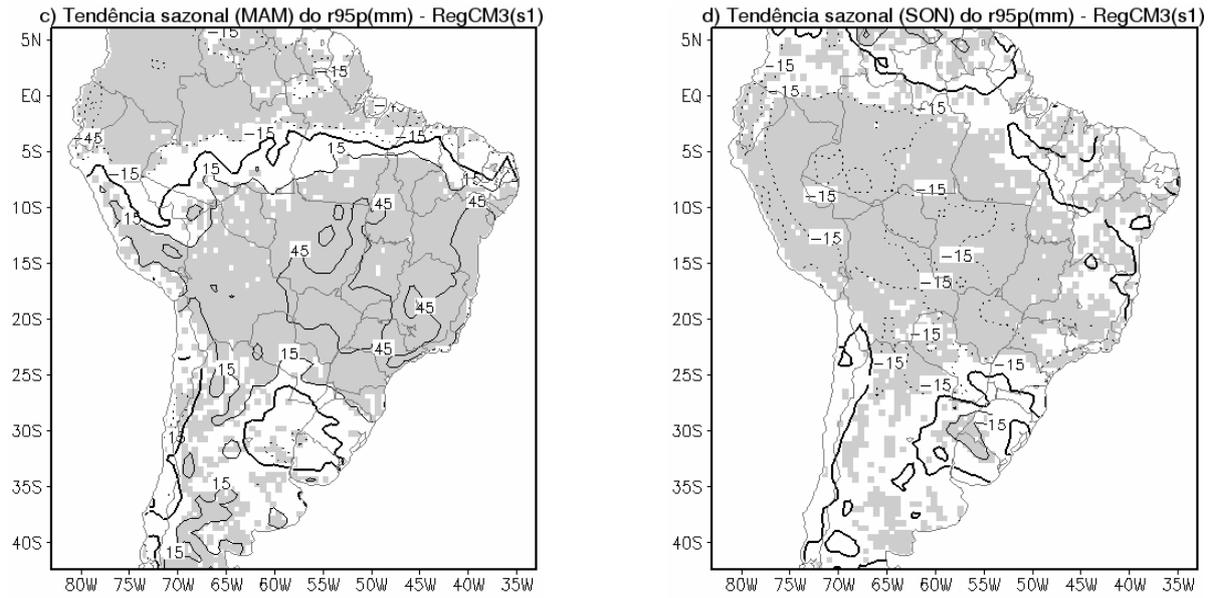


Fig. 5.11. (continuação).

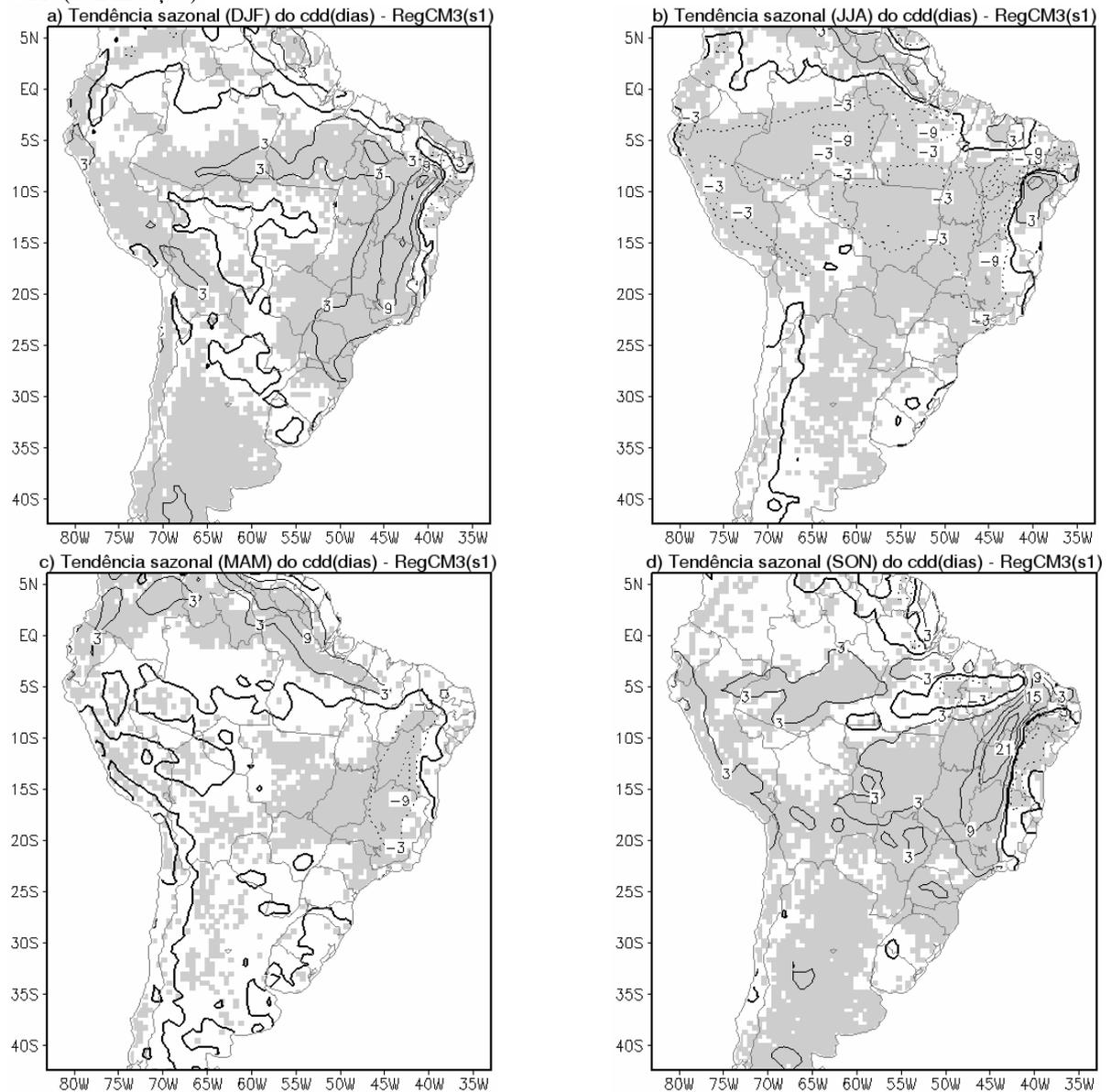


Fig. 5.12. Idem Fig. 5.11 para o índice sazonal cdd (dias).

A distribuição espacial de tendência dos índices sazonais de chuva r95p, prcptot, rx5day e cwd simulada pelo RegCM3(s1) (Figs. 5.11a-d; Figs. 10 a 12B) é caracterizada principalmente por tendências negativas (positivas) nas estações de verão e primavera (inverno e outono), sendo que o padrão do outono (primavera) é praticamente o oposto do verão (inverno). Um padrão inverso de tendências é encontrado para o índice sazonal cdd (Figs. 5.12a-d).

Diante deste resultado, verifica-se que no geral as simulações da tendência dos índices sazonais de chuva pelo RegCM3(s1) (Figs. 5.11 e 5.12a-d; Figs. 10 a 12B) são bastante semelhantes às observações do BRANT (Figs. 5.6 e 5.7a-d da seção 5.1.2b; Figs. 7 a 9B) nas estações de inverno e primavera, porém muito diferentes no outono. Por outro lado, as simulações se assemelham a reanálise (Figs. 5.4 e 5.5a-d da seção 5.1.2b; Figs. 4 a 6B) nas estações de inverno e outono e diferem na primavera e no verão, com exceção do índice cdd.

Desta forma, diferentemente dos resultados da reanálise (Figs. 5.4 e 5.5a-d da seção 5.1.2b; Figs. 4 a 6B), nota-se a existência de variabilidade sazonal nos mapas de tendência dos índices de chuva simulados pelo modelo (Figs. 5.11 e 5.12a-d; Figs. 10 a 12B) e obtidos a partir da análise do BRANT (Figs. 5.6 e 5.7a-d da seção 5.1.2b; Figs. 7 a 9B).

c) HadAM3 versus RegCM3

Os mapas de tendência para os índices anuais de chuva (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd) simulados pelo modelo HadAM3 sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 (Fig. 13B) mostram um comportamento bastante similar aos gerados pelo modelo RegCM3(s1) (Figs. 5.10a-e), embora sejam caracterizados por tendências mais suavizadas. Por outro lado, os padrões espaciais de tendência dos índices sazonais de chuva r95p, cdd, prcptot, rx5day e cwd simulados pelos RegCM3(s1) (Figs. 5.11 e 5.12a-d; Figs. 10 a 12B) e HadAM3 (Figs. 14 a 18B) se assemelham somente nos meses de outono e inverno e, nos meses de primavera e verão para o índice cdd, enquanto que tendências opostas entre os modelos são detectadas nas estações de primavera e verão pelos índices prcptot, r95p, rx5day e cwd e, nas estações de outono e inverno, pelo índice cdd.

Através das seções 5.2.1 e 5.2.2a-b, nota-se que, de maneira geral, os modelos RegCM3(s1) e HadAM3 apresentaram resultados coerentes entre si. No entanto, foi no estudo dos coeficientes de correlação dos índices anuais e sazonais de chuva nas quatro sub-regiões (ver Tabelas 5.6 a 5.10 das seções 5.2.2a-b) que a simulação do RegCM3(s1) mostrou-se superior à do HadAM3 para a maioria dos índices anuais e sazonais e sub-regiões, embora em algumas situações o HadAM3 mostrou um desempenho comparável ou até melhor que o modelo regional em relação às observações, como,

por exemplo, para o índice anual cdd na sub-região SDE para ambos os conjuntos de dados (ver Tabela 5.6c da seção 5.2.2a).

5.3. Conclusão – Parte II

Os índices climáticos de chuva derivados dos dados de reanálise do NCEP/NCAR e da análise do BRANT para a América do Sul no período de 1961-1990 foram validados através da comparação de seus resultados com os obtidos a partir de observações provenientes de algumas estações de superfície localizadas sobre o Brasil. De maneira geral, os resultados não apresentam uma característica muito marcante, sendo que cada região (Brasil e Estado de São Paulo), índice (prcptot, r95p, rx5day, cdd e cwd), conjunto de dados (NCEP/NCAR e BRANT) e estação do ano (verão, outono, inverno e primavera) apresentam suas particularidades. No entanto, pode-se mencionar o melhor desempenho da análise do BRANT em estimar os índices anuais e sazonais de chuva observados nas estações de superfície; a eficiência dos dois conjuntos de dados em representar os sinais de tendência dos índices prcptot, cdd, rx5day e r95p observados no outono e inverno sobre o Brasil e o Estado de São Paulo; e a dificuldade da reanálise do NCEP/NCAR e da análise do BRANT em reproduzir o índice cwd anual e sazonal observado. Com relação aos padrões espaciais de tendência dos índices anuais de chuva, os dois conjuntos de dados apresentam uma boa concordância com os resultados encontrados na análise do CPTEC e em trabalhos anteriores (Alexander et al. 2005, Haylock et al. 2006). Sobre o sudoeste da América do Sul e grande parte da Argentina, a reanálise não reproduziu os sinais de tendência dos índices anuais de chuva identificados por Haylock et al. (2006) e pela análise do CPTEC. Através dos mapas de tendência dos índices de chuva para as quatro estações do ano originados dos dados de reanálise do NCEP/NCAR, verifica-se a existência de baixa variabilidade sazonal, com uma configuração espacial bastante similar à análise anual. Com relação ao BRANT, a distribuição espacial de tendência dos índices sazonais de chuva é caracterizada por padrões semelhantes de tendência nas estações extremas, invertendo de sinal nas estações de transição, sugerindo uma maior influência da estação de inverno nos mapas de tendência dos índices anuais de chuva.

As simulações dos índices de chuva pelos modelos climáticos RegCM3(s1, s2, s3) e HadAM3 foram analisadas em quatro sub-regiões (AM, NE, SDE e SUL) e na América do Sul como um todo através da comparação dos seus resultados com os obtidos a partir dos dados observados. O estudo dos coeficientes de correlação dos índices anuais de chuva nas quatro sub-regiões mostra que, dentre as três simulações com o modelo RegCM3, a simulação RegCM3(s1), com o esquema de convecção Grell, apresentou um melhor desempenho em representar as tendências dos índices

anuais e sazonais de chuva nas sub-regiões, em particular nas estações de outono e inverno. O RegCM3(s1) simulou corretamente a tendência de aumento das condições de umidade observadas na América do Sul através dos índices anuais r95p, prcptot e rx5day. Por outro lado, a simulação do RegCM3(s1) não detectou a tendência negativa dos índices anuais r95p, prcptot e rx5day observada no sudoeste da América do Sul e a tendência dos índices anuais cdd e cwd em grande parte do continente. Através dos mapas de tendência dos índices sazonais de chuva simulados pelo modelo, nota-se a inversão de padrões espaciais de tendência entre as estações do ano, apontando para um aumento tanto nos totais de chuva quanto nos seus extremos nos meses de outono e inverno. Desta forma, a simulação do RegCM3(s1) se assemelha aos dados da reanálise e do BRANT simultaneamente apenas na estação de inverno.

As distribuições espaciais de tendência dos índices anuais de chuva resultantes das simulações do RegCM3(s1) e do HadAM3 sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 são bastante semelhantes entre si, embora o HadAM3 seja caracterizado por tendências mais suavizadas. Por outro lado, tendências opostas entre as simulações dos modelos são detectadas nas estações de primavera e verão pelos índices prcptot, r95p, rx5day e cwd e, nas estações de outono e inverno, pelo índice cdd. Para a maioria dos índices anuais e sazonais de chuva e sub-regiões, a simulação do RegCM3(s1) se mostrou superior à do HadAM3.

Referências bibliográficas

Alexander LV, Zhang X, Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Klein Tank AMG, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Rupa Kumar K, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephenson DB, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vazquez-Aguirre JL (2005) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res* 111: D05109, doi:10.1029/2005JD006290

Allan RJ, Haycock MR (1993) Circulation Features Associated with the Winter Rainfall Decrease in Southwestern Australia. *Journal of Climate* 6: 1356-1367

Ambrizzi T (2007) Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas

Anthes RA, Hsu E-Y, Kuo Y-H (1987) Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4). NCAR Tech. Note TN-282+STR

Barros VR, Casteñeda ME, Doyle M (2000) Recent precipitation trends in southern South America east of the Andes: An indication of climatic variability. *Southern Hemisphere paleo and neoclimates*, P. P. Smolka and W. Volkheimer, Eds., Springer-Verlag

Carvalho LMV, Jones C, Liebmann B (2002) Extreme Precipitation Events in Southeast South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate* 15: 2377-2394

Costa Neto PLO (1977) *Estatística*. Ed. Edgard Blucher Ltda.

Costa MH, Foley JA (1998) A Comparison of Precipitation Datasets for the Amazon Basin. *Geophys. Res. Lett.* 25: 155-158

Cox P, Betts R, Bunton C, Essery R, Rowntree PR, Smith J (1999) The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Climate Dynamics* 15: 183-203

Dickinson RE, Henderson-Sellers A, Kennedy PJ (1993) Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. Note TN-3871STR

Druyan LM, Fulakeza M (2002) Dynamic downscaling of Seasonal Climate Predictions over Brazil. *Journal of Climate* 15: 3411-3426

Dufek AS, Ambrizzi T (2005) Variabilidade Climática da Temperatura no Estado de São Paulo. *Revista de Iniciação Científica: CETEPE-EESC/USP* 7: 23-29

Dufek AS, Ambrizzi T (2007) Precipitation variability in São Paulo State, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* (in press)

Emanuel KA (1991) A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.* 48: 2313-2335

Fernandez JPR (2004) Ondas Quase-estacionárias no Hemisfério Sul: Observações e Simulações Climáticas sobre América do Sul, Tese Doutorado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil

Folland C, Anderson C (2002) Estimating changing extremes using empirical ranking methods. *Journal of Climate* 15: 2954–2960

Folland C, Coauthors (1999) Workshop on indices and indicators for climate extremes, Asheville, NC, USA, 3–6 June 1997, Breakout Group C: Temperature indices for climate extremes. *Climatic Change* 42: 31–43

Frías MD, Fernández J, Sáenz J, Rodríguez-Puebla C (2005) Operational predictability of monthly average maximum temperature over the Iberian Peninsula using DEMETER simulations and downscaling. *Tellus* 57A: 448-463

Frich P, Alexander LV, Della-Marta P, Gleason B, Haylock M, Klein Tank AMG, Tom Peterson (2002) Observed coherent change in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research* 19: 193-212

Fritsch JM, Chappell CF (1980) Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *J. Atmos. Sci.* 37: 1722–1733

Giorgi F, Marinucci MR, Bates GT (1993a) Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.* 121: 2749-2813

Giorgi F, Marinucci MR, Bates GT (1993b) Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.* 121: 2814-2832

Giorgi F, Mearns LO (1999) Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research* 104(D6): 6335-6352

Gordon C, Cooper C, Senior C, Banks H, Gregory J, Johns T, Mitchell J, Wood R (2000) The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics* 16: 147-168

Grell GA (1993) Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization. *Mon. Wea. Rev.* 121: 764-787

Grell GA, Dudhia J, Staffer DR (1994a) A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (mm5). NCAR Tech. Note TN-398+IA

Groisman P, Knight R, Easterling D, Karl T, Hegerl G, Razuvaev V (2005) Trends in Intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate* 18: 1326-1350

Haylock MR, Peterson T, Alves LM, Ambrizzi T, Anunciação YMT, Baez J, Barros VR, Berlato MA, Bidegain M, Coronel G, Corradi V, Garcia VJ, Grimm AM, Karoly D, Marengo JA, Marino MB, Moncunill DF, Nechet D, Quintana J, Rebello E, Rusticucci M, Santos JL, Trebejo I, Vincent L (2006) Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate* 19: 1490-1512

Hyndman RJ, Fan Y (1996) Sample quantiles in statistical packages. *Amer. Stat.* 50: 361-365

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (2001) *Climate Change 2001 - The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge Univ Press

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (2007) *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge Univ Press

Jones R, Murphy J, Hassell D, Taylor R (2001) Ensemble mean changes in a simulation of the European climate of 2071-2100 using the new Hadley Centre regional modeling system HadAM3H/HadRM3H. Bracknell: Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office (DEFRA Report 2/2/01)

Kalnay E, Coauthors (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77: 437–471

Kiehl JT, Hack JJ, Bonan GB, Boville BA, Briegleb BP, Williamson DL, Rasch PJ (1996) Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3). NCAR Tech. Note TN-420+STR

Kiktev D, Sexton DMH, Alexander L, Folland CK (2003) Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes. *Journal of Climate* 16: 3560–3571

Klein Tank AMG, Können GP (2003) Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–99. *Journal of Climate* 16: 3665–3680

Liebmann B, Allured D (2005) Daily precipitation grids for South America. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 86: 1567-1570

Liebmann B, Vera CS, Carvalho LMV, Camilloni I, Hoerling MP, Barros VR, Báez J, Bidegain M (2004) An observed trend in central South American Precipitation. *Journal of Climate* 17: 4357-4367

Marengo J (2001) Mudanças climáticas globais e regionais: Avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. *Revista Brasileira de Meteorologia* 16: 1-18

Marengo J (2003) Condições climáticas e recursos hídricos no Norte Brasileiro. In: *Clima e Recursos Hídricos no Brasil*, by Tucci CE and Braga B. Associação Brasileira de Recursos Hídricos FBMC/ANA. Porto Alegre, Brasil 9: 117-161

Marengo J (2004) Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoretical and Applied Climatology* 78: 79-96

Marengo J, Camargo CGC (2007) Trends in Extreme air temperatures in southern Brazil. *Int. J. Climatology* (accepted)

Menéndez CG, Saulo AC, Li ZX (2001) Simulation of South American wintertime climate with a nesting system. *Climate Dynamics*. 17: 219-231

Minetti JL (1998) Trends and jumps in the annual precipitation in South America, south of the 15 degrees. *S. Atmosfera* 11: 205-221

Minetti JL, Vargas WM, Poblete AG, Acuna LR, Casagrande G (2003) Non-linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999. *Atmosfera* 16: 119-135

Misra V, Dirmeyer PA, Kirtman BP (2003) Dynamic Downscaling of Seasonal Simulation over South American. *Journal of Climate* 16: 103-117

Nicolini M, Salio P, Katzfey JJ, McGregor JL, Saulo AC (2002) January and July regional climate simulation over South American. *Journal of Geophysical Research* 107: 4637

Pal JS, Small EE, Eltahir EAB (2000) Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 105 (D24): 29579-29594

Pope VD, Gallani ML, Rowntree PR, Stratton RA (2000) The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model - HadAM3. *Climate Dynamics* 16: 123-146

Qian J.H, Seth A, Stephen Z (2003) Reinitialized versus Continuous Simulation for Regional Climate Downscaling. *Monthly Weather Review* 131: 2857-2874

Quintana-Gomez RA (1999) Trends in maximum and minimum temperatures in northern South America. *Journal of Climate* 12: 2104-2112

Rocha EJP (2001) Balanço de umidade e influência de condições de contorno superficiais sobre a precipitação da Amazônia. Tese (Doutorado em Meteorologia), INPE, São José dos Campos

Rusticucci M, Barrucand M (2004) Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina. *Journal of Climate* 17: 4099-4107

Rusticucci M, Penalba O (2000) Interdecadal changes in the precipitation seasonal cycle over southern South America and their relationship with surface temperature. *Climate Research* 16: 1-15

Sansigolo C, Rodriguez R, Etchichury P (1992) Tendências nas temperaturas médias do Brasil. *Anais do VII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, São Paulo, 367-371

Santos CAC, Brito JIB (2007) Análise dos índices de extremos para o semi-árido do Brasil e suas relações com TSM e IVDN. *Revista Brasileira de Meteorologia* 22: 303-312

Seth A, Rojas M (2003) Simulation and sensitivity in a nested modeling system for South America. Part I: reanalysis boundary forcing. *Journal of Climate* 16: 2437-2453

Stratton RA (1999) A high resolution AMIP integration using the Hadley Centre model HadAM2b. *Climate Dynamics* 15: 9±28

Venegas S, Mysak L, Straub N (1996) Evidence for interannual and interdecadal climate variability in the South Atlantic. *Geophys Res Lett* 23: 2673-2676

Venegas S, Mysak L, Straub N (1998) Atmosphere-ocean coupled variability in the South Atlantic. *Journal of Climate* 10: 2904-2920

Victoria R, Matinelli L, Moraes J, Ballester M, Krusche A, Pellegrino G, Almeida R, Richey J (1998) Surface air temperature variations in the Amazon region and its border during this century. *Journal of Climate* 11: 1105-1110

Vincent LA, Peterson TC, Barros VR, Marino MB, Rusticucci M, Carrasco G, Ramirez E, Alves LM, Ambrizzi T, Berlato MA, Grimm AM, Marengo JA, Molion L, Moncunill DF, Rebello E, Anunciação YMT, Quintana J, Santos JL, Baez J, Coronel G, Garcia J, Trebejo I, Bidegain M, Haylock MR, Karoly D (2005) Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000. *Journal of Climate* 18: 5011-5023

Zhang X, Yang F (2004) RCLimDex (1.0) User Manual. Climate Research Branch. Environment Canada. Downsview, Ontario Canadá

Zhang X, Hegerl G, Zwiers F, Kenyon J (2005) Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. *Journal of Climate* 18: 1641-1651

Apêndice A – Figuras dos índices de extremos climáticos de temperatura

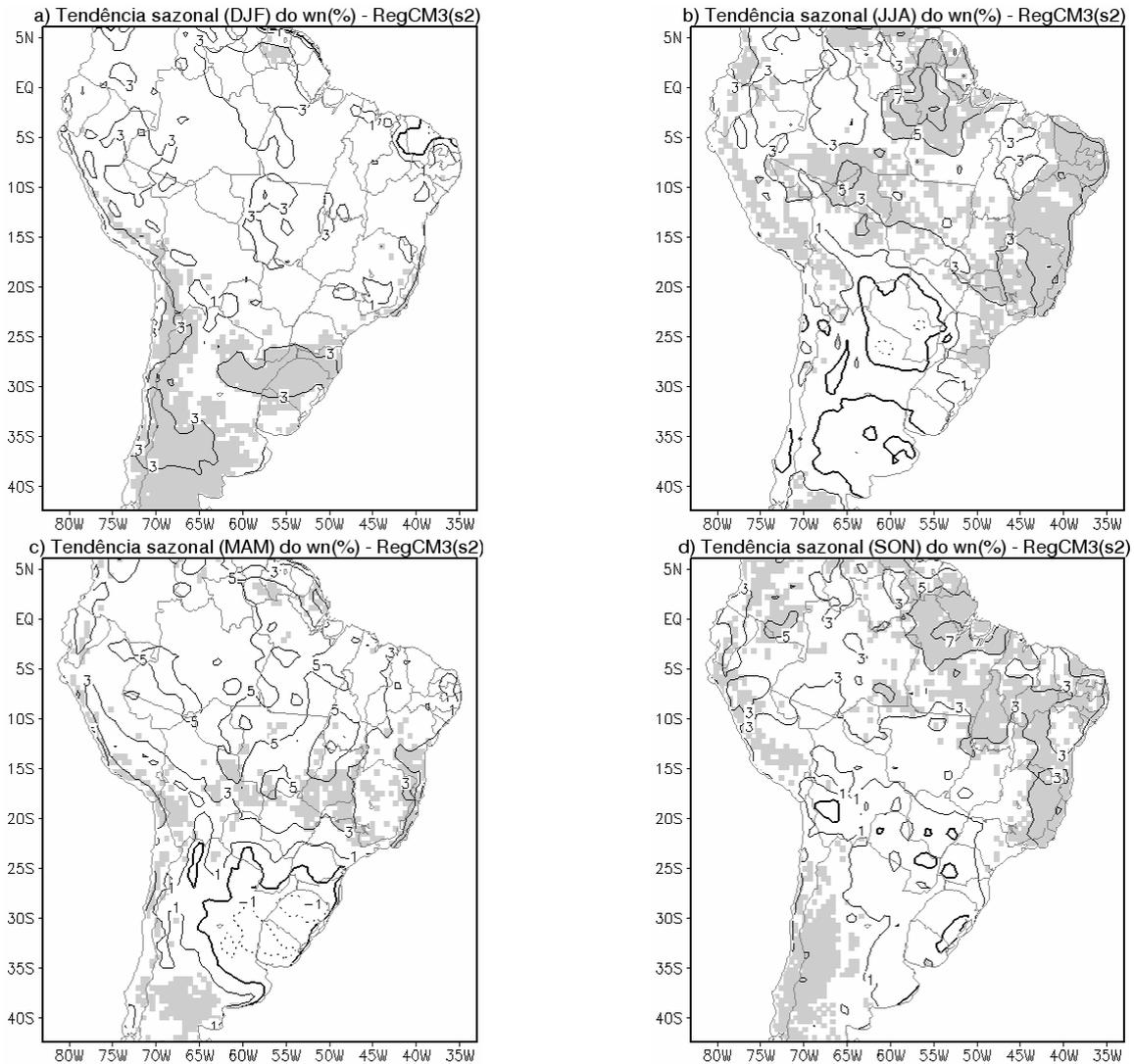


Fig. 1A. Tendência do índice sazonal wn (%) simulada pelo modelo RegCM3(s2) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

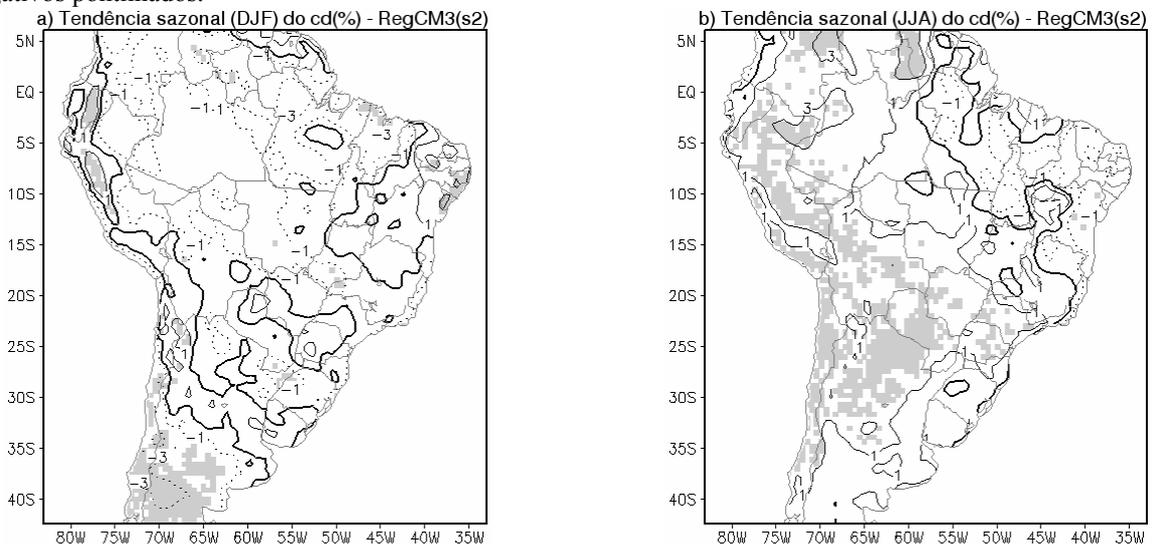


Fig. 2A. Idem Fig. 1A para o índice sazonal cd (%).

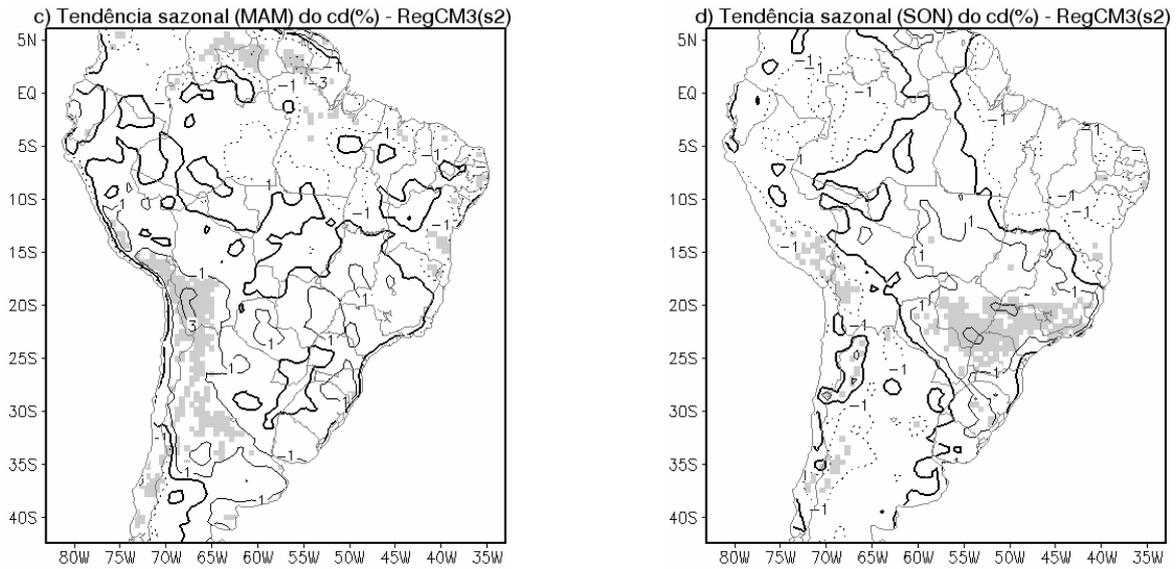


Fig. 2A. (continuação).

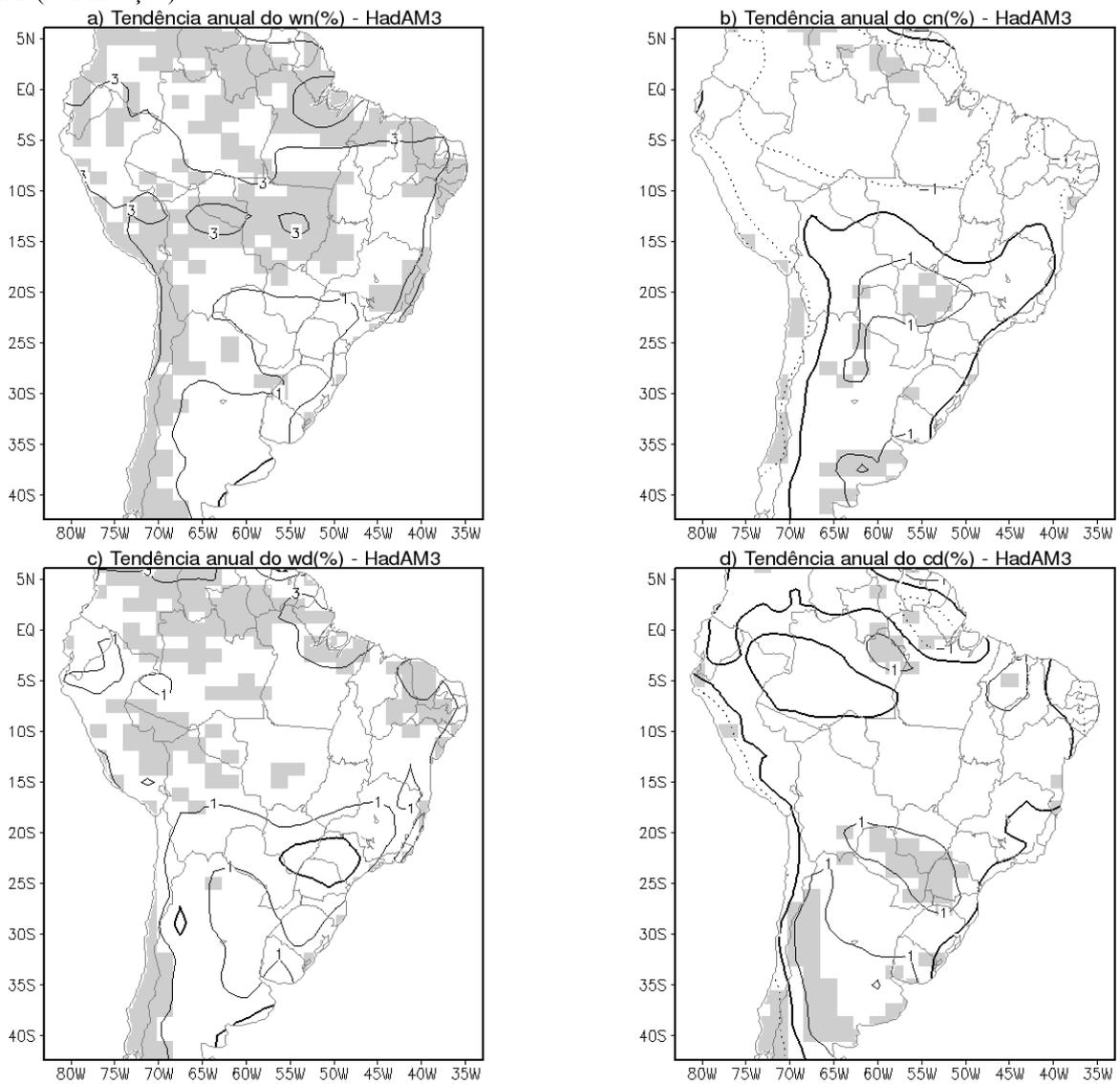


Fig. 3A. Tendência dos índices anuais de temperatura: (a) wn (%), (b) cn (%), (c) wd (%) e (d) cd (%) simulada pelo modelo HadAM3 sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990. O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

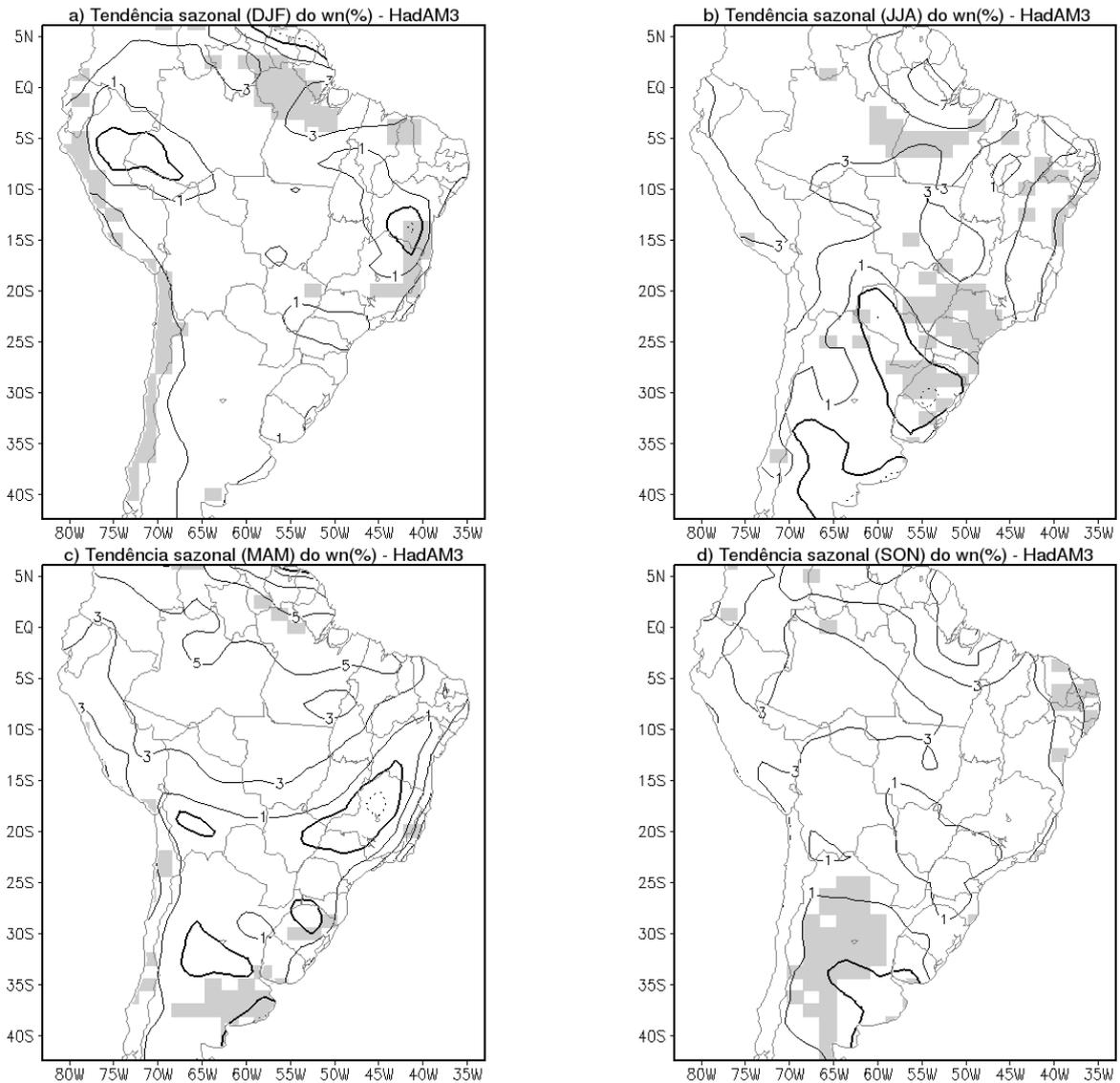


Fig. 4A. Tendência do índice sazonal wn (%) simulada pelo modelo HadAM3 sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

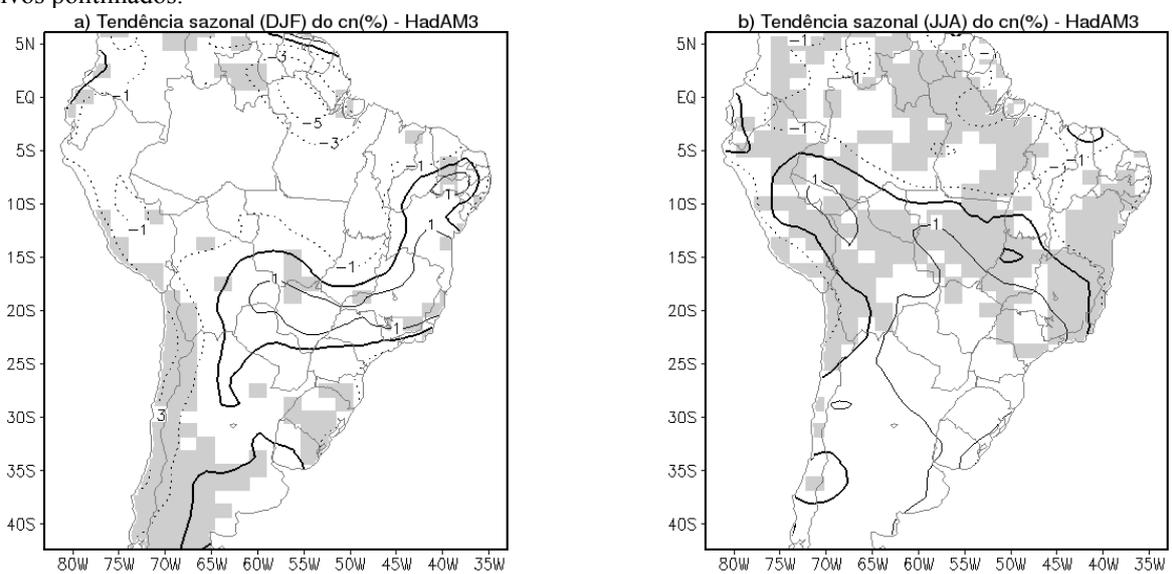


Fig. 5A. Idem Fig. 4A para o índice sazonal cn (%).

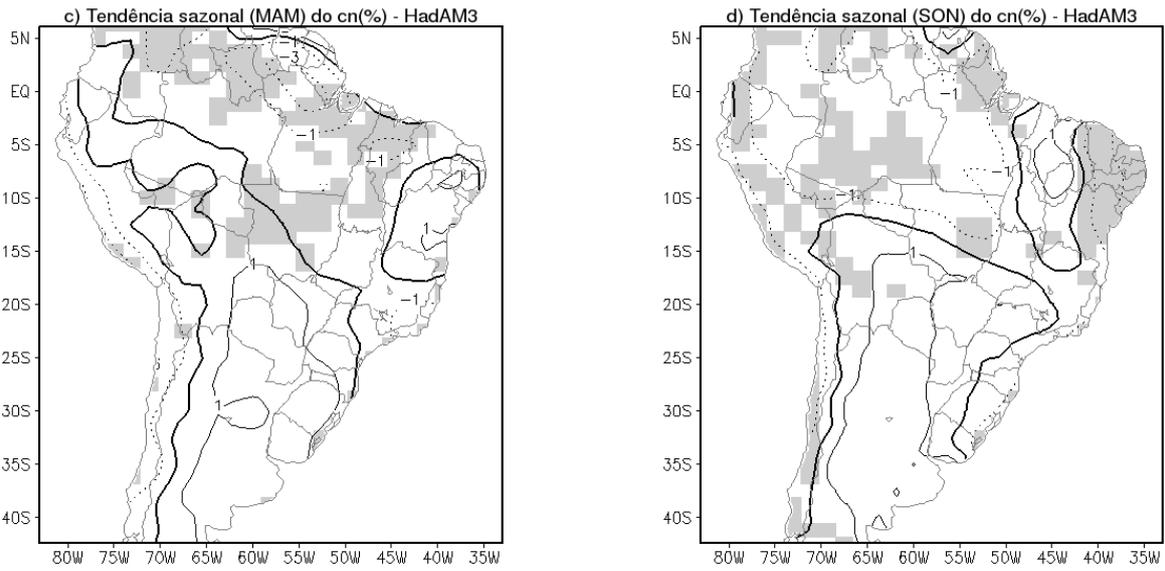


Fig. 5A. (continuação).

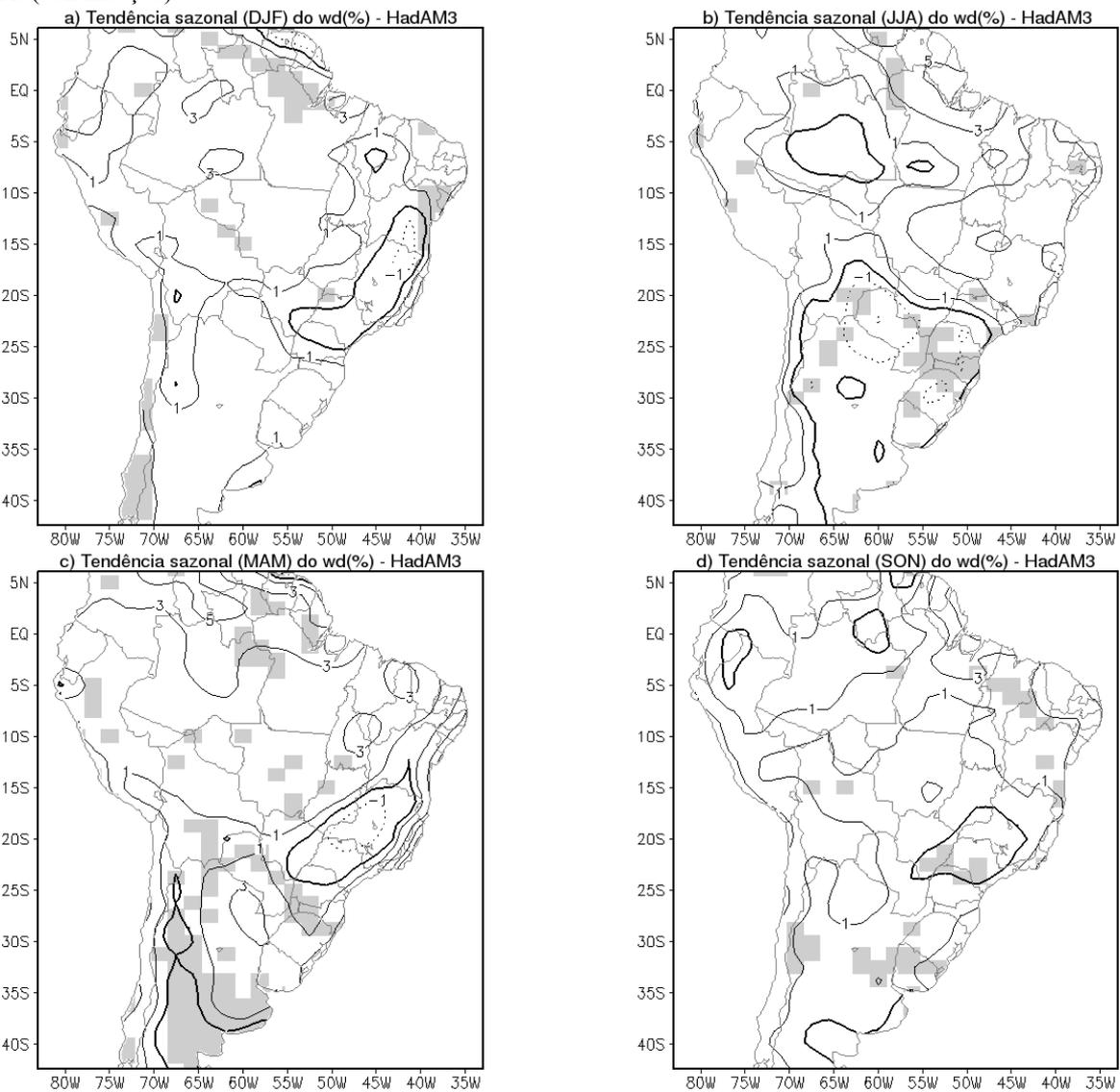


Fig. 6A. Idem Fig. 4A para o índice sazonal wd (%).

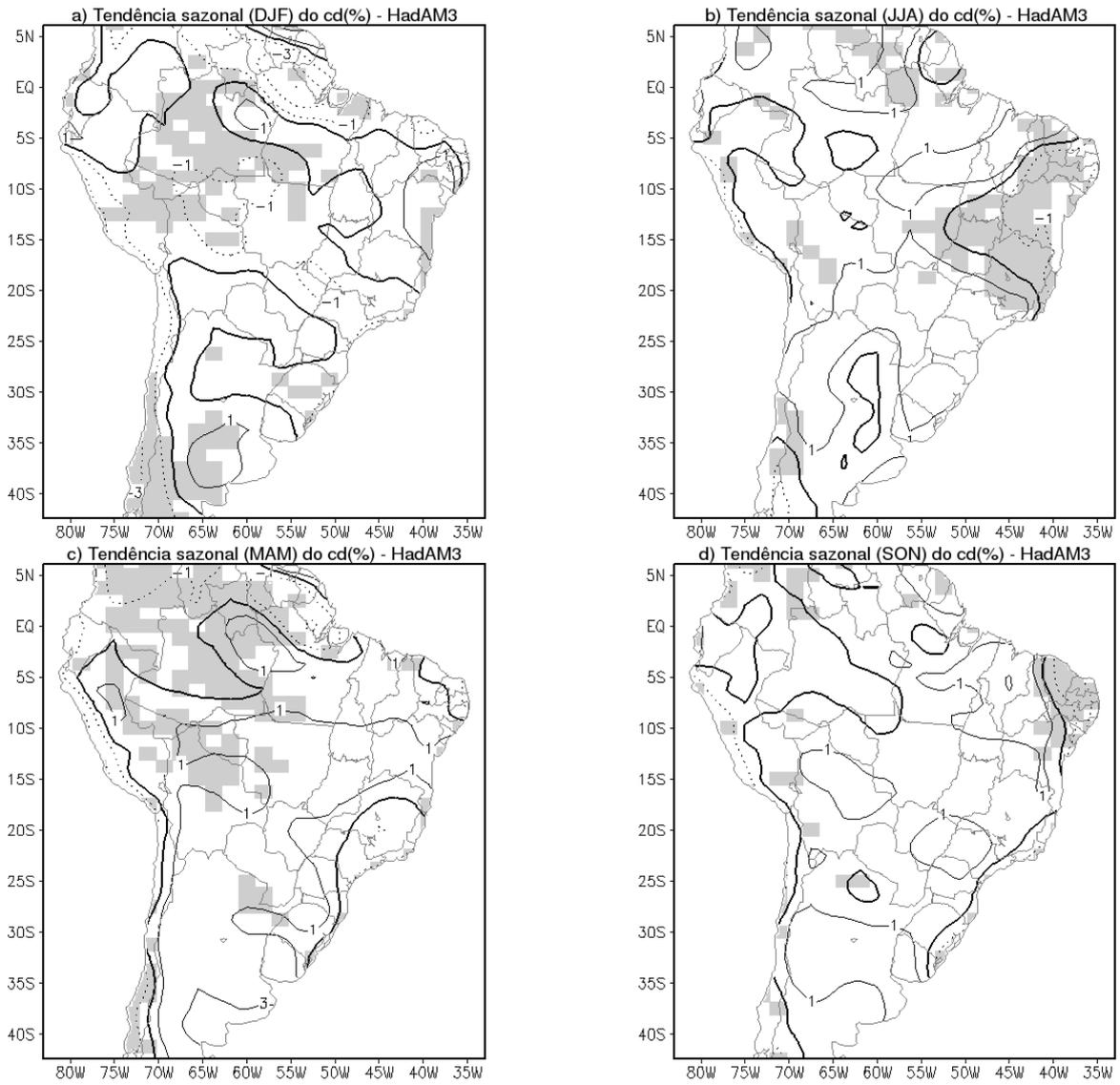


Fig. 7A. Idem Fig. 4A para o índice sazonal cd (%).

Apêndice B – Figuras dos índices de extremos climáticos de chuva

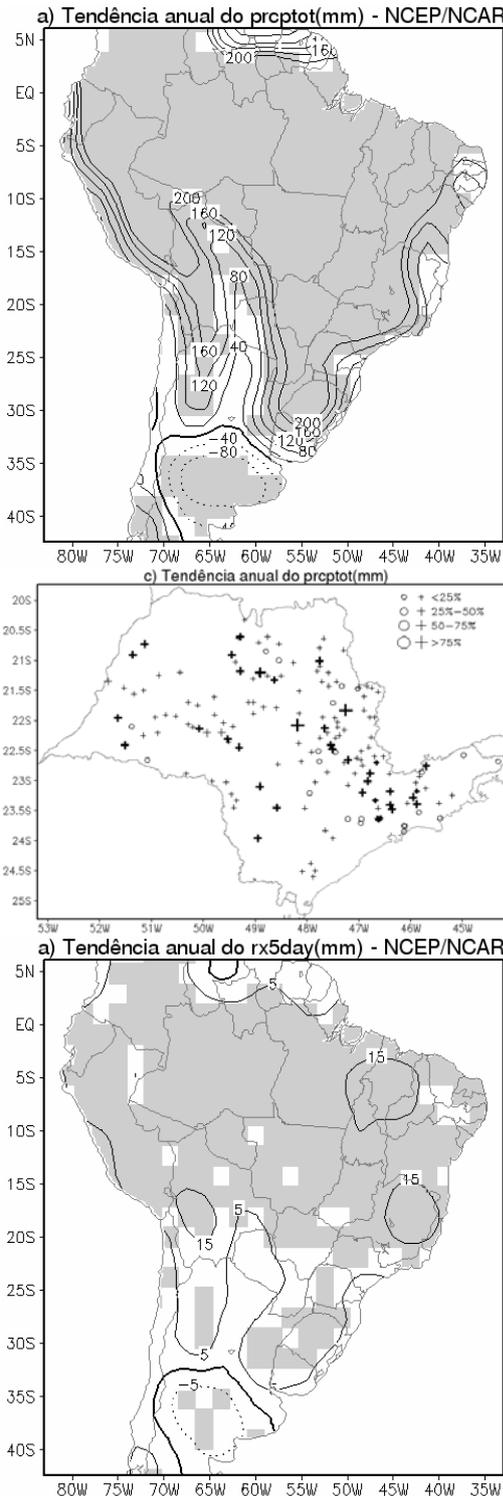


Fig. 2B. Tendência do índice anual rx5day (mm) durante o período de 1961-1990 obtida a partir da (a) renálise do NCEP/NCAR, (b) análise do CPTEC (1959-2000) e (c) análise do BRANT sobre a América do Sul, estações de superfície no Brasil e (d) no Estado de São Paulo. (a-b) O sombreamento destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados. (c-d) A tendência positiva é representada por '+' e a negativa por 'o', sendo os seus tamanhos proporcionais à magnitude da tendência, conforme escala indicada nos mapas. Os símbolos em negrito indicam tendência estatisticamente significativa no nível de 5%.

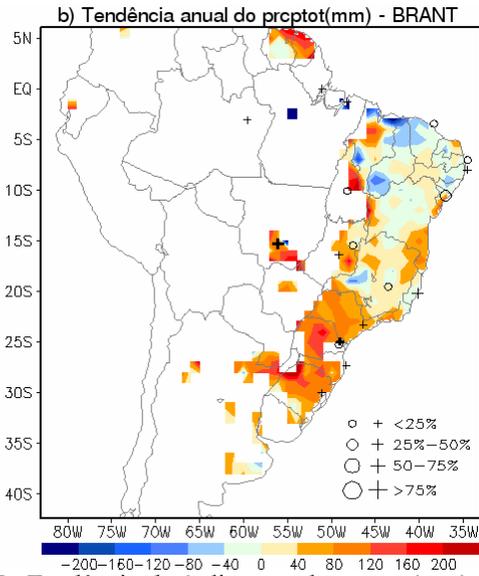


Fig. 1B. Tendência do índice anual prcptot (mm) durante o período de 1961-1990 obtida a partir da (a) renálise do NCEP/NCAR e (b) análise do BRANT sobre a América do Sul, estações de superfície no Brasil e (c) no Estado de São Paulo. (a) O sombreamento destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados. (b-c) A tendência positiva é representada por '+' e a negativa por 'o', sendo os seus tamanhos proporcionais à magnitude da tendência, conforme escala indicada nos mapas. Os símbolos em negrito indicam tendência estatisticamente significativa no nível de 5%.

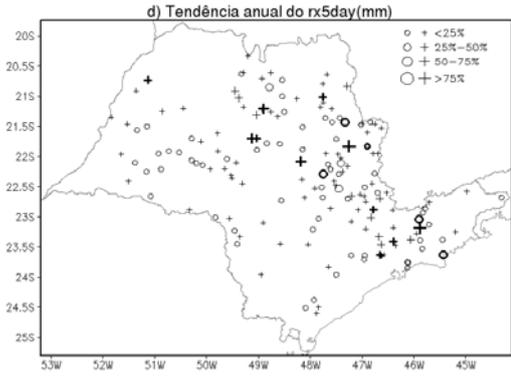
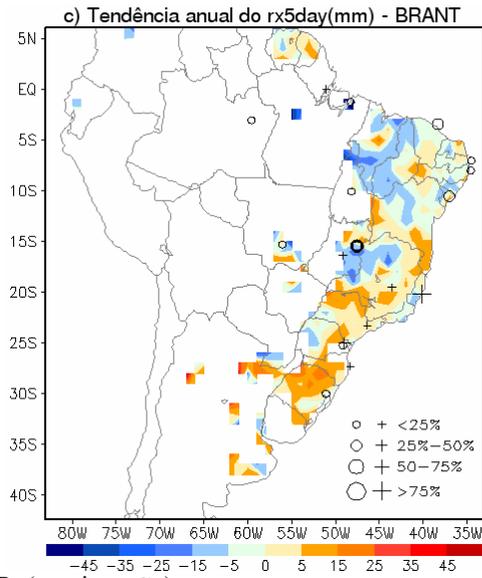


Fig. 2B. (continuação).

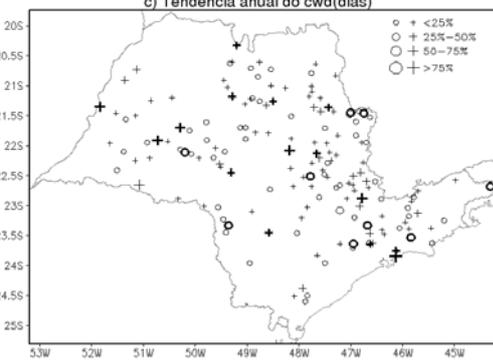
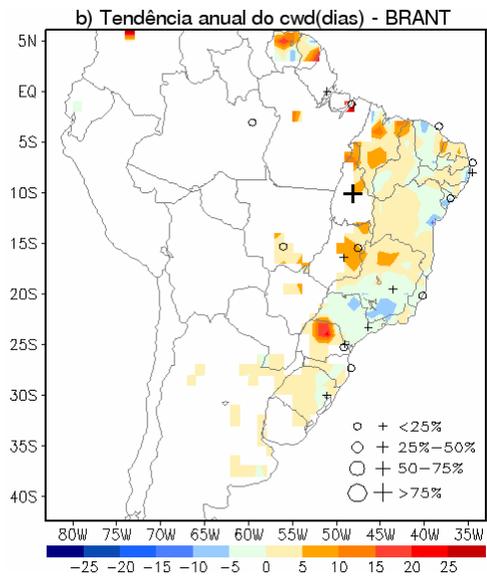
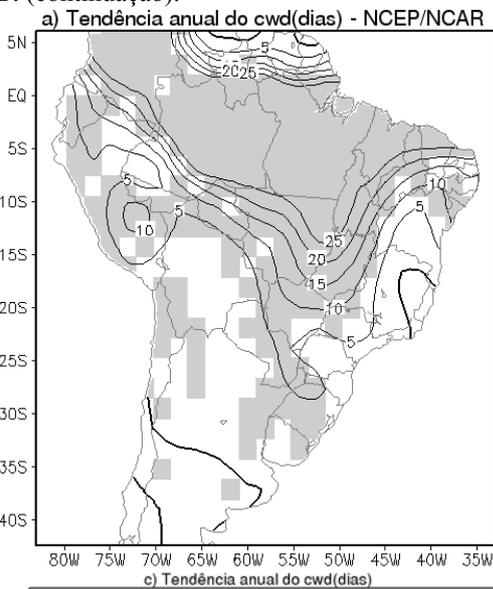


Fig. 3B. Idem Fig. 1B para o índice anual cwd (dias).

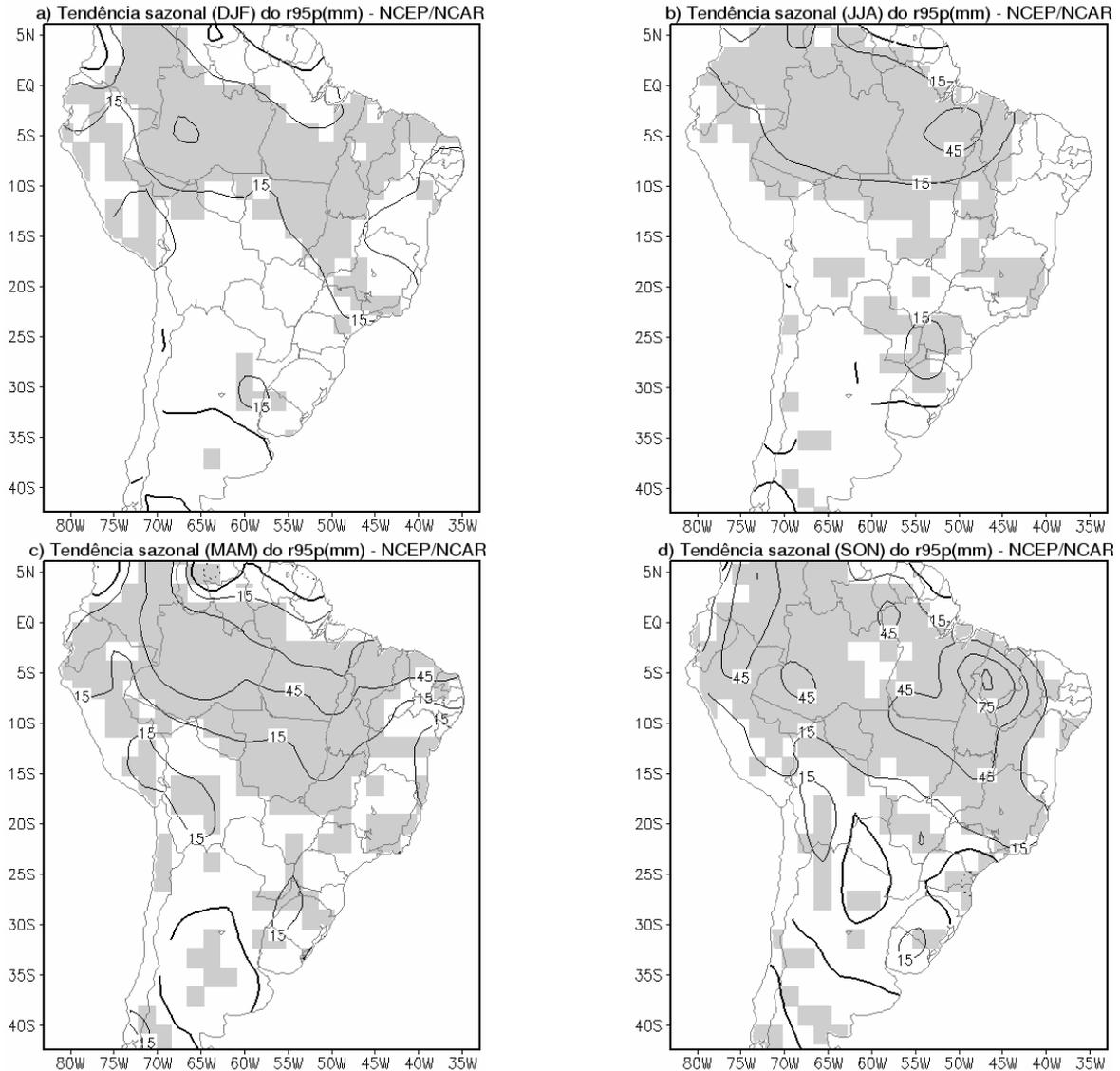


Fig. 4B. Tendência do índice sazonal r95p (mm) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 obtida a partir da renálise do NCEP/NCAR: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

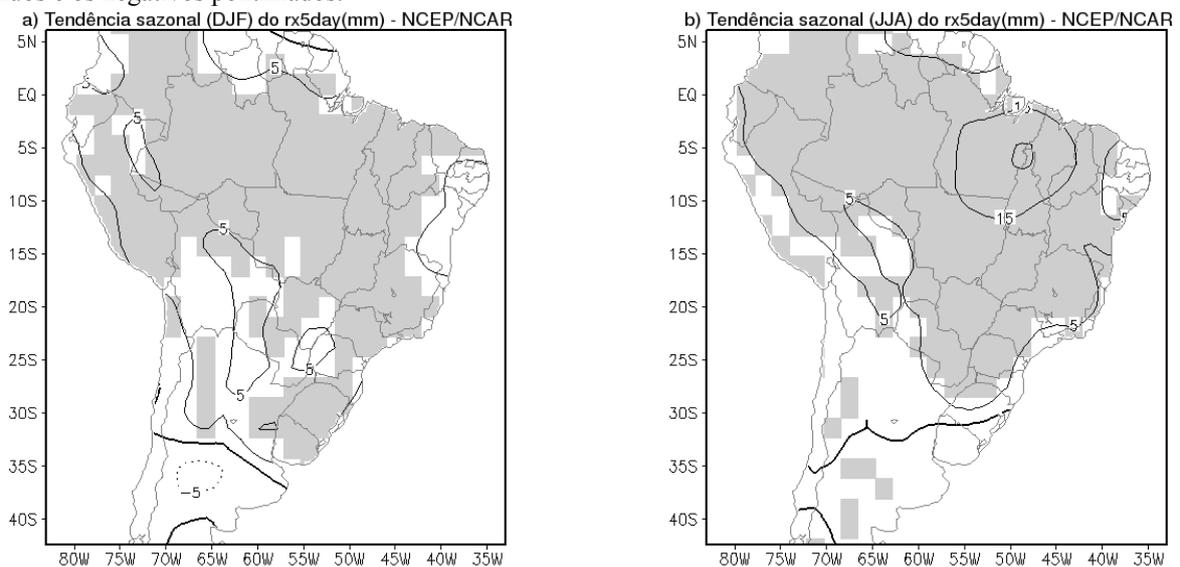
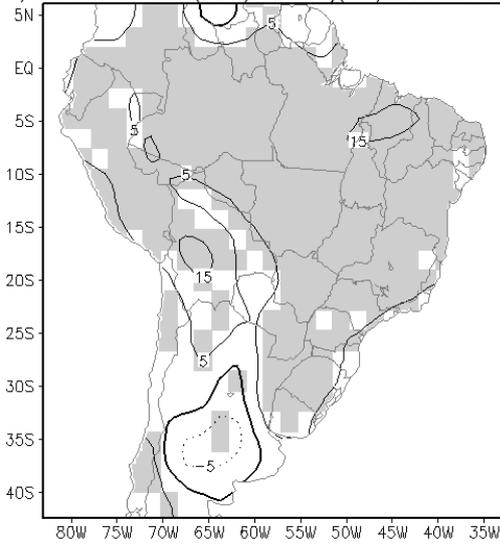


Fig. 5B. Idem Fig. 4B para o índice sazonal rx5day (mm).

c) Tendência sazonal (MAM) do rx5day(mm) - NCEP/NCAR



d) Tendência sazonal (SON) do rx5day(mm) - NCEP/NCAR

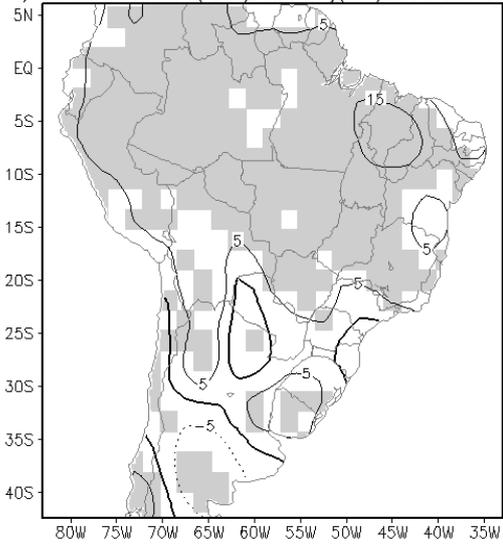
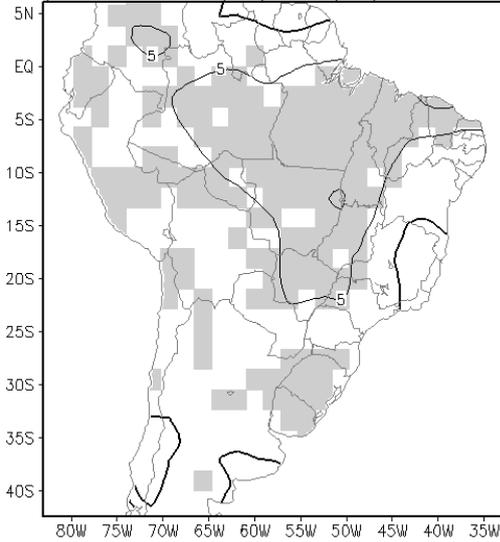
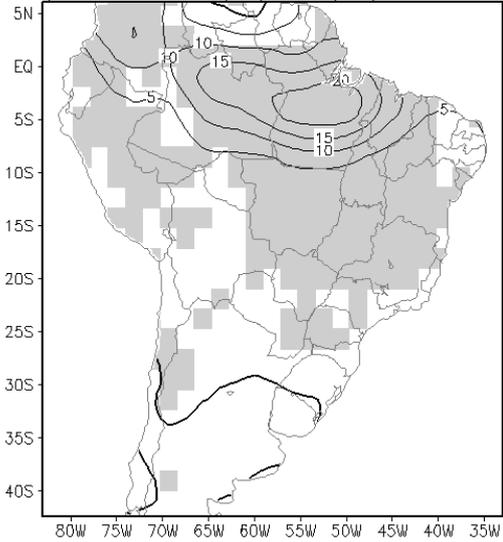


Fig. 5B. (continuação).

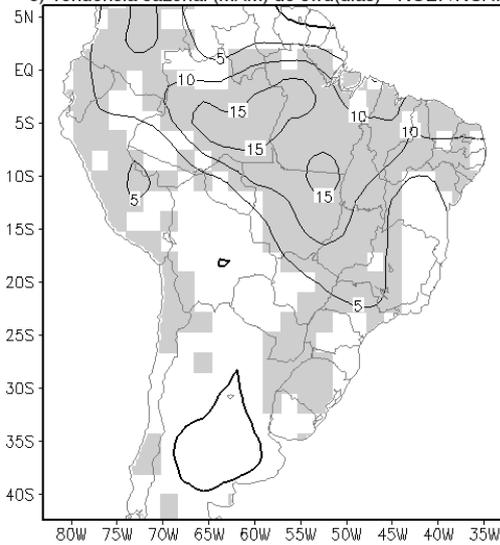
a) Tendência sazonal (DJF) do cwd(dias) - NCEP/NCAR



b) Tendência sazonal (JJA) do cwd(dias) - NCEP/NCAR



c) Tendência sazonal (MAM) do cwd(dias) - NCEP/NCAR



d) Tendência sazonal (SON) do cwd(dias) - NCEP/NCAR

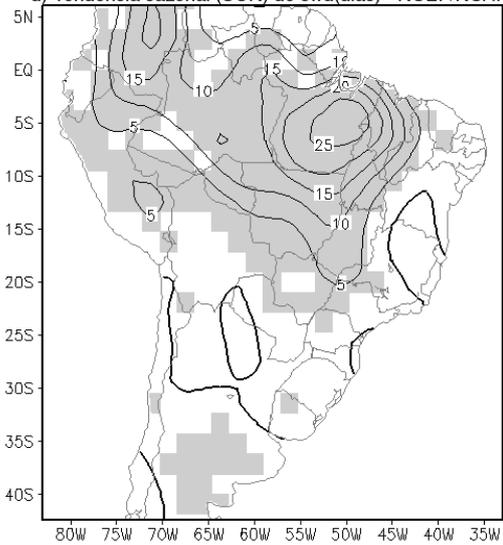


Fig. 6B. Idem Fig. 4B para o índice sazonal cwd (dias).

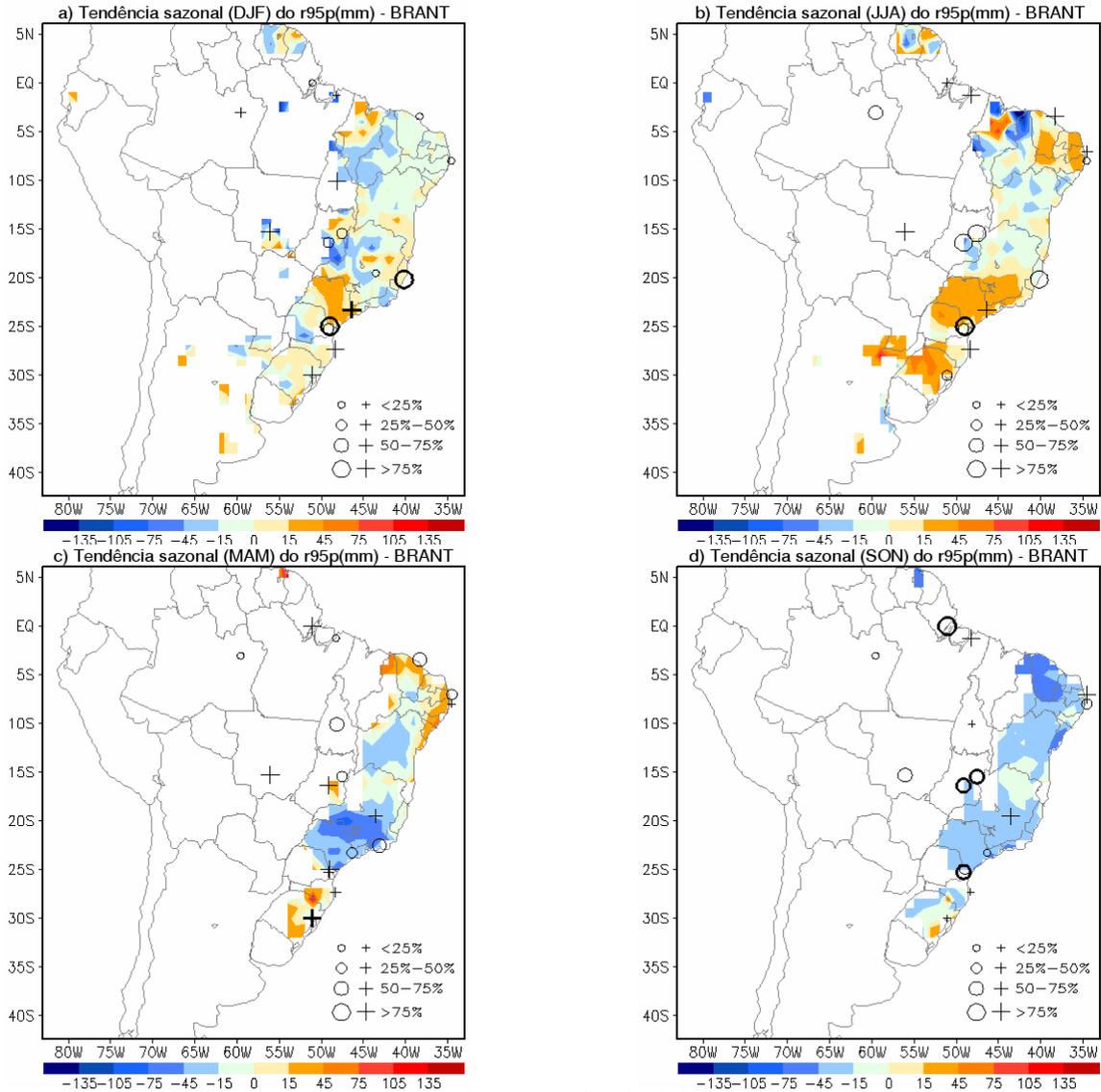


Fig. 7B. Tendência do índice sazonal r95p (mm) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990 obtida a partir da análise do BRANT: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O intervalo e a escala de intensidade são mostrados no rodapé da figura.

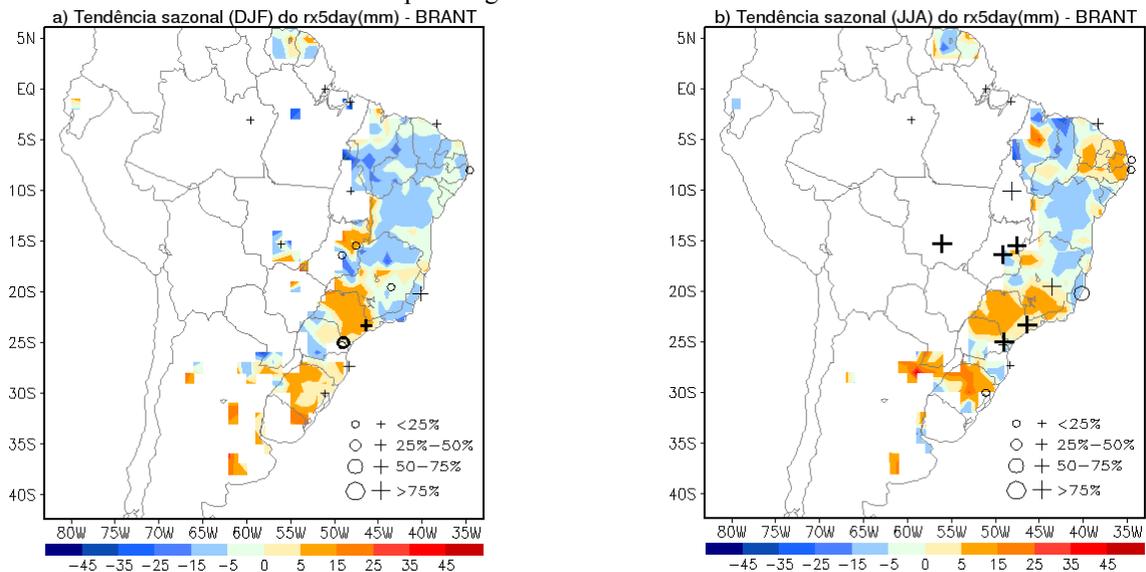


Fig. 8B. Idem Fig. 7B para o índice sazonal rx5day (mm).

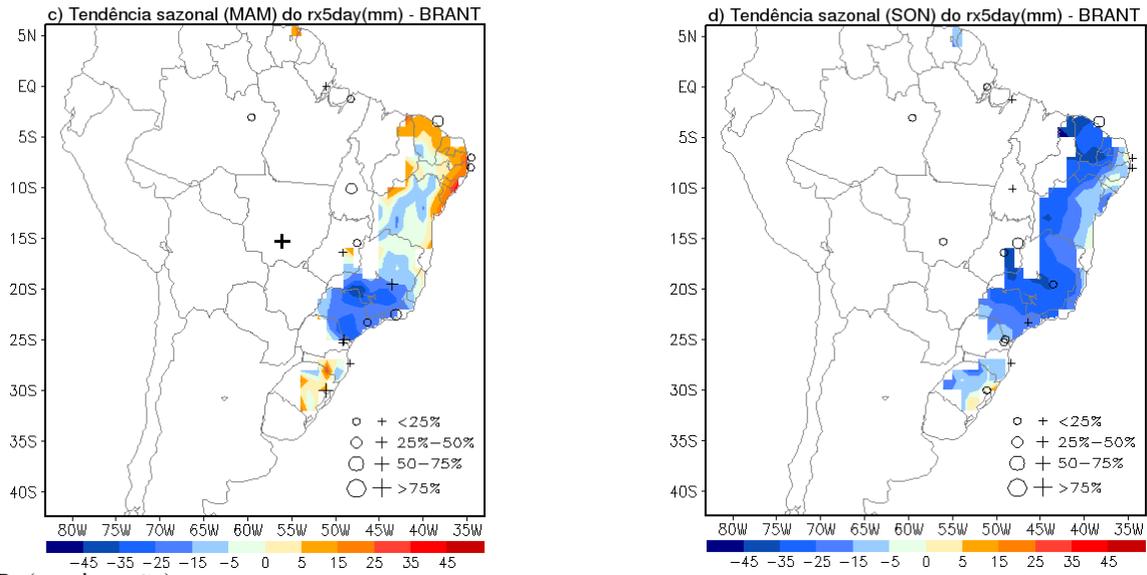


Fig. 8B. (continuação).

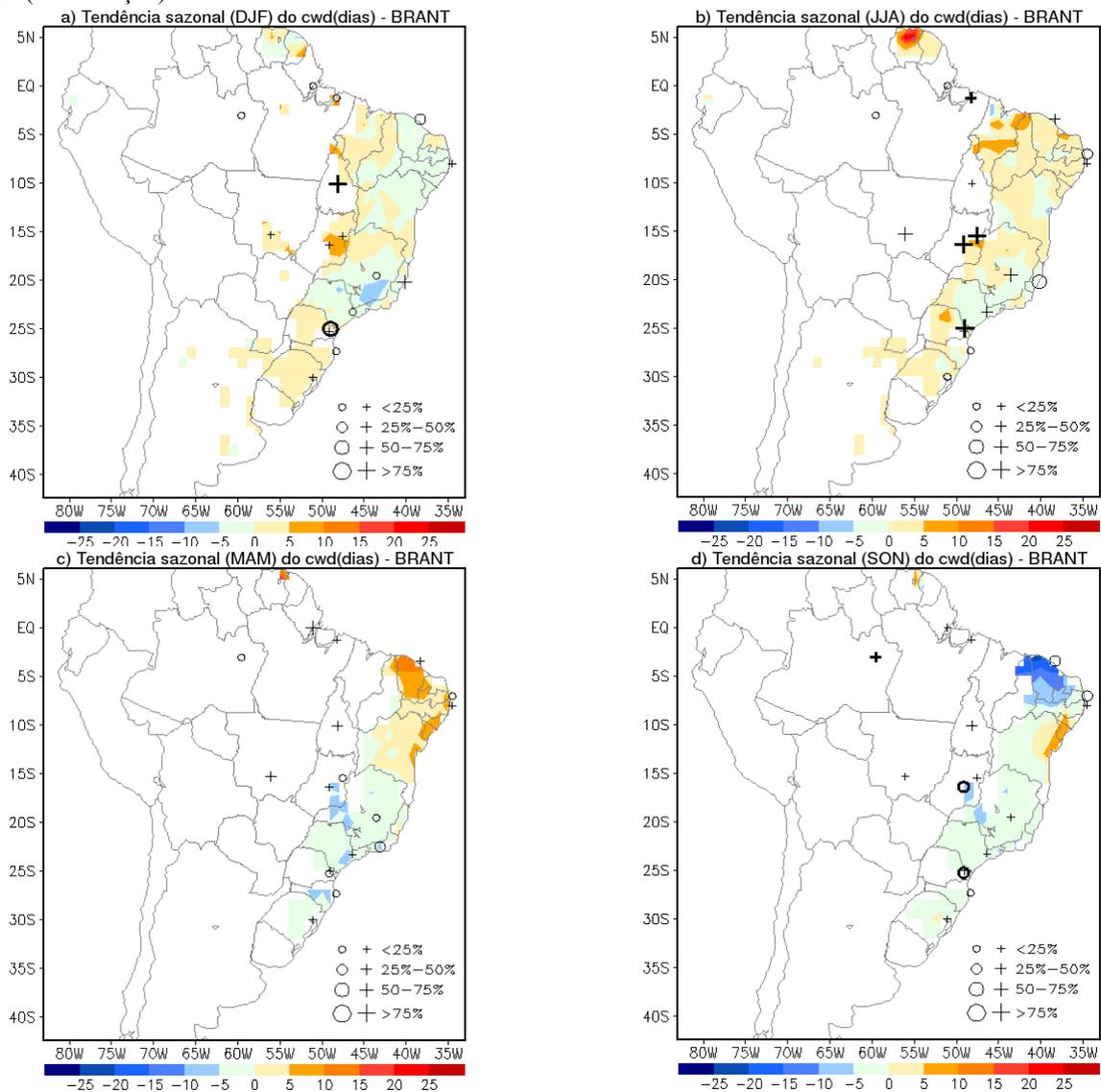


Fig. 9B. Idem Fig. 7B para o índice sazonal cwd (dias).

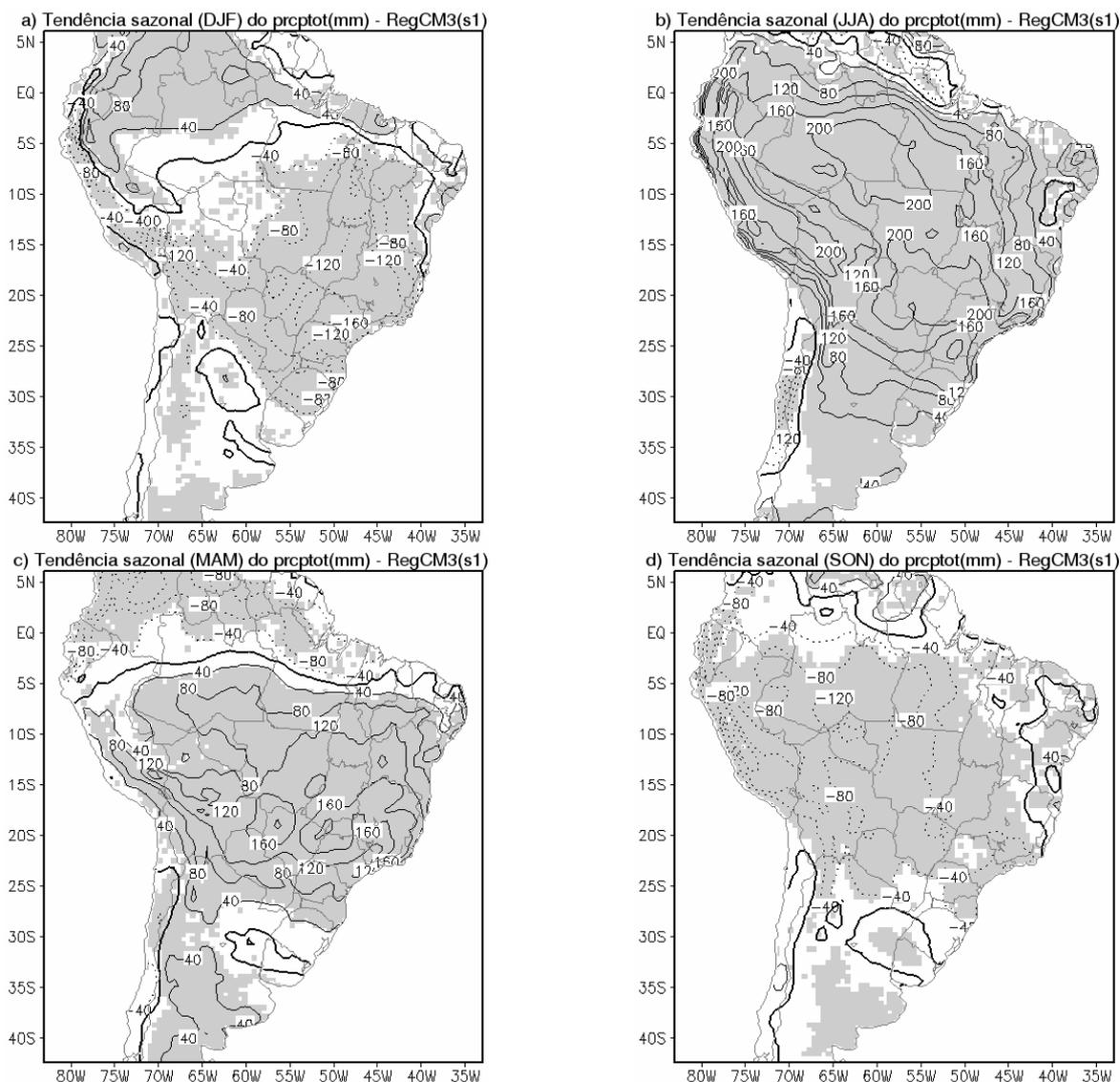


Fig. 10B. Tendência do índice sazonal prcptot (mm) simulada pelo modelo RegCM3(s1) sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

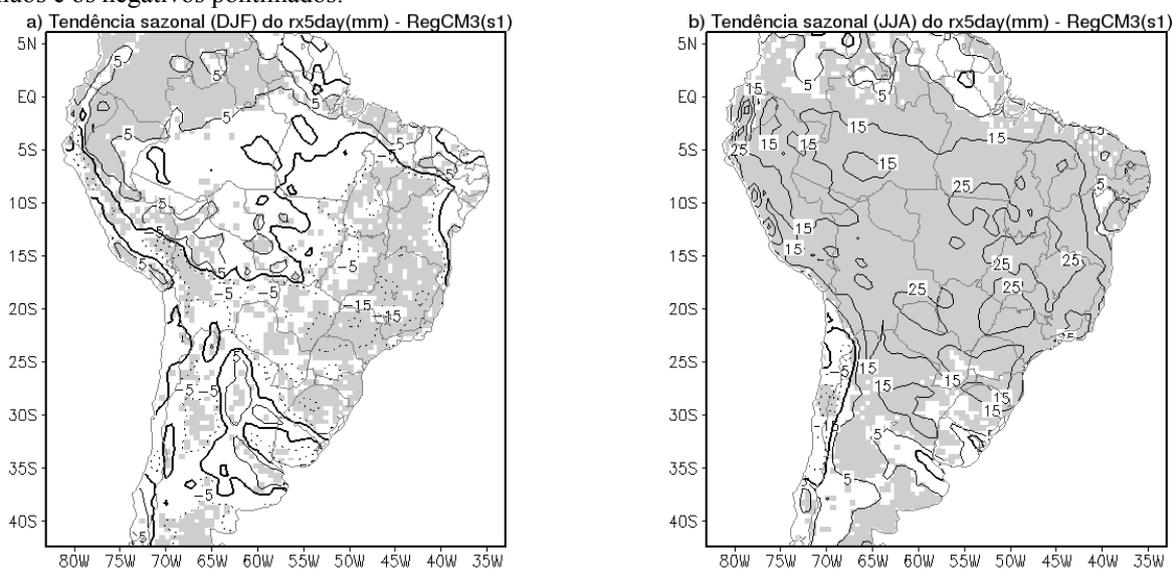


Fig. 11B. Idem Fig. 10B para o índice sazonal rx5day (mm).

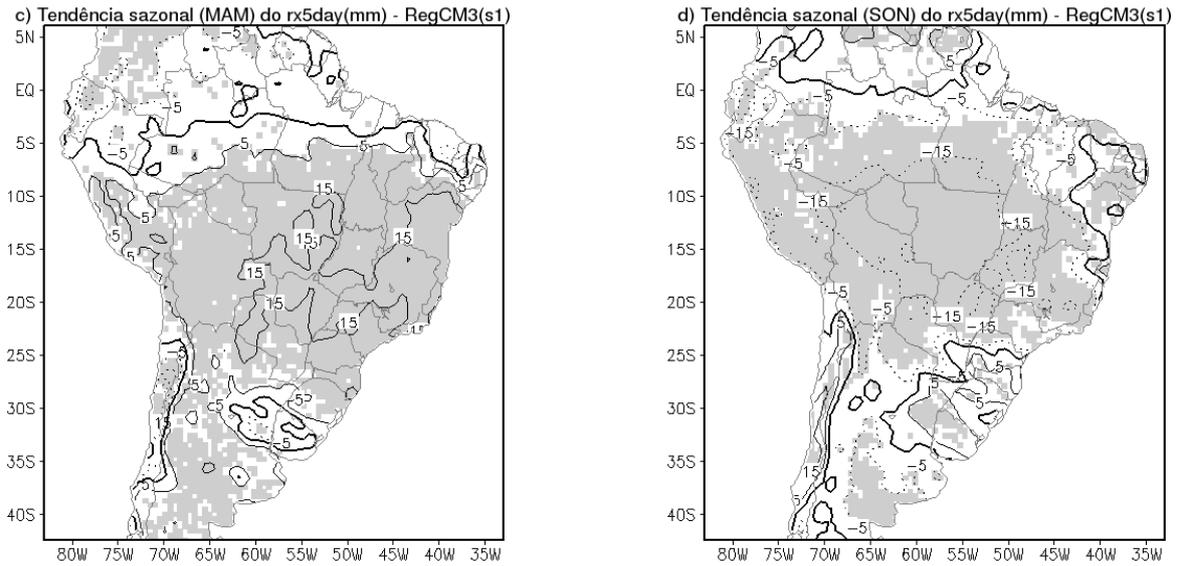


Fig. 11B. (continuação).

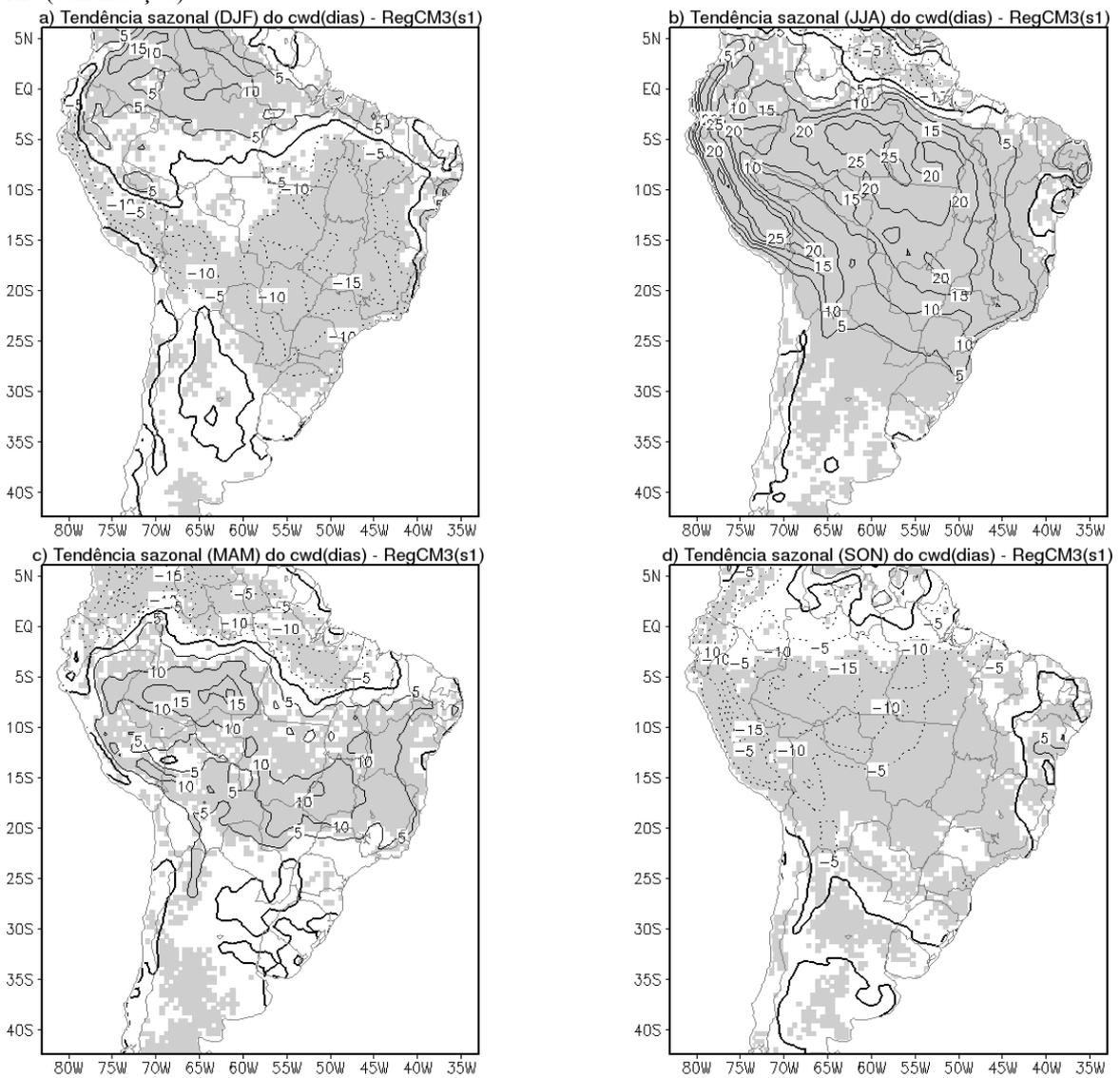


Fig. 12B. Idem Fig.10B para o índice sazonal cwd (dias).

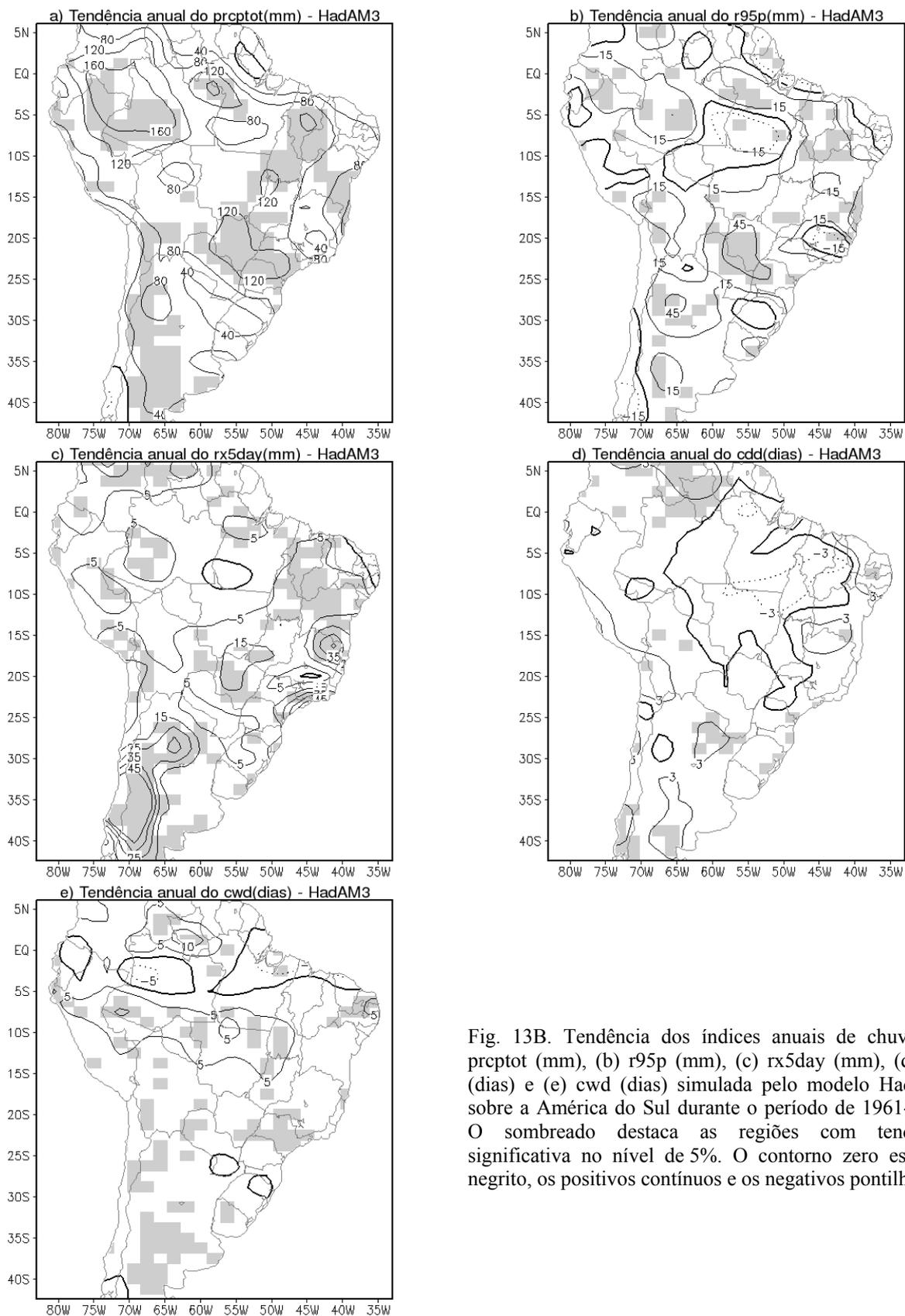


Fig. 13B. Tendência dos índices anuais de chuva: (a) prcptot (mm), (b) r95p (mm), (c) rx5day (mm), (d) cdd (dias) e (e) cwd (dias) simulada pelo modelo HadAM3 sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990. O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negro, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

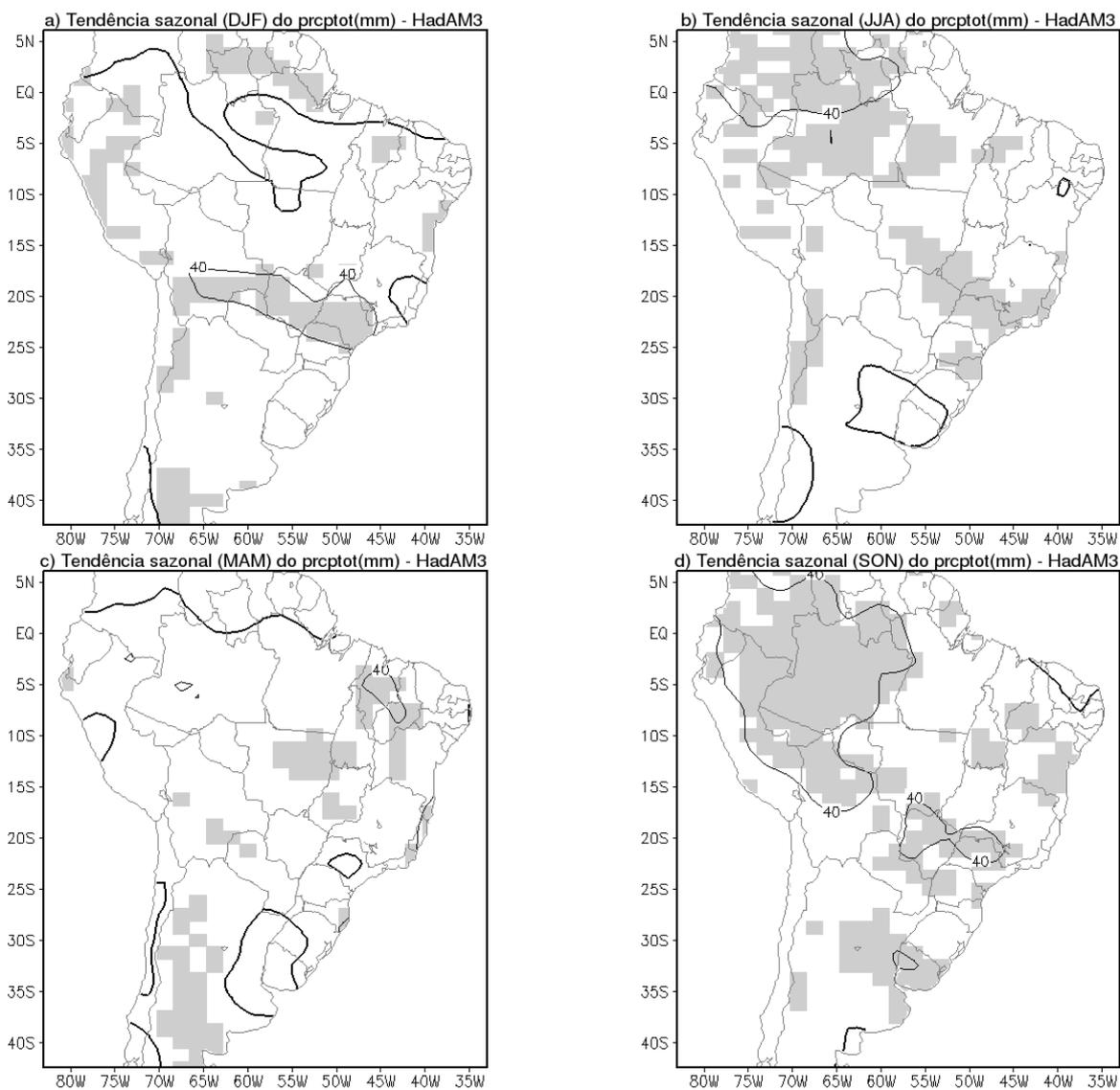


Fig. 14B. Tendência do índice sazonal prcptot (mm) simulada pelo modelo HadAM3 sobre a América do Sul durante o período de 1961-1990: (a) verão (DJF), (b) inverno (JJA), (c) outono (MAM) e (d) primavera (SON). O sombreado destaca as regiões com tendência significativa no nível de 5%. O contorno zero está em negrito, os positivos contínuos e os negativos pontilhados.

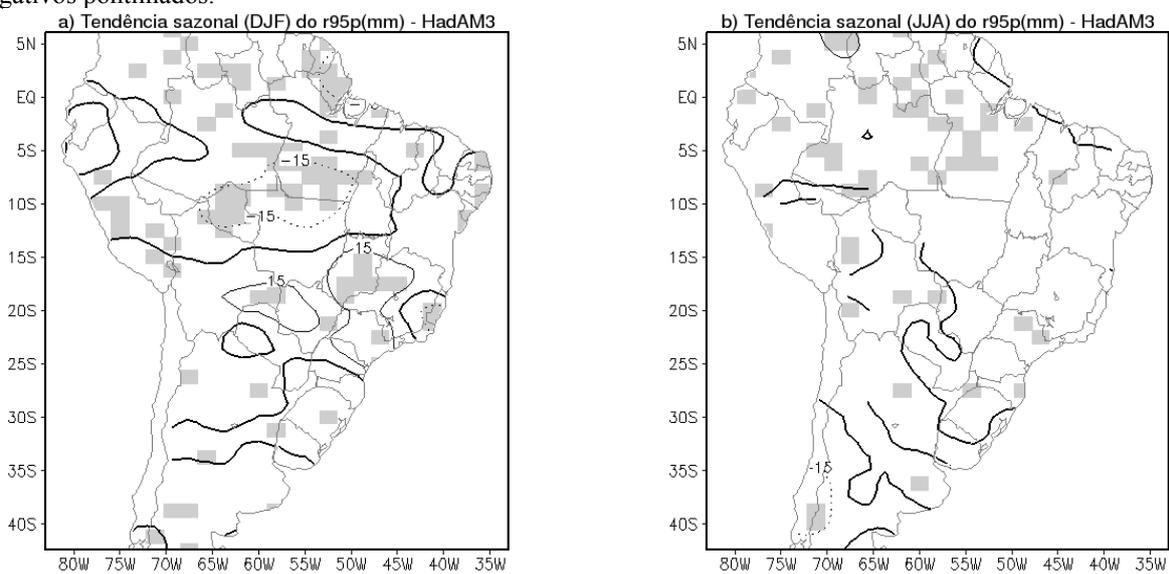


Fig. 15B. Idem Fig. 14B para o índice sazonal r95p (mm).

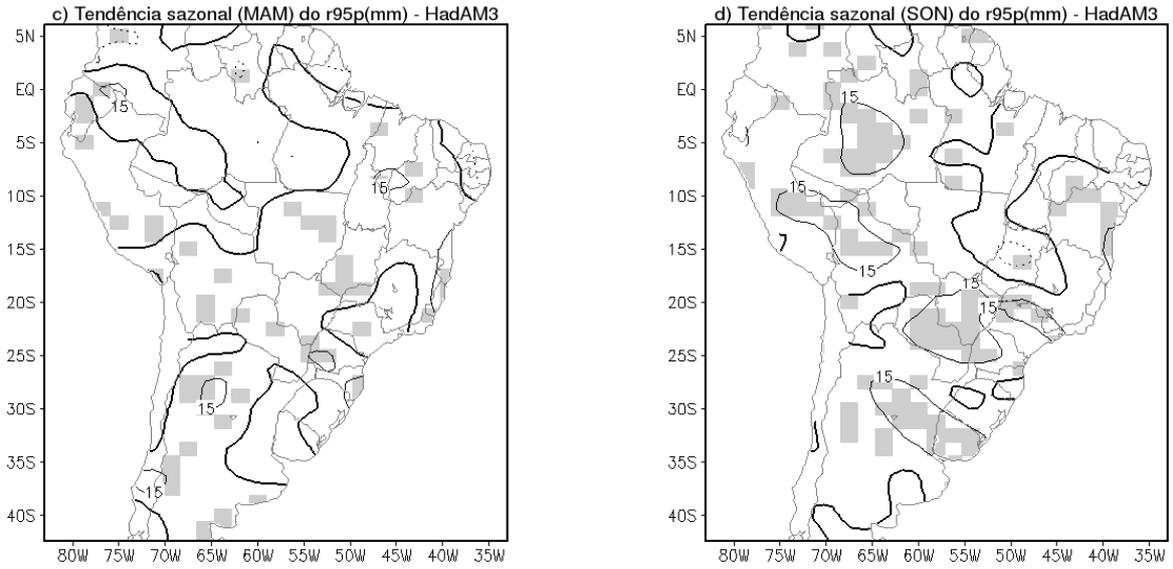


Fig. 15B. (continuação).

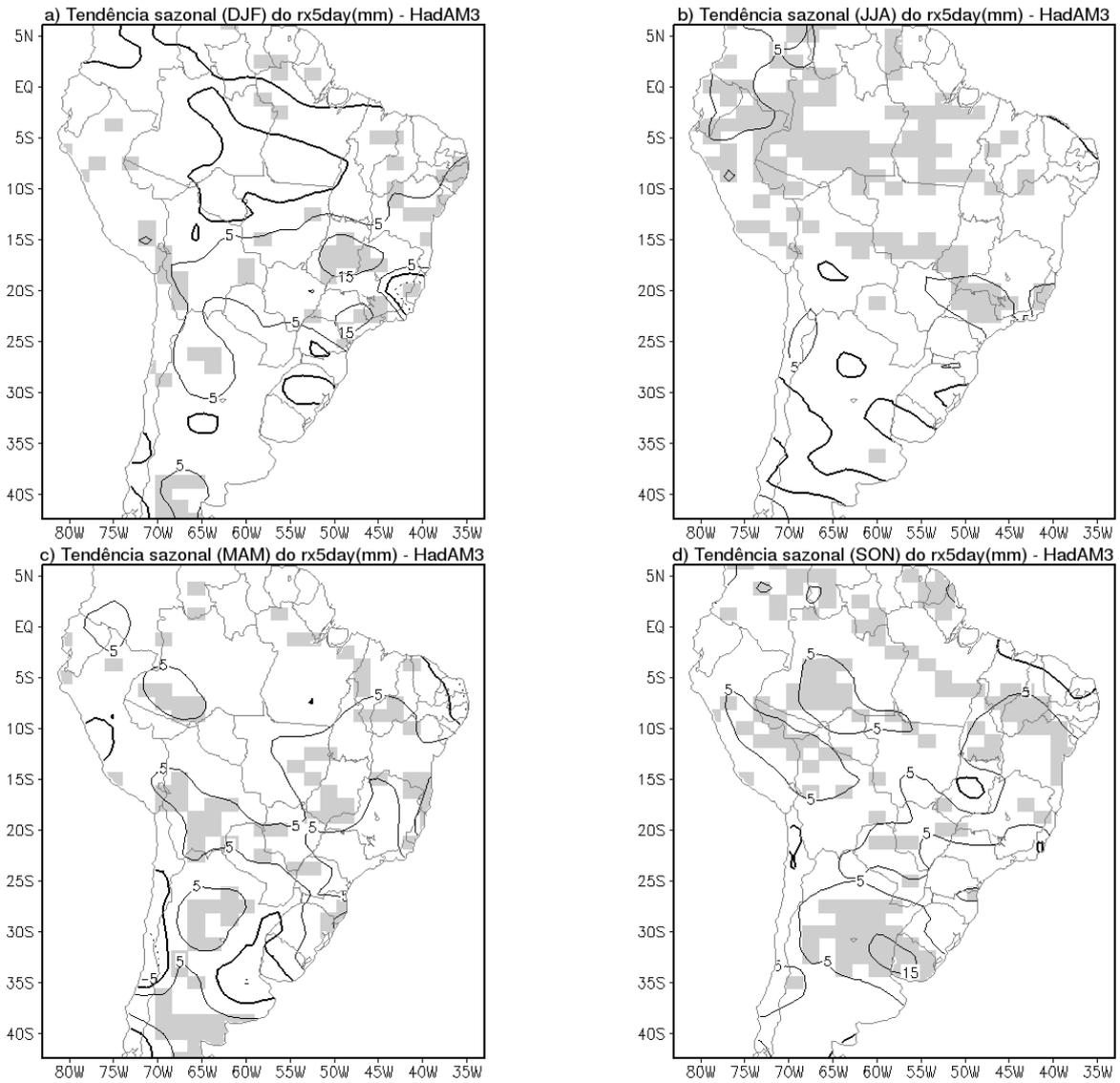


Fig. 16B. Idem Fig. 14B para o índice sazonal rx5day (mm).

