



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**TENDÊNCIA DOS ÍNDICES DE INSTABILIDADE
NA AMÉRICA DO SUL**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Rute Ferreira

Itajubá, MG, Brasil

2013

TENDÊNCIA DOS ÍNDICES DE INSTABILIDADE NA AMÉRICA DO SUL

por

Rute Costa Ferreira

Monografia apresentada à comissão examinadora
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da
Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como
requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientadora: Michelle Simões Reboita

Itajubá, MG, Brasil
2013

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**


A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

**TENDÊNCIA DOS ÍNDICES DE INSTABILIDADE NA AMÉRICA DO
SUL**

elaborada por
Rute Costa Ferreira

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Michele Simões Reboita, Dr^a (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)



Roger Rodrigues Torres, Dr. (UNIFEI)



Luiz Felipe Silva, Dr. (UNIFEI)

Itajubá, 13 de novembro de 2013.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a todos que colaboraram de alguma maneira com o trabalho e que ajudaram a concluir o atual trabalho.

A Michelle, que além de ótima professora, pela oportunidade de trabalharmos juntas durante esse período.

A comissão examinadora, professores Roger e Luiz Felipe, por aceitarem o convite e pelas críticas construtivas.

A PRPPG - Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação – da UNIFEI e a FAPEMIG pelos recursos disponibilizados para a apresentação parcial deste trabalho no V SIC - Simpósio Internacional de Climatologia, com o título “ÍNDICE DE INSTABILIDADE K NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL”.

As minhas irmãs Sílvia pelo apoio e aprendizado, e Ana por tudo. Aos meus pais, pois sem eles, eu não teria chegado aqui.

Aos meus professores da graduação que conseguiram mostrar além dos livros.

Aos meus amigos, principalmente o pessoal da primeira turma de Ciências Atmosféricas, alguns em especial, colaboraram não só para o meu crescimento profissional, como para o crescimento pessoal.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

TENDÊNCIA DOS ÍNDICES DE INSTABILIDADE NA AMÉRICA DO SUL

AUTORA: Rute Costa Ferreira
ORIENTADORA: Michelle Simões Reboita

Local e Data da Defesa: Itajubá, 13 de novembro de 2013.

Os índices de instabilidade revelam a estrutura vertical da atmosfera com relação à temperatura do ar e umidade a fim de identificar instabilidade ou estabilidade da atmosfera. Caso ocorra instabilidade, fornecem um indicativo da intensidade dos sistemas precipitantes e possibilidade de queda de granizo, sendo úteis na previsão de eventos extremos. O índice K indica o potencial para tempestades com base na taxa vertical de variação da temperatura, na umidade na baixa troposfera e na extensão da camada úmida. O índice Total Totals (TT) é a soma de dois índices de estabilidade: o Vertical Totals (VT - dado pelo *lapse rate* entre os níveis de 850 e 500 hPa) e o Cross Totals (CT - dado pela diferença do nível de umidade em 850 hPa e a temperatura em 500 hPa). Devido à grande importância destes índices na previsão de tempo e da falta de estudos quanto à tendência destes parâmetros na América do Sul, este trabalho tem como objetivo determinar os índices K e TT para os quatro horários sinóticos (00, 06, 12 e 18 UTC) entre 1979 e 2012, realizar uma climatologia destes índices e calcular a tendência sazonal e para todos os períodos dos mesmos para a América do Sul. Para realizar este estudo foram utilizados dados de temperatura e umidade do ar obtidos da reanálise ERA-Interim que tem resolução horizontal de 0,75° de latitude e longitude. No interior do continente, maiores valores dos índices K e TT são obtidos no verão, devido principalmente à variação sazonal da temperatura, além dessa ser a estação chuvosa influenciada pelo regime monçônico em grande parte do continente sul americano. Há tendência de aumento nos valores de ambos os índices sobre a Amazônia norte e tendência negativa nos valores dos índices a noroeste da Argentina e sudoeste da Bolívia.

Palavras-chave: Climatologia. Índice K. Índice TT.

Lista de Figuras

Figura 1: Tendência de temperatura, FONTE: IPCC, 2007.....	15
Figura 2: Tendência de precipitação para o período 1950-2008. Fonte: DAI, 2011.....	16
Figura 3: Tendência de precipitação anual para o período 1979-2005. Fonte: IPCC, 2007..	16
Figura 4: Tendência de precipitação nos meses de janeiro a março do período 1976-1999. Os valores negativos estão circulados com linha pontilhada. Fonte: LIEBMANN, 2004.....	17
Figura 6: Média climatológica horária para o índice TT: a) 00Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 18Z.	21
Figura 7: Variações sazonais climatológicas do índice K às 00 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON).....	23
Figura 8: Variações sazonais climatológicas do índice TT para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON).....	24
Figura 9: Tendência sazonal do índice K de instabilidade.....	25
Figura 10: Tendência sazonal do índice de instabilidade TT.....	26
Figura 11: Tendência dos índices de instabilidade: a) representa o índice K, b) o índice TT.	27
Figura A 1: Variações sazonais climatológicas do índice K às 06 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON).....	32
Figura A 2: Variações sazonais climatológicas do índice K às 12 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON).....	33
Figura A 3: Variações sazonais climatológicas do índice K às 18 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON).....	34
Figura B 1: Variações sazonais climatológicas do índice TT às 06 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON).....	35
Figura B 2: Variações sazonais climatológicas do índice TT às 12 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON).....	36
Figura B 3: Variações sazonais climatológicas do índice TT às 18 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON).....	37
Figura C 1: Tendência sazonal do índice de instabilidade K às 06 Z: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON).....	38
Figura C 2: Tendência sazonal do índice de instabilidade K às 12 Z: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)	39
Figura C 3: Tendência sazonal do índice de instabilidade K às 18 Z: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)	40
Figura C 4: Tendência sazonal do índice de instabilidade TT às 06 Z: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)	41
Figura C 5: Tendência sazonal do índice de instabilidade TT às 12 Z: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)	42
Figura C 6: Tendência sazonal do índice de instabilidade TT às 18 Z: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)	43
Figura D 1: Tendência anual do índice K por horário: a) 00Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 18Z.....	44
Figura D 2: Tendência anual do índice TT por horário: a) 00Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 18Z.....	45

Sumário

RESUMO.....	5
Lista de Figuras.....	6
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Temperatura de ponto de orvalho	9
2.2 Formação de nuvens.....	9
2.3 Índices de instabilidade	10
2.3.1. Índice K	10
2.3.2. Índice Total Totals	11
2.3.3. Aplicações dos índices de instabilidade	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS	18
4. RESULTADOS	19
5. CONCLUSÕES.....	28
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
ANEXO A - Variação sazonal do índice K.....	32
ANEXO B - Variação sazonal do índice TT	35
ANEXO C - Tendência sazonal dos índices K e TT	38
ANEXO D - Tendência anual dos índices K e TT	44

1. INTRODUÇÃO

A atmosfera é dita estável quando as camadas de ar mais próximas da superfície são mais frias do que as camadas logo acima destas. Já a atmosfera é dita instável na ocorrência de camadas de ar mais quentes próximas da superfície e mais frias acima. Na primavera e verão é comum o grande aquecimento diurno da superfície devido a maior incidência de radiação solar. Esse aquecimento favorece a convecção e, conseqüentemente, a instabilização da atmosfera, favorecendo a ocorrência de nuvens, precipitação e, principalmente, de tempestades convectivas no final da tarde, exceto no caso da Amazônia, pois o máximo de precipitação ocorre as 15 horas.

Para avaliar se a atmosfera é estável ou instável são utilizados índices de instabilidade. Os índices de instabilidade são parâmetros numéricos de cálculo objetivo que visam estabelecer uma relação entre a ocorrência de tempestades e a circulação de meso ou grande escala nas quais estão imersas, e para tentar prognosticá-las, utilizam-se dos perfis verticais de vento, temperatura e umidade (BENETTI e SILVA DIAS, 1986). Em caso de instabilidade atmosférica, fornecem um indicativo da intensidade das chuvas e possibilidade de queda de granizo, sendo úteis na previsão de eventos extremos. Entre os diversos índices de instabilidade tem-se o índice K, o *Total Totals* (TT), Showalter, o Lifted Index (LI), CAPE, CINE, Severe Weather Threat (SWEAT).

A análise do índice TT é conveniente para prever eventos severos associados à queda de granizo. Se ambos valores de K e TT são altos, a tendência é ter chuvas torrenciais. Se o valor de K é baixo e TT é alto, então a tendência é ter tempestades severas (ESCOBAR, 2010).

Esses índices são muito úteis, e por serem fáceis de calcular e quando utilizados em conjunto com a meteorologia sinótica, eles ajudam tanto em pesquisas quanto na parte de previsão do tempo. E devido à importância destes índices e da falta de estudos quanto a estes parâmetros na América do Sul, este trabalho tem como proposta realizar uma climatologia mensal e sazonal dos índices K e TT, e avaliar a tendência sazonal dos mesmos para os quatro horários sinóticos (00, 06, 12 e 18 UTC) no período de 1979 a 2012, e também para todo o período.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o presente estudo, é necessário definir alguns conceitos associados à termodinâmica da atmosfera, os quais estão divididos nos tópicos 2.1 a 2.3.2.

2.1. Temperatura de ponto de orvalho

A temperatura de ponto de orvalho (T_d) pode ser definida, segundo Vianello e Alves (1991) como a “temperatura na qual a saturação ocorre quando o ar é resfriado a pressão constante e sem adição ou remoção de vapor d’água”, ou seja, temperatura na qual o vapor d’água presente na parcela atmosférica analisada atinge a maior concentração à mesma pressão. Sendo assim, T_d é um parâmetro de suma importância junto a outros elementos para indicar a instabilidade atmosférica. Assim, T_d pode ser obtida em função da umidade relativa (U_r , em fração) e da temperatura do ar no nível desejado (T , em °C) pelas equações (1) e (2):

$$T_d = \frac{237,3 \left(\log_{10} U_r + \frac{7,5 T}{237,3 + T} \right)}{7,5 - \log_{10} U_r - \frac{7,5 T}{237,3 + T}} \quad (1)$$

Para $T > 0^\circ\text{C}$ e

$$T_d = \frac{243,33 \left(\log_{10} U_r + \frac{7,665 T}{243,33 + T} \right)}{7,665 - \log_{10} U_r - \frac{7,665 T}{243,33 + T}} \quad (2)$$

para $T < 0^\circ\text{C}$.

2.2. Formação de nuvens

Para que haja formação de nuvens são necessárias algumas condições atmosféricas como instabilidade das parcelas de ar, mecanismos de levantamento do ar e umidade.

A convecção na atmosfera é um mecanismo de levantamento no qual há transferência de calor, responsável pela ascensão do ar mais quente entre as camadas atmosféricas. Este tipo de convecção ocorre em função do ar próximo à superfície ser mais quente do que o das camadas acima da superfície.

Parcelas de ar são consideradas instáveis se o ar que sofre levantamento é mais quente do que o ar da camada para onde as parcelas se deslocaram e também

das camadas acima desta. Caso haja umidade nestas parcelas de ar instáveis e núcleos de condensação pode ocorrer formação de nuvens. As nuvens são formadas por minúsculas gotículas d'água e por cristais de gelo em suspensão na atmosfera.

2.3. Índices de instabilidade

Segundo Frago (1998), os diversos índices de instabilidade são diferenciados por tipos de parâmetros, em função da sua complexidade e dos pressupostos em que determinam. Podem ser separados em três classes:

- índices que se baseiam no princípio de que a instabilidade pode ser inferida apenas com base nas diferenças de condições de temperatura e/ou umidade entre dois níveis isobáricos;
- índices que relacionam os elementos referidos na anterior categoria com as características do vento na troposfera na vertical da estação de radiossondagem;
- índices que se baseiam na determinação de valores da energia necessários à convecção forte.

No presente trabalho, o cálculo dos índices K e TT incluem-se no primeiro tipo, pois só depende dos parâmetros temperatura e umidade em diferentes níveis atmosféricos.

2.3.1. Índice K

O índice K indica o potencial para tempestades com base na taxa vertical de variação da temperatura, na umidade na baixa troposfera e na extensão da camada úmida. Este índice pode ser calculado através da equação (3) (T, em °C):

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (3)$$

na qual a estimativa da taxa vertical de variação da temperatura é calculada pela diferença entre as temperaturas de 850 (T₈₅₀) e 500hPa (T₅₀₀), a umidade na baixa troposfera é dada pela temperatura do ponto de orvalho de 850hPa (T_{d850}), e a extensão vertical da camada úmida é calculada pela diferença entre a temperatura do ar (T₇₀₀) e do ponto de orvalho (T_{d700}) ambas em 700hPa. Com base nestes dados é possível estimar a estrutura vertical da atmosfera parametrizando os principais processos atmosféricos que influenciam na formação de convecção e futura dissipação.

A Tabela 1 expressa a probabilidade de tempestades em função do valor calculado do índice K:

Tabela 1: Valores de índice K relacionados a possibilidade de tempestades
Fonte: ESCOBAR, 2010

Valor de K	Possibilidade de tempestades
$K \leq 20$	Nenhuma
$20 < K \leq 25$	Chuvas isoladas
$25 < K \leq 30$	Tempestades amplamente espalhadas
$30 < K \leq 35$	Tempestades espalhadas
$35 < K < 40$	Muitas tempestades

2.3.2. Índice Total Totals

O índice Total Totals (TT) é composto por dois índices o *Vertical Totals* (VT) e o *Cross Totals* (CT) (MILLER, 1972).

O VT representa o *lapse rate* entre duas camadas: a de 850hPa e de 500hPa e é calculado por:

$$VT = T_{850} - T_{500} \quad (4)$$

Para ter instabilidade na atmosfera esse índice deve apresentar diferença positiva e com valores altos. Este índice pode não indicar presença de movimentos ascendentes caso haja um pequeno gradiente vertical de temperatura devido à diminuição da temperatura da superfície (resultante do bloqueio causado pela presença de nuvens na atmosfera). Devido a isso, também devem ser analisadas outras variáveis atmosféricas.

O CT representa a diferença da quantidade umidade próximo à superfície com a temperatura de médios níveis e é dado pela fórmula:

$$CT = T_{d850} - T_{500} \quad (5)$$

O índice TT combina a temperatura de níveis médios, a umidade ambiental em 850hPa, e a temperatura em 500hPa. Este índice é obtido através da soma dos índices *Cross Totals* e *Vertical Totals*:

$$TT = CT + VT \quad (6)$$

Ou seja, pelas equações (5) e (6), tem-se:

$$TT = T_{850} + T_{d850} - 2 T_{500} \quad (7)$$

O cálculo da equação 7.2 relaciona o valor encontrado para o índice TT com o tipo de atividade convectiva que pode ocorrer como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Relação entre valores do índice *Total Totals* e atividade convectiva

Fonte: ESCOBAR, 2010.

Valores de TT	Atividade Convectiva
$TT \leq 44$	Potencial fraco
$44 < TT \leq 50$	Chuvas fortes
$50 < TT \leq 55$	Tempestades moderadas
$TT > 55$	Tempestades muito fortes

Este índice tem como maior limitação a dependência da umidade em 850 hPa, assim como o índice K. O índice TT exige calor e umidade em 850 hPa e frio em 500 hPa e não restringe a umidade em 700hPa. Se houver uma camada seca em 700 hPa isso não afeta o valor de TT (SILVA DIAS, 2000).

Quando a massa de ar é quente e úmida, esses índices dão interpretações semelhantes, mas quando o ar é mais frio e seco o *Total Totals* tem melhores resultados por dar um peso maior à presença de ar frio em níveis médios (BENETI e SILVA DIAS, 1986).

2.3.3. Aplicações dos índices de instabilidade

Em estudos para a cidade de Porto Alegre/RS, Ulguim Pedra (2008) confirma que a utilização dos índices K e TT como detectores de chuvas intensas é considerável. Porém para a análise de chuvas intensas é necessário que se faça a análise da camada de 1000 a 400 hPa, pois há possibilidade da nuvem com capacidade de precipitação formar-se fora da camada para a qual o índice é calculado – camada de 850 a 500 hPa para os índices K e TT. Para a mesma cidade, segundo estudo de Cardoso (2008) para o mês de janeiro o índice K foi o que melhor explicou a variabilidade da chuva para o intervalo de 0,1 a 10 mm. Já para o mês de julho, os índices VT, CT e novamente VT foram os que melhor explicaram a variabilidade da chuva para os intervalos de 0,1 a 10 mm; 10,1 a 20 mm e maiores de 20 mm de precipitação, respectivamente. Para este mesmo mês o índice menos representativo no intervalo de 0,1 a 10 mm foi o TT.

A análise dos índices de instabilidade calculados a partir de radiossondagens realizadas em Maxaranguape/RN mostrou maior instabilidade condicional no mês de abril, coincidindo com um máximo secundário de precipitação. Porém, não explicou

o máximo principal observado em julho. Isso sugere que os mecanismos termodinâmicos não são suficientes para modular o máximo de chuva, o que é consistente com estudos realizados no Sudeste e Sul do Brasil (TOMAZIELLO E GANDU, 2009; CARDOSO et al., 2006 apud SILVA, 2011).

Diversos índices foram propostos relacionando o índice K a outros parâmetros, entre eles, incluem-se os índices K_{950hPa} e CK.

O índice K_{950hPa} , proposto por CORRÊA (2007), tem como principal aprimoramento verificar a influência do transporte de calor e vapor de água realizado pelos fluxos/Jatos de Baixos Níveis (JBN) e conseqüentemente tem fundamental papel na geração e manutenção da convecção em níveis mais baixos (950 hPa), todas as temperaturas em graus Celsius ($^{\circ}C$):

$$K_{950hPa} = (T_{950} - T_{500}) + T_{d950} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (8)$$

Corrêa comparou o novo índice, mostrando diferenças significativas nos valores de K e K_{950hPa} , estas comprovam a influência dos JBN e fluxos entre estes dois níveis de pressão e na conseqüente formação de tempestades, sendo que é também muito útil na análise diagnóstica para distinguir o tipo de fluxo atuante.

Já o desenvolvimento do índice CK, por Lima (2006), tem por intuito complementar o índice K, considerando a necessidade de se transportar essa umidade na vertical, com posterior condensação do vapor d'água e formação da nuvem convectiva, no qual as componentes do vento servem como um 'indicador de convecção'. Pode ser calculado pelo produto entre o índice K e a divergência em baixos níveis (925hPa):

$$CK = K \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (9)$$

onde u é a componente zonal do vento; v é a componente meridional do vento e K representa o índice K, calculado pela equação (2). Este índice é válido apenas para valores de K maiores que zero, o que não representa perdas nos cálculos associados possibilidade de tempestades, já que valores significativos de K são acima de 20, como é mostrado na Tabela 1.

De acordo com a climatologia dos índices K e TT realizada por Escobar e Andrade (2010) é possível observar uma clara variação sazonal devido à grande dependência que tem estes índices com a temperatura e umidade do ar, pois levam informação da temperatura em 850, 700 e 500 hPa e da temperatura de ponto de orvalho em 850 e 700 hPa. É discutido também que há grande correspondência na

localização das áreas com máximos e mínimos valores entre os dois diferentes índices. Maiores valores foram encontrados no verão, pois estão associados diretamente à variação sazonal da temperatura, estação na qual as áreas continentais apresentam valor máximos valores de temperatura, tendo relação direta também com o campo de chuva e umidade, já que o verão é a estação chuvosa (no verão as precipitações ficam concentradas sobre grande parte do Sudeste e Centro-Oeste). A atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) nesta época do ano contribui com uma grande porcentagem da variância explicada desta chuva e valores dos índices. O padrão encontrado na região Sudeste e Sul é semelhante nas outras estações ao longo do ano diferindo somente com relação aos valores dos índices. Nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste apresentam maiores valores absolutos dos índices no verão, no outono há um decaimento em relação ao verão, e os mínimos encontrados foram no inverno.

Segundo Tomaziello (2006), altos valores do índice TT apresentam correspondência com a ocorrência de precipitação (o maior volume de precipitação está associado aos valores do índice que acusam maior probabilidade de tempestades). Essa associação não é direta, pois o mês de maior probabilidade de tempestades é março, enquanto que o maior volume de precipitação do período observado ocorre em janeiro. Portanto, não só fatores termodinâmicos (instabilidade) estão associados às chuvas intensas de janeiro em São Paulo.

Estudando separadamente a climatologia da temperatura em cada nível que compõe o índice K, Correa (2006) analisou as diferenças resultantes nas médias climatológicas, nota-se um expressivo aumento da temperatura do ar em 850 hPa quase todas os pontos das regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, e também um aumento menos expressivo da temperatura do ponto de orvalho em 850 hPa. Já no nível de 700 hPa, percebeu-se um leve aumento da temperatura do ar em quase todas áreas das regiões estudadas. Observou-se um considerável aumento da temperatura do ar em 500 hPa em quase todas as regiões estudadas do país e notou-se também um suave aumento significativo da temperatura do ponto de orvalho em 500hPa na região continental. Assim, concluiu que a magnitude da soma das temperaturas do ar e do ponto de orvalho em 850 hPa se sobrepõe as outras componentes da equação do Índice K, nota-se que esta é a componente da equação

que produz maior papel na explicação do aumento significativo do índice ao longo dos anos.

Para relacionar tornados e índices de instabilidade Estivallet (2013) analisou vários índices de instabilidade por dados de reanálise, com resolução horizontal de 2,5°. Os índices TT e o K foram utilizados porque foram os dados mais consistentes. Nos horários sinóticos de cada dia, foram calculados os índices e separados valores máximos (extremos), no período de 1957 a 2009. A partir dos dados gerados pelo GrADS, foi observado que há datas consistentes com os valores máximos dos índices e tempestades severas que possam ter originado tornados na região Sul do Brasil. Foi realizada uma pesquisa em jornais e em acervo histórico e foi comprovado que altos valores de ambos os índices coincidiam com tempestades que provocaram danos severos em Santa Catarina, com óbitos inclusive.

2.4. Tendência observadas

Como os índices a serem calculados, dependem diretamente da temperatura, é importante observar se há tendência nesse parâmetro. A Figura 1 mostra que há tendência de aumento na temperatura no período 1970-2004, em toda a América do Sul.

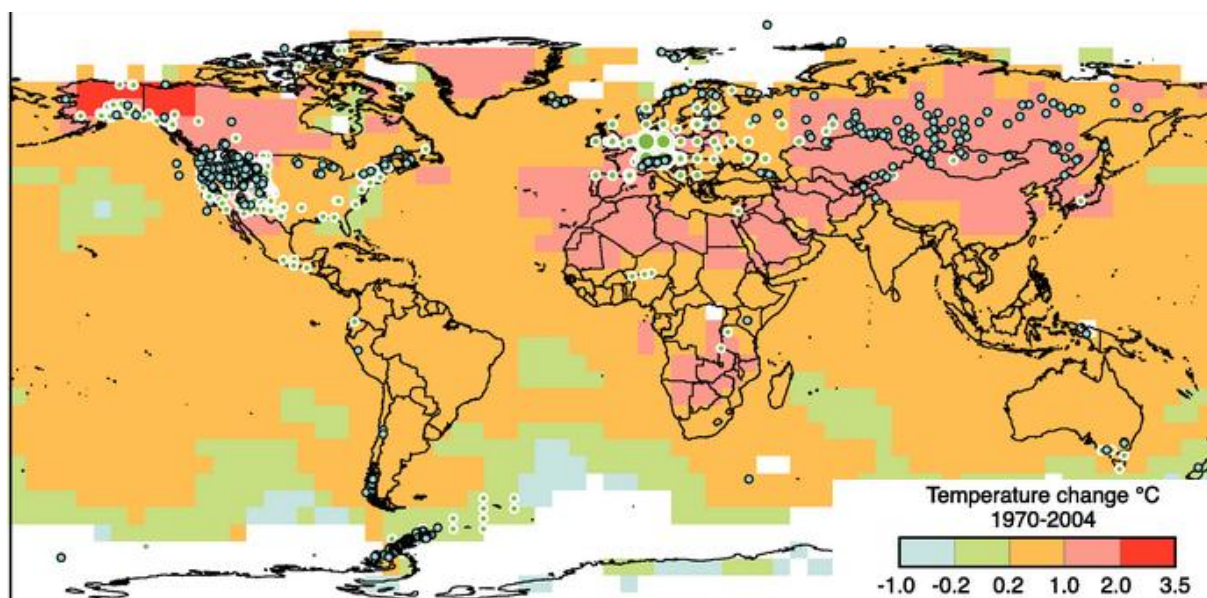


Figura 1: Tendência de temperatura, FONTE: IPCC, 2007.

Para o período de 1950 a 2008, é possível notar na Figura 2 que há tendência de aumento de precipitação diária na Amazônia Norte e sul da América do Sul.

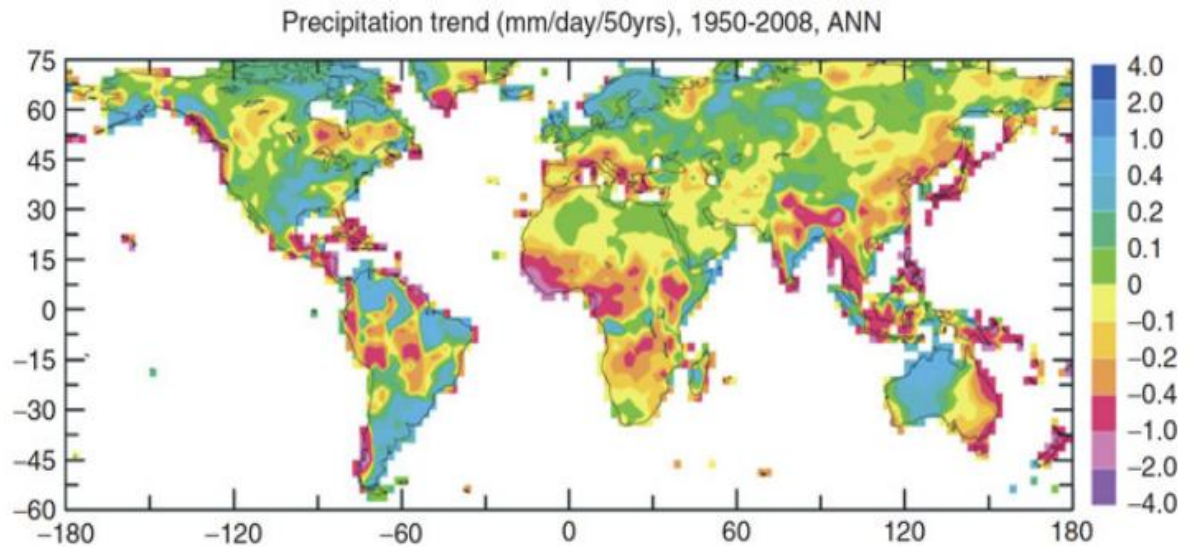


Figura 2: Tendência de precipitação para o período 1950-2008. Fonte: DAI, 2011.

Já segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC,2007) há aumento de chuvas na região da Argentina, e diminuição em parte da Amazônia, como mostra a Figura 3.

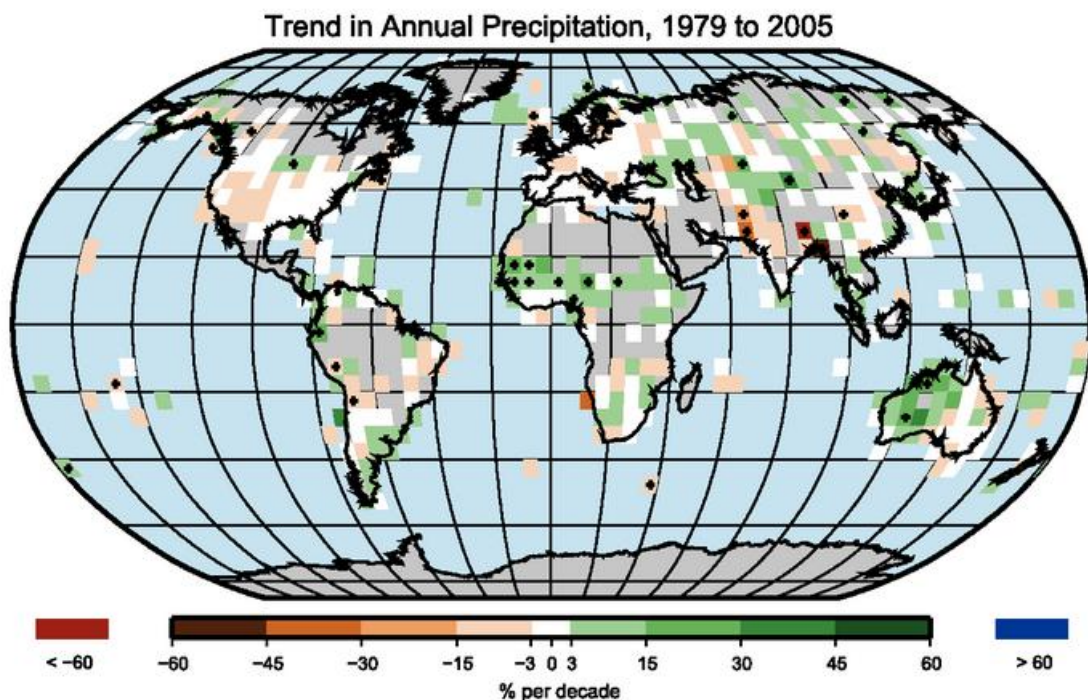


Figura 3: Tendência de precipitação anual para o período 1979-2005. Fonte: IPCC, 2007.

Em estudos para a precipitação de verão, Liebmann (2004), encontrou tendência de aumento nas precipitações na Amazônia, decréscimo na região central do Brasil e na Argentina, como mostra a Figura 4.

January - March precipitation trend 1976 - 1999

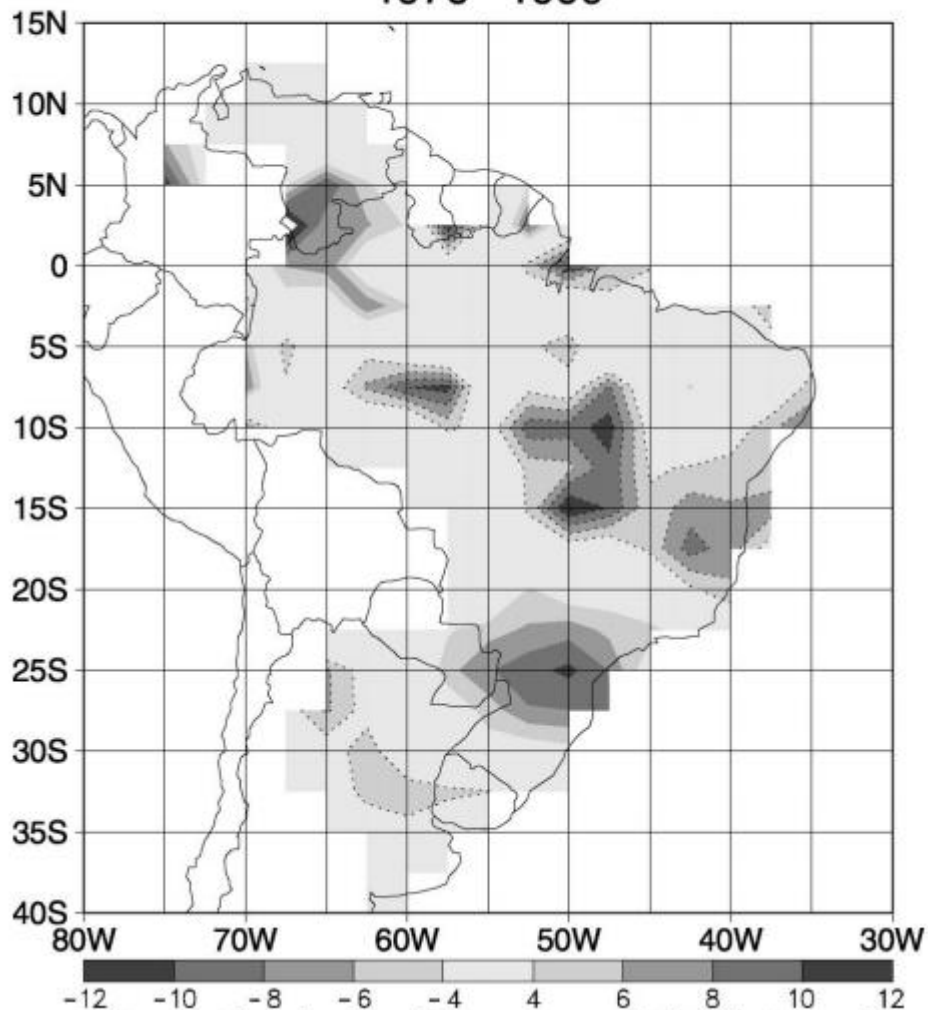


Figura 4: Tendência de precipitação nos meses de janeiro a março do período 1976-1999. Os valores negativos estão circulados com linha pontilhada. Fonte: LIEBMANN, 2004.

De acordo com as Figuras 1 a 4, não é possível estabelecer analogamente uma tendência dos índices de instabilidade. Embora os resultados dos autores (IPCC,2007; DAI,2011; LIEBMANN, 2004) sejam para épocas diferentes, eles divergem com relação as áreas com tendência, ou seja, não há unanimidade nesse parâmetro em estudos internacionais.

Até o presente momento, não existem trabalhos que realizem climatologia e tendência para toda a América do Sul.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Dados

Com o intuito de realizar uma climatologia mensal e sazonal dos índices de instabilidade K e TT, para o período entre janeiro de 1979 e dezembro 2012, foram utilizados dados para os quatro horários sinóticos (00, 06, 12 e 18 UTC) de temperatura (em Kelvin) e umidade do ar (em porcentagem) obtidos da reanálise *ERA-Interim* do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) com resolução horizontal de 0,75° (disponíveis em: http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/levtype=pl/). A área em estudo está compreendida entre as latitudes 60° S a 15° N e longitude de 270° a 330° W, e os dados foram obtidos em três níveis de pressão da atmosfera (850, 700 e 500hPa).

Antes do cálculo dos índices, os dados de umidade foram convertidos para fração (valores entre 0 e 1) e os de temperatura foram transformados em graus Celsius, a partir das equações:

$$U_{\text{fração}} = \frac{U_r (\%)}{100} \quad (10)$$

$$T (\text{°C}) = T(\text{K}) - 273.15 \quad (11)$$

Com a umidade ($0 < U_r < 1$) e temperatura (T , °C), foram calculadas para cada ponto de grade em cada tempo através das equações (1 e 2) a temperatura de ponto de orvalho nos níveis de 700 e 850 hPa, para realizar os cálculos dos índices K e TT.

Foi desenvolvido um algoritmo no *software* Matlab a fim de realizar os presentes cálculos. Após o cálculo da temperatura e temperatura de ponto de orvalho, os índices K e TT foram calculados para cada horário sinótico a climatologia sazonal e anual de cada índice, e realizada uma análise de tendência. Para o cálculo da tendência será utilizado o método de regressão linear simples e testada a significância estatística com o teste t de Student.

3.2. Regressão Linear Simples

Realizou-se uma análise de tendência para identificar as regiões onde os valores dos índices de instabilidade têm aumentado ou diminuído ao longo do período em questão. Para o cálculo das tendências foi utilizada a técnica de regressão linear simples e plotado nos mapas o coeficiente angular.

A equação de regressão linear pode ser descrita como (STEVENSON, 1981):

$$y = a + bx \quad (12)$$

onde Y é o valor predito da série temporal, a é o coeficiente linear da reta, b é o coeficiente angular da reta e x é o valor calculado do índice para cada tempo. As equações para a e b são escritas como:

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (13)$$

$$a = \frac{\sum y - b \sum x}{n} \quad (14)$$

onde n é o número de observações.

3.3. Teste de hipótese

Foi calculado o teste de hipótese t de Student para verificar se as tendências eram significativas ao nível de 0,1% (90% de confiança). Esse método pode ser calculado a partir da equação (STEVENSON, 1981):

$$t = \frac{r - 0}{\sqrt{(1 - r^2)/(n - 2)}} \quad (15)$$

onde r é o intervalo de confiança e t é o valor do teste t .

Para testar a significância dos valores, foi definido o intervalo de confiança r e observado se o valor alegado está incluído ou não neste intervalo. Caso esse valor esteja no intervalo, aceita-se a hipótese inicial (H_0) que consiste em não haver tendência nos índices, caso contrário, rejeita-se a hipótese inicial e aceita-se a hipótese alternativa (H_1). A hipótese inicial testada (H_0) é que não há tendência, e H_1 é hipótese alternativa, para qual há tendência.

4. RESULTADOS

Os índices K e TT bem como a tendência destes foram calculados para toda a região da América do Sul, e a análise climatológica foi realizada para os quatro horários sinóticos, sazonalmente.

4.1 Médias Horárias

A Figura 1 mostra a média climatológica, por horário sinótico, dos índices K e TT e poucas diferenças foram observadas com relação à variação do horário para o índice K na região de estudo. Ambos índices mostraram valores mais baixos na região leste do continente para às 12 Z em relação aos outros horários (Figura 5.c e 6.c). No índice TT, foram encontrados valores mais baixos na região amazônica às 18 Z, o que pode ser explicado pela variação do ciclo diurno da temperatura para ambos os índices.

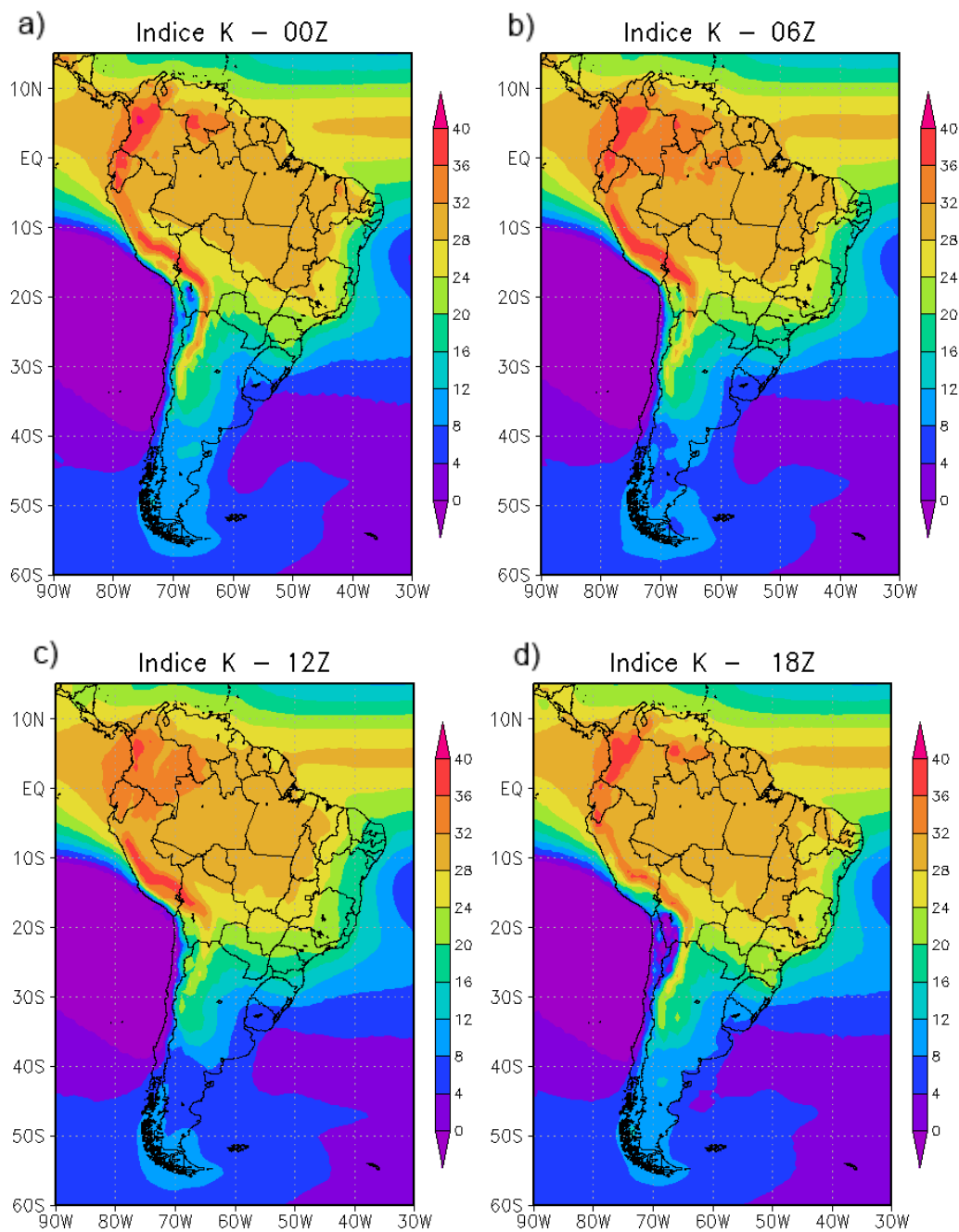


Figura 5: Média climatológica horária para o índice K: a) 00Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 18Z.

Valores típicos do índice K encontrados para a região sudeste do país variam de 20 a 28 (Figura 5). Já para o índice TT está variação é de 40 a 46 (Figura 6).

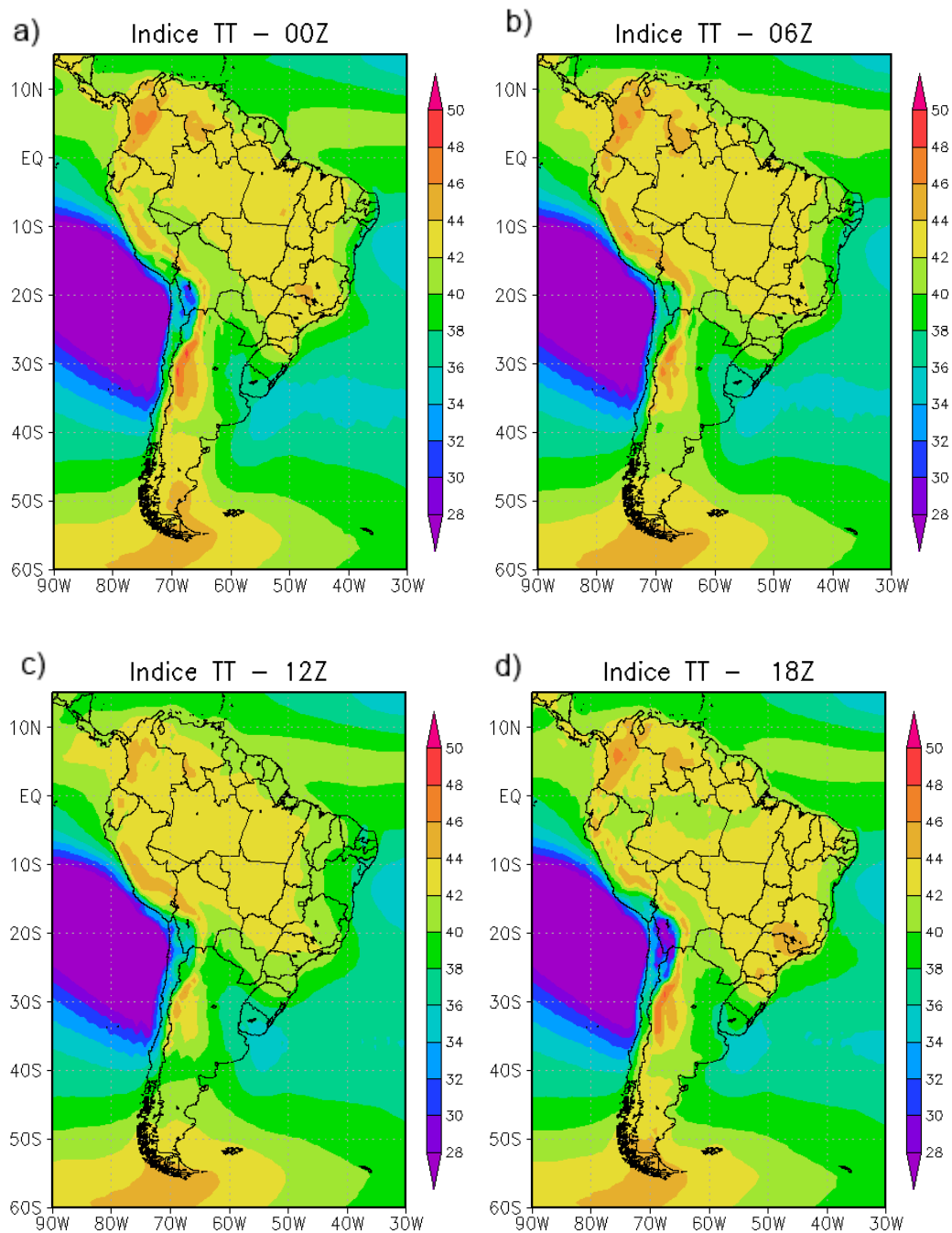


Figura 6: Média climatológica horária para o índice TT: a) 00Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 18Z.

É possível perceber um padrão bastante semelhante entre os índices K e TT em todos os campos plotados nas Figuras 5 e 6, mostrando maiores valores de índices de instabilidade na região central e noroeste da América do Sul.

Os valores médios encontrados por Estivallet (2013) para os índices foram aproximadamente 41 e 20, para o TT e K, respectivamente, estabelecendo classificações regionais para os índices, principalmente para o estado de Santa Catarina, o que confirma os valores encontrados no presente estudo.

4.2 Análise Sazonal

Devido à semelhança no comportamento dos índices ao longo dos horários analisados, a representação gráfica dos resultados é mostrada para o horário das 00Z, para que pudessem ser comparados a outros estudos encontrados na literatura, como o de Escobar (2010), entre outros.

As figuras para os outros horários estão no anexo A e B, onde podem ser comparadas as semelhanças no padrão de distribuição dos índices.

As variações observadas nas Figuras 7 e 8 se devem a variação sazonal da temperatura, sendo que em áreas continentais os valores de temperatura são máximos.

Menores valores de índices de instabilidade indicam que o perfil atmosférico encontra-se mais estável não apresentando possibilidade de chuvas. Devido à atuação do regime monçônico em parte do continente, é possível constatar que os maiores valores de ambos os índices encontram-se no verão, considerada estação chuvosa. A maior umidade presente na atmosfera em baixos níveis e as maiores temperaturas registradas nesta estação fazem com que o valor do índice aumente (Figura 7 a) em relação aos menores valores encontrados no inverno, estação mais seca e com temperaturas mais brandas.

Na Figura 3, é possível ver que os maiores valores encontrados do índice K estão próximos à Cordilheira dos Andes, ao longo do continente, atingindo valores $K > 40$, devido ao efeito orográfico nas linhas de pressão.

No verão (Figura 7 a) e primavera (Figura 7 d) são encontrados os maiores valores de K na região central do Brasil variando de 32 a 40, e de 28 a 36, respectivamente. Menores valores são no inverno, variando bastante o valor do índice no país, de $K=4$ no Rio Grande do Sul a $K=32$, no noroeste do Amazonas e em Rorâima (Figura 7 c). No outono há decréscimo em relação aos valores típicos do K no verão em quase todo o país, exceto na porção norte do país onde há aumento dos valores de K (Figura 7 b). As Figuras do índice K concordam com a distribuição espacial da chuva sazonal na Amazônia.

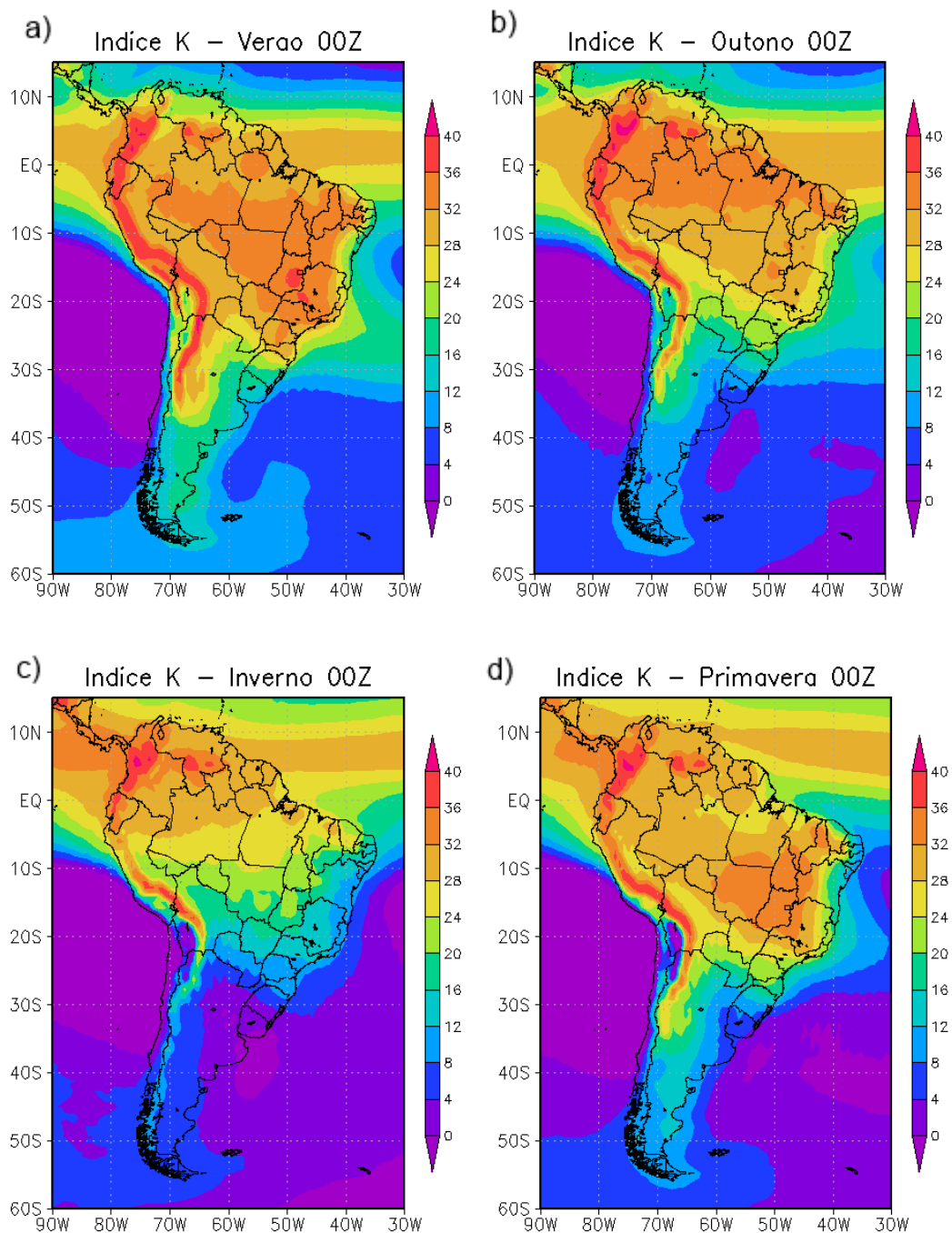


Figura 7: Variações sazonais climatológicas do índice K às 00 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

Na região sudeste do Brasil a variação de valores do índice TT entre verão (TT=46) e inverno (TT=40 a 42) tem até 6 unidades de diferença, como mostrado na Figura 8.a) e 8.c), caracterizando o regime monçônico atuante nesta região, com verões chuvosos e invernos secos.

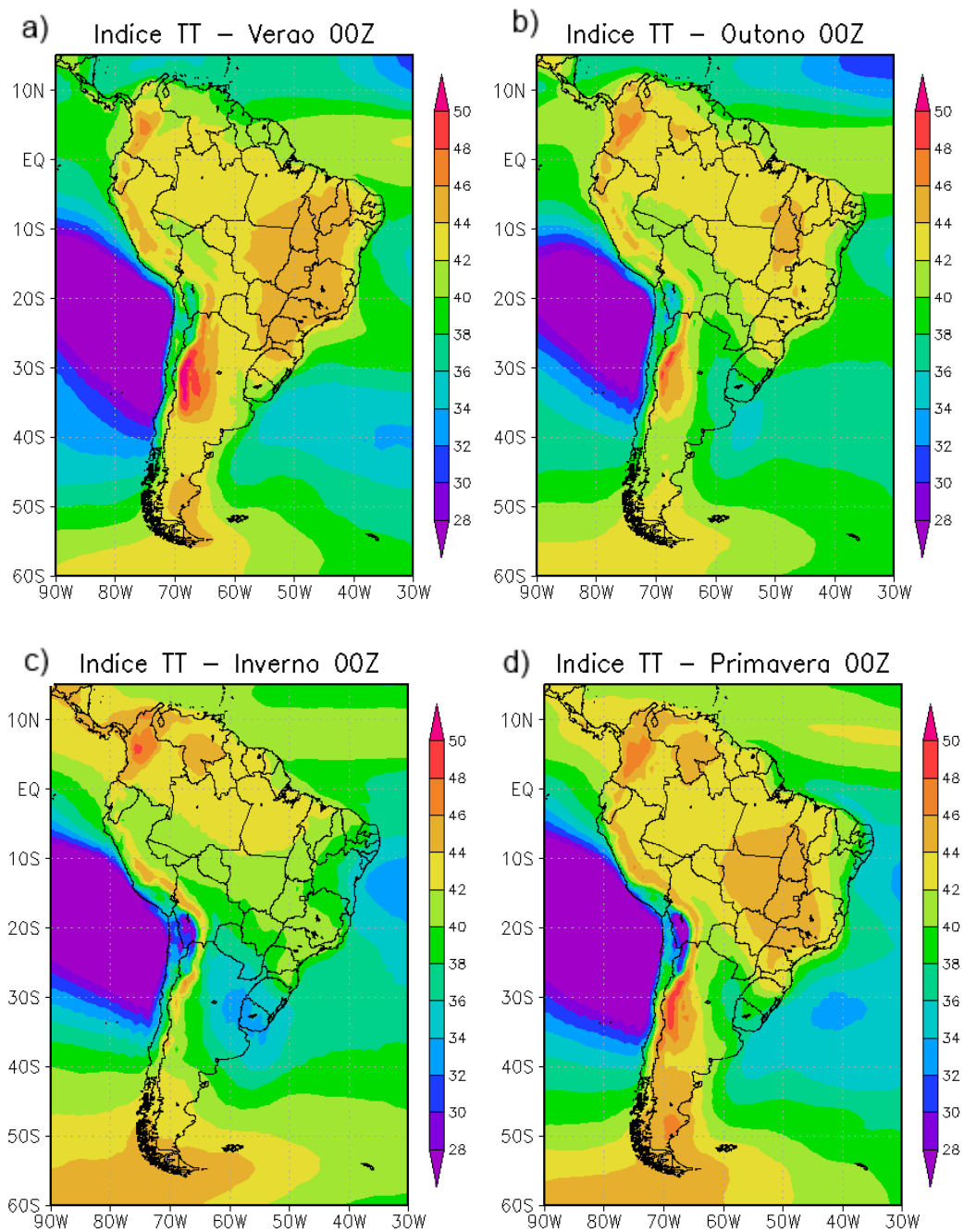


Figura 8: Variações sazonais climatológicas do índice TT para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

4.3 Análise de tendência

As Figuras de tendência foram plotadas para as 00Z. Os demais horários e anual estão nos anexos C e D. Para a análise de tendência, as linhas azuis correspondem à tendência negativa e as vermelhas referem-se à tendência positiva dos índices K e TT para as Figuras 9 a 11. Caso a região apresentasse tendência

significativa a partir do teste t, graficamente foi preenchida com a cor cinza, como foi plotado nas Figuras 9, 10 e 11.

Na Figura 9, é possível notar que as estações que indicam maiores valores de tendência crescente no valor do índice K são verão e primavera, onde foram obtidos valores significativos na região Amazônica e parte da região Centro Oeste do Brasil. Há tendência de decréscimo nos valores principalmente no outono na Argentina (Figura 9.b).

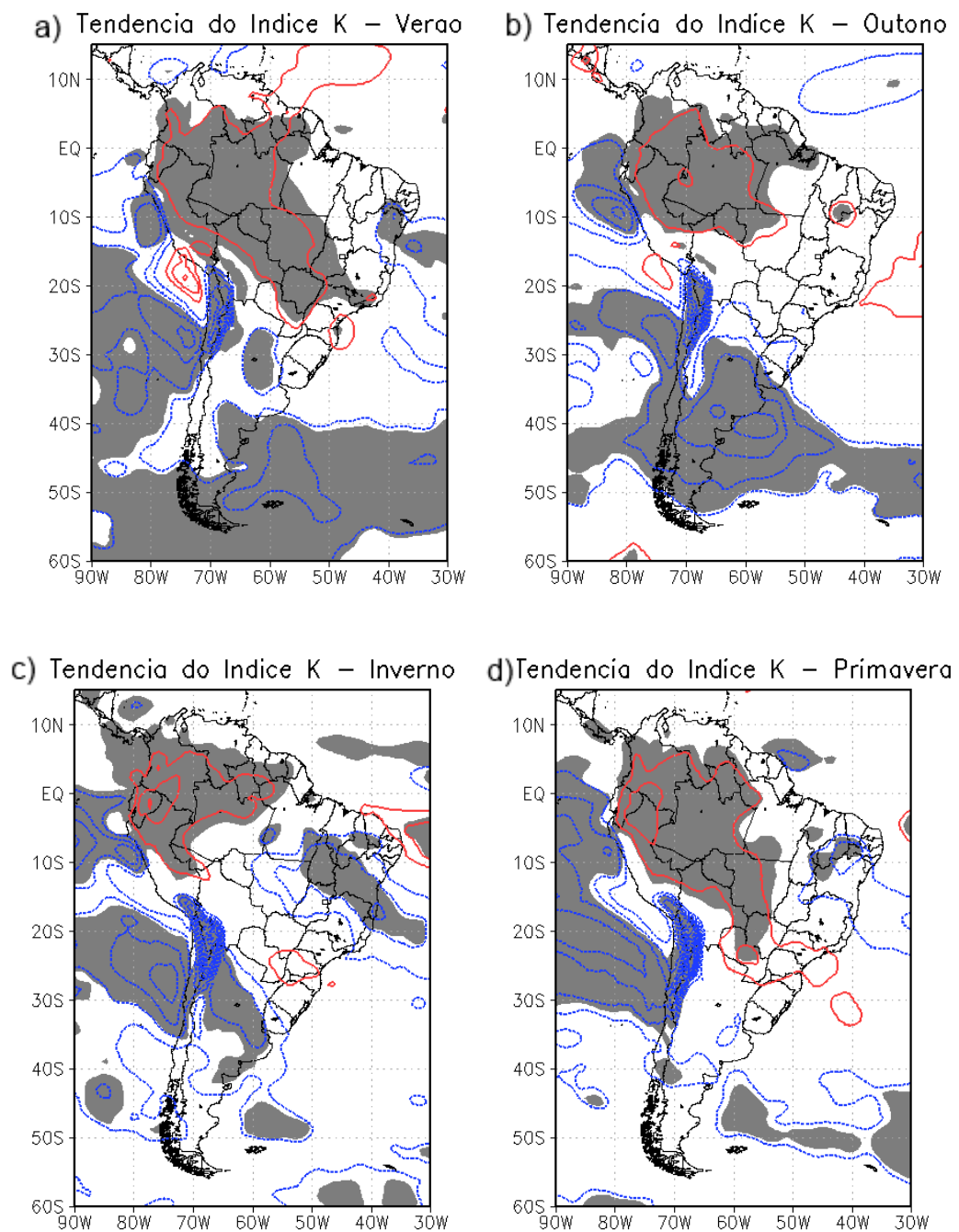


Figura 9: Tendência sazonal do índice K de instabilidade.

A tendência do índice TT (Figura 10) mostra maiores áreas com valores significativos para aumento e decréscimo dos valores em relação ao índice K (Figura 9). Assim como a tendência para K, o índice TT também apresentou maiores valores e maior área de tendência de aumento dos valores de TT para o verão (Figura 10.a). O outono foi a única estação que não foi encontrada tendência de diminuição próxima ao estado da Bahia, e a estação que apresentou maior tendência de decréscimo do índice sobre o continente (Figura 10.b)

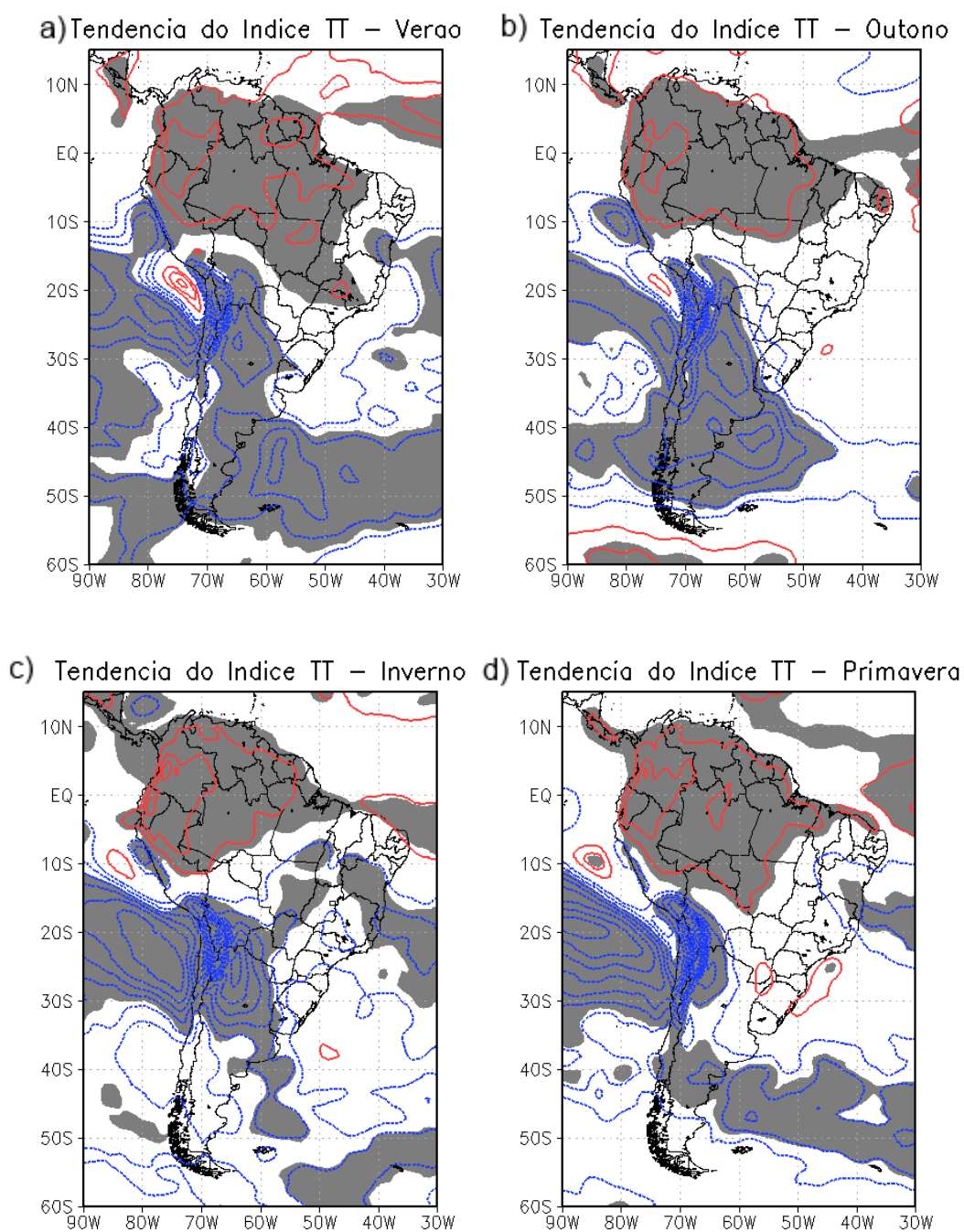


Figura 10: Tendência sazonal do índice de instabilidade TT.

Segundo Liebmann (2004), há aumento de precipitação na Amazônia e decréscimo na Argentina (Figura 4) o que corresponde aos locais de aumento e diminuição dos índices no verão (Figuras 9 a e 10a).

A tendência para todo o período do índice K apresenta menor área com valores significantes (Figura 11.a) em relação a tendência do índice TT (Figura 11.b). Para ambos os índices há tendência de aumento na região amazônica e de diminuição na região da Argentina e Chile.

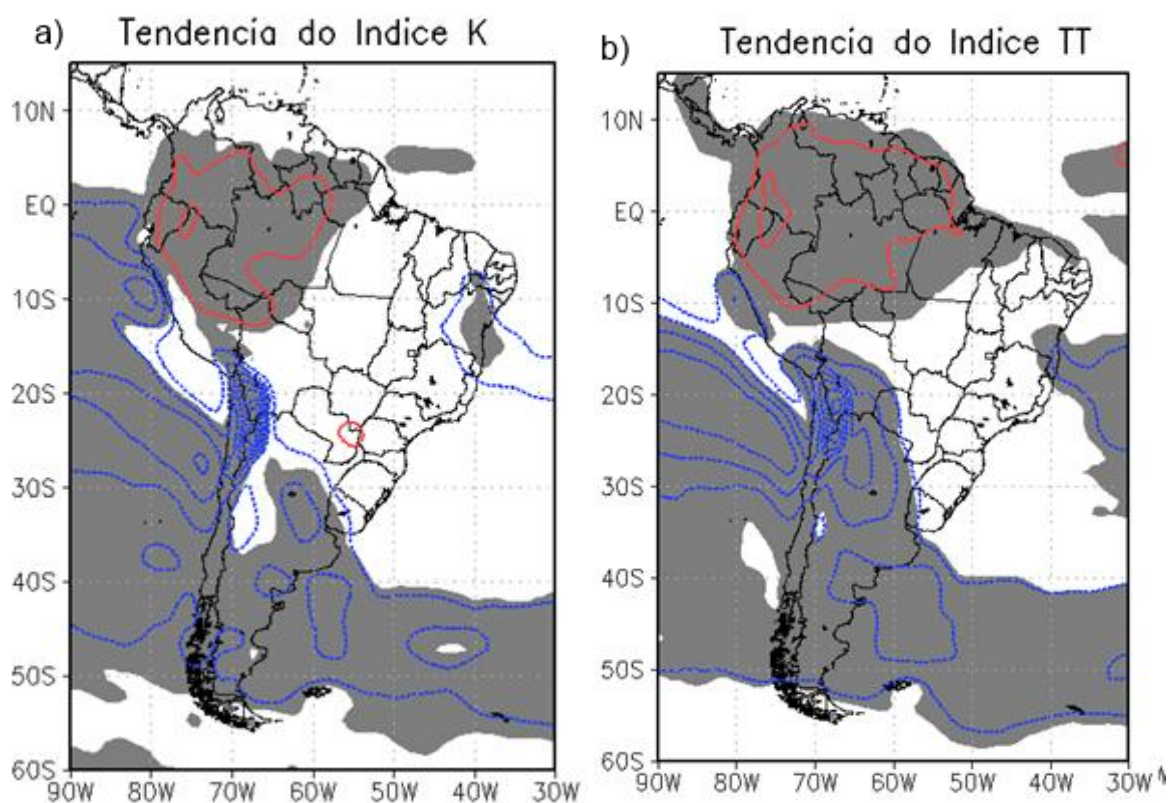


Figura 11: Tendência dos índices de instabilidade: a) representa o índice K, b) o índice TT.

A tendência de aumento encontrada em ambos os índices pode estar relacionada ao crescente desmatamento na região Amazônica, e também com aumentos de temperatura previstos pelos cenários do IPCC, nos quais, todas as projeções indicam aumento de temperatura para esta região.

Estudos mostraram um aumento sistemático da convecção sobre o norte da Amazônia desde 1975, que poderia indicar um aumento de chuva na região (Chu et al. 1995, apud MARENGO, 2006). Já segundo Marengo (2006), todos os modelos mostram que na hipótese de desmatamento total da Amazônia, a temperatura e a evaporação tendem a aumentar, enquanto que a chuva tende a diminuir. Estas

mudanças podem ser resultado de interações entre o clima, hidrologia, vegetação e o gerenciamento dos recursos água e terra.

Tendência positiva indica que há aumento dos valores dos índices ao longo do período de estudo, e negativa indica diminuição dos valores destes índices. Isso pode auxiliar a previsão do tempo estabelecendo novos limiares locais mais altos ou baixos para indicar possibilidade de tempestades, caso não exista aumento climatológico no regime de chuvas no local.

5. CONCLUSÕES

As variações horárias entre os valores dos índices de instabilidade são explicada pela variação diurna da temperatura, encontrando menores valores para a região sudeste as 12Z e maiores valores próximo aos Andes, principalmente na Colômbia e Peru.

Nas variações sazonais é possível observar que no verão e primavera há grande evaporação na região amazônica afetando a estrutura termodinâmica da atmosfera (circulação atmosférica e precipitação). Por isso são encontrados maiores valores de índice nessa região. O inverno apresenta menores valores dos índices para a maior parte do Brasil, o que pode ser parcialmente explicado pelo regime de monção atuante no continente.

Há valores significativos de tendência de aumento de ambos os índices na região amazônica e tendência de diminuição nos valores dos índices na região da Argentina. Há evidências de que o aumento de atividades humanas (como mudanças no uso da terra e desmatamento) modificam as características termodinâmicas da baixa atmosfera, e esta é uma das possíveis causas da tendência de aumento dos índices na Amazônia.

Trabalhos internacionais mostram que não há unanimidade em relação à tendência de precipitação na América do Sul, e com base nisso, trabalhos futuros serão desenvolvidos a fim de explicar a causa da tendência assim como estabelecer novos limiares dos índices para regiões específicas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENETI, C. A.; SILVA DIAS, M. A. Análise do desempenho de índices de instabilidade como previsores de tempestades na região centro-sul do Brasil. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/cbm-files/19-f50abe0d6c46514b60a4b5750c11e987.pdf>> Acesso em: 20 abr. 2013.

CARDOSO, N. K. R., DINIZ, G. B., MARQUES, J. R., PRESTES, S. D. Relações entre índices de instabilidade e as chuvas em Porto Alegre/RS – CBMET, 2008.

CORRÊA, C. S. A ocorrência de fluxos no perfil vertical do vento na baixa atmosfera e seu efeito na intensidade do índice "K" – RBMET, vol.22 n°.2 São Paulo Agosto 2007.

CORREIA, F. R. S., POLIFKE DA SILVA, F., JUSTI DA SILVA, M. G. A., Índice K: análise comparativa dos períodos climatológicos de 1950-1979 e 1980-2009 – IV Simpósio Internacional de Climatologia (IV SIC), João Pessoa, PB. Anais eletrônicos do IV SIC, 2011.

DAI, A.: 2011: Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2: 45–65. doi: 10.1002/wcc.81

ESCOBAR, G. C. J. Curso Meteorologia Sinótica – CPTEC/INPE – Cachoeira Paulista, SP, Outubro, 2010.

ESCOBAR, G. C. J., ANDRADE, K. Climatologia dos índices de instabilidade K e Total Totals (TT) para o Sul e Sudeste do Brasil – XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia – Belém, PA, 2010.

ESTIVALLET, J., OLIVEIRA, R. Climatologia para os índices de instabilidade K e TT associados a ocorrências tornádicas em Santa Catarina – V Simpósio Internacional de Climatologia (V SIC), Florianópolis, SC, 2013.

FRAGOSO, M. A utilização de índices de estabilidade no estudo de situações convectivas: o exemplo dos temporais de Outono de 1997, em Lisboa. *Finisterra: Revista portuguesa de geografia*, 1998.

IPCC. Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis. 2007.

LIEBMANN, B.: An Observed Trend in Central South American Precipitation. *J. Climate*, 17, 4357–4367. 2004

LIMA, D.R.O. Um novo índice de instabilidade: O índice CK – Congresso Brasileiro de Meteorologia – Florianópolis, SC, 2006.

MARENGO, J. Caracterização do clima no Século XX e Cenários Climáticos no Brasil e na América do Sul para o Século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC. 2006.

MILLER, R. C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Report 200, Air Weather Service, United States Air Force, 190 pp., 1972.

REBOITA, M. S, Introdução à Estatística Aplicada à Climatologia Parte III – Análise de Séries Temporais, Projeto PAE – São Paulo, 2005. Disponível em <<http://www.icess.ucsb.edu/gem/clima-i.htm>>. Acesso em 10 out. 2013.

SILVA, C. M. S.; SILVA, F. R., LEME, N. P. Ciclo anual de precipitação como função de índices de instabilidade termodinâmica e fluxos de energia estática: análises em Maxaranguape-RN. *Rev. bras. meteorol.* [online]. 2011, vol.26, n.2, pp. 235-242. ISSN 0102-7786.

SILVA DIAS, M. A. Índices de instabilidade para previsão de chuva e tempestades severas. Disponível em: < <http://www.master.iag.usp.br/ensino/indices.pdf> > Acesso em: 19 abr. 2013.

STEVENSON, W. Estatística aplicada à administração. Harper & Row do Brasil, São Paulo, 1981.

TOMAZIELLO, A. C. N., GANDU, A. W. Análise Estatística de Índices de Instabilidade Termodinâmica em São Paulo. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia (XIV CBMET), 2006, Florianópolis, SC. Anais eletrônicos do XIV CBMET, 2006.

ULGUIM PEDRA, G; OLIVEIRA FILHO, J. H. Utilização de índices de instabilidade na previsão de chuvas intensas – UFPEL: XVII Congresso de Iniciação Científica, 2008.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia Básica e Aplicações. Viçosa, M. G., UFV - Imprensa Universitária, 1991. 449p.

ANEXO A - Variação sazonal do índice K

A1. Variação sazonal do índice K para às 06 Z

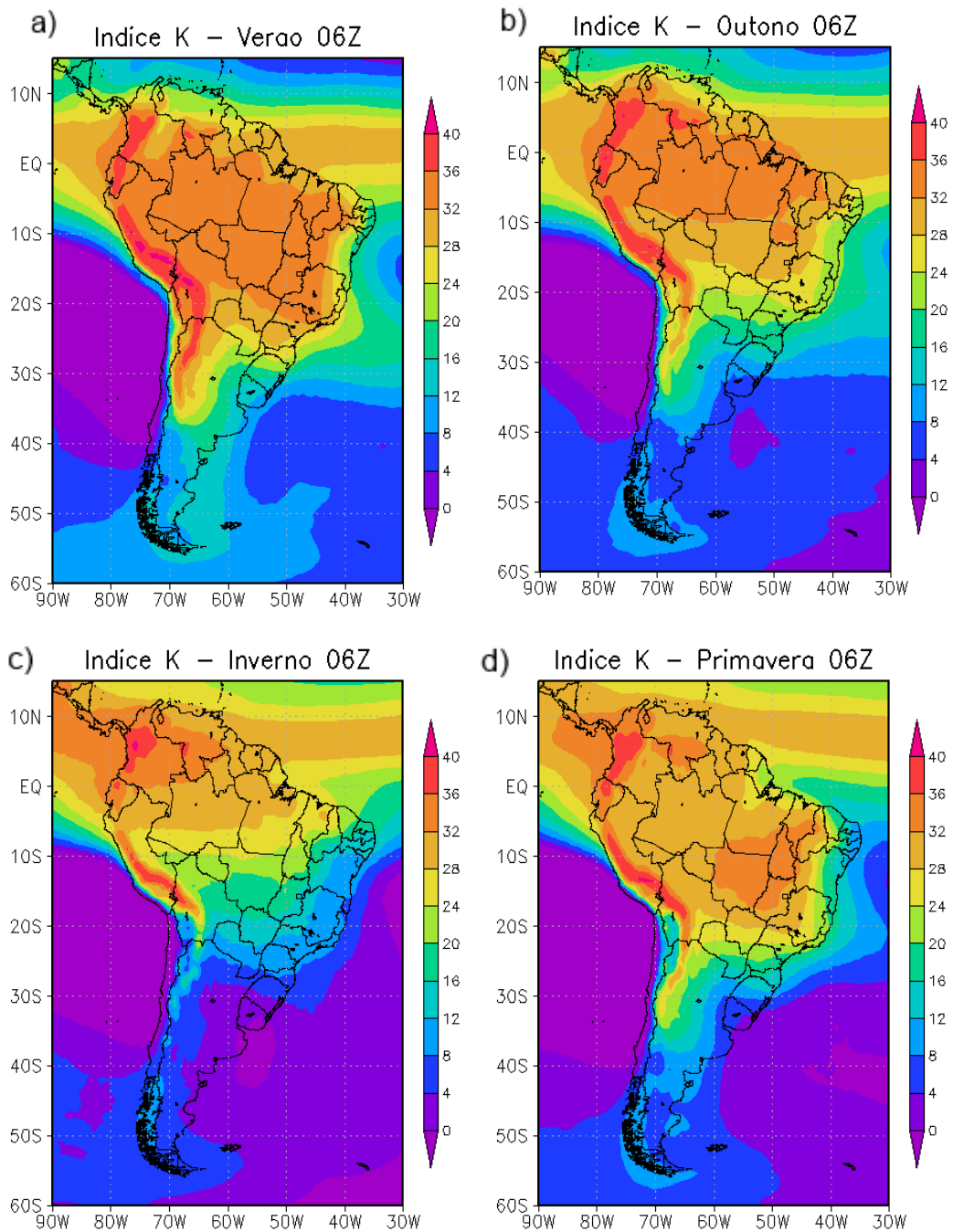


Figura A 1: Variações sazonais climatológicas do índice K às 06 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

A2. Variação sazonal do índice K para às 12 Z

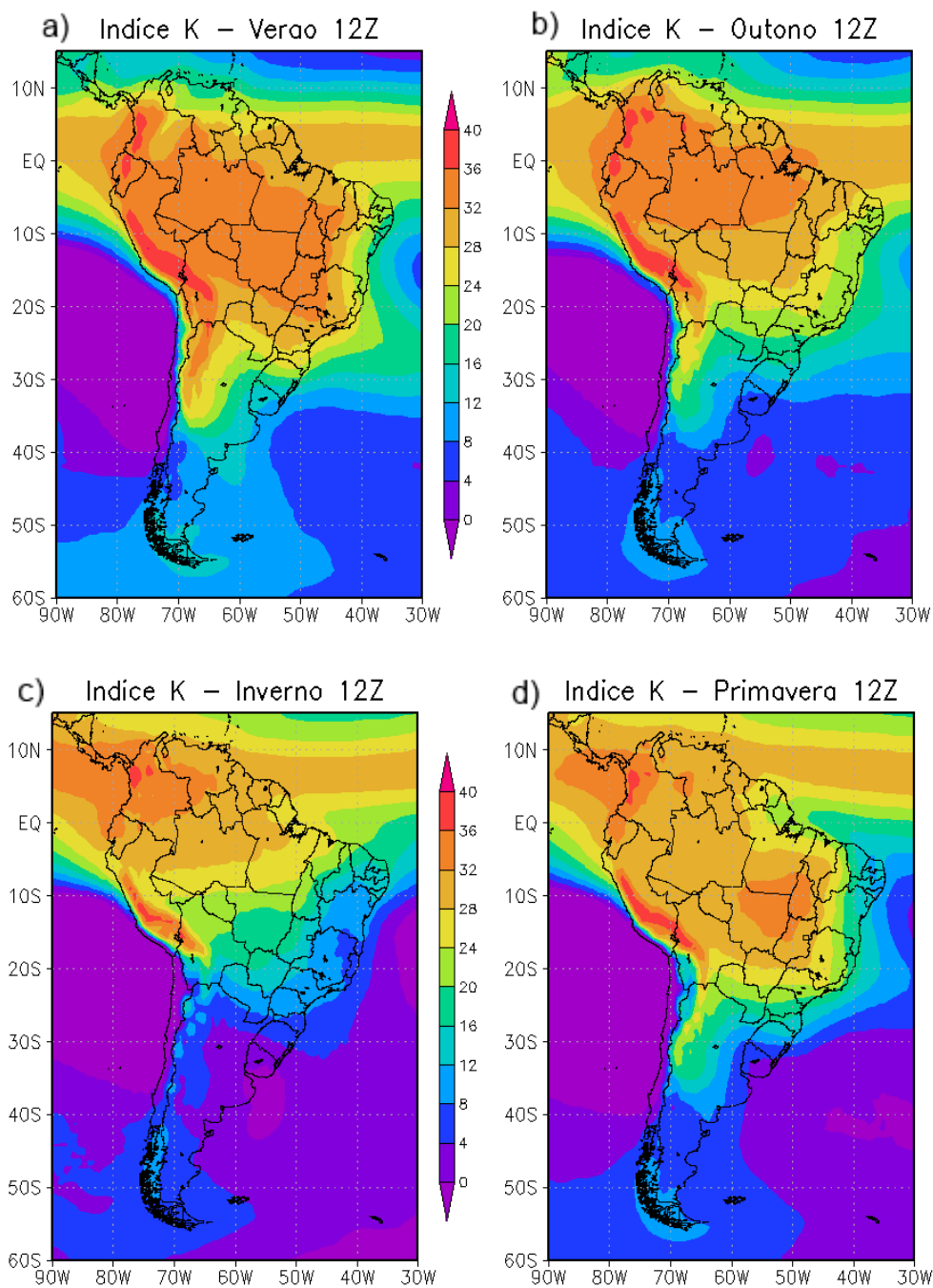


Figura A 2: Variações sazonais climatológicas do índice K às 12 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

A3. Variação sazonal do índice K para às 18 Z

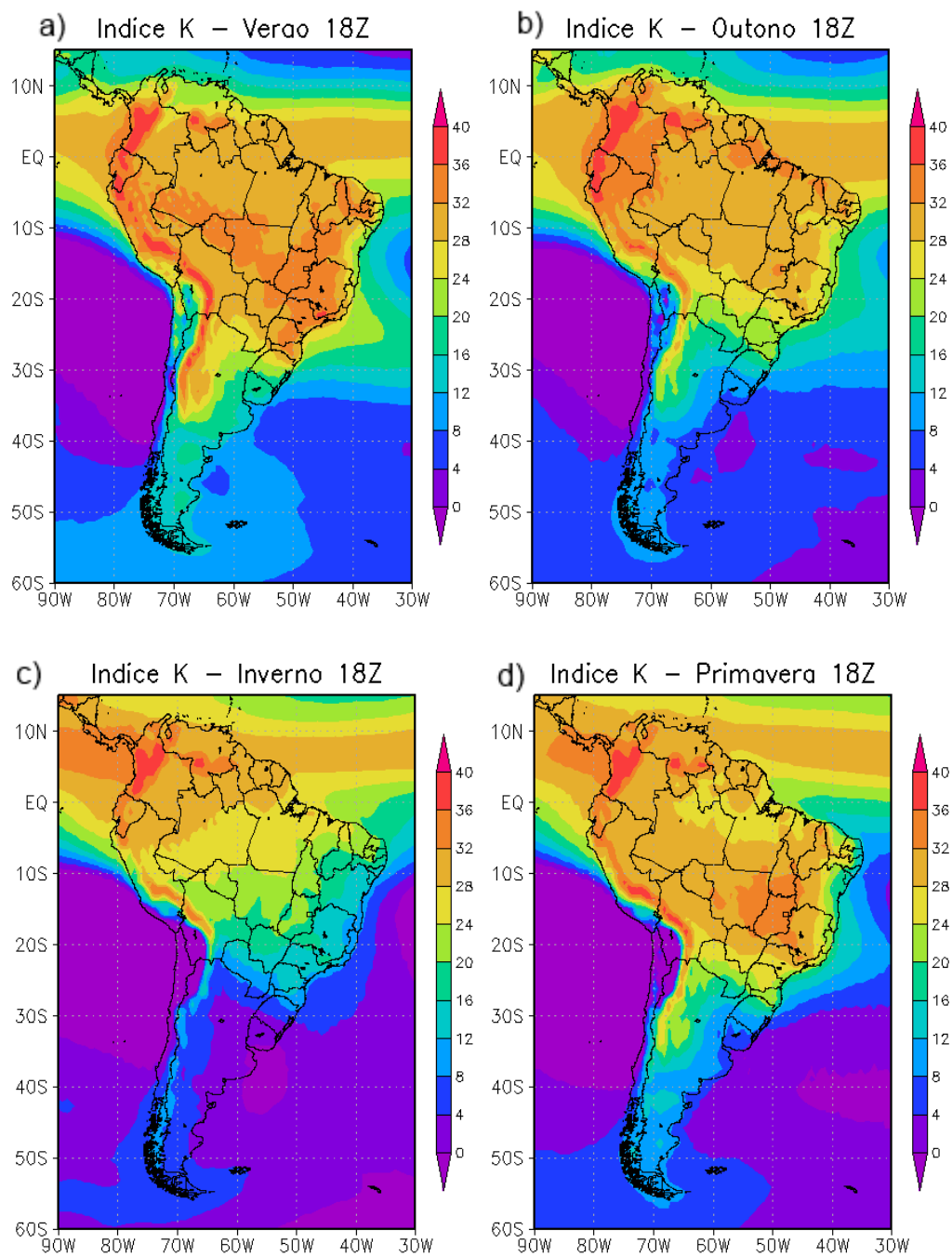


Figura A 3: Variações sazonais climatológicas do índice K às 18 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

ANEXO B - Variação sazonal do índice TT

B1. Variação sazonal do índice TT para às 06 Z

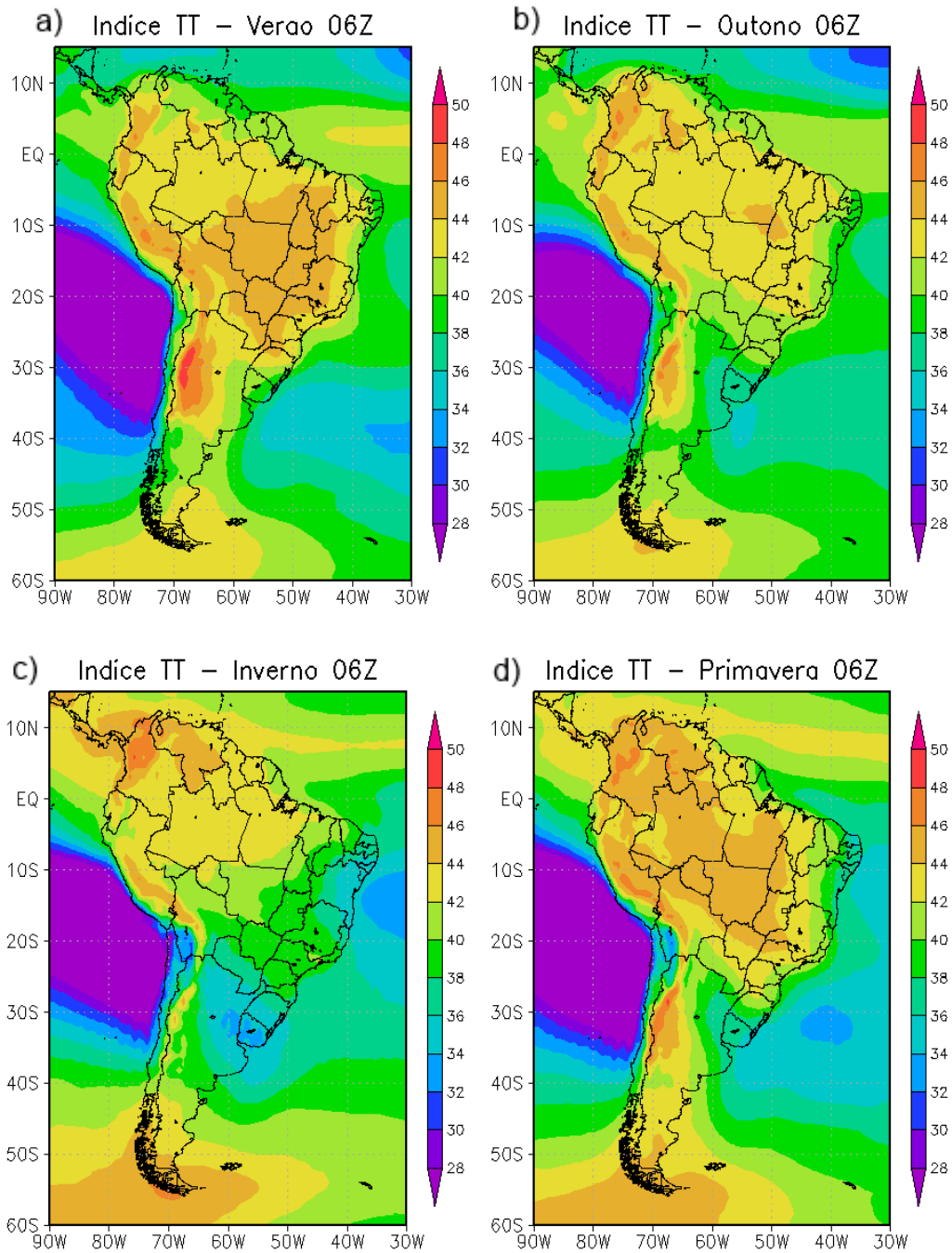


Figura B 1: Variações sazonais climatológicas do índice TT às 06 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

B2. Variação sazonal do índice TT para às 12 Z

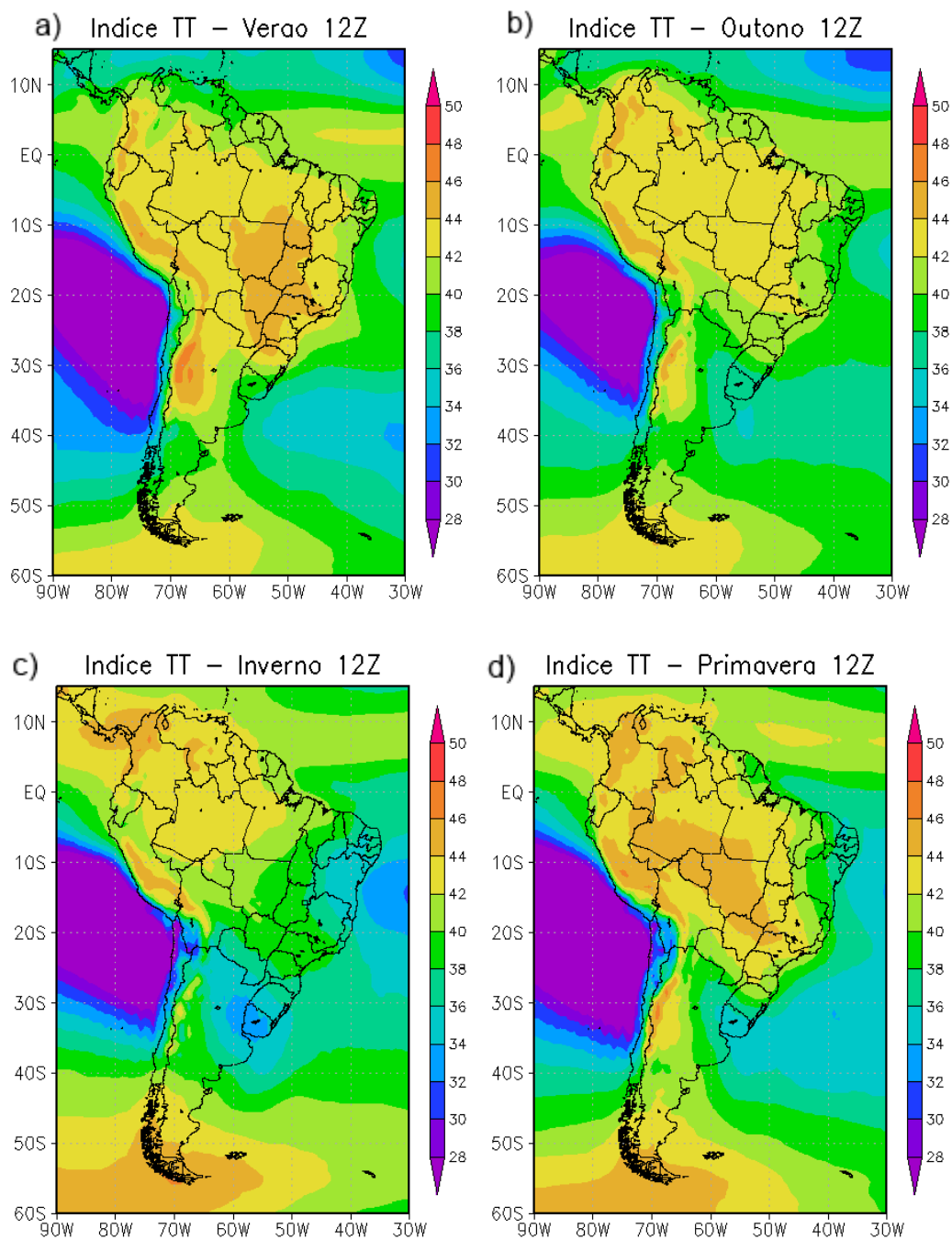


Figura B 2: Variações sazonais climatológicas do índice TT às 12 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

B3. Variação sazonal do índice TT para às 18 Z

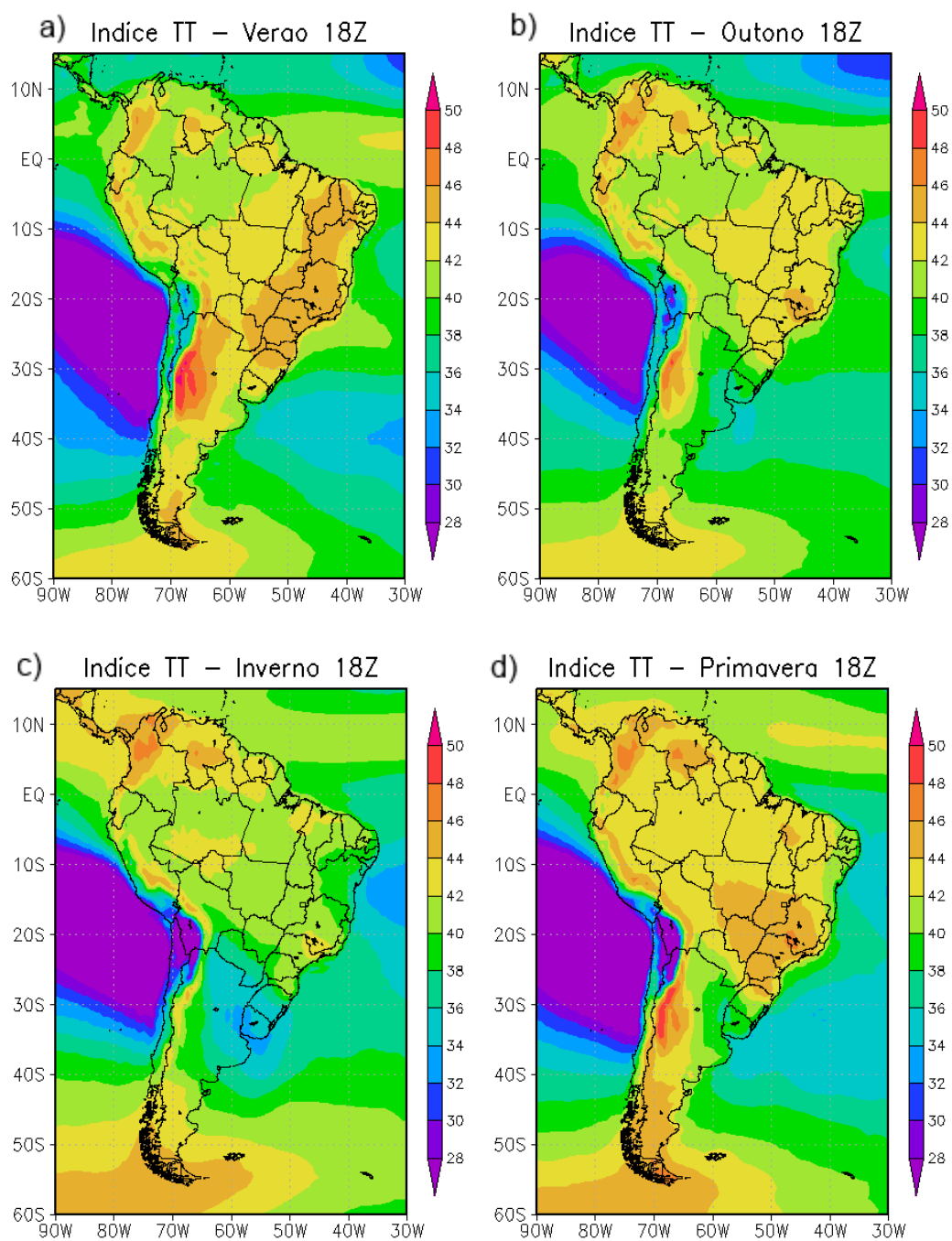


Figura B 3: Variações sazonais climatológicas do índice TT às 18 Z para a América do Sul: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

ANEXO C - Tendência sazonal dos índices K e TT

C1. Tendência sazonal do índice K às 06 Z

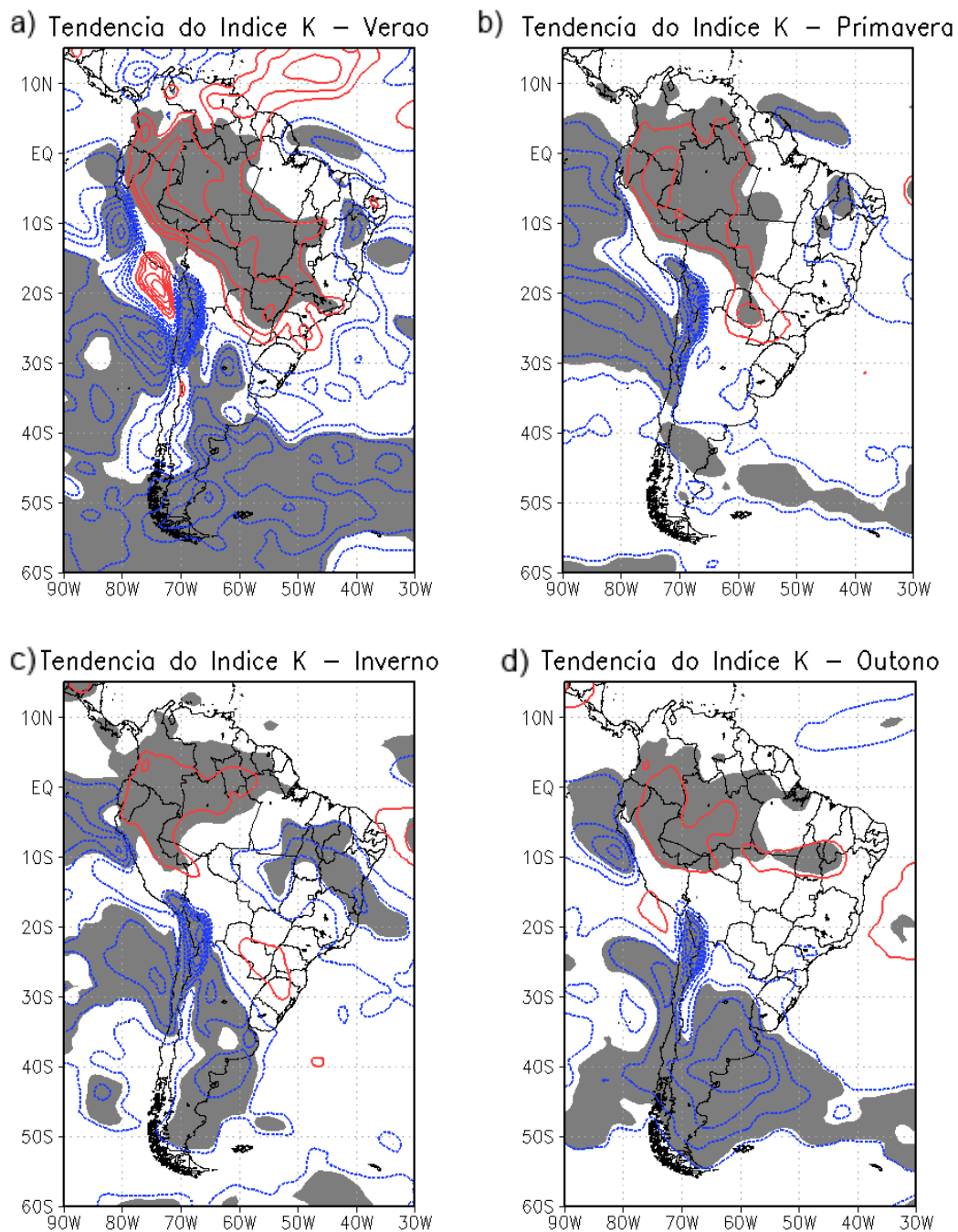


Figura C 1: Tendência sazonal do índice de instabilidade K às 06 Z: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

C2. Tendência sazonal do índice K às 12 Z

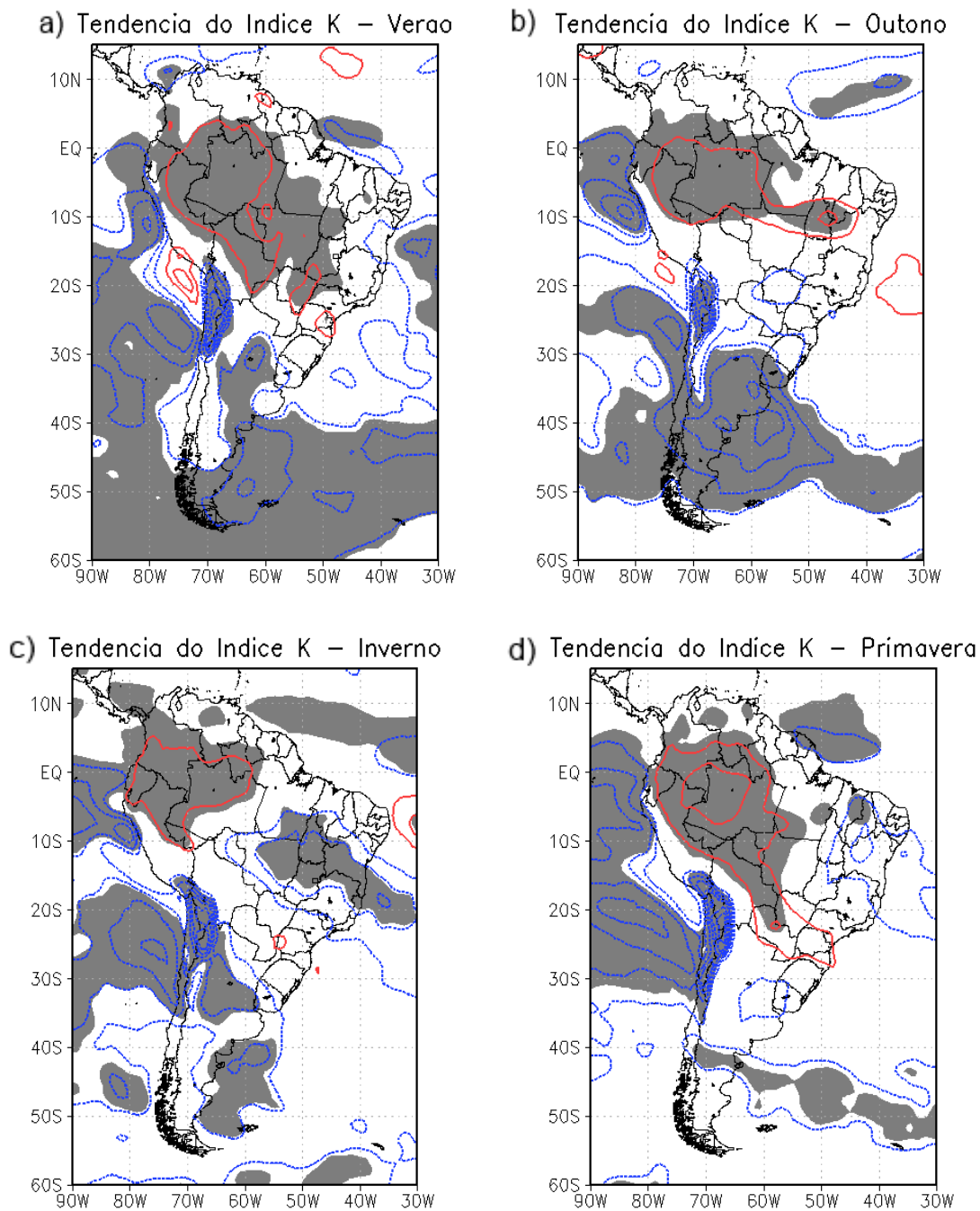


Figura C 2: Tendência sazonal do índice de instabilidade K às 12 Z: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

C3. Tendência sazonal do índice K às 18 Z

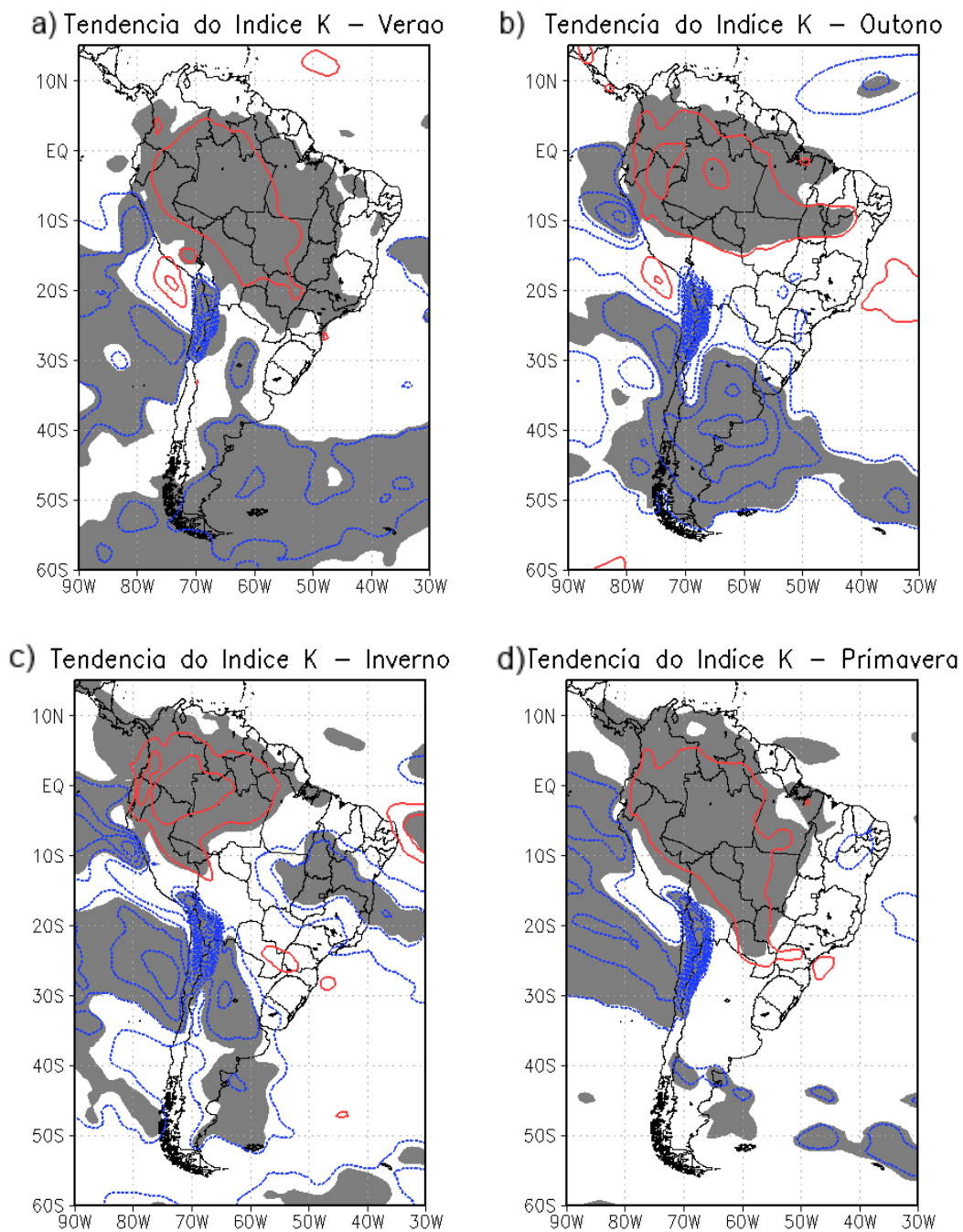


Figura C 3: Tendência sazonal do índice de instabilidade K às 18 Z: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

C4. Tendência sazonal do índice TT às 06 Z

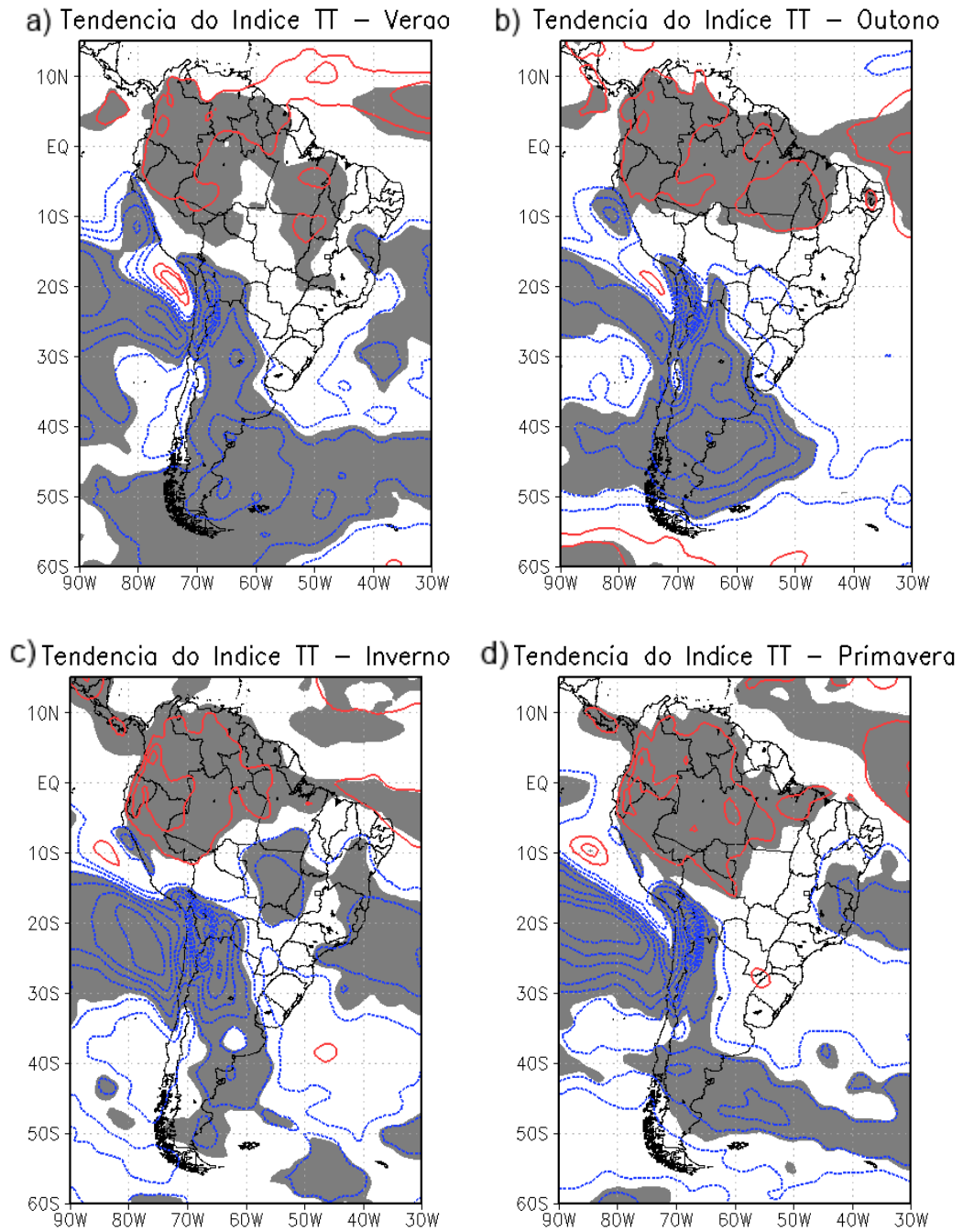


Figura C 4: Tendência sazonal do índice de instabilidade TT às 06 Z: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

C5. Tendência sazonal do índice TT às 12 Z

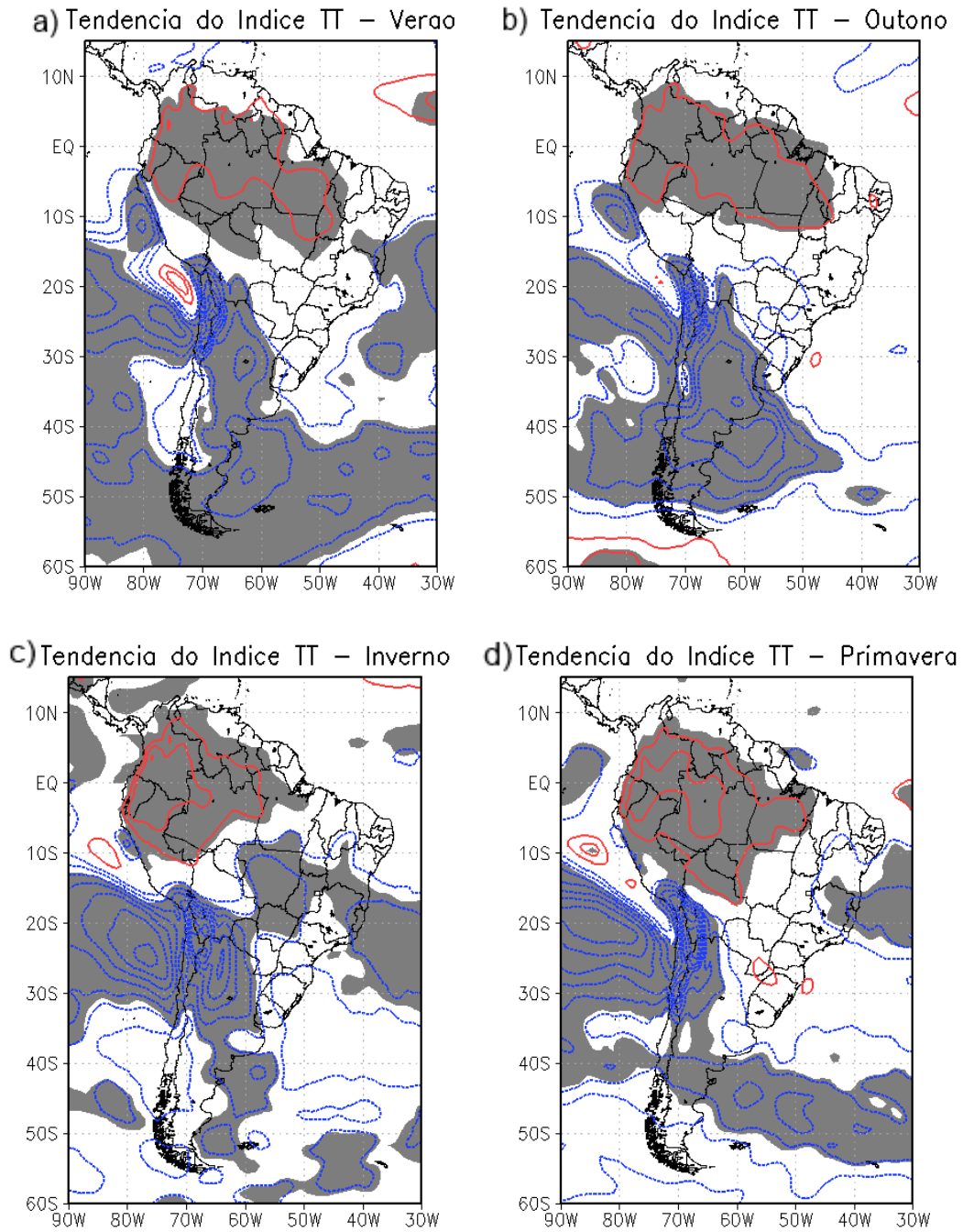


Figura C 5: Tendência sazonal do índice de instabilidade TT às 12 Z: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

C6. Tendência sazonal do índice TT às 18 Z

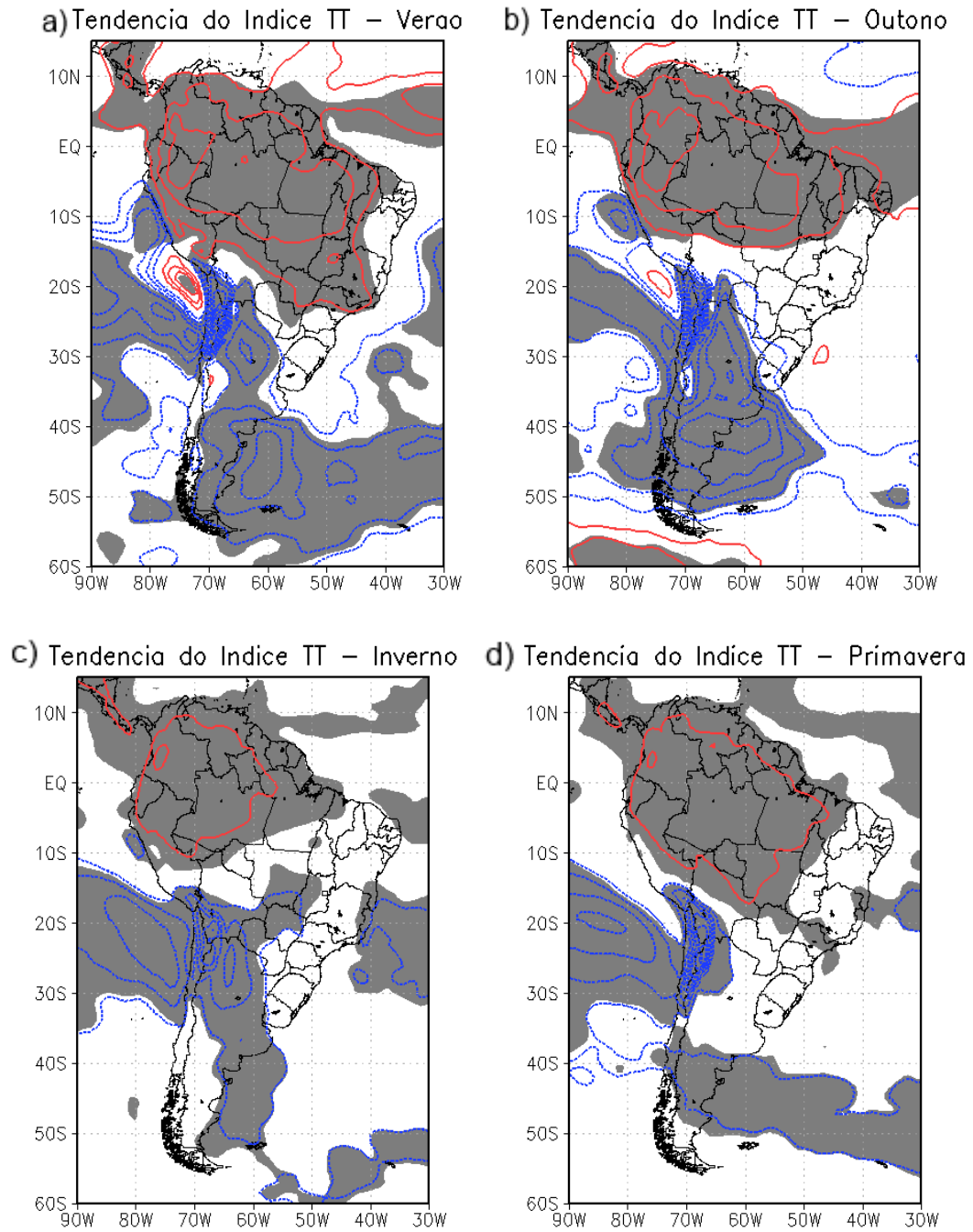


Figura C 6: Tendência sazonal do índice de instabilidade TT às 18 Z: a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA), d) primavera (SON)

ANEXO D - Tendência anual dos índices K e TT

D1. Tendência anual do índice K

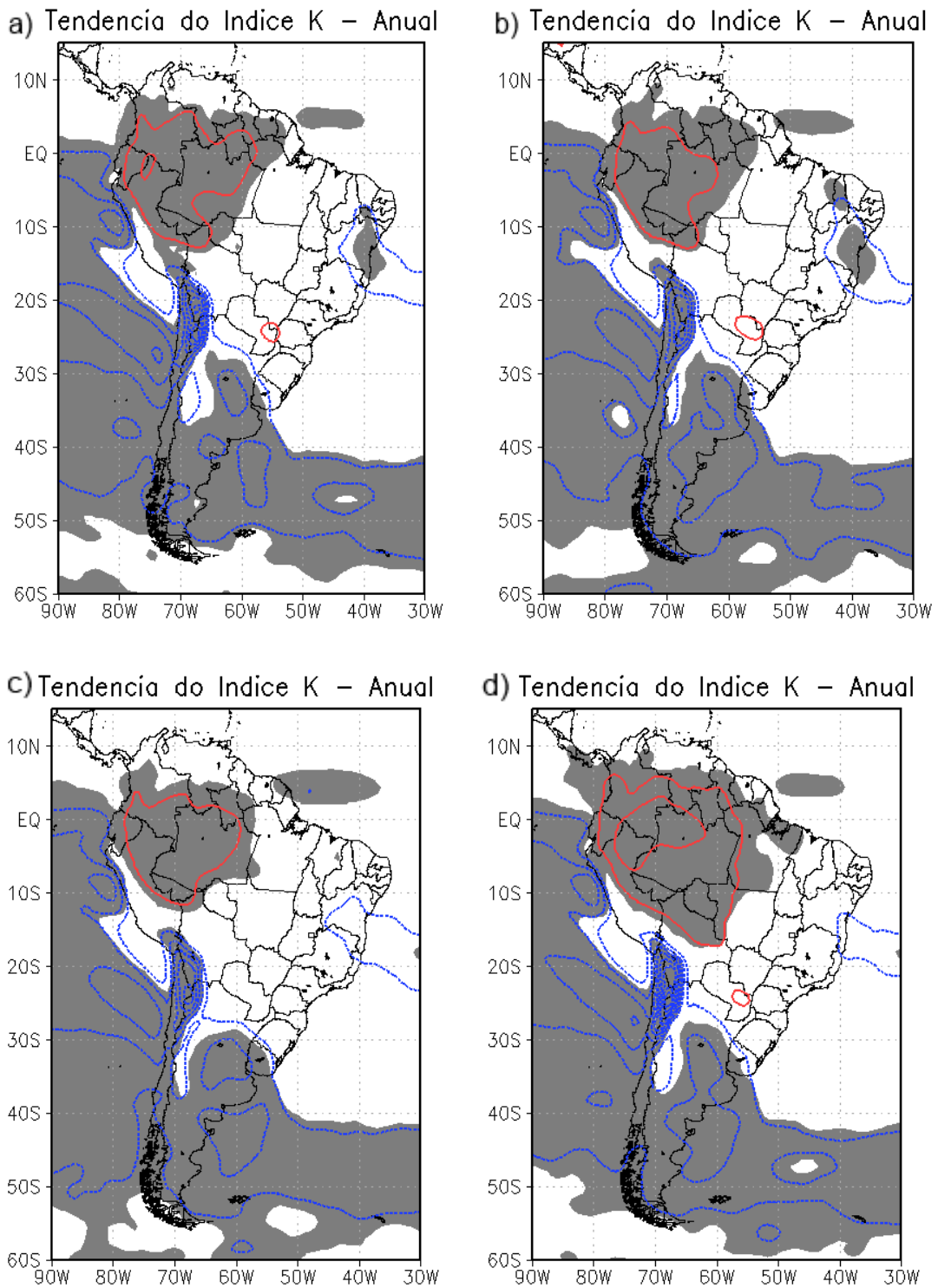


Figura D 1: Tendência anual do índice K por horário: a) 00Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 18Z.

D2. Tendência anual do índice TT

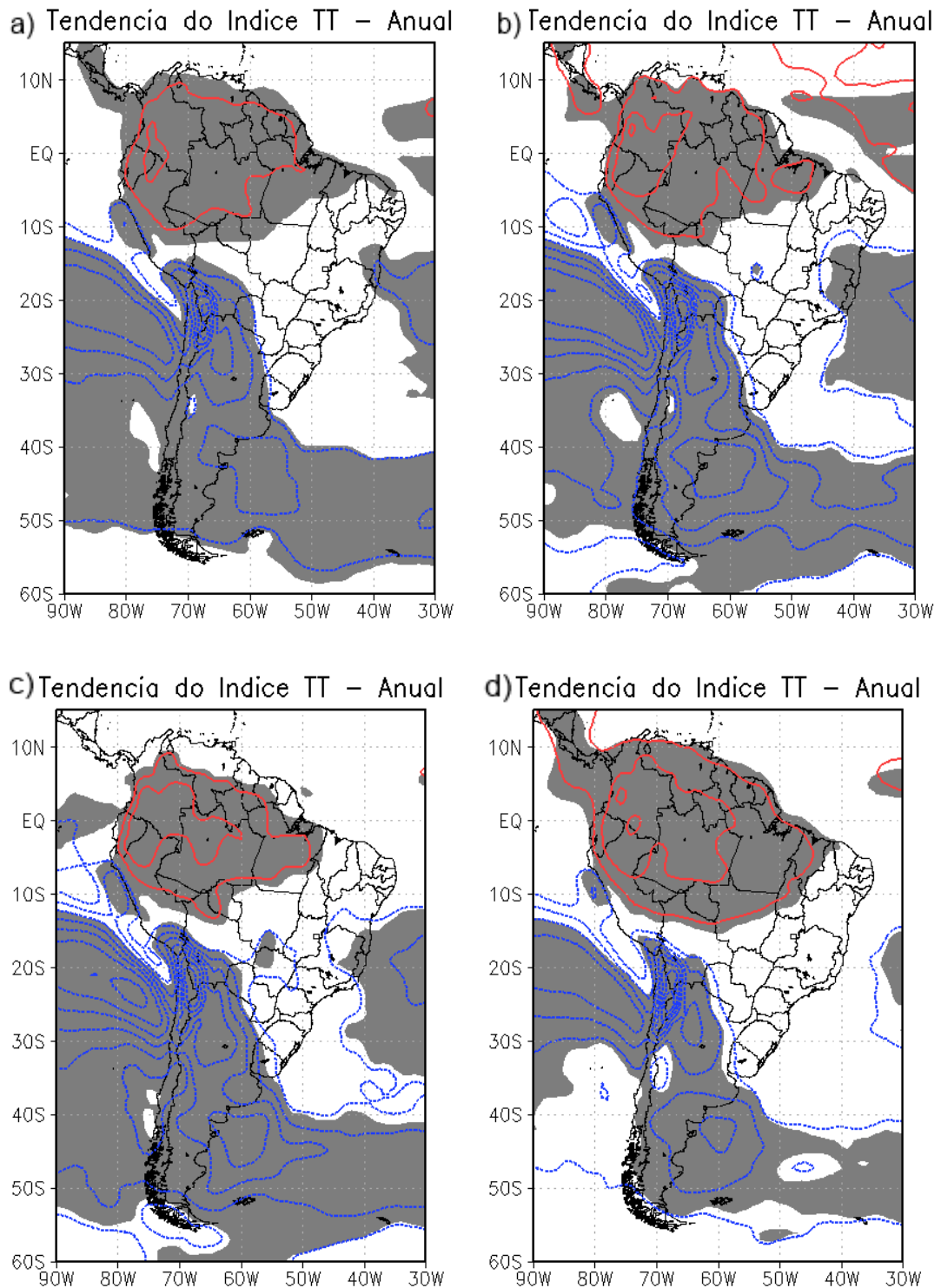


Figura D 2: Tendência anual do índice TT por horário: a) 00Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 18Z.