



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-14213-TDI/1114

**ESTUDO DAS TROCAS HORIZONTAIS E VERTICAIS DE  
ENERGIA DURANTE EPISÓDIOS DE ZCAS: INFLUÊNCIA DA  
RESOLUÇÃO DAS ANÁLISES E DOS MODELOS E DA  
PARAMETRIZAÇÃO DE CONVECÇÃO**

Renata Weissmann Borges Mendonça

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr.  
José Paulo Bonatti, aprovada em 23 de junho de 2005.

INPE  
São José dos Campos  
2007

620.91:551.35.5(8)

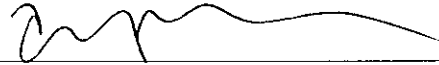
Mendonça, R. W.B..

Estudo das trocas horizontais e verticais durante episódios de ZCAS: influência da resolução das análises e dos modelos e de parametrização de convecção / Renata Weissmann Borges Mendonça. - São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005. 204 p.; - (INPE-14213-TDI/1114)

1. Energia. 2. Modos normais. 3. Modelo de circulação geral atmosférica. 4. Zona de Convergência do Atlântico Sul  
5. Parametrização de convecção. I.Título

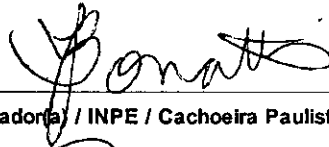
Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Doutor(a) em  
Meteorologia

Dr. Prakki Satyamurty



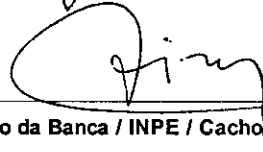
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. José Paulo Bonatti



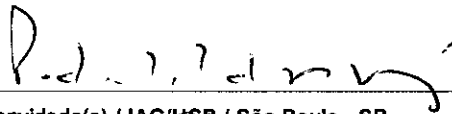
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Silvio Nilo Figueroa



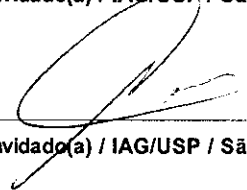
Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Pedro Leite da Silva Dias



Convidado(a) / IAG/USP / São Paulo - SP

Dr. Adilson Wagner Gandu



Convidado(a) / IAG/USP / São Paulo - SP

Aluno (a): Renata Weissmann Borges Mendonça

São José dos Campos, 23 de junho de 2005



*“Os ventos que às vezes tiram algo que amamos,  
são os mesmos que nos trazem algo que aprendemos a amar.  
Por isso, não devemos chorar pelo que nos foi tirado e sim,  
aprender a amar o que nos foi dado.  
Pois tudo aquilo que é realmente nosso,  
nunca se vai para sempre.”*

Autor Desconhecido



*A Meu Querido Esposo*  
**Antônio Marcos Mendonça,**  
*por todo amor e dedicação.*

*A Meu Querido Filho*  
**Matheus Weissmann Borges Mendonça,**  
*por cada sorriso, minha razão de viver.*





## AGRADECIMENTOS

Ao **Dr. José Paulo Bonatti** pela orientação segura e pelos ensinamentos e experiências compartilhadas essenciais na realização desta tese, e pela compreensão e amizade nos momentos difíceis.

Aos membros da banca examinadora, **Dr. Prakki Satyamurty**, **Dr. Sílvio Nilo Figueroa**, **Dr. Pedro Leite da Silva Dias** e **Dr Adilson Wagner Gandu**, pelas correções e sugestões apresentadas.

À *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES)* pelo suporte financeiro recebido durante o doutoramento.

Aos colegas da **turma de doutorado**, pela amizade e companheirismo durante a realização dos créditos e incentivo para a conclusão desta tese, e aos demais colegas do INPE que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, em especial a Lilian Rezende Escobar pelo apoio técnico, atenção e amizade.

Aos **amigos do CPTEC-Cachoeira Paulista**, em especial a Ana Cláudia, Aurora, Josefina, Luciene e Paula, companheiras de sala, pelo incentivo, carinho e amizade e às bibliotecárias Alice, Deicy e Valdirene, pela sincera amizade e inestimável apoio.

À amiga **Silvana D. Porto**, pelo encorajamento e incentivos, sempre presentes em nossas valiosas conversas. Por todo carinho e amizade para comigo e minha família.

A meu esposo **Antônio Marcos**, pela motivação e companheirismo em todas as etapas do doutorado, pelo imenso amor e inigualável dedicação e paciência durante toda a elaboração desta tese. Enfim, por tudo o que vivemos juntos.

A meu filho **Matheus**, que ilumina e alegria minha vida, trazendo, na inocência de seu sorriso, a certeza de que viver é maravilhoso.

A meus pais, **Vilson e Carmem**, pela coragem, dignidade, respeito e confiança sempre presentes em suas vidas, e pelo apoio e incentivo constantes.

A meu irmão **Rodrigo**, pelo carinho, entusiasmo e amizade sincera com que sempre me incentivou.

A **minha família**, pela perseverança e união com que supera as dificuldades e por todo apoio recebido durante este trabalho.

A DEUS, pelo dom da vida e sabedoria, essenciais em todas as nossas realizações.



## RESUMO

As trocas horizontais e verticais de energia para um composto de sete episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) foram estudadas a partir das análises do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) com resoluções T062L28, T126L28 e T170L42, utilizando a teoria de decomposição em modos normais descrita em Kasahara e Puri (1981). O estudo foi dividido em duas partes: uma observacional, onde foi realizada uma análise energética do composto de ZCAS, considerando-se a partição vertical de energia entre os modos externos e internos, e as interferências entre os modos horizontais de oscilação Rossby, Kelvin, Misto Rossby-Gravidade, Gravidade Oeste e Leste; e uma parte de modelagem, em que se avaliou o desempenho do Modelo Global do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) em simular a energética modal para o composto de ZCAS, enfatizando-se a influência da resolução espacial do Modelo e de diferentes parametrizações de convecção profunda: Kuo, Relaxed Arakawa-Schubert (RAS) e Grell. Observou-se um máximo de porcentagem de energia total (em torno de 60%) para os modos internos 4 a 7, com alturas equivalentes entre 100 e 600 metros, especialmente sobre grande parte da América do Sul central e próximo ao equador, incluindo a região da ZCAS; e um máximo secundário para a categoria de modos externos ( $n=1$  a 3), mais significativo em latitudes altas e diminuindo em direção ao equador. Para a partição horizontal de energia, as maiores contribuições foram obtidas para as auto-interações dos modos Rossby e Kelvin e interações (produto cruzado) entre os modos Rossby-Kelvin, em todas as categorias de modos verticais, sendo estas últimas responsáveis pelas interferências construtivas de energia na região da ZCAS. As interações de energia entre os modos verticais mostraram um aumento da porcentagem de energia dos Baixos Níveis para a Estratosfera, com máxima interferência positiva (negativa) de energia em Altos Níveis (Estratosfera), para os modos internos 4 a 7. Os resultados dos experimentos de modelagem mostraram que as previsões utilizando os esquemas de convecção profunda Kuo, RAS e Grell foram semelhantes entre si e apresentaram uma boa concordância em relação aos padrões obtidos na parte observacional. O emprego de diferentes esquemas de convecção profunda não apresentou impactos significativos na partição e interação de energia entre os modos verticais e horizontais. Um impacto maior foi obtido com o aumento da resolução vertical das Análises e do Modelo, de 28 para 42 níveis, em que um maior número de modos internos apresentam um papel relevante nas trocas horizontais e verticais de energia.



**STUDY OF THE HORIZONTAL AND VERTICAL ENERGY EXCHANGES  
DURING SACZ EPISODES: INFLUENCE OF THE RESOLUTION OF THE  
ANALYSES AND THE MODELS AND THE CONVECTION  
PARAMETERIZATION**

**ABSTRACT**

The horizontal and vertical energy exchanges for a composite of seven South Atlantic Convergence Zone (SACZ) episodes were studied by expansion into three-dimensional normal mode functions (Kasahara and Puri, 1981) using the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) analyses with T062L28, T126L28 e T170L42 resolutions. In the first part of this study (observational part), energetics analyses for the SACZ composite were performed with an emphasis on the vertical energy partition between external and internal modes and on the energy interactions within and between various horizontal oscillation modes, such as Rossby, Kelvin, Mixed Rossby-Gravity and West and East Gravity modes. In the second part (modelling experiments), the performance of the CPTEC Global Model in simulating the modal energetics for the SACZ composite was evaluated, emphasizing the influence of the model resolution and the three different deep convection parameterizations: Kuo, Relaxed Arakawa-Schubert (RAS) and Grell. A maximum share of the total energy (about 60%) was found in the 4<sup>th</sup> to 7<sup>th</sup> internal modes with equivalent depths between 100 and 600 meters, especially over the great part of the central South America and near equator including the SACZ region. As the latitude increases, the energy is distributed towards the lower order modes ( $n = 1$  to 3) with the external modes category becoming dominant at higher latitudes. For the horizontal energy partition, the most expressive contributions were obtained for the auto-interactions of the Rossby and Kelvin modes and for Rossby-Kelvin cross interactions in all vertical modes categories. The Rossby-Kelvin cross interactions were the main process for constructive energy interferences in the SACZ region. The vertical modes interactions indicated that the percentage of total energy increases from low levels to the stratosphere with maximum positive (negative) interferences in high levels (stratosphere), in the 4<sup>th</sup> to 7<sup>th</sup> internal modes. The results from the modelling experiments showed that the model predictions using the Kuo, RAS and Grell deep convection schemes were similar with each other, and had a good agreement with the patterns obtained in the observational part. The use of different deep convection schemes did not present significant impact in the partition and interaction of energy between vertical and horizontal modes. A greater impact was obtained increasing the vertical resolution of the analyses and the model from 28 to 42 levels. A greater number of internal modes shows a relevant role in the horizontal and vertical energy exchanges, in terms of representing the observed characteristics.



## SUMÁRIO

	Pág.
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	
<b>LISTA DE TABELAS</b>	
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>35</b>
2.1 Uso de Funções Modos Normais na Análise Energética da Atmosfera.....	35
2.2 A Convecção e a Zona de Convergência do Atlântico Sul.....	41
<b>CAPÍTULO 3 – DADOS E METODOLOGIA.....</b>	<b>47</b>
3.1 Dados.....	47
3.2 Metodologia.....	47
3.2.1 Decomposição em Funções Modos Normais.....	47
3.2.2 Episódios Seleccionados.....	62
3.2.3 Experimentos: Parte Observacional e Modelagem.....	64
3.2.4 Composição dos Episódios de ZCAS.....	66
<b>CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DA PARTIÇÃO DE ENERGIA ENTRE OS MODOS VERTICAIS E HORIZONTAIS: RESULTADOS OBSERVACIONAIS E DE MODELAGEM.....</b>	<b>67</b>

4.1	Partição de Energia entre os Modos Verticais.....	67
4.2	Partição de Energia entre os Modos Horizontais.....	90
4.2.1	Análise Energética das Auto-Interações entre os Modos Horizontais..	91
4.2.2	Análise Energética das Interações entre Modos Horizontais.....	96
4.2.3	Influência dos Esquemas de Convecção Profunda.....	105
4.3	Interação da Energia Total entre os Modos Verticais em Diferentes Níveis de Pressão .....	139
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>		<b>179</b>
5.1	Considerações Gerais.....	179
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	185
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>187</b>
<b>APÊNDICE A – MODELO GLOBAL DO CPTEC.....</b>		<b>195</b>
A.1	Características Gerais.....	195
A.2	Forma Discreta das Equações do MCGA-CPTEC.....	196



## LISTA DE FIGURAS

3.1	Procedimento para obter os modos verticais e horizontais .....	50
3.2	Temperatura de Brilho Média para pêntadas referentes aos episódios de ZCAS selecionados. (Fonte: Metop/CPTEC/INPE) .....	63
4.1	Estrutura Vertical e Altura Equivalente (m) dos 12 primeiros modos verticais, para o modelo de 28 camadas: (a) Modos 1-4; (b) Modos 5-8 e (c) Modos 9-12 .....	68
4.2	Estrutura Vertical e Altura Equivalente (m) dos 14 primeiros modos verticais, para o modelo de 42 camadas: (a) Modos 1-4; (b) Modos 5-8, (c) Modos 9-11 e (d) 12-14 .....	69
4.3	Região média de atuação do composto de ZCAS, definida para a partição modal vertical de energia sobre a América do Sul. ....	70
4.4	Porcentagem de energia total (sombreado) e altura equivalente (metros, valores indicados sobre as linhas horizontais), secção vertical ao longo da posição média da ZCAS (segmento AB, Fig. 4.3), Análise NCEP 12Z: (a) T126L28 e (b) T170L42 .....	71
4.5	Energia Cinética ( $m^2/s^2$ ) - EC <sub>n</sub> , Energia Potencial Disponível ( $m^2/s^2$ ) - EP <sub>n</sub> e Porcentagem de Energia Total - PEn (linhas sólida, tracejada e pontilhada, respectivamente) em função do modo vertical n, para a região ilustrada na Figura 4.3, Análise NCEP: (a) T126L28 e (b) T170L42 .....	72
4.6	Energia Total (%), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42) .....	75
4.7	Energia Total (%), Modelo Global do CPTEC – KUO, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42) .....	76
4.8	Energia Total (%), Modelo Global do CPTEC – RAS, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42).....	77
4.9	Energia Total (%), Modelo Global do CPTEC – GRELL, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42).....	78
4.10	Precipitação Total (mm/dia), para o composto de ZCAS: (a) e (b) dados GPCP, (c)-(h) MCGA CPTEC – KUO, RAS e GRELL respectivamente, para as resoluções T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita) .....	79
4.11	Perfil vertical da fonte de calor (K/dia) para o composto de ZCAS, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), respectivamente: (a) e (b) Região: América do Sul; (c) e (d) Região: Composto de ZCAS (conforme Figura 4.3).....	81

4.12	Fontes e Sumidouros de calor (K/dia) para o composto de ZCAS, média entre os níveis 1000 hPa e 150 hPa, Análises NCEP: (a) T126L28 e (b) T170L42.....	82
4.13	Fontes e Sumidouros de calor (K/dia) para o composto de ZCAS, média entre os níveis 1000 hPa e 150 hPa, previsão de 24 horas, Modelo CPTEC – T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), respectivamente: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	83
4.14	Fontes e Sumidouros de Energia Total, Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), para os modos verticais: (a) e (b) 1 a 3; (c) e (d) 4 a 7; (e) e (f) 8 a 12 (14, para 42 níveis); e (g) e (h) 1 a 12 (14)	85
4.15	Variação temporal da energética dos modos verticais 1-3, 4-7 e 8-12 na região da ZCAS, Análise NCEP T126L28, para os Episódios: (a) 1-2; (b) 3-4; (c) 5; (d) 6; e (e) 7. Os eixos no lado direito dos gráficos representam as energias potencial disponível (EPn) e cinética (ECn), respectivamente. As linhas verticais tracejadas indicam o período de atuação da ZCAS .....	88
4.16	Variação temporal da energética dos modos verticais 1-3, 4-7 e 8-14 na região da ZCAS, Análise NCEP T170L42, para os Episódios: (a) 1-2; (b) 3-4; (c) 5; (d) 6; e (e) 7. Os eixos no lado direito dos gráficos representam as energias potencial disponível (EPn) e cinética (ECn), respectivamente. As linhas verticais tracejadas indicam o período de atuação da ZCAS .....	89
4.17	Energia Total (%) dos modos horizontais referente aos modos verticais 1 a 3, para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Soma; (c) e (d) Rossby; (e) e (f) Kelvin .....	93
4.18	Energia Total (%) dos modos horizontais referente aos modos verticais 4 a 7, para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Soma; (c) e (d) Rossby; (e) e (f) Kelvin .....	94
4.19	Energia Total (%) dos modos horizontais referente aos modos verticais 8 a 12 (14, para T170L42), para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Soma ; (c) e (d) Rossby; (e) e (f) Kelvin	95
4.20	Energia Total (%) das interações entre os modos horizontais referente aos modos verticais 1 a 3, para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Resíduo; (c) e (d) Rossby-Kelvin; (e) e (f) Rossby-Misto .....	98
4.21	Energia Total (%) das interações entre os modos horizontais referente aos modos verticais 1 a 3, para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Kelvin-Misto; (c) e (d) Kelvin-Gravidade Oeste; (e) e (f) Kelvin- Gravidade Este .....	99
4.22	Energia Total (%) das interações entre os modos horizontais, referente aos modos verticais 4 a 7, para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Resíduo (todas as interações); (c) e (d) Rossby-Kelvin .....	102

4.23	Energia Total (%) das interações entre os modos horizontais, referente aos modos verticais 4 a 7, para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Rossby-Misto; (c) e (d) Rossby-Gravidade Oeste; (e) e (f) Rossby-Gravidade Este .....	103
4.24	Energia Total (%) das interações entre os modos horizontais, referente aos modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Resíduo (todas as interações); (c) e (d) Rossby-Kelvin .....	104
4.25	Energia Total (%) do modo horizontal Soma, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	108
4.26	Energia Total (%) do modo horizontal Rossby para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	109
4.27	Energia Total (%) do modo horizontal Kelvin para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	110
4.28	Energia Total (%) do modo horizontal Soma para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	111
4.29	Energia Total (%) do modo horizontal Rossby para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	112
4.30	Energia Total (%) do modo horizontal Kelvin para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	113
4.31	Energia Total (%) do modo horizontal Soma para os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	114
4.32	Energia Total (%) do modo horizontal Rossby para os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	115
4.33	Energia Total (%) do modo horizontal Kelvin para os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): KUO (a) e (b); RAS (c) e (d); e GRELL (e) e (f) .....	116

4.34	Energia Total (%) para a soma de todas as interações – Resíduo, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	118
4.35	Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Kelvin, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	119
4.36	Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Misto, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	120
4.37	Energia Total (%) das interações entre os modos Kelvin e Misto, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	122
4.38	Energia Total (%) das interações entre os modos Kelvin e Gravidade Oeste, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	123
4.39	Energia Total (%) das interações entre os modos Kelvin e Gravidade Este, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	124
4.40	Energia Total (%) da soma de todas as interações - Resíduo, para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	126
4.41	Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Kelvin, para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	127
4.42	Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Misto, para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	128
4.43	Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Gravidade Oeste, para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	129
4.44	Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Gravidade Este, para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	130

4.45	Energia Total (%) da soma de todas as interações - Resíduo, para os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	133
4.46	Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Kelvin, para os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.....	134
4.47	Energia total (%) em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42) .....	140
4.48	Energia total (%) em níveis médios (800 hPa a 300 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42) .....	141
4.49	Energia total (%) em altos níveis (300 hPa a 150 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42) .....	142
4.50	Energia total (%) para Estratosfera (150 hPa até o topo), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42) .....	143
4.51	Interação Energia Total (%) em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) entre os modos verticais 1 a 3; (c) e (d) entre os modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) entre os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42) .....	145
4.52	Interação Energia Total (%) em níveis médios (800 hPa a 300 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) entre os modos verticais 1 a 3; (c) e (d) entre os modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) entre os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42) .....	146
4.53	Interação Energia Total (%) em altos níveis (300 hPa a 150 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) entre os modos verticais 1 a 3; (c) e (d) entre os modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) entre os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42) .....	147
4.54	Interação Energia Total (%) na Estratosfera (150 hPa até o topo), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) entre os modos verticais 1 a 3; (c) e (d) entre os modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) entre os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42) .....	148
4.55	Interação Energia Total (%) entre as categorias de modos verticais, em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) 0103-0407; (c) e (d) 0407-0812 (14, para T170L42); e (e) e (f) 0103-0812 (14) .....	151

4.56	Interação Energia Total (%) entre as categorias de modos verticais, em níveis médios (800 hPa a 300 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) 0103-0407; (c) e (d) 0407-0812 (14, para T170L42); e (e) e (f) 0103-0812 (14).....	152
4.57	Interação Energia Total (%) entre as categorias de modos verticais, em altos níveis (300 hPa até 150hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) 0103-0407; (c) e (d) 0407-0812 (14, para T170L42); e (e) e (f) 0103-0812 (14).....	153
4.58	Interação Energia Total (%) entre as categorias de modos verticais, Estratosfera (150 hPa até o topo), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) 0103-0407; (c) e (d) 0407-0812 (14, para T170L42); e (e) e (f) 0103-0812 (14).....	154
4.59	Resíduo da Interação Energia Total (%), modos verticais 1 a 12 - Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e 1 a 14 - Análise T170L42 (a direita): (a) e (b) Baixos Níveis; (c) e (d) Níveis Médios; (e) e (f) Altos Níveis; e (g) e (h) Estratosfera .....	155
4.60	Energia total (%) em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL .....	158
4.61	Energia total (%) em níveis médios (800 hPa a 300 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.....	159
4.62	Energia total (%) em altos níveis (300 hPa a 150 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.....	160
4.63	Energia total (%) para Estratosfera (150 hPa até o topo), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.....	161
4.64	Interação energia total (%) em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.....	162
4.65	Interação energia total (%) em níveis médios (800 hPa a 300 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.....	163
4.66	Interação energia total (%) em altos níveis (300 hPa a 150 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.....	164

4.67	Interação energia total (%) para Estratosfera (150 hPa até o topo), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL .....	165
4.68	Interação energia total (%) entre as categorias de modos verticais 0103-0407, em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL	166
4.69	Interação energia total (%) entre as categorias de modos verticais 0407-0812 e 0407-0814, em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL ...	167
4.70	Interação energia total (%) entre as categorias de modos verticais 0407-0812 e 0407-0814, em níveis médios (800 hPa a 300 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL ...	168
4.71	Interação energia total (%) entre as categorias de modos verticais 0103-0407, em altos níveis (300 hPa a 150 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL .....	169
4.72	Interação energia total (%) entre as categorias de modos verticais 0407-0812 e 0407-0814, em altos níveis (300 hPa a 150 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL....	170
4.73	Resíduo da interação de energia total (%) entre os modos verticais 1 a 12 e 1 a 14, respectivamente, para o Modelo Global do CPTEC – KUO T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), média das previsões de 24h, (a) e (b) Baixos Níveis;(c) e (d) Níveis Médios; (e) e (f) Altos Níveis; e (g) e (h) Estratosfera .....	171
4.74	Resíduo da interação de energia total (%) entre os modos verticais 1 a 12 e 1 a 14, respectivamente, para o Modelo Global do CPTEC – RAS T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), média das previsões de 24h: (a) e (b) Baixos Níveis; (c) e (d) Níveis Médios; (e) e (f) Altos Níveis; e (g) e (h) Estratosfera .....	172
4.75	Resíduo da interação de energia total (%) entre os modos verticais 1 a 12 e 1 a 14, respectivamente, para o Modelo Global do CPTEC – GRELL T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), média das previsões de 24h: (a) e (b) Baixos Níveis; (c) e (d) Níveis Médios; (e) e (f) Altos Níveis; e (g) e (h) Estratosfera.....	173





## LISTA DE TABELAS

3.1	Descrição dos Experimentos: Parte Observacional e Modelagem.....	64
4.1	Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Horizontais - Modelos T126L28 – Região: América do Sul.....	135
4.2	Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Horizontais - Modelos T170L42 – Região: América do Sul.....	136
4.3	Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Horizontais - Modelos T126L28 – Região: Composto ZCAS.....	137
4.4	Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Horizontais - Modelos T170L42 – Região: Composto ZCAS.....	138
4.5	Classes de Níveis de Pressão.....	139
4.6	Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Verticais - Modelos T126L28 – Região: América do Sul.....	174
4.7	Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) - Energética dos Modos Verticais - Modelos T170L42 – Região: América do Sul.....	175
4.8	Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Verticais - Modelos T126L28 – Região: Composto ZCAS.....	176
4.9	Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) - Energética dos Modos Verticais - Modelos T170L42 – Região: Composto ZCAS.....	177



## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	- Raio médio da Terra ( $6.37 \times 10^6$ m)
$\mathbf{A}$	- Vetor tridimensional das variáveis de estado
$c_n = (gH_n)^{1/2}$	- Velocidade de fase da onda de gravidade pura ( $\text{ms}^{-1}$ )
$c_p$	- Calor específico à pressão constante ( $1005 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ )
$C_{r,n}^{s,l}(t)$	- Coeficiente de expansão no tempo de $\mathbf{A}$
$EC_n, EP_n, ET_n$	- Energias cinética, potencial disponível e total
$E_{wn}, E_{Tn}$	- Energias totais de todos os modos horizontais e do modo horizontal $w$ , para um dado modo vertical $n$ .
$f = 2\text{sen}\mathbf{j}$	- Parâmetro de Coriolis ( $\text{s}^{-1}$ )
$f_n(\mathbf{I}, \mathbf{j}, t)$	- Transformada vertical da função $f(\mathbf{I}, \mathbf{j}, s, t)$
$F_T$	- Termo relativo à dissipação de calor
$g$	- Aceleração da gravidade ( $9.8 \text{ ms}^{-2}$ )
$h_n$	- Coeficiente de expansão da variável $P$
$\tilde{h}_n$	- Geopotencial adimensionado em função de $H_n$
$H_n$	- Profundidade Equivalente do modo vertical $n$
$H_{r,n}^{s,l}(\mathbf{I}, \mathbf{j})$	- Função da estrutura horizontal
$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$	- Versores esféricos horizontais e vertical
$l$	- Índice para os modos meridionais
$m, n$	- Índices para os modos verticais
$N$	- Número de modos verticais
$p$	- Pressão atmosférica local (hPa)
$p_s$	- Pressão à superfície (hPa)
$\bar{p}_s$	- Média global da pressão à superfície (hPa)
$P$	- Geopotencial generalizado ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$ )
$P_n$	- Porcentagem de energia total do modo vertical $n$

$PE_w$	- Porcentagem de energia total do modo horizontal $w$ em relação a todos os modos, incluindo as interações entre eles, para a categoria de modos verticais considerados
$q$	- Logaritmo neperiano da razão $(p_s/\bar{p}_s)$
$\dot{Q}$	- Taxa de calor (aquecimento diabático)
$r$	- Índice para o modo de oscilação de acordo com a frequência
$R_d$	- Constante do gás para o ar seco ( $287.05 \text{ JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$R_u, R_v$	- Parte não-homogênea das equações do movimento zonal e meridional
$\tilde{R}_n^u, \tilde{R}_n^v, \tilde{R}_n^h$	- Termos não-lineares do sistema de equações primitivas
$s$	- Número de onda zonal
$t$	- Tempo (s)
$T$	- Campo de temperatura total (K)
$T_v$	- Temperatura virtual (K)
$\bar{T}(s)$	- Perfil de temperatura do escoamento básico (K)
$T'$	- Desvio de Temperatura em relação à $\bar{T}(s)$ (K)
$u(l, j, s, t)$	- Componente zonal do vento ( $\text{ms}^{-1}$ )
$u_n, v_n$	- Coeficientes de expansão das componentes zonal e meridional do vento.
$\tilde{u}_n, \tilde{v}_n$	- Componentes zonal e meridional do vento adimensionadas em função de $c$
$v(l, j, s, t)$	- Componente meridional do vento ( $\text{ms}^{-1}$ )
$\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$	- Vento horizontal ( $\text{ms}^{-1}$ )
$d_{mn}$	- Delta de Kronecker
$f(l, j, s, t)$	- Geopotencial ( $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ )
$\bar{f}(s)$	- Geopotencial hidrostático em relação a $\bar{T}(s)$
$j$	- Latitude
$g_m$	- Função peso na relação de ortonormalidade

$\bar{\Gamma}(\mathbf{s})$	- Estabilidade estática do estado básico em coordenada vertical $\mathbf{s}$ ( $\text{Km}^{-1}$ )
$k$	- Constante dada pela razão $R_a/c_p$
$l$	- Longitude
$J_n$	- Constante adimensional dada pela razão $c_n/2\Omega a$
$\Theta_{r,n}^{s,l}(\mathbf{j})$	- Função de Hough (auto-função da estrutura horizontal)
$\mathbf{s}$	- Coordenada vertical, definida por $(p/p_s)$
$\dot{\mathbf{s}}$	- Velocidade vertical do vento em coordenada $\mathbf{s}$
$\Omega$	- Velocidade angular da Terra ( $7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )
$\Psi_n(\mathbf{s})$	- Função da estrutura vertical
$\nabla$	- Gradiente (operador Nabla)
$\nabla \cdot$	- Divergente
$\langle, \rangle$	- Produto interno



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AB	- Alta da Bolívia
COLA	- Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies
CPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ECMWF	- European Centre for Medium Range Weather Forecasts
EMQ	- Erro Médio Quadrático
EURASIA	- Padrão de Teleconexão entre a Europa e a Ásia
FGGE	- First Global GARP Experiment
FMN-3D	- Funções Modos Normais Tridimensional
GPCP	- Global Precipitation Climatology Project
JBN	- Jato de Baixos Níveis
JMA	- Japan Meteorological Agency
MCGA	- Modelo de Circulação Geral Atmosférico
MM5	- Modelo de Mesoescala da PSU-NCAR
NCAR	- National Center for Atmospheric Research
NCEP	- National Centers for Environmental Prediction
NMC	- National Meteorological Center
OMJ	- Oscilação Madden-Julian
PSU	- Pennsylvania State University
TSM	- Temperatura à Superfície do Mar
VC	- Vórtice Ciclônico
ZCAS	- Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	- Zona de Convergência Intertropical
ZCPS	- Zona de Convergência do Pacífico Sul
ZCIS	- Zona de Convergência do Índico Sul
ZFB	- Zona Frontal do Baiu
ZPSs	- Zonas de Precipitação Subtropicais





## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

A existência de uma interação entre a convecção tropical e os sistemas de grande escala é conhecida desde a década de 60, a partir de diversos estudos observacionais (Malkus e Williams, 1963; Matsumoto et al., 1967; Cho e Ogura, 1974). As interações entre o aquecimento devido à condensação de vapor d'água e a dinâmica da atmosfera conduzem a efeitos em diversas escalas espaciais e temporais. O processo de condensação é iniciado e modulado pela dinâmica de grande escala, enquanto o aquecimento latente fornece uma importante forçante para a dinâmica. Esta forçante é, portanto, crucial para determinar a estrutura da circulação atmosférica nas latitudes tropicais e médias (Straus e Huntley, 1994).

O processo de ajustamento à forçante convectiva ocorre através da propagação de ondas que se dispersam, interagem não linearmente entre si e se amortecem, numa área maior, deixando no local de origem uma atmosfera aproximadamente em equilíbrio. Entretanto, é importante que as escalas da forçante e das ondas geradas sejam avaliadas convenientemente a fim de se obter um bom entendimento dos mecanismos envolvidos e especificamente dos efeitos causados por esse ajuste.

Qualquer sistema de circulação atmosférica, seja uma célula convectiva de pequena escala, um ciclone ou um sistema de grande escala, é caracterizado por um suprimento de energia cinética, e o desenvolvimento de tal sistema requer ou uma transformação de alguma outra forma de energia em energia cinética (por exemplo, transformação de energia potencial disponível em energia cinética), ou uma conversão da energia cinética para o sistema em desenvolvimento (por exemplo, energia cinética do estado básico para energia cinética da perturbação). Desta forma, o estudo do comportamento da atmosfera, ou parte dela, pode ser realizado examinando-se o comportamento da energia envolvida, ou seja, descrevendo-se o fluxo de energia gerado, transformado e dissipado através de um sistema atmosférico.

A análise da energia e suas transformações em termos de Funções Modos Normais Tridimensionais (FMN-3D) constitui uma metodologia para o diagnóstico da energética da circulação geral. Os modos normais são as auto-soluções de equações primitivas sobre a esfera e permitem uma análise da partição da energia global entre os modos verticais e horizontais nos domínios de número de onda zonal, índice meridional e índice vertical. Nesta abordagem, a solução da estrutura vertical possibilita a análise da energética para cada um dos modos verticais, ou seja, modos externo e internos, separadamente, enquanto na distribuição de energia entre os modos horizontais, os autovalores (modos normais) são classificados em modos gravitacionais (onda de Kelvin e de gravidade) e rotacionais (onda de Rossby e mista).

Nos extratropicais, a fonte primária de energia para os distúrbios atmosféricos de grande escala é a energia potencial disponível zonal, associada ao intenso gradiente meridional de temperatura, sendo o aquecimento diabático devido à liberação de calor latente e ao aquecimento radiativo, fontes secundárias de energia aos sistemas sinóticos de latitudes médias. Nos trópicos, por outro lado, a energia potencial disponível é pequena, devido aos fracos gradientes de temperatura, e a liberação de calor latente é a principal fonte de energia, pelo menos para os distúrbios que se originam na região tropical (Gandu, 1993).

Em particular, durante o verão da América do Sul, mais de 50% da precipitação anual tanto na região tropical como subtropical é convectiva, com forte variação diurna (Silva Dias et al., 1987). Assim, a liberação de calor latente é substancial e deve ser considerada para explicar a circulação de verão regional, caracterizada por Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Baixa do Chaco (BC), Alta da Bolívia (AB) e Vórtices Ciclônicos (VC), (Satyamurty, P., Nobre C. e Silva Dias, P. L., 1998).

Entretanto, uma das dificuldades que surgem é como representar a liberação de calor latente associada a convecção profunda em modelos numéricos de previsão de tempo, uma vez que há um conhecimento limitado de como este processo realmente ocorre na natureza e a interação entre a convecção e a circulação de grande escala não é linear.

Nas últimas décadas, a interação da circulação de grande escala e a convecção cumulus tem recebido especial atenção, principalmente no que diz respeito aos esquemas que a parametrizam (Kuo et al., 1997). Inúmeros esquemas foram desenvolvidos e incorporados em modelos numéricos, contudo nenhum dos esquemas existentes pode ser considerado como teoria geral para o amplo conjunto de situações atmosféricas (Kuo et al., 1997; Wang e Seaman, 1997).

Portanto, o propósito deste trabalho de tese é apresentar um estudo diagnóstico para eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul, enfatizando a análise energética, principalmente no que se refere à partição de energia entre os modos horizontais de oscilação (ondas de Rossby, Kelvin, misto Rossby-Gravidade e de gravidade inercial, com propagação para leste e para oeste) em função dos modos verticais. O desempenho do modelo global do CPTEC para o cálculo da energética modal é avaliado, considerando diferentes resoluções e parametrizações de convecção profunda.

De acordo com o contexto exposto, os principais objetivos deste trabalho são:

- estudar as trocas horizontais e verticais de energia baseado em funções modos normais tridimensionais durante episódios de ZCAS, a fim de identificar padrões indicadores de formação e dissipação deste sistema meteorológico, bem como sua interação com outros fenômenos.
- verificar o impacto de diferentes resoluções do modelo global do CPTEC (T062L28, T126L28 e T170L42) no estudo das trocas de energia entre os modos verticais e as interferências entre os modos horizontais de oscilação;

- verificar a influência de diferentes esquemas de parametrização de convecção profunda (Kuo, Relaxed Arakawa-Schubert e Grell) na partição de energia entre os modos verticais e horizontais, a fim de contribuir com algum conhecimento para aprimorar a representação das respostas ao aquecimento convectivo em modelos numéricos.
- obter as fontes e sumidouros de energia a partir dos resíduos das equações de conservação de energia.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais tópicos abordados neste trabalho. Os dados e a metodologia utilizados no desenvolvimento deste estudo são descritos no Capítulo 3. Os resultados dos experimentos observacionais e de modelagem sobre a distribuição da energia total entre os modos verticais e horizontais são apresentados nos Capítulos 4. No Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais, incluindo as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Uso de Funções Modos Normais na Análise Energética da Atmosfera

A análise da energética atmosférica é uma ferramenta poderosa para determinar processos importantes no desenvolvimento de sistemas de tempo. Taylor (1936, citado por Fulton e Schubert, 1985) foi talvez o primeiro cientista a mostrar que uma atmosfera compressível pode suportar oscilações livres com diferentes estruturas verticais; cada um destes modos tendo a estrutura horizontal de um fluido incompressível com uma profundidade diferente do valor da constante de separação, para a qual ele introduziu o termo “profundidade equivalente” ou “altura equivalente”.

Desde então, os modos normais atmosféricos têm desempenhado um papel central na teoria de movimentos de marés atmosféricas (Siebert, 1961; Longuet-Higgins, 1968; Chapman e Lindzen, 1970) e na teoria de propagação de ondas de escala planetária (Salby, 1984). Os modos normais são também importantes na previsão numérica de tempo, onde são usados na confecção de análises objetivas (Flattery, 1970), como funções base para modelos espectrais (Kasahara, 1977), inicialização de modelos (Daley, 1981), representação de dados globais (Kasahara e Puri, 1981) e construção de soluções testes para modelos (Dee e da Silva, 1986), conforme citação de Cohn e Dee (1989).

Em seu trabalho, Kasahara e Puri (1981) destacam que a informação sobre a distribuição espectral de energia atmosférica é importante para uma seleção apropriada de resoluções espaciais (truncamento) do modelo, para resolver as equações prognósticas, além de ser útil na parametrização de mecanismos de dissipação de energia em escala subgrade nas equações de previsão.

A transferência de energia entre o escoamento médio e a escala planetária, bem como a partição de energia entre as componentes estacionária e transiente da circulação e a conversão de energia entre os modos barotrópico e baroclínico têm sido enfocadas em diversos trabalhos teóricos e de modelagem.

Silva Dias et al. (1983) investigaram a resposta atmosférica tropical de um modelo de água rasa linearizado à fontes transientes de calor sobre a América do Sul, interpretando os resultados como um modo interno com profundidade equivalente da ordem de 250 m. A partição de energia entre os modos rotacionais e gravitacionais foi analisada em função da latitude e das escalas espacial e temporal da fonte de calor. Seus resultados indicaram que a latitude da forçante afeta a partição de energia entre os modos de alta e baixa frequências, com os modos de alta frequência sendo favorecidos à medida que a forçante torna-se mais rápida, mais próxima do equador e com menor dimensão espacial.

A hipótese do trabalho de Silva Dias et al. (1983) foi justificada posteriormente por Silva Dias e Bonatti (1985), utilizando-se dados observacionais para analisar a partição de energia entre os modos verticais da circulação de verão sobre a América do Sul tropical. Eles verificaram que tanto as características básicas (Alta da Bolívia e Cavado do Nordeste) da circulação tropical em altos níveis sobre a América do Sul, como o escoamento de oeste sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico foram bem reproduzidos pela decomposição dos dados em modos verticais. Notou-se que um modo interno com profundidade equivalente da ordem de 250 m é dominante nas proximidades do equador, enquanto para latitudes mais altas o modo externo (aproximadamente 9800 m) torna-se dominante.

Kasahara (1984) examinou a resposta linear da atmosfera à forçantes térmicas tropicais estacionárias e transientes através da expansão em modos normais para um modelo global de equações primitivas linearizado em relação a um estado básico de repouso e incluindo forçante térmica e dissipação de momento prescritas. Ele obteve que para o caso de aquecimento tropical estacionário, a maior parte da energia excitada é devido

aos modos rotacionais, entretanto, uma parte significativa da energia é devido também ao modo Kelvin. Já no caso do aquecimento tropical transiente, apenas os modos gravitacionais, com exceção do modo Kelvin, são fortemente dependentes da escala temporal do aquecimento.

Tanaka (1985) desenvolveu um esquema para diagnóstico da energética global durante o período de inverno do First Global GARP Experiment (FGGE), o qual descreve o fluxo de energia entre os diferentes modos normais da atmosfera, bem como as interações entre eles. Seus resultados indicam que a energia potencial gerada nos modos baroclínicos zonais (especialmente no modo vertical  $m=4$ , com altura equivalente  $h_m = 150m$ ) é transformada em energia potencial disponível do modo barotrópico e, imediatamente, convertida em energia cinética do mesmo modo. Por outro lado, a energia cinética do modo baroclínico da escala de um ciclone é transformada em energias cinéticas das componentes zonal e eddy do modo barotrópico por interações não lineares. Desta forma, o fluxo de energia atmosférica é caracterizado por interação de energia do modo baroclínico para o modo barotrópico, nas interações trópicos-extratrópicos, sendo a maior parte da energia cinética dissipada pelo modo barotrópico na região do cinturão de altas pressões.

Uma expansão do trabalho de Kasahara (1984) foi apresentada por Kasahara e Silva Dias (1986). Neste trabalho foi analisada a resposta de ondas planetárias à fontes de calor tropicais estacionárias numa atmosfera global com cisalhamentos meridional e vertical. Com a inclusão de um fluxo zonal, os autores obtiveram que o cisalhamento vertical deste permite um acoplamento do modo externo com os modos verticais internos, resultando em uma resposta significativa do modo externo, devido à excitação dos modos baroclínicos internos pelo aquecimento tropical. Ao contrário da estrutura meridional dos modos verticais internos, a estrutura meridional do modo externo é global e a resposta ao aquecimento tropical não é confinada equatorialmente.

Gelaro (1992a, b) utilizou a decomposição em modos normais de um modelo de previsão numérica de tempo sofisticado para investigar as interações trópicos-latitudes

médias. Analisa-se a resposta do modelo à anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) impostas no Pacífico tropical, em relação aos aspectos globais e aos aspectos tropicais e extratropicais separadamente. Através do monitoramento do crescimento de energia nos modos horizontais e verticais dominantes, o autor mostra que a resposta a longo prazo é bem estabelecida entre 1 e 2 semanas após a introdução da anomalia de aquecimento. As taxas de crescimento e estruturas destes modos fornecem indicações dos processos dinâmicos que controlam a resposta do modelo. Nos trópicos, o aumento da convecção é o mecanismo forçante dominante, enquanto nos extratropicos, a propagação meridional de energia e as instabilidades locais no fluxo ambiente (instabilidades baroclínicas) parecem ser mecanismos importantes para produzir os padrões de ondas observados, com decaimento caracterizado por instabilidade barotrópica. Além disso, através da resposta particionada trópico-extratropical verifica-se que nos trópicos a estrutura é dominada pelo modo externo e um modo interno de profundidade média. Já nos extratropicos, a estrutura dominante é barotrópica.

Haas (1993) estudou os mecanismos de interação entre os modos verticais normais na presença de uma corrente básica, utilizando-se sistema de equações primitivas. Seus resultados mostraram que as trocas de energia dos modos internos para o externo dependem principalmente do cisalhamento vertical da corrente básica, sendo que quanto maior o cisalhamento vertical da corrente básica zonal, mais intensa é a transferência de energia para o modo externo e, quanto mais distante do equador, mais eficiente é essa transferência.

Andrade (1994) desenvolveu um modelo global de equações primitivas em coordenada vertical sigma, espectral, não linear e essencialmente dinâmico, para estudar a resposta da atmosfera a forçantes térmicas tropicais, enfatizando-se a partição de energia entre os modos normais horizontais e verticais de energia. A distribuição de energia entre os modos horizontais de oscilação para experimentos onde a atmosfera inicial estava em repouso mostrou que fontes localizadas mais próximas do equador e alongadas zonalmente (forçante da Indonésia, por exemplo) excitaram mais a geração de modos



gravitacionais (Kelvin e gravidade) do que as fontes mais circulares e relativamente mais distantes da faixa equatorial (forçantes da Amazônia e África). Para os modos rotacionais, Rossby e misto, observou-se ocorrer o oposto. Em relação aos modos verticais, obteve-se que com a introdução de uma condição inicial diferente de zero ocorreram trocas de energia entre os modos verticais normais, associadas ao cisalhamento vertical do escoamento médio. Além disso, a análise da energia total indicou que a energia associada ao modo externo é dominante em latitudes médias, aumentando gradativamente a partir de 30°N e 30°S, até atingir 90%, para o estado inicial de repouso atmosférico, enquanto para uma condição inicial diferente, observou-se um aumento de energia nas latitudes subtropicais e diminuição de energia em latitudes altas; na faixa tropical, a energia concentrou-se nos modos internos, com um pico no segundo modo vertical interno (~ 60%).

Tanaka e Kimura (1996) compararam as características da energética das análises globais operacionais do European Center for Medium-Range Forecasts (ECMWF), Japan Meteorological Agency (JMA) e do National Meteorological Center (NMC) utilizando modos normais. Os autores verificaram que o espectro de energia dos modos de Rossby e gravidade estão conectados no intervalo de alta frequência, pelo menos para os modos verticais internos  $m = 1$  a 4 (com alturas equivalentes variando entre 9625m e 150m (Tanaka, 1985)). A intercomparação das energéticas de modos normais para as análises do JMA, NMC e ECMWF mostraram que os níveis de energia dos modos de Rossby são praticamente os mesmos, tendo uma discrepância menor do que 8%, enquanto para os modos de gravidade a discrepância é em torno de 8%.

Nunes (2002) fez uma análise da partição de energia entre os modos normais verticais e horizontais, utilizando o Modelo de Circulação Geral Atmosférico (MCGA) do Centro de Previsão e Estudos Climáticos (CPTEC) com as condições iniciais do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e as fisicamente inicializadas pelo MCGA-CPTEC. Seus resultados mostraram que, sobre a região tropical, para todas as estruturas horizontais reunidas (Rossby, Kelvin, misto Rossby-Gravidade, gravidade leste e oeste) e para os modos Rossby e Kelvin, o quinto modo vertical ( $H_5 = 291$ m) é o

que detém a maior porcentagem da energia total, e que para os modos misto e gravidade leste e oeste, o segundo modo ( $H_2 = 3868\text{m}$ ) é o dominante, havendo um máximo secundário no quinto modo. A mesma análise sobre a América do Sul apresentou um deslocamento do máximo secundário para o quarto modo vertical ( $H_4 = 641\text{m}$ ), o qual, segundo a autora, pode estar relacionado à uma maior extensão vertical da fonte de calor sobre a América do Sul quando comparada com a fonte média tropical. Em relação à interação total e entre os pares de modos horizontais, concluiu-se que a interação total destrói energia na faixa equatorial, sendo a maior contribuição proveniente da combinação Rossby-Kelvin. Além disso, verificou-se que a interação entre o modo divergente gravidade oeste com os modos rotacional Rossby e divergente Kelvin contribui positivamente para a energia total na região da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Bonatti (2004) realizou uma análise da partição e interação modal de energia para episódios de nuvem vírgula invertida sobre a América do Sul, utilizando o Modelo Global do CPTEC. Seus resultados indicam que as categorias de modos verticais 0 a 2 ( $H_n > 600\text{m}$ ) e 3 a 6 ( $100\text{m} < H_n < 600\text{m}$ ) são as que concentram as maiores porcentagens de energia, sendo que os modos horizontais Rossby e Kelvin foram os que mais detiveram energia para estas duas categorias. Verificou-se destruição de energia para a maioria das interações entre os modos horizontais e que os produtos cruzados entre os modos Rossby e Kelvin com os demais modos foram os que apresentaram as maiores porcentagens de energia durante o estágio maduro da nuvem vírgula invertida. As interações entre os modos verticais indicaram construção de energia para os níveis médios (800 hPa até 300 hPa – região de convecção) e destruição de energia para a estratosfera (150 hPa até o topo), para os modos 0 a 2.

## **2.2 A Convecção e a Zona de Convergência do Atlântico Sul**

Uma das características mais interessantes da precipitação e da circulação quase-estacionária dominante durante o verão sobre a América do Sul e que tem recebido destaque em estudos recentes refere-se à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS, freqüentemente observada em imagens de satélite durante o verão austral, é convencionalmente definida como uma faixa persistente, pelo menos 4 dias seguidos (Quadro, 1994), de nebulosidade e precipitação, com orientação noroeste-sudeste, que se estende desde o sul da região Amazônica até o Atlântico Sul-Central.

Devido aos efeitos que a intensa precipitação e variabilidade em sua posição causam em regiões economicamente importantes, tais como as regiões Sudeste e Sul do Brasil, é importante entender a estrutura dinâmica da ZCAS, sua formação e efeitos remotos que, eventualmente, atuam sobre sua estrutura.

As primeiras referências na literatura a mencionar esta importante estrutura dinâmica, ZCAS, parecem datar da década de 1970, com os trabalhos de Taljaard (1972), Krishnamurty et al. (1973) e Stretten (1973). Estes dois últimos realçam o importante papel dessas bandas de nebulosidade do ponto de vista da transferência de momentum, calor e umidade dos trópicos para as latitudes mais altas.

Kodama (1992, 1993) estudou amplamente as características e condições que favorecem a formação das chamadas Zonas de Precipitação Subtropicais (ZPSs), tais como ZCAS, Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e Zona Frontal do Baisu (ZFB). O autor obteve que as ZPSs apresentam algumas características em comum, entre as quais pode-se citar: (i) são sistemas quase-estacionários; (ii) estão associadas à forte atividade convectiva no lado oeste e um centro de alta pressão subtropical no lado leste, bem como ao jato subtropical (30°-35°); (iii) verifica-se um forte gradiente de temperatura potencial equivalente e intensificação da convergência de umidade na região de convergência, associados a um escoamento de ar em direção aos pólos na baixa troposfera, a oeste da alta subtropical; e (iv) apresentam estrutura baroclínica e regiões

convectivamente instáveis. No caso da ZCAS, a forte atividade convectiva e o centro de alta pressão subtropical referem-se à convecção na Amazônia e ao anticiclone no Atlântico Sul, respectivamente.

Figuerola et al. (1995), com o auxílio de um modelo em coordenada eta simulou a formação da Alta da Bolívia, do cavado próximo a costa nordeste do Brasil e de uma zona de convergência na posição da ZCAS. Seus resultados mostraram uma zona de convergência bem definida em baixos níveis, na posição média observada da ZCAS e que a variação diurna da convecção na região Amazônica constitui um fator importante nestas simulações. A importância da topografia e da fonte de calor em produzir os principais padrões da circulação regional de verão sobre a América do Sul foram enfatizados também em seus estudos.

Grimm e Silva Dias (1995) utilizaram um modelo barotrópico de conservação de vorticidade para estudar as interações trópico-extratropical com forçantes associadas a anomalias convectivas em escala planetária. Seus experimentos mostraram que a ZCPS tem fundamental importância no estabelecimento e controle da ZCAS e esta, por sua vez, exerce influência sobre a Zona de Convergência do Índico Sul (ZCIS) e sobre os padrões de teleconexão que influenciam a Europa e a Ásia (padrão EURASIA), principalmente no período de verão do Hemisfério Sul.

Figuerola (1997) realizou um estudo observacional e de modelagem sobre os sistemas que atuam na América do Sul durante o verão. Seus resultados indicaram que a ZCAS não depende da topografia dos Andes, da ZCIT, da ZCPS e da convecção sobre a África. Entretanto, na ausência de convecção tropical sobre a América do Sul não foi verificada a formação da ZCAS. Além disso, o autor obteve que o fator principal para a formação e manutenção da ZCAS é a interação entre a convecção tropical sobre a América do Sul e as ondas transientes de números de onda zonal 5 e 6, sendo os Andes, a ZCIT e a convecção da África, fatores secundários.

Nogués-Paegle e Mo (1997) utilizaram métodos estatísticos e análises globais para avaliar as correlações entre as circulações de grande escala e regional com a ZCAS. Seus resultados indicam um padrão oscilando entre a intensificação (enfraquecimento) da convecção sobre a ZCAS e os déficits (abundância) de precipitação sobre as planícies subtropicais da América do Sul, o qual parece ser uma componente regional de um sistema de grande escala, possivelmente relacionado à oscilação de 30-60 dias nos trópicos. Além disso, foi documentado um influxo de umidade dos trópicos para a Argentina Central e sul do Brasil para os períodos úmidos, causado por um intenso Jato de Baixos Níveis (JBN) a leste dos Andes. Os JBNs estabelecem corredores de umidade que produzem precipitação em latitudes subtropicais e médias sobre o continente.

Gandu e Silva Dias (1998) estudaram o impacto de fontes de calor tropicais sobre a circulação troposférica de altos níveis e a subsidência compensadora da convecção associada, usando um modelo baroclínico. Seus resultados indicam que a subsidência compensatória associada à fonte de calor Amazônica está principalmente concentrada a sudoeste da fonte, sendo este efeito intensificado ao se incorporar uma fonte de calor assimétrica, orientada no sentido da ZCAS.

Carvalho et al. (2004) investigaram as relações entre a variabilidade intrasazonal-interanual da atividade convectiva e extremos de precipitação e a circulação de grande escala associada a ZCAS durante o verão austral. Um método objetivo foi desenvolvido para identificar a ZCAS e caracterizar sua intensidade, posição geográfica (continental ou oceânica), e persistência. Dentre os principais resultados, observou-se que a categoria ZCAS intensa está associada a anomalias negativas de radiação de onda longa (ROLE) sobre uma grande área da América do Sul tropical, estendendo desde o oeste da Amazônia até o Oceano Atlântico, e que as características continental e oceânica da ZCAS estão relacionadas a padrões de trem de ondas em latitudes médias. A oscilação Madden-Julian (OMJ) modula eventos de ZCAS intensa, com persistência maior que 3 dias.

Muitos dos trabalhos citados anteriormente enfatizam o importante papel de forçantes térmicas associadas à fontes de calor representadas pela liberação de calor latente na Amazônia e Indonésia, e suas extensões para sudeste associadas à ZCAS e ZCPS, respectivamente. Entretanto, muitos dos aspectos discutidos não são considerados em estudos de previsibilidade, os quais, se incluídos, poderiam contribuir para aumentar significativamente a escala de tempo de validade das previsões, especialmente a previsão de tempo e clima em regiões tropicais e subtropicais como a do Brasil, que são influenciadas por sistemas nos quais a liberação de calor latente tem papel significativo em suas energéticas. Neste sentido, muitos estudos enfatizam a importância de representar os processos de escala subgrade, tais como a convecção cumulus, em modelos numéricos.

O problema e a prática da parametrização cumulus é complexo, pois em uma atmosfera condicionalmente instável, onde as nuvens cumulus estão presentes, os movimentos verticais de escala subgrade estão integralmente relacionados à liberação de calor latente (Frank, 1983). Além disso, os processos de liberação de calor latente associada à convecção cumulus são ainda pouco entendidos na natureza. Nos últimos anos, muitos esforços vêm sendo empregados para melhorar a compreensão da interação entre a circulação de grande escala e a convecção cumulus, principalmente dos esquemas que a parametrizam (Kuo et al., 1997).

Diversos esquemas de parametrização cumulus têm sido desenvolvidos e incorporados em modelos numéricos, entre os quais pode-se destacar: Kuo (1974), Arakawa e Schubert (1974), Kreitzberg e Perkey (1976), Fritsch e Chappell (1980), Betts-Miller (1986a,b), Kain e Fritsch (1990) e Grell (1993). Entretanto, não existe uma teoria geral sobre parametrização cumulus e, nenhum esquema pode ser considerado consistente em um amplo conjunto de sistemas meteorológicos.

Puri (1983) analisou a relação entre o ajuste convectivo, a Circulação de Hadley e os modos normais de um modelo espectral. Ele obteve que o ajuste convectivo influencia principalmente os modos de gravidade de baixa frequência, em concordância com os

resultados de Webster (1972) e Gill (1980), que mostraram, usando modelos simples, que a resposta ao aquecimento diabático nos trópicos induz a excitação de ondas de Kelvin. Este estudo sugere também a possível sensibilidade dos resultados à parametrização de processos convectivos no modelo.

Wang e Seaman (1997) compararam quatro esquemas de parametrização cumulus (Anthes-Kuo, Betts-Miller, Grell e Kain-Fritsch), usando o modelo de mesoescala MM5 da Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research (PSU-NCAR) em eventos de precipitação sobre os Estados Unidos para as estações fria e quente. Seus resultados mostraram que, para os quatro esquemas de convecção, a destreza da previsão é maior para eventos da estação fria e quando a resolução é reduzida de 36 km para 12 km, e que o modelo prevê melhor o volume de precipitação do que a localização e a quantidade pico de precipitação. O esquema de Kain-Fritsch, baseado na hipótese de energia potencial disponível convectiva, foi o que apresentou melhor desempenho nas simulações.

Mendonça (1999) avaliou o desempenho do modelo global do CPTEC durante episódios de ZCAS utilizando dois esquemas de convecção profunda, tipo Kuo (KUO) e Arakawa-Schubert Relaxado (RAS). Neste estudo foram calculados índices estatísticos para algumas variáveis do modelo em cinco regiões: América do Sul, Tropical, Extratropical, Continente e Oceano. No caso da precipitação, a análise do índice *threat score* indicou que ambos os modelos, KUO e RAS, apresentam bom desempenho em prever a ocorrência/não ocorrência de precipitação e deficiência em prever chuvas intensas. Entretanto, em geral, a versão RAS apresentou resultados ligeiramente melhores.

Rocha (2000) estudou o impacto de três parametrizações de convecção, Kuo (1974, modificado por Geleyn, 1985), Kain e Fritsch (1990 e 1993) e Fritsch e Chappell (1980) em um evento de ciclogênese sobre o Oceano Atlântico Sul. As simulações foram feitas utilizando o modelo numérico da Japan Meteorological Agency (JMA), de área limitada, adaptado para a América do Sul, com resoluções de 75 km e 25 km. No caso

da simulação com resolução de 75 km, seus resultados mostraram que o esquema Kuo forneceu precipitação convectiva mais fragmentada no setor quente do ciclone, devido ao domínio de divergência de umidade na coluna. Já com os esquemas de Kain e Fritsch e Fritsch e Chappell, a precipitação convectiva mostrou-se mais contínua no espaço e alinhamento norte-sul, apesar da divergência de umidade deslocando-se para leste juntamente com o sistema. Para a resolução de 25 km, a distribuição de precipitação foi muito semelhante à das simulações com 75 km, apresentando apenas melhor definição dos máximos e mínimos de precipitação.

Os trabalhos citados acima são alguns exemplos de estudos que mostram a importância não só da inclusão, como de uma boa representação dos processos de escala subgrade, em particular, de processos convectivos em modelos numéricos. É relevante também notar, como mencionado anteriormente, que apesar de inúmeros progressos, há ainda um grande desafio e muito há ser realizado para obter um melhor entendimento destes processos, bem como reduzir os erros em previsões de precipitação.



## **CAPÍTULO 3**

### **DADOS E METODOLOGIA**

Este trabalho é basicamente composto de duas partes, uma observacional e outra de modelagem. Neste Capítulo são apresentados os dados, a metodologia e uma breve descrição dos episódios de ZCAS selecionados e utilizados no desenvolvimento deste estudo.

#### **3.1 Dados**

Os dados utilizados para a análise observacional e de modelagem consistem, basicamente, das análises do National Centers for Environmental Predictions (NCEP), com resoluções T062L28, T126L28 e T170L42 e horário das 12Z (daqui em diante, referenciadas como Análise T062L28, Análise T126L28 e Análise T170L42, respectivamente), e o Modelo Global do CPTEC (Bonatti, 1996; Kinter et al., 1997, Cavalcanti et al., 2002 e Marengo et al., 2003).

Estimativas de precipitação diária provenientes do Global Precipitation Climatology Project (GPCP) foram utilizados para ilustrar e comparar os campos de precipitação e de partição de energia, associados ao composto dos episódios de ZCAS selecionados. Detalhes sobre a geração das estimativas de precipitação do GPCP podem ser obtidas em Huffman e Bolvin (2002).

#### **3.2 Metodologia**

##### **3.2.1 Decomposição em Funções Modos Normais**

As trocas verticais e horizontais de energia foram analisadas com base na decomposição em funções modos normais dos campos atmosféricos, resumidos a seguir, de acordo

com os procedimentos descritos em Kasahara e Puri (1981), Daley (1991) e Andrade (1994).

### a) Equações Primitivas e Expansão em Modos Normais

Conservando-se os termos não-lineares e forçantes, as equações primitivas em coordenadas esféricas  $(\lambda, \varphi)$  na horizontal e coordenada vertical  $\sigma = \frac{p}{p_s}$  são expressas, de acordo com Andrade (1994), por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial P}{\partial \lambda} = R_u, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu + \frac{1}{a} \frac{\partial P}{\partial \varphi} = R_v, \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \tilde{\sigma}}{\partial \sigma} + \nabla \cdot (\mathbf{V} - \tilde{\mathbf{V}}) + (\mathbf{V} - \tilde{\mathbf{V}}) \cdot \nabla q = 0, \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \tilde{\mathbf{V}} \cdot \nabla q + q \nabla \cdot \tilde{\mathbf{V}} = 0, \quad (3.4)$$

$$\frac{dT}{dt} = \kappa T \left( \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} + \frac{dq}{dt} \right) + \frac{\dot{Q}}{C_p} + F_T, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT}{\sigma}, \quad (3.6)$$

O conjunto de equações (3.1-3.6) acima são as equações do movimento horizontal, tendência de pressão a superfície, continuidade de massa, termodinâmica e hidrostática, onde:

- $\mathbf{V} = (u, v)$  é a velocidade horizontal, sendo  $u$  e  $v$  as componentes zonal e meridional, respectivamente;
- $\tilde{\mathbf{V}} = \int_{s_T}^1 \mathbf{V} ds$ , é a velocidade horizontal do vento mediada verticalmente, com  $s = 1$  e  $s = s_T$  representando a coordenada vertical na superfície e no topo da atmosfera, respectivamente.
- $\dot{\sigma} = d\sigma/dt$  é a componente vertical da velocidade;
- $q = \ln(p_s/\bar{p}_s)$ , em que  $p_s$  é a pressão à superfície e  $\bar{p}_s$  é a média global de  $p_s$ ;
- $f$  é o parâmetro de Coriolis;
- $a$  é o raio médio da Terra;
- $\lambda, \varphi, \sigma, t$  são, respectivamente, a longitude, a latitude, a coordenada vertical e o tempo;
- $R_u$  e  $R_v$  são as resultantes que compõem a parte não linear das equações do movimento zonal e meridional, respectivamente;
- $\kappa = R_d/c_p$ , onde  $R_d$  é a constante do gás para o ar seco e  $c_p$  é o calor específico do ar à pressão constante;
- $\dot{Q}$  é a taxa de calor (aquecimento diabático);
- $F_T$  é o termo relativo à dissipação de calor;
- $\phi$  é o geopotencial;
- $P$  é uma variável auxiliar (Kasahara e Puri, 1981), definida por:

$$P = \phi - \bar{\phi}(\sigma) + R_d \bar{T}(\sigma)q, \quad (3.7)$$

onde:  $\bar{\phi}(\sigma)$  é o geopotencial hidrostático em relação a  $\bar{T}(\sigma)$ ;

- $T$  é a temperatura, definida como:

$$T = \bar{T}(\sigma) + T'(\lambda, \varphi, \sigma, t), \quad (3.8)$$

onde:  $T'$  é o desvio de  $T$  em relação à temperatura  $\bar{T}(\sigma)$ ;

$\bar{T}(\sigma)$  é o perfil de temperatura da atmosfera básica, função apenas da coordenada vertical.

Os modos normais das equações do modelo são construídos reescrevendo as equações da continuidade e termodinâmica em uma nova forma. Os procedimentos para obter a decomposição das estruturas vertical e horizontal em modos normais são mostrados na Figura 3.1 abaixo. As equações governantes são linearizadas em torno de um estado básico em repouso e com temperatura média, que é função somente da altura. O método das transformadas é empregado para a decomposição do sistema linearizado nas equações das estrutura horizontal e vertical, acopladas pela profundidade equivalente.

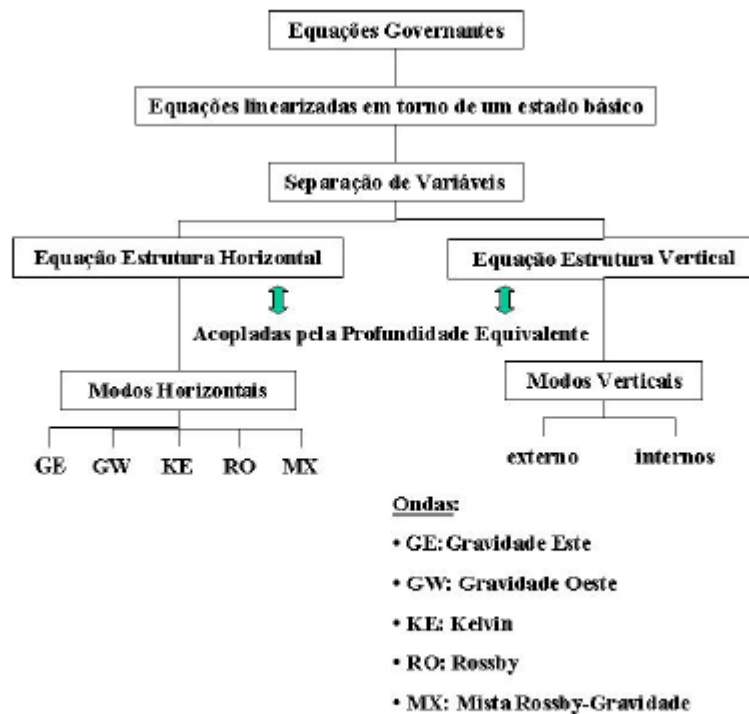


FIGURA 3.1 – Procedimento para obter os modos verticais e horizontais.  
 FONTE: Adaptada de Ko et al. (1989).

A equação da estrutura vertical, juntamente com as condições de contorno, formam um problema de Sturm-Liouville, cujos modos verticais normais são os autovetores, e os autovalores associados são proporcionais à velocidade de fase da onda de gravidade pura (profundidade ou altura equivalente). Estes autovalores fornecem a estrutura horizontal para cada modo vertical normal, ou seja, cada equação da estrutura horizontal

está associada a uma profundidade equivalente (autovalor) e a um modo vertical (autovetor). Os modos normais da estrutura horizontal formam uma base completa.

Desta forma, uma grandeza arbitrária da atmosfera,  $\mathbf{A}(\mathbf{I}, \mathbf{j}, \mathbf{s}, t)$ , pode ser representada matematicamente como uma série de funções através desse conjunto ortonormal e completo de funções tri-dimensionais:

$$\mathbf{A}(\mathbf{I}, \mathbf{j}, \mathbf{s}, t) = \sum_{n,s,r,l} C_{r,n}^{s,l}(t) H_{r,n}^{s,l}(\mathbf{I}, \mathbf{j}) \Psi_n(\mathbf{s}), \quad (3.9)$$

com:

$$C_{r,n}^{s,l} = \langle \mathbf{A}_n(\lambda, \varphi, t), H_{r,n}^{s,l}(\lambda, \varphi) \rangle$$

$$\mathbf{A}_n(\mathbf{I}, \mathbf{j}, t) = \int \mathbf{A}(\mathbf{I}, \mathbf{j}, \mathbf{s}, t) \Psi_n(\mathbf{s}) d\mathbf{s}, \quad (3.10)$$

$$H_{r,n}^{s,l}(\lambda, \varphi) = \Theta_{r,n}^{s,l}(\varphi) \exp(is\lambda)$$

onde:

$\Psi_n(\sigma)$  é a estrutura vertical do conjunto de funções;

$H_{r,n}^{s,l}(\lambda, \varphi)$  é a estrutura horizontal do conjunto de funções;

$\Theta_{r,n}^{s,l}(\varphi)$  é a função de Hough (auto-função da estrutura horizontal);

$s$  é o número de onda zonal;

$l$  é o índice para os modos meridionais de oscilação;

$n$  é o índice para os modos verticais de oscilação;

$\langle, \rangle$  indica o produto interno; e

$r$  é o índice para o modo de oscilação de acordo com a sua frequência característica, isto é:

$r = 1$  – onda de Rossby,

$r = 2$  – onda de Kelvin,

- r = 3 – onda mista Rossby-Gravidade,
- r = 4 – onda de gravidade para oeste,
- r = 5 – onda de gravidade para leste.

A transformada vertical finita da função genérica  $f(\mathbf{l}, \mathbf{j}, \mathbf{s}, t)$  para separação da equação da estrutura vertical associada às equações primitivas é definida como em Andrade (1994):

$$f_n(\mathbf{l}, \mathbf{j}, \mathbf{s}, t) = \int_0^1 f(\mathbf{l}, \mathbf{j}, t) \Psi_n(\mathbf{s}) d\mathbf{s}, \quad (3.11)$$

onde  $\Psi_n(\sigma)$  é o núcleo da transformada de peso unitário e  $\mathbf{s}_T = 0$ .

A transformada inversa de (3.11) é expressa por:

$$f(\lambda, \varphi, \sigma, t) = \sum_n f_n(\lambda, \varphi, t) \Psi_n(\sigma), \quad (3.12)$$

onde  $f_n$  é o coeficiente de expansão para a função  $f$  e a função  $\Psi_n$  satisfaz a condição de ortonormalidade:

$$\int_0^1 \Psi_m(\mathbf{s}) \Psi_n(\mathbf{s}) d\mathbf{s} = \mathbf{d}_{mn} = \begin{cases} 1, & \text{para } m = n \\ 0, & \text{para } m \neq n \end{cases}, \quad (3.13)$$

com  $\delta_{mn}$  indicando o delta de Kronecker.

Neste caso, a função  $f$  pode ser substituída por qualquer uma das variáveis  $u$ ,  $v$  ou  $P$ :

$$u(\lambda, \varphi, \sigma, t) = \sum_n u_n(\lambda, \varphi, t) \Psi_n(\sigma), \quad (3.14)$$

$$v(\lambda, \varphi, \sigma, t) = \sum_n v_n(\lambda, \varphi, t) \Psi_n(\sigma), \quad (3.15)$$

$$P(\lambda, \varphi, \sigma, t) = \sum_n gh_n(\lambda, \varphi, t) \Psi_n(\sigma), \quad (3.16)$$

onde  $h_n$ ,  $u_n$  e  $v_n$  são os coeficientes de expansão na vertical da função P e das componentes horizontais da velocidade, respectivamente.

A equação da estrutura vertical, como deduzida em Andrade (1994) é expressa por:

$$\frac{d}{d\sigma} \left[ \left( \frac{\sigma g}{R\Gamma} \right) \frac{d\Psi_n}{d\sigma} \right] + \frac{\Psi_n}{H_n} = 0, \quad (3.17)$$

com  $H_n = c_n^2/g$  ( $c_n$  é a velocidade de fase da onda de gravidade pura) sendo a profundidade equivalente associada a cada modo vertical n, satisfazendo as seguintes condições de contorno:

$$\sigma \frac{d\Psi_n}{d\sigma} + \sigma \frac{\bar{\Gamma}_T}{T_T} \Psi_n = 0, \quad \sigma = 0 \quad (3.18)$$

e

$$\sigma \frac{d\Psi_n}{d\sigma} + \sigma \frac{\bar{\Gamma}_S}{T_S} \Psi_n = 0, \quad \sigma = 1 \quad (3.19)$$

Uma vez determinado  $H_n$ , pode-se determinar as equações da estrutura horizontal, definidas por:

$$\frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial \tilde{t}} - \text{sen } \mathbf{j} \tilde{v}_n + \frac{J_n}{\cos \mathbf{j}} \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial I} = \tilde{R}_n^u, \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial \tilde{v}_n}{\partial \tilde{t}} + \text{sen } \mathbf{j} \tilde{u}_n + J_n \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial \mathbf{j}} = \tilde{R}_n^v, \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial \tilde{t}} + \frac{J_n}{\cos \mathbf{j}} \nabla \cdot \mathbf{V}_n = \tilde{R}_n^h, \quad (3.22)$$

onde:

- $\nabla \cdot \mathbf{V}_n = \left( \frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial \lambda} + \frac{\partial (\tilde{v}_n \cos \varphi)}{\partial \varphi} \right);$
- $\vartheta_n = \frac{(gH_n)^{1/2}}{2\Omega a}$  é uma constante adimensional que caracteriza a natureza do escoamento horizontal, e representa a razão entre a velocidade de fase da onda de gravidade pura para cada modo vertical  $n$ , e a velocidade linear da superfície terrestre no equador, sendo  $\Omega$  a velocidade angular da Terra;
- $\tilde{u}_n = u_n / (gH_n)^{1/2}$ ;  $\tilde{v}_n = v_n / (gH_n)^{1/2}$  e  $\tilde{h}_n = h_n / H_n$  são as variáveis vento e geopotencial adimensionadas em função da velocidade de fase da onda de gravidade pura e da profundidade equivalente, respectivamente;
- a variável tempo é adimensionada por  $2\Omega$ ;
- os termos não-lineares e forçantes em 3.20-3.22 são expressos por:  $\tilde{R}_n^u = R_n^u / 2\Omega$ ;  $\tilde{R}_n^v = R_n^v / 2\Omega$ ; e  $\tilde{R}_n^h = -R_n^h / 2\Omega$ . Para o caso homogêneo, o valor destas resultantes é nulo, e o sistema de equações governantes torna-se idêntico ao sistema de equações da água rasa linearizadas sobre a esfera, com um estado básico de repouso. As equações 3.20-3.22 mostram a evolução temporal dos coeficientes de expansão, enquanto as forçantes (parte não-linear) são representadas pelos termos advectivos e pelas contribuições das fontes e sumidouros de energia.

A dedução das equações apresentadas neste ítem podem ser encontradas em Andrade (1994).

### **b) Análise da Partição Modal de Energia**

A análise da partição de energia total entre os modos verticais foi realizada para os modos horizontais: Rossby, Kelvin, misto Rossby-gravidade, gravidade leste e oeste, e para todos os modos reunidos. As partes vertical e horizontal desta análise são baseadas na documentação NMC Development Division Staff (1988) e Andrade (1994), respectivamente.



O cálculo da energia cinética ( $E_{C_n}$ ), energia potencial disponível ( $E_{P_n}$ ) e energia total ( $E_{T_n}$ ), associado a cada modo vertical  $n$ , são obtidos, na forma adimensional, a partir das seguintes equações:

$$E_{C_n} = \frac{1}{2} (\tilde{u}_n^2 + \tilde{v}_n^2), \quad (3.23)$$

$$E_{P_n} = \frac{1}{2} (\tilde{h}_n^2), \quad (3.24)$$

$$E_{T_n} = E_{C_n} + E_{P_n}, \quad (3.25)$$

As contribuições para a energia total de cada modo vertical é obtida pela expressão:

$$P_n = \frac{E_{C_n} + E_{P_n}}{\sum_{n=0}^N (E_{C_n} + E_{P_n})} \times 100\% \quad (3.26)$$

onde  $N$  é o número total de modos verticais considerados, neste caso, 28 ou 42.

### c) Partição de Energia no Modelo Global do CPTEC

Nesta seção são apresentadas as equações da partição de energia entre os modos verticais e horizontais, utilizadas pelo Modelo Global do CPTEC. A forma discreta das equações do Modelo Global do CPTEC encontram-se no Apêndice A.

#### (i) Modos Verticais

Consideremos a função estrutura vertical  $\Psi_{nk}$  e o autovetor da adjunta  $\Psi_{nk}^T$ , para os modos  $n = 1, \dots, K$  e níveis  $k = 1, \dots, K$ , satisfazendo a seguinte relação de ortonormalidade:

$$\sum_{k=1}^K \Psi_{nk} \Psi_{mk}^T \gamma_m = \delta_{nm}, \quad (3.27)$$

onde  $\gamma_n = \frac{1}{\sum_{k=1}^K \Psi_{nk} \Psi_{nk}^T}$  e  $\delta_{nm}$  é o delta de Kronocker.

A energia cinética para cada nível  $k$  é definida, então, da seguinte forma:

$$E_{C_k} = \frac{1}{2} \mathbf{W}_k \cdot \mathbf{W}_k^T, \quad (3.28)$$

$$\text{com: } \mathbf{W}_k = \sum_{n=1}^K \mathbf{W}_n \Psi_{nk} \quad \text{e} \quad \mathbf{W}_k^T = \sum_{m=1}^K \mathbf{W}_m \Psi_{mk}^T \gamma_m,$$

$$\text{onde: } \mathbf{W}_n = u_n \hat{\mathbf{i}} + v_n \hat{\mathbf{j}}; \quad u_n = \sqrt{gH_n} \tilde{u}_n; \quad \text{e} \quad v_n = \sqrt{gH_n} \tilde{v}_n.$$

As variáveis  $\tilde{u}_n$  e  $\tilde{v}_n$  são as componentes zonal e meridional do vento adimensionalizadas.

De acordo com as definições acima, a equação (3.28) pode ser rescrita como:

$$E_{C_k} = \frac{1}{2} \left[ \sum_{n=1}^K (u_n \hat{\mathbf{i}} + v_n \hat{\mathbf{j}}) \Psi_{nk} \right] \cdot \left[ \sum_{m=1}^K (u_m \hat{\mathbf{i}} + v_m \hat{\mathbf{j}}) \Psi_{mk}^T \gamma_m \right], \quad (3.29)$$

ou seja,

$$E_{C_k} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^K \sum_{m=1}^K g \sqrt{H_n H_m} (\tilde{u}_n \tilde{u}_m + \tilde{v}_n \tilde{v}_m) \Psi_n \Psi_{mk}^T \gamma_m, \quad (3.30)$$

A equação (3.30) acima pode ser decomposta em duas parcelas, uma contendo os termos para o caso em que  $n=m$  e outra, para os termos em que  $n \neq m$ :

$$E_{C_k} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^K gH_n (\tilde{u}_n^2 + \tilde{v}_n^2) \Psi_{nk} \Psi_{nk}^T \gamma_n + \sum_{n=1}^{K-1} \sum_{m=n+1}^K g\sqrt{H_n H_m} (\tilde{u}_n \tilde{u}_m + \tilde{v}_n \tilde{v}_m) \Psi_{nk} \Psi_{mk}^T \gamma_m, \quad (3.31)$$

A equação (3.31) é a equação da energia cinética dos modos verticais para cada nível  $k$ , composta pela soma da energia cinética de todos os modos verticais  $n$  (1o. termo da direita) e pela soma da energia cinética devido às interações entre os diferentes modos verticais (2o. termo da direita).

Aplicando-se o somatório em  $k$  à equação (3.31), temos que a condição de ortonormalidade (3.27) é satisfeita (2o. membro de (3.31) = 0) e obtemos a equação da

energia cinética integrada verticalmente para todos os níveis  $k$   $\left( E_C = \sum_{k=1}^K E_{C_k} \right)$ :

$$E_C = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^K gH_n (\tilde{u}_n^2 + \tilde{v}_n^2) = \sum_{n=1}^K E_{C_n}, \quad (3.32)$$

Analogamente, temos que a energia potencial disponível para cada nível  $k$  pode ser definida como:

$$E_{P_k} = \frac{1}{2} Z_k Z_k^T, \quad (3.33)$$

com:

$$Z_k = \sum_{n=1}^K \frac{gh_n}{\sqrt{gH_n}} \Psi_{nk} \quad \text{e} \quad Z_k^T = \sum_{m=1}^K \frac{gh_m}{\sqrt{gH_m}} \Psi_{mk}^T \gamma_m, \quad (3.34)$$

onde:  $h_n = H_n \tilde{h}_n$  ( $\tilde{h}_n$  é o geopotencial adimensionalizado).

Substituindo (3.34) em (3.33), obtemos:

$$E_{P_k} = \frac{1}{2} \left( \sum_{n=1}^K \frac{g \tilde{h}_n}{\sqrt{g H_n}} \Psi_{nk} \right) \left( \sum_{m=1}^K \frac{g \tilde{h}_m}{\sqrt{g H_m}} \Psi_{mk}^T \gamma_m \right), \quad (3.35)$$

ou

$$E_{P_k} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^K \sum_{m=1}^K \left( g \sqrt{H_n H_m} \tilde{h}_n \tilde{h}_m \Psi_{nk} \Psi_{mk}^T \gamma_m \right), \quad (3.36)$$

A equação (3.36) pode, então, ser decomposta na soma de dois termos, um contendo a soma da energia potencial disponível para todos os modos  $n$  e outro contendo a soma da energia potencial disponível devido à interação entre os diferentes modos verticais.

Assim,

$$E_{P_k} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^K \left( g H_n \tilde{h}_n^2 \right) \Psi_{nk} \Psi_{nk}^T \gamma_n + \sum_{n=1}^{K-1} \sum_{m=n+1}^K \left( g \sqrt{H_n H_m} \tilde{h}_n \tilde{h}_m \right) \Psi_{mk} \Psi_{mk}^T \gamma_m, \quad (3.37)$$

Novamente, aplicando-se o somatório em  $k$  à equação (3.37), temos que a condição de ortonormalidade (3.27) é satisfeita (2o. membro de (3.37) = 0) e obtemos a equação da energia potencial disponível integrada verticalmente para todos os níveis  $k$

$$\left( E_P = \sum_{k=1}^K E_{P_k} \right):$$

$$E_P = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^K \left( g H_n \tilde{h}_n^2 \right) = \sum_{n=1}^K E_{P_n}, \quad (3.38)$$

Somando-se as equações (3.31) e (3.37) obtemos a equação da energia total para os modos verticais em cada nível k:

$$E_{T_k} = \frac{gH_n}{2} \sum_{n=1}^K (\tilde{u}_n^2 + \tilde{v}_n^2 + \tilde{h}_n^2) \Psi_{nk} \Psi_{nk}^T \gamma_n + g\sqrt{H_n H_m} \sum_{n=1}^{K-1} \sum_{m=n+1}^K (\tilde{u}_n \tilde{u}_m + \tilde{v}_n \tilde{v}_m + \tilde{h}_n \tilde{h}_m) \Psi_{nk} \Psi_{mk}^T \gamma_m, \quad (3.39)$$

### (ii) Modos Horizontais

Para os modos horizontais, a energia cinética é definida para cada modo vertical n de acordo com a seguinte equação:

$$E_{C_n} = \frac{gH_n}{2} \mathbf{W}_n \cdot \mathbf{W}_n, \quad (3.40)$$

com:

$$\mathbf{W}_n = \tilde{u}_n \hat{\mathbf{i}} + \tilde{v}_n \hat{\mathbf{j}} = \sum_{r=1}^5 (\tilde{u}_{nr} \hat{\mathbf{i}} + \tilde{v}_{nr} \hat{\mathbf{j}}), \quad (3.41)$$

onde r descreve os seguintes modos horizontais:

- r = 1 → Rossby;
- r = 2 → Kelvin;
- r = 3 → Misto;
- r = 4 → Gravidade Oeste; e
- r = 5 → Gravidade Leste.

Desta forma, das equações (3.40) e (3.41) obtemos:

$$E_{C_n} = \frac{gH_n}{2} \left[ \sum_{r=1}^5 (\tilde{u}_{nr} \hat{i} + \tilde{v}_{nr} \hat{j}) \right] \cdot \left[ \sum_{s=1}^5 (\tilde{u}_{ns} \hat{i} + \tilde{v}_{ns} \hat{j}) \right], \quad (3.42)$$

ou

$$E_{C_n} = \frac{gH_n}{2} \sum_{r=1}^5 \sum_{s=1}^5 (\tilde{u}_{nr} \tilde{u}_{ns} + \tilde{v}_{nr} \tilde{v}_{ns}), \quad (3.43)$$

A equação (3.43) pode, então, ser decomposta em dois termos, um contendo a soma da energia cinética de todos os modos horizontais  $r$ , para cada nível  $n$ , e outro contendo a soma da energia cinética resultante da interação entre os modos horizontais, para cada nível  $n$ :

$$E_{C_n} = \frac{gH_n}{2} \left[ \sum_{r=1}^5 (\tilde{u}_{nr}^2 + \tilde{v}_{nr}^2) + \sum_{r=1}^4 \sum_{s=r+1}^5 (\tilde{u}_{nr} \tilde{u}_{ns} + \tilde{v}_{nr} \tilde{v}_{ns}) \right] \quad (3.44)$$

A equação da energia potencial disponível para os modos horizontais é obtida de forma análoga à dedução anterior. Neste caso, temos:

$$E_{P_n} = \frac{gH_n}{2} \tilde{h}_n^2, \quad (3.45)$$

$$\text{com } \tilde{h}_n = \sum_{r=1}^5 \tilde{h}_{nr}$$

Segue então que:

$$E_{P_n} = \frac{gH_n}{2} \sum_{r=1}^5 \sum_{s=1}^5 (\tilde{h}_{nr} \tilde{h}_{ns}), \quad (3.46)$$

ou

$$E_{P_n} = \frac{gH_n}{2} \left[ \sum_{r=1}^5 (\tilde{h}_{nr}^2) + \sum_{r=1}^4 \sum_{s=r+1}^5 (\tilde{h}_{nr} \tilde{h}_{ns}) \right], \quad (3.47)$$

Somando-se as equações (3.44) e (3.47) obtemos a equação da energia total dos modos horizontais para cada modo vertical n:

$$E_{T_n} = \frac{gH_n}{2} \left[ \sum_{r=1}^5 (\tilde{u}_{nr}^2 + \tilde{v}_{nr}^2 + \tilde{h}_{nr}^2) + \sum_{r=1}^4 \sum_{s=r+1}^5 (\tilde{u}_{nr} \tilde{u}_{ns} + \tilde{v}_{nr} \tilde{v}_{ns} + \tilde{h}_{nr} \tilde{h}_{ns}) \right], \quad (3.48)$$

Considerando a integral sobre a esfera, o segundo termo da equação (3.48) anula-se e a equação da energia total torna-se:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{T_n} &= \frac{1}{4\pi a^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} E_{T_n} a^2 \cos \varphi d\varphi d\lambda = \\ &= \frac{gH_n}{2} \sum_{r=1}^5 \frac{1}{4\pi a^2} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (\tilde{u}_{nr}^2 + \tilde{v}_{nr}^2 + \tilde{h}_{nr}^2) a^2 \cos \varphi d\varphi d\lambda = \sum_{r=1}^5 \bar{E}_{T_{nr}} \end{aligned}, \quad (3.49)$$

### (iii) Equações da Conservação de Energia

As equações da geração de energia cinética e energia potencial disponível, bem como a equação de tendência da energia total, utilizadas para obter as fontes e sumidouros de energia por resíduo, podem ser expressas, respectivamente, por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (E_{C_n}) + \frac{\vartheta_n}{\cos \varphi} \left( \tilde{u}_n \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial \lambda} + (\tilde{v}_n \cos \varphi) \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial \varphi} \right) = \tilde{u}_n \tilde{R}_n^u + \tilde{v}_n \tilde{R}_n^v, \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (E_{P_n}) + \frac{\vartheta_n}{\cos \varphi} \tilde{h}_n \left( \frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial \lambda} + \frac{\partial (\tilde{v}_n \cos \varphi)}{\partial \varphi} \right) = \tilde{h}_n \tilde{R}_n^h, \quad (3.51)$$

A tendência de energia total pode ser expressa pela soma das equações anteriores, resultando em:

$$\frac{\partial}{\partial t} (E_{T_n}) + \frac{\vartheta_n}{\cos \varphi} \left( \frac{\partial(\tilde{h}_n \tilde{u}_n)}{\partial \lambda} + \frac{\partial(\tilde{h}_n \tilde{v}_n \cos \varphi)}{\partial \varphi} \right) = \tilde{u}_n \tilde{R}_n^u + \tilde{v}_n \tilde{R}_n^v + \tilde{h}_n \tilde{R}_n^h, \quad (3.52)$$

onde os termos do membro direito da equação (3.52) indicam a contribuição total dos termos não lineares e forçantes na evolução temporal da energia cinética zonal, energia cinética meridional e energia potencial disponível. Os coeficientes de interação não linear são calculados numericamente. As soluções analíticas destes coeficientes são apresentadas no apêndice C de Andrade (1994).

Ao se integrar globalmente a equação (3.52), o segundo termo do lado esquerdo se anula (é um divergente) e, na ausência de fontes e sumidouros, a energia total é conservada.

### 3.2.2 Episódios Selecionados

De acordo com a disponibilidade das análises do NCEP para as três resoluções, T062L28, T126L28 e T170L42 e a descrição do boletim Climanálise (2001a, b e c, 2002), foram selecionados 7 episódios de ZCAS para a realização deste estudo, ocorridos nos seguintes períodos:

- Fevereiro/2002: 4 a 7 (Episódio 1) e 16 a 24 (Episódio 2);
- Dezembro/2001: 17 a 21 (Episódio 3) e 24 a 28 (Episódio 4);
- Novembro/2001: 2 a 6 (Episódio 5) e 16 a 21 (Episódio 6);
- Janeiro/2001: 1 a 4 (Episódio 7).

As imagens de satélite apresentadas na Figura 3.2, mostram a temperatura de brilho média para as pêncladas referentes aos períodos (ou parte dos períodos) de atuação da ZCAS e indicam o posicionamento da banda de nebulosidade associada a cada um dos episódios selecionados.



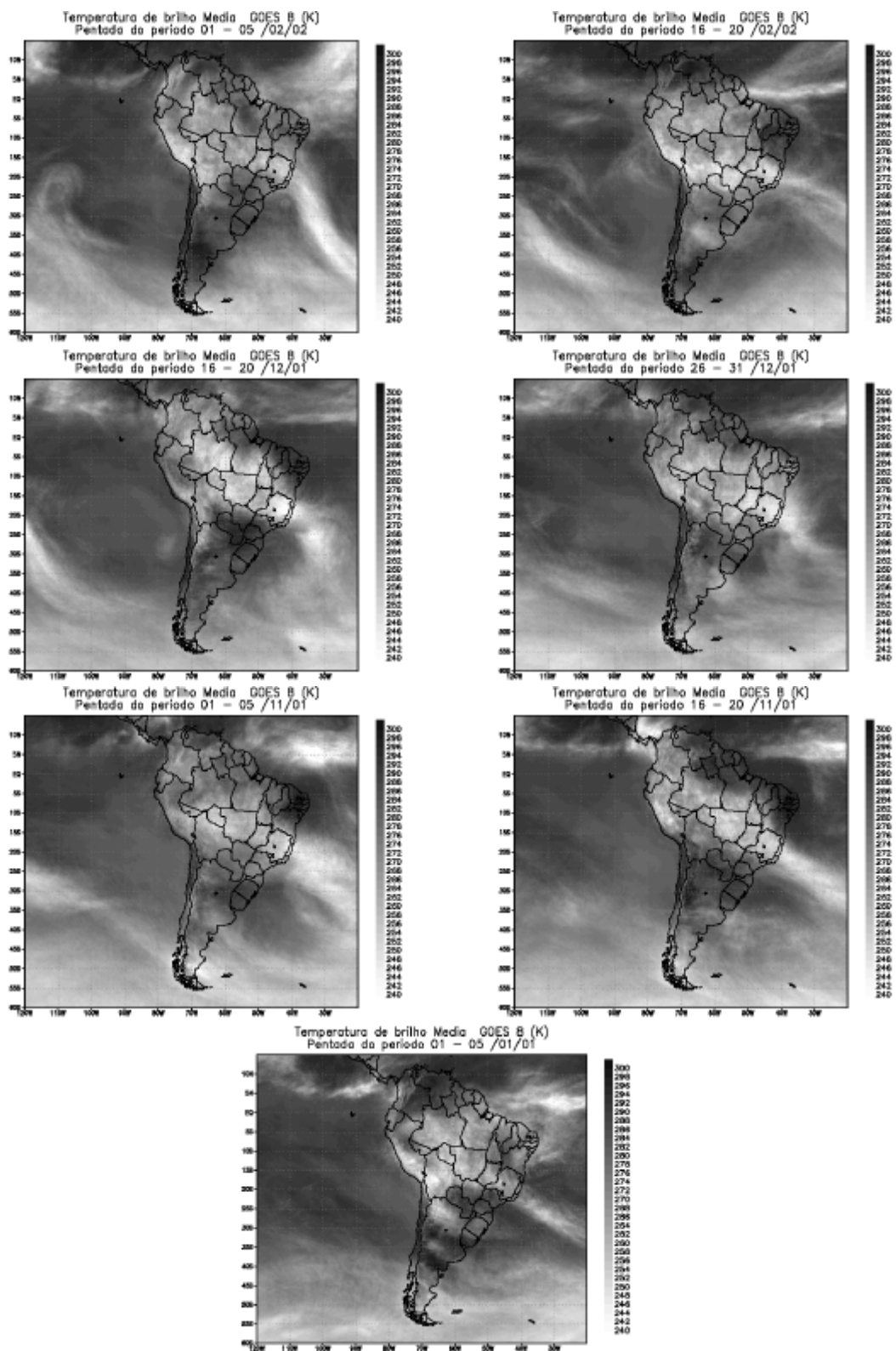


FIGURA 3.2 – Temperatura de Brilho Média para pêntricas referentes aos episódios de ZCAS selecionados.  
 FONTE: Metop/CPTEC/INPE.

### 3.2.3 Experimentos: Parte Observacional e Modelagem

Como o propósito deste trabalho consiste em estudar a partição modal de energia, verificando-se a influência da resolução das análises, dos modelos e da parametrização de convecção profunda, foram realizados doze experimentos (TABELA 3.1), sendo três destes, experimentos de controle.

TABELA 3.1- Descrição dos Experimentos: Parte Observacional e Modelagem.

<b>Experimentos</b>	<b>Resolução</b>	<b>Esquema de Convecção</b>
Controle 1 (EXC1) Controle 2 (EXC2) Controle 3 (EXC3)	Análise NCEP T062L28 Análise NCEP T126L28 Análise NCEP T170L42	Sem Convecção
Experimento 4 (EXP4) Experimento 5 (EXP5) Experimento 6 (EXP6)	Modelo T062L28 Modelo T126L28 Modelo T170L42	KUO
Experimento 7 (EXP7) Experimento 8 (EXP8) Experimento 9 (EXP9)	Modelo T062L28 Modelo T126L28 Modelo T170L42	RAS
Experimento 10 (EXP10) Experimento 11 (EXP11) Experimento 12 (EXP12)	Modelo T062L28 Modelo T126L28 Modelo T170L42	GRELL

Os três primeiros experimentos referem-se à parte observacional deste estudo, e consistem em analisar a partição e trocas de energia entre os modos normais verticais e horizontais a partir das análises do NCEP. Os padrões obtidos a partir desta análise são utilizados para comparação com os resultados do modelo (Experimentos 4-12). Para a parte de modelagem, além das diferentes resoluções, são avaliados os efeitos de três esquemas de convecção profunda: KUO e Relaxed Arakawa-Schubert (RAS), que são, respectivamente, os esquemas operacional e opcional do Modelo Global do CPTEC, e GRELL, que é uma versão de pesquisa (Figuroa, 2003 - Comunicação Pessoal). As

parametrizações destes esquemas estão descritas, respectivamente, em: Kuo (1965) e Anthes (1977), Moorthi e Suarez (1992) e Grell et al. (1994).

O estudo baseia-se no cálculo diário da partição de energia entre os modos normais verticais e horizontais, para cada episódio descrito na seção 3.2.2. Para cada episódio, foi considerado um intervalo de aproximadamente 10 dias, iniciando/terminando 2 a 3 dias antes/depois do período de atuação da ZCAS e efetuadas as rodadas do Modelo Global do CPTEC, conforme os experimentos descritos anteriormente. No caso dos EXC1-3 (parte observacional), considerou-se as análises do NCEP das 12Z para as datas selecionadas, enquanto nos EXP4-12 (parte de modelagem), considerou-se as previsões de 24 horas válidas para as datas selecionadas (seção 3.2.2).

A avaliação dos resultados, apresentada no Capítulo 4 a seguir, foi dividida basicamente em quatro etapas:

- 1) Análise do espectro de energia potencial disponível, energia cinética e porcentagem de energia em função dos modos verticais e variação temporal deste espectro em cada episódio de ZCAS;
- 2) análise dos campos de porcentagem de energia total em função das categorias de modos verticais obtidos do item 1 acima;
- 3) identificação das fontes e sumidouros de energia em função das categorias de modos verticais.
- 4) análise da partição de energia total (%) dos modos horizontais e das interações entre os pares de modos horizontais em função das categorias de modos verticais;
- 5) análise da interação de energia total (%) entre os modos verticais em diferentes níveis de pressão.

As etapas (1) e (3) da avaliação é aplicada apenas para os experimentos de controle. No caso das etapas (2)-(5), os resultados são apresentados para um composto dos episódios de ZCAS, considerando apenas os dias em que estes eventos estiveram efetivamente atuando.

### 3.2.4 Composição dos Episódios de ZCAS

Uma análise visual da Figura 3.2 indica que, em todos os episódios, a banda de nebulosidade associada a ZCAS esteve atuando praticamente sobre os mesmos estados brasileiros. Assim, a fim de apresentar os resultados de forma compacta, destacando-se as informações sobre a região de interesse deste estudo, obteve-se um composto para o conjunto de episódios de ZCAS selecionados (seção 3.2.2). O cálculo do composto de ZCAS é baseado na média aritmética dos 7 episódios de ZCAS, considerando-se as Análises e Previsões de 24 horas válidas para o período de atuação destes eventos. A técnica empregada para a composição dos eventos de ZCAS pode ser descrita, resumidamente, nos seguintes passos:

- 1) Obteve-se os campos médios (média no tempo),  $\mathbf{c}_n = \sum_{k=1}^K \frac{\mathbf{c}_{nk}}{K}$ , para cada episódio de ZCAS ( $n = 1, \dots, 7$ ), onde  $\mathbf{c}_{nk}$  representa o campo de vento, a ser composto, referente ao dia  $k$  ( $k=1, \dots, K$ ) e  $K$  o número de dias em que o episódio  $n$  esteve atuando;
- 2) calculou-se a média aritmética dos campos médios para os 7 episódios de ZCAS  $\mathbf{c} = \sum_{n=1}^7 \frac{\mathbf{c}_n}{7}$ , obtidos em (1).
- 3)  $\mathbf{c}$  representa, desta forma, um campo composto (daqui em diante, referenciado como composto de ZCAS).

Esta técnica de composição foi empregada considerando-se a semi-estacionariedade dos fenômenos de ZCAS, o que possibilitou o cálculo da média temporal em (i).

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISE DA PARTIÇÃO DE ENERGIA ENTRE OS MODOS VERTICAIS E HORIZONTAIS: RESULTADOS OBSERVACIONAIS E DE MODELAGEM

Este Capítulo apresenta uma discussão sobre a partição e interação de energia entre os modos verticais e horizontais para os episódios de ZCAS selecionados, e o impacto das resoluções da análise e do Modelo Global do CPTEC, e diferentes parametrizações de convecção profunda na energética modal.

#### 4.1 – Partição De Energia Entre Os Modos Verticais

A estrutura atmosférica vertical em termos de modos normais é dependente do modelo (Silva Dias e Bonatti, 1986). As Figuras 4.1 e 4.2 mostram as auto-funções e as profundidades equivalentes (autovalores) para uma atmosfera padrão de 28 e 42 camadas, respectivamente. Os modos externos para os modelos de 28 e 42 níveis ( $H_1=9805\text{m}$  e  $H_1=9820\text{m}$ ), representados, respectivamente, nos painéis (a) das Figuras 4.1 e 4.2, apresentam estrutura vertical quase independente da altura e é referido como modo barotrópico equivalente. As estruturas verticais dos modos internos tornam-se mais complicadas e confinadas aos níveis mais baixos, para  $n > 14$  (não apresentados). Estes modos são referidos como modos baroclínicos.

Em acordo com o trabalho de Silva Dias e Bonatti (1986), destaca-se o modo  $n=5$ , com alturas equivalentes de 284m e 342m, respectivamente para 28 e 42 níveis, que apresentam máximos em torno de 800 e 200 hPa, e um zero em torno de 400 hPa. Este modo detém a maior parte da energia nos trópicos, principalmente próximo à regiões de intensa atividade convectiva. O modo externo ( $H_1=9805\text{m}$  e  $H_1=9820\text{m}$ ) é dominante na região do cinturão de altas pressões.

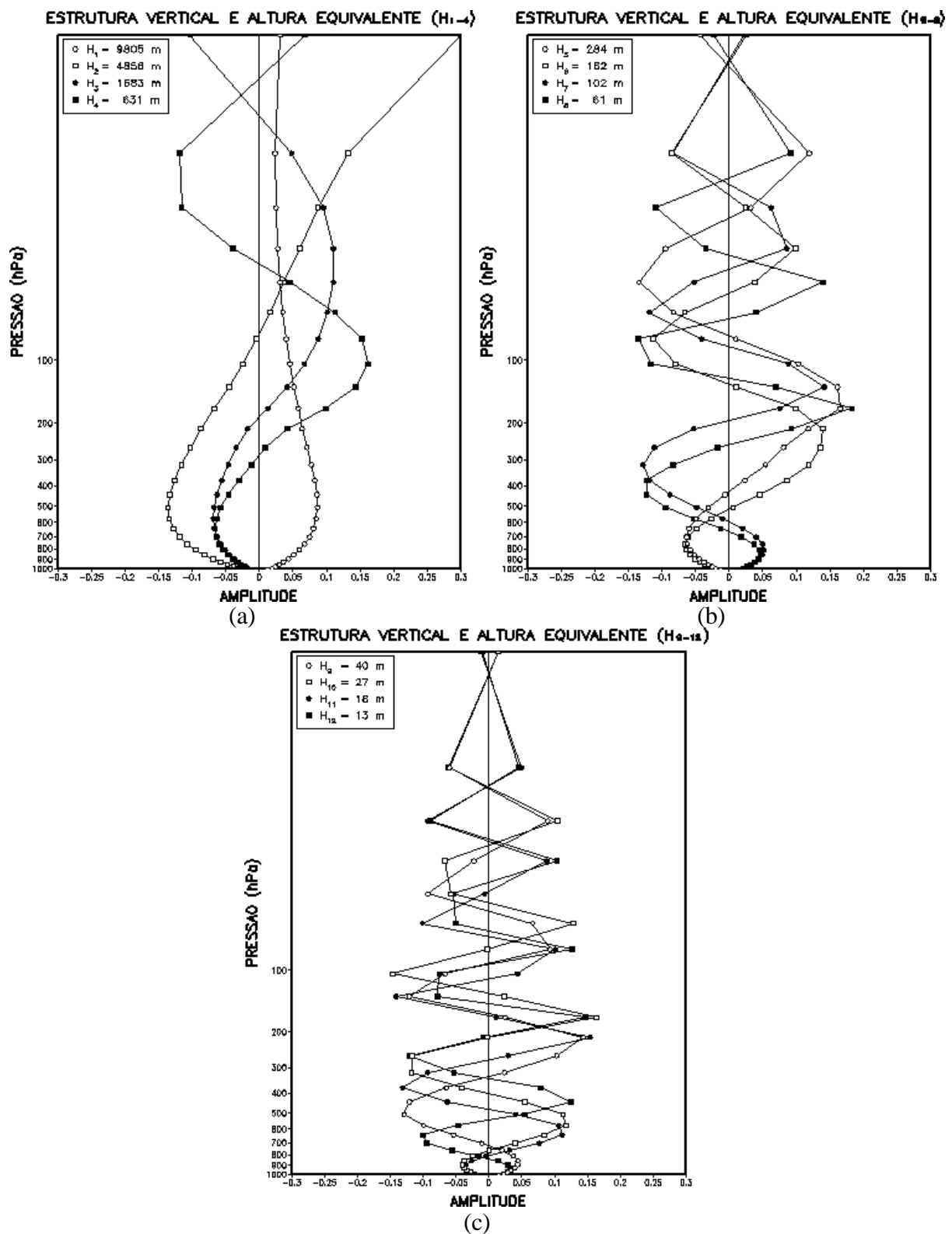


FIGURA 4.1 – Estrutura Vertical e Altura Equivalente (m) dos 12 primeiros modos verticais, para o modelo de 28 níveis: (a) Modos 1-4; (b) Modos 5-8 e (c) Modos 9-12.

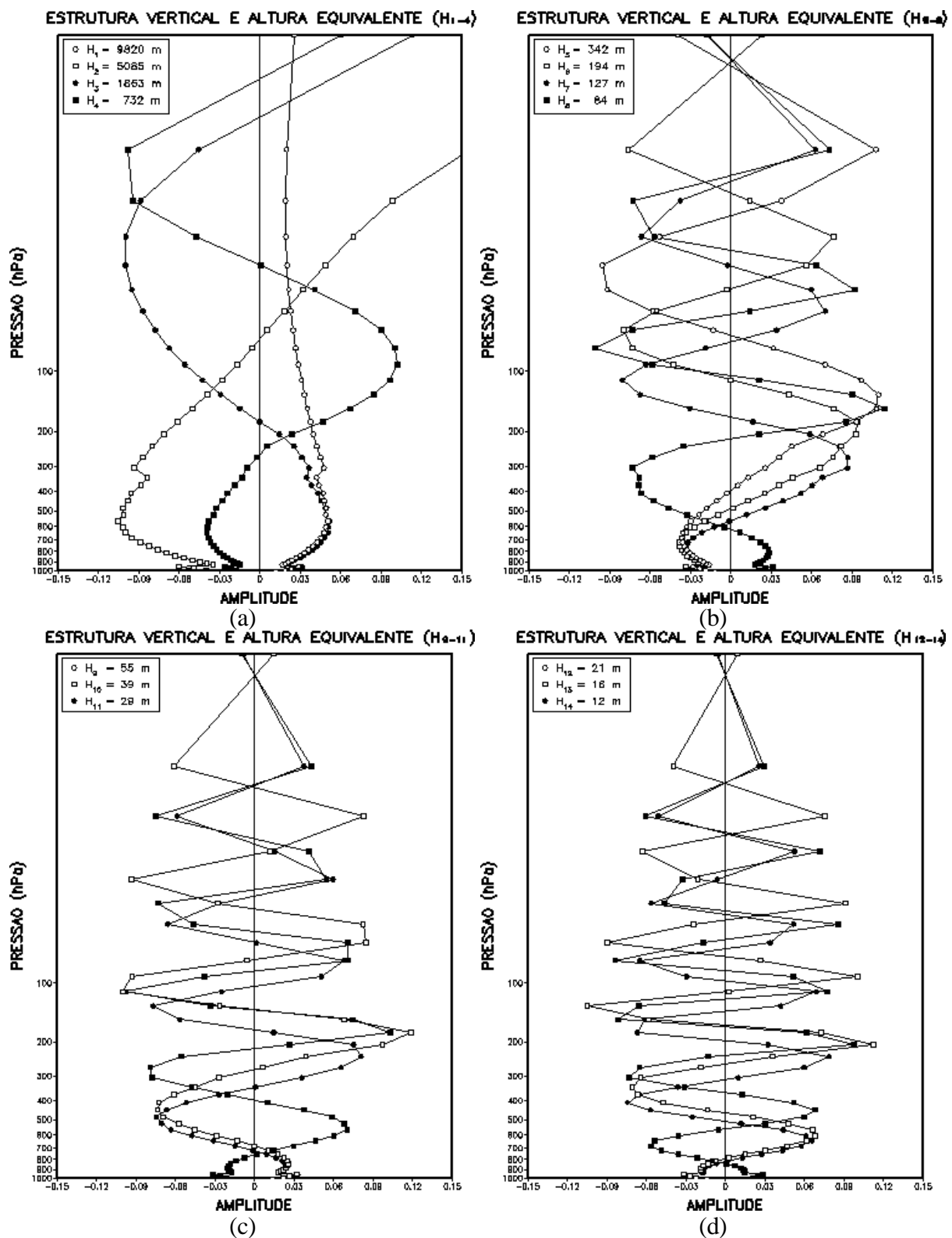


FIGURA 4.2 – Estrutura Vertical e Altura Equivalente (m) dos 14 primeiros modos verticais, para o modelo de 42 níveis: (a) Modos 1-4; (b) Modos 5-8, (c) Modos 9-11 e (d) 12-14.

A partir da técnica de composição descrita na seção 3.2.4, foi selecionada uma área sobre a América do Sul, indicada pelo retângulo na Figura 4.3, que representa a região média de atuação do composto de ZCAS, definida a partir do campo composto de vento horizontal em 850 hPa, considerando-se a área de confluência dos ventos associada a ZCAS. O segmento AB na Figura 4.3 indica o eixo médio da confluência em 850 hPa, que coincide com a banda de nebulosidade associada ao composto de ZCAS, considerado como referência nas seções verticais apresentadas nesta seção.

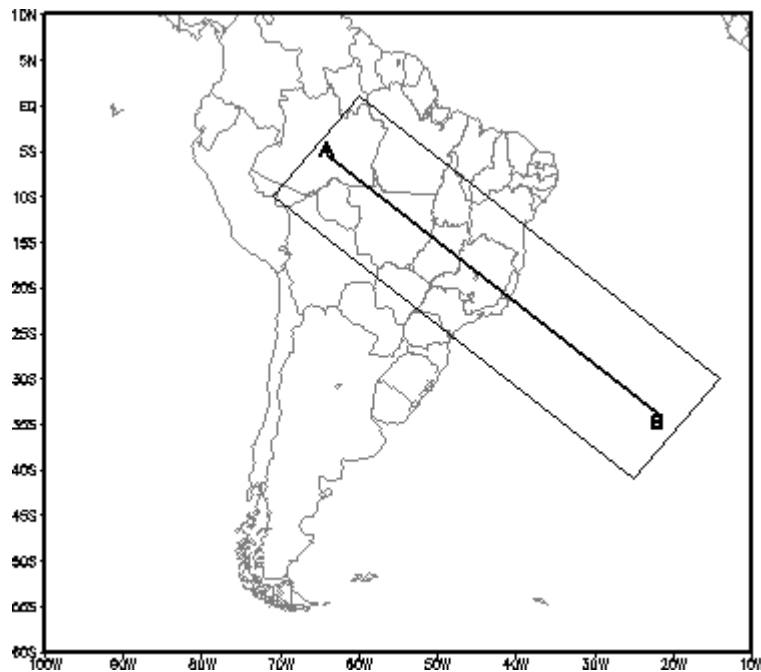


FIGURA 4.3 – Região média de atuação do composto de ZCAS, definida para a partição modal vertical de energia sobre a América do Sul.

Uma análise dos resultados obtidos para as resoluções T062L28 (não apresentados) e T126L28 mostrou que os padrões encontrados são bastante semelhantes entre si, o que sugere que os impactos do aumento de resolução horizontal de aproximadamente 200 km para 100 km não são tão significativos quanto aqueles devido ao aumento na resolução vertical, de 28 para 42 níveis. Desta forma, serão apresentados nesta seção e nas seções subsequentes, apenas os resultados para as resoluções T126L28 e T170L42.



A porcentagem de energia total (definida pela equação 3.26) para uma secção vertical ao longo da posição média do composto de ZCAS (segmento AB, indicado na Figura 4.3) é apresentada na Figura 4.4. Observa-se que, em ambas as resoluções, os modos internos 4 a 7 com alturas equivalentes entre 600 e 100 m são os que apresentam maior concentração de energia. Um máximo secundário de energia é verificado para os três primeiros modos verticais (n=1-3), com o modelo de alta resolução (T170L42) indicando valores ligeiramente mais altos. Desta forma, a maior concentração de energia ao longo da secção vertical da ZCAS ocorre nos 7 primeiros modos verticais, como pode ser visto mais detalhadamente na Figura 4.5. Além disso, nota-se uma maior dominância dos modos mais externos (1 a 3) sobre o oceano em latitudes médias, e dos modos mais internos (4 a 7) sobre o continente, na região tropical.

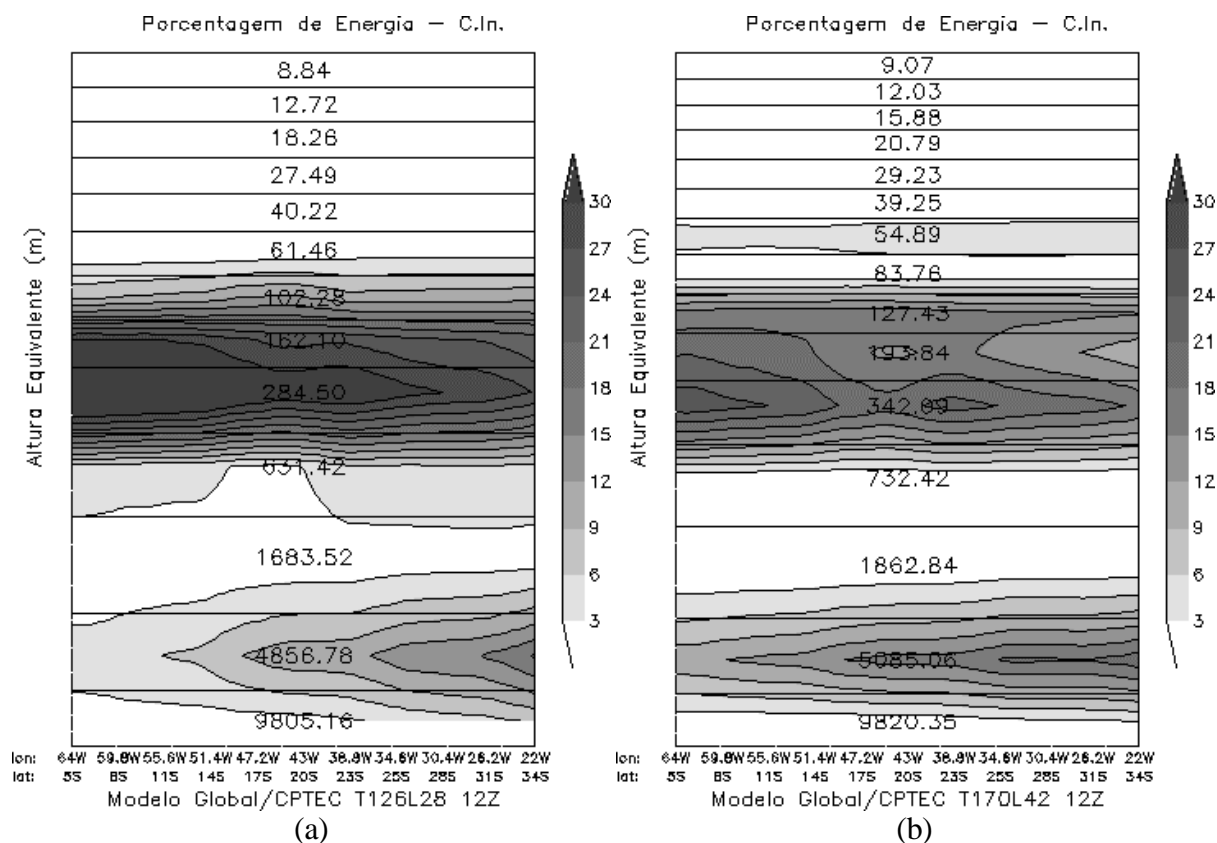


FIGURA 4.4– Porcentagem de energia total (sombreado) e altura equivalente (metros, valores indicados sobre as linhas horizontais), secção vertical ao longo da posição média da ZCAS (segmento AB, Fig. 4.3), Análise NCEP 12Z: (a) T126L28 e (b) T170L42.

A Figura 4.5 mostra a partição de energia do modelo nas formas cinética ( $EC_n$ ) e energia potencial ( $EP_n$ ), bem como a contribuição percentual de energia total em função dos modos verticais (profundidade equivalente), média na área indicada na Figura 4.3. Novamente, é possível notar que a partição vertical de energia está concentrada no modo interno  $n = 5$  ( $H_5 = 284\text{m}; 342\text{m}$ ). Um máximo secundário de energia no segundo modo vertical, com altura equivalente  $H_2$  em torno de  $4856\text{m}$  e  $5085\text{m}$ , respectivamente para 28 e 42 níveis, pode ser também observado. Além disso, nota-se que a energia cinética parece ser, em grande parte, representada pelos modos verticais de ordem menor ( $n=1$  a 3), enquanto que a energia potencial no modo externo é mínima, com um pico acentuado no quinto modo, o qual determina a dominância na distribuição da porcentagem. Estes resultados estão de acordo com os trabalhos de Kasahara e Puri (1981), Silva Dias e Bonatti (1985, 1986), exceto que o máximo secundário de energia foi verificado para o modo externo (barotrópico), o que pode ser explicado pelas diferenças nos modelos e cenários meteorológicos utilizados nos estudos, uma vez que esta metodologia empregando modos normais é dependente do modelo.

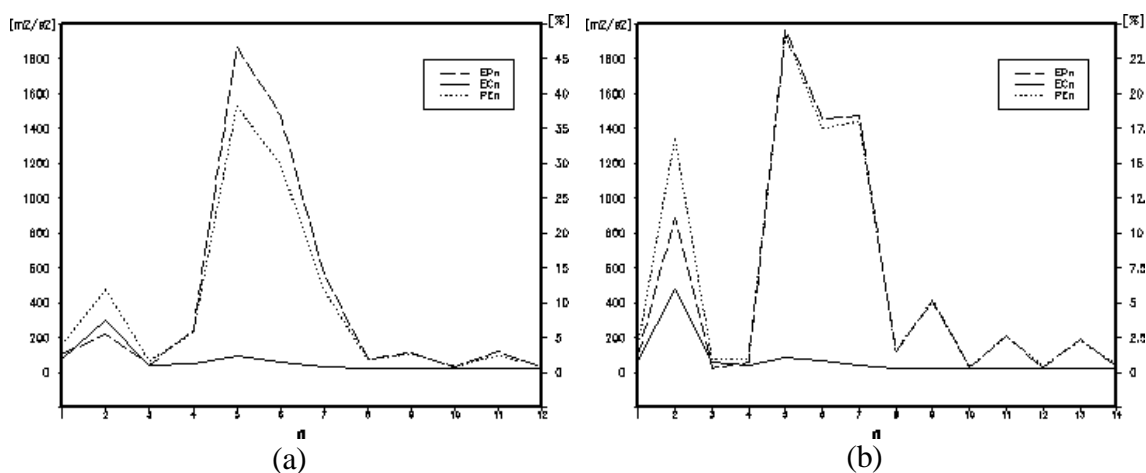


FIGURA 4.5 – Energia Cinética ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) -  $EC_n$ , Energia Potencial Disponível ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) -  $EP_n$  e Porcentagem de Energia Total -  $PE_n$  (linhas sólida, tracejada e pontilhada, respectivamente) em função do modo vertical  $n$ , para a região ilustrada na Figura 4.3, Análise NCEP: (a) T126L28 e (b) T170L42.

Considerando a partição vertical de energia indicada nas Figuras 4.4-4.5, os modos verticais foram divididos em três categorias para a análise dos próximos resultados, baseando-se em uma extensão dos resultados Silva Dias e Bonatti (1986):

- Categoria I (n=1 a 3): modos verticais com altura equivalente acima de 600m;
- Categoria II (n=4 a 7): modos com alturas entre 100 e 600m;
- Categoria III (n=8 a 12 (14), para 28 (42) níveis): modos com alturas entre 10 e 100m.

De acordo com a Figura 4.4, as categorias acima foram definidas levando-se em conta os modos verticais com alturas superiores a 10 m, o que é representado pelos 12 (14) primeiros modos para um modelo com 28 (42) níveis. A primeira categoria é considerada como a categoria do modo externo e dos dois primeiros modos internos, desde que os zeros das estruturas verticais para n=1 a 3 só aparecem em altos níveis (Figuras 4.1a e 4.2a). As categorias II e III representam as categorias de modos internos.

Os campos de porcentagem de energia total para as Análises do NCEP, T126L28 e T170L42, são apresentados na Figura 4.6, de acordo com a classificação das categorias I, II e III. Os padrões observados nos painéis (a) a (f) são bastante semelhantes para ambas as resoluções, notando-se apenas algumas diferenças quantitativas. Os valores apresentados pela Análise T170L42 são ligeiramente inferiores àqueles da Análise T126L28 para as categorias I e II; o inverso é observado para a categoria III, ressaltando o impacto do aumento da resolução vertical, de 28 para 42 níveis.

No caso da categoria I, nota-se que a energia dos modos verticais 1 a 3 é mais significativa em latitudes mais altas (valores em torno de 50-60%), diminuindo em direção ao equador, o que pode estar associado à influência do jato subtropical nesta faixa de latitude, uma vez que este pode ser descrito por ondas de Rossby longas. Os modos 4 a 7 (categoria II) apresentam valores maiores de energia em grande parte da faixa central da América do Sul e próximo ao equador, incluindo a região de atuação da ZCAS. Nota-se que estes núcleos de alta porcentagem de energia (cerca de 60%) estão

situados em regiões convectivamente ativas e estão em concordância com o posicionamento da banda de nebulosidade associado a ZCAS (Figura 4.10). A categoria III mostra um padrão similar àquele da categoria I, embora com porcentagens menores de energia.

Nas Figuras 4.7-4.9 são apresentados os campos de porcentagem de energia para os experimentos de modelagem, utilizando os esquemas de convecção KUO, RAS e GRELL. Em geral, os resultados são, quantitativa e qualitativamente, bastante semelhantes aos dos experimentos de controle, para ambas as resoluções. O modelo com esquema GRELL apresenta uma melhor definição dos padrões espaciais observados, especialmente na região da ZCAS. Entretanto, o comportamento do modelo com os três esquemas de convecção profunda não apresentou diferenças significativas, com todos os esquemas simulando satisfatoriamente o padrão e os núcleos de máxima porcentagem de energia, e indicando resultados similares entre si. Isto sugere que, para estes experimentos, o esquema de convecção utilizado no modelo não tem grandes impactos na energética modal. Impactos maiores são observados quando considerado o aumento da resolução vertical.

A comparação dos resultados das Figuras 4.6-4.9 com os campos de precipitação total apresentados na Figura 4.10 indica que os núcleos de máxima porcentagem de energia estão em concordância com as áreas convectivamente ativas e com máximos de precipitação, especialmente para os modos verticais da categoria II. Os modos verticais 4 e 5 são aqueles mais excitados pelo aquecimento convectivo, na região tropical (Puri, 1983). Destaca-se ainda da Figura 4.10, que o Modelo Global do CPTEC T170L42 utilizando o esquema Grell apresenta uma melhor previsão do campo de precipitação, especialmente sobre o continente.

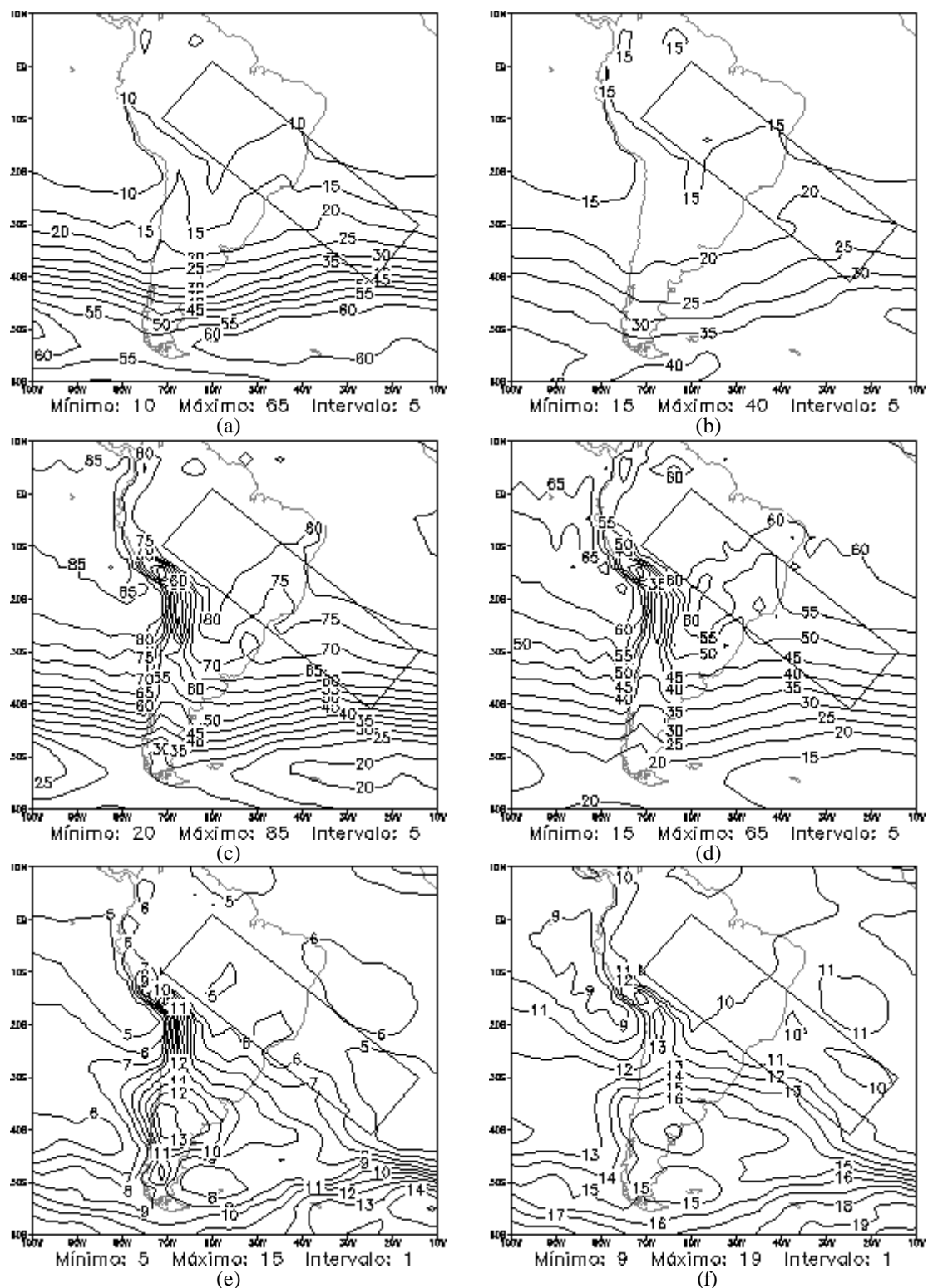


FIGURA 4.6 – Energia Total (%), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42).

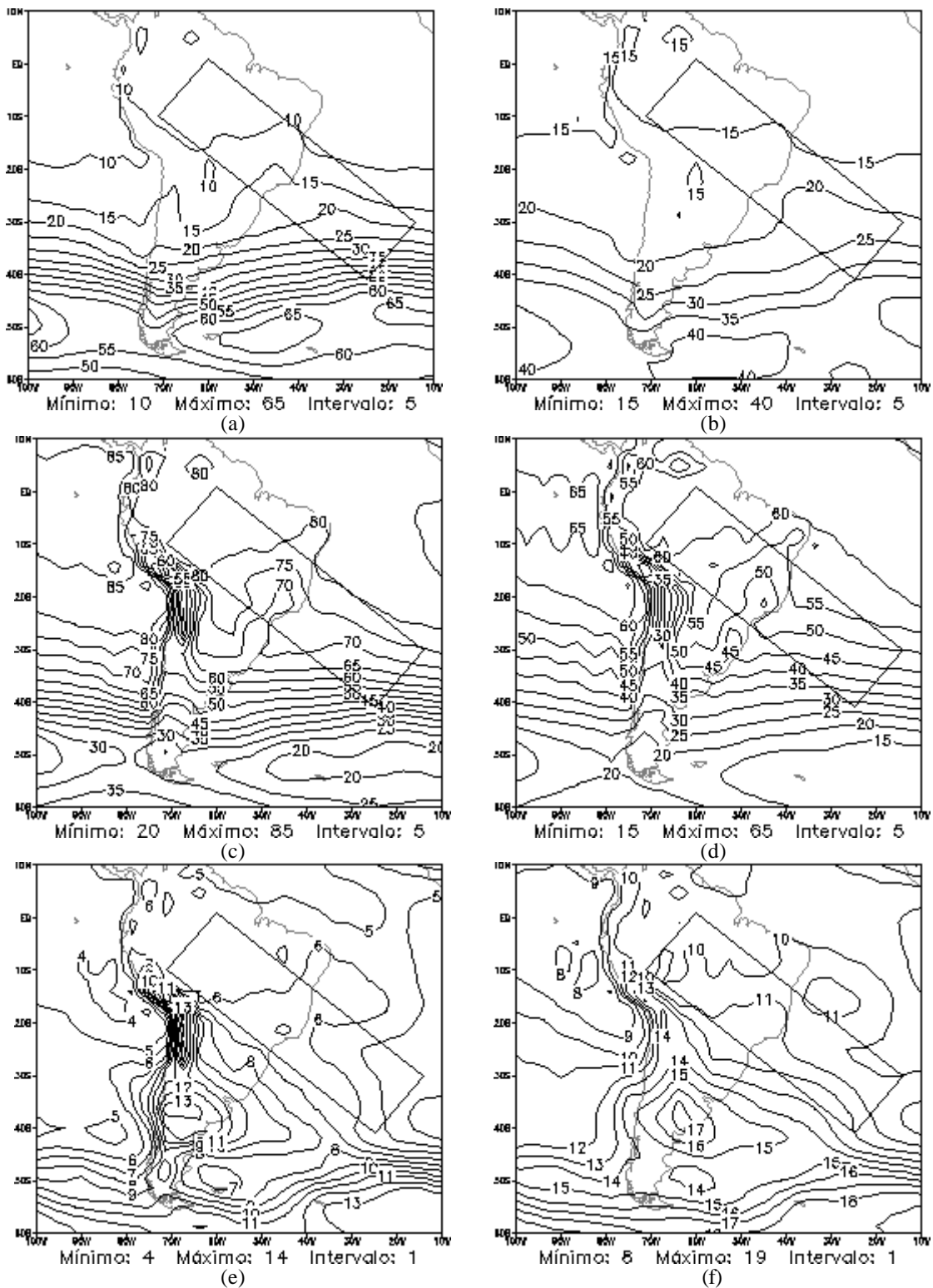


FIGURA 4.7 – Energia Total (%), Modelo Global do CPTEC – KUO, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42).

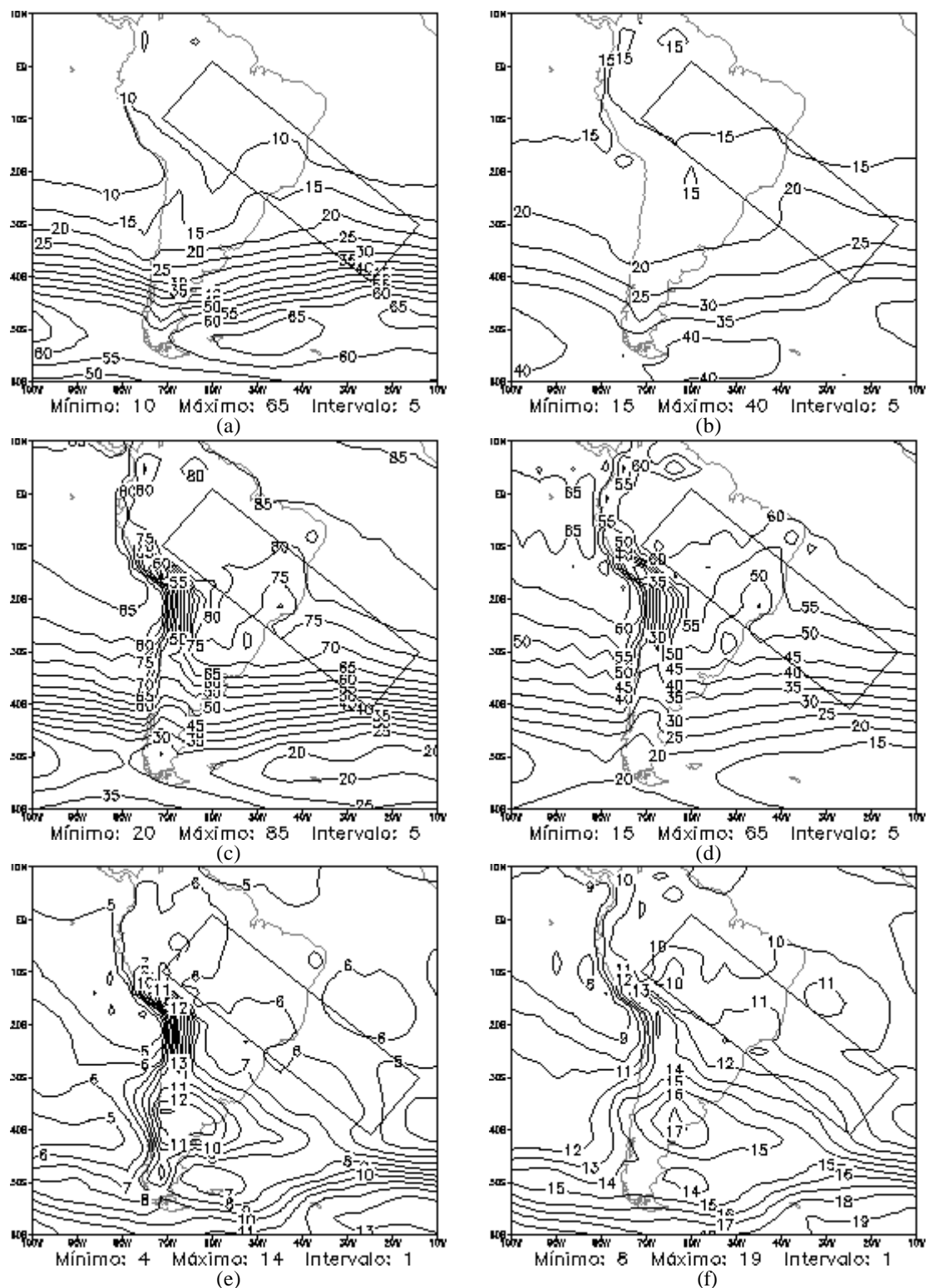


FIGURA 4.8 – Energia Total (%), Modelo Global do CPTEC – RAS, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42).

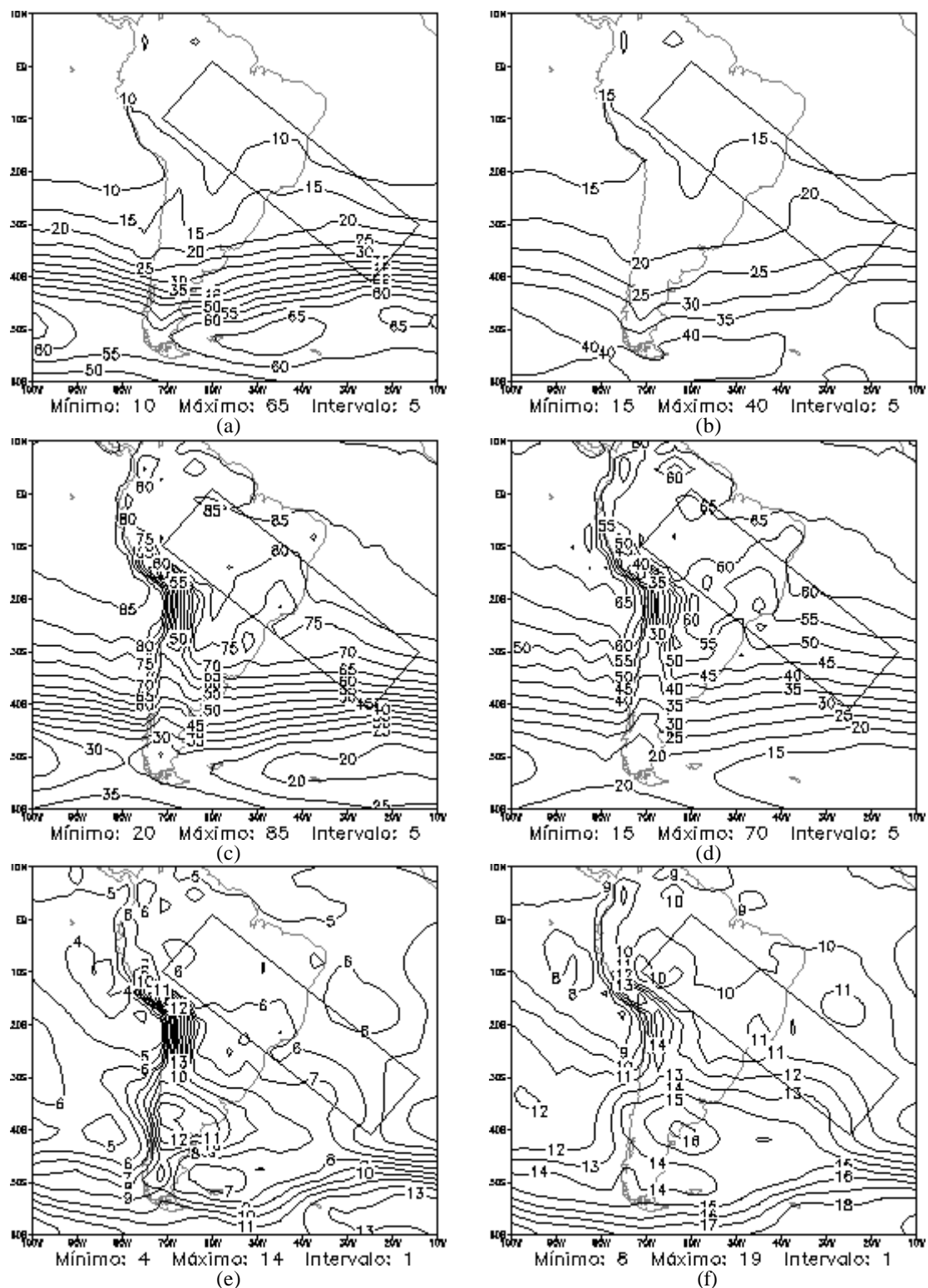


FIGURA 4.9 – Energia Total (%), Modelo Global do CPTEC – GRELL, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42).



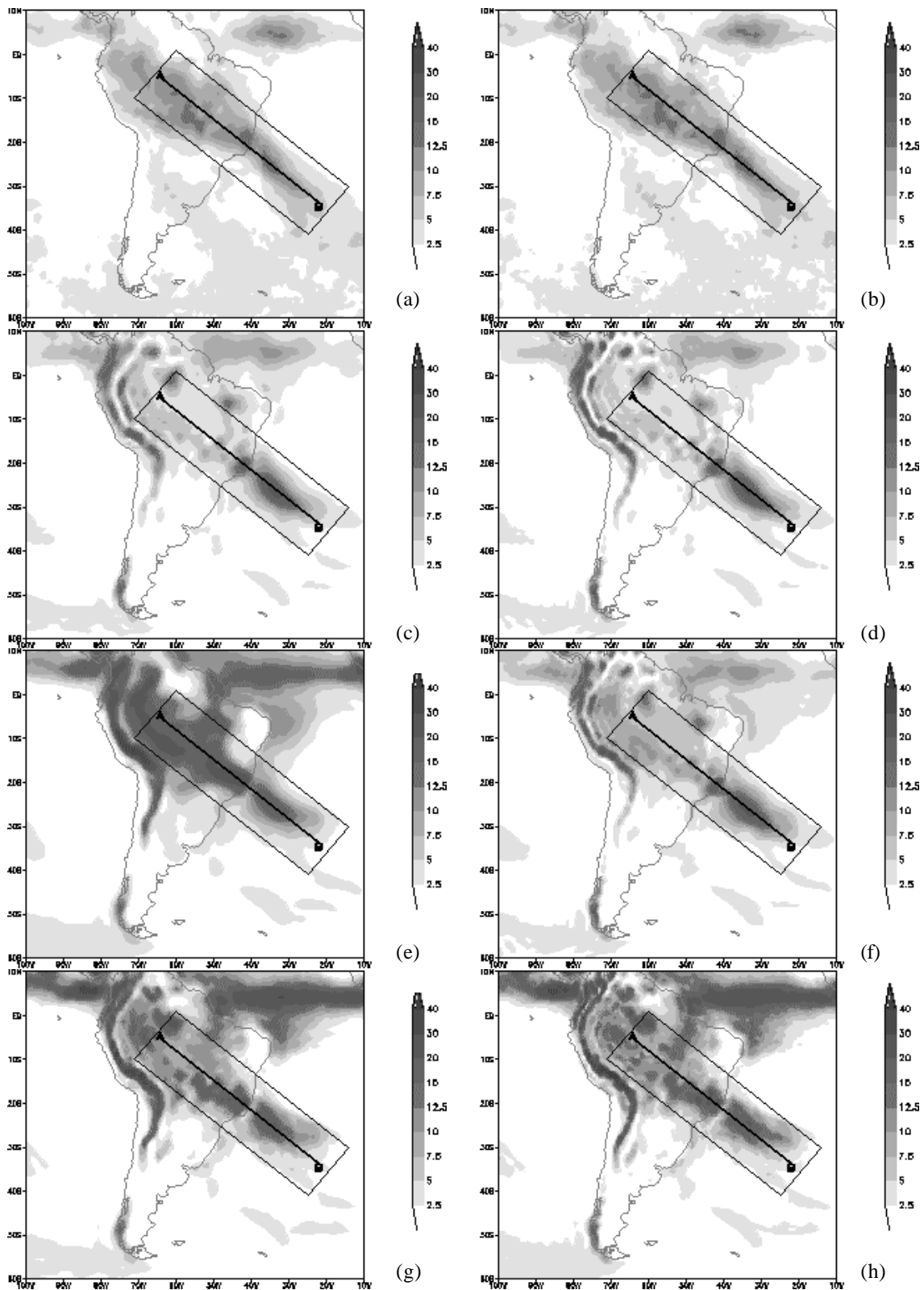


FIGURA 4.10 – Precipitação Total (mm/dia), para o composto de ZCAS: (a) e (b) dados GPCP, (c)-(h) MCGA CPTEC – Kuo, Ras e Grell respectivamente, para as resoluções T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita).

Nas Figuras 4.11 a seguir são apresentados os perfis verticais das fontes de calor para o composto de ZCAS para as resoluções T126L28 e T170L42 das Análises do NCEP e do Modelo Global do CPTEC, com os esquemas KUO, RAS e GRELL, considerando a média na área das regiões da América do Sul (painéis a e b) e do composto de ZCAS, conforme Figura 4.3 (painéis c e d). As fontes e sumidouros de calor foram obtidas a partir do resíduo da equação de balanço termodinâmico, expressa por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T + \omega \frac{\partial T}{\partial p} + \frac{\omega}{c_p} \frac{\partial \phi}{\partial p} = \frac{J}{c_p} \quad (4.1)$$

A      B      C      D      E

onde os termos A a E representam, respectivamente, a tendência local de temperatura T, a advecção horizontal de temperatura, a advecção vertical de temperatura, a advecção de espessura e a taxa de aquecimento/resfriamento diabático (resíduo).

Para os perfis verticais da fonte de calor médios na região da América do Sul para as resoluções T126L28 e T170L42, respectivamente, nota-se valores relativamente pequenos de fontes e sumidouros de calor e que, em geral, os modelos tendem a subestimar as fontes e sumidouros obtidos para as Análises, principalmente entre os níveis de 700 e 250 hPa. Nos painéis 4.11 (c) e (d), os perfis verticais da fonte de calor, para a região do composto de ZCAS indica fontes de calor mais intensas, entretanto o MCGA-CPTEC, com os esquemas KUO, RAS e GRELL, mantém as subestimativas dos valores obtidos nas Análises T126L28 e T170L42 para os níveis entre 700 e 250 hPa. Em ambos os casos, embora o comportamento do modelo seja similar em relação aos três esquemas de convecção, os perfis verticais da fonte de calor obtido como o esquema GRELL é o que mais se aproxima daquele das Análises, principalmente para a resolução T170L42.

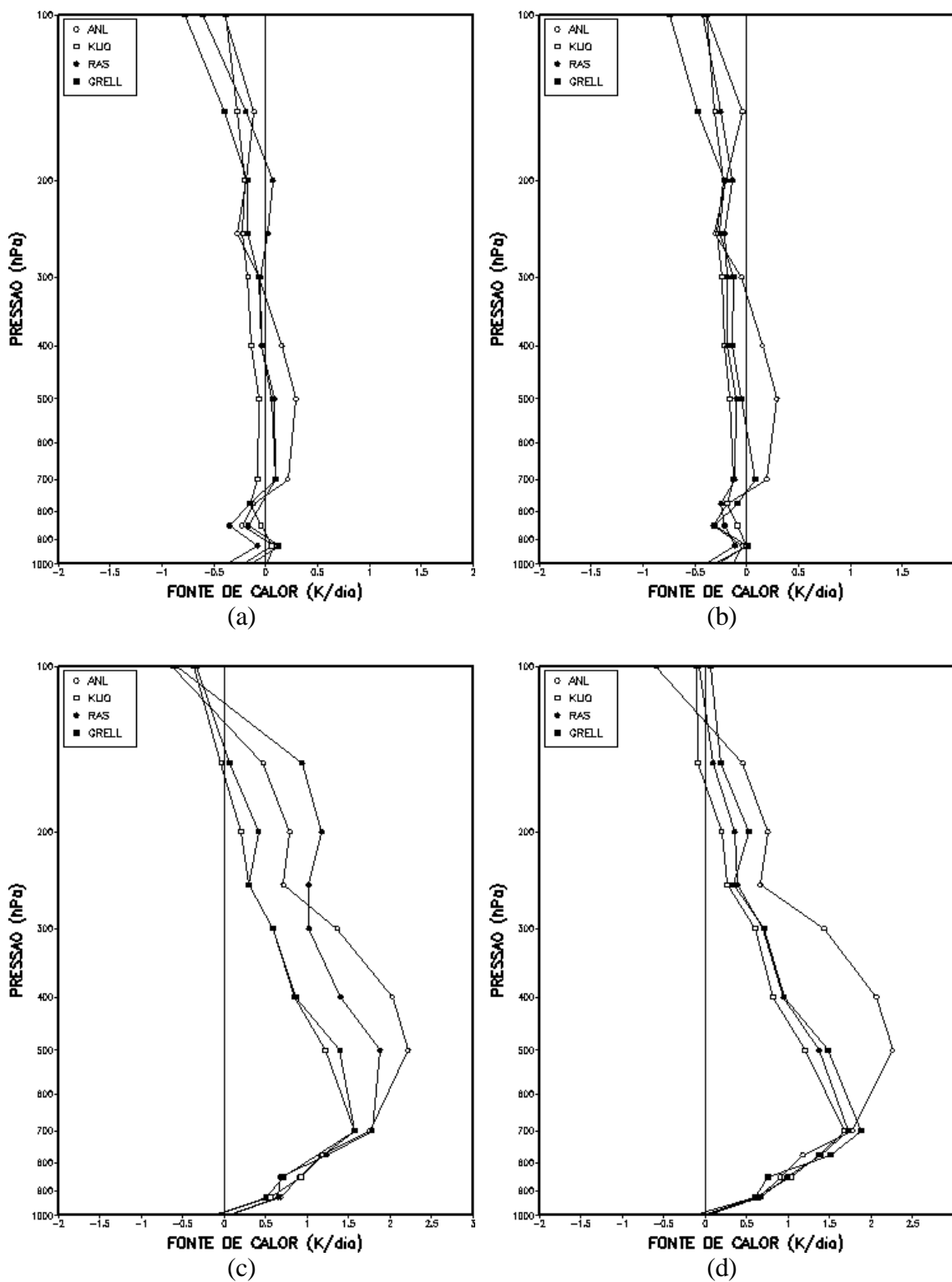


FIGURA 4.11- Perfil vertical da fonte de calor (K/dia) para o composto de ZCAS, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), respectivamente: (a) e (b) América do Sul; (c) e (d) Composto ZCAS (Fig. 4.3). Na legenda, ANL representa a Análise e KUO, RAS e GRELL os esquemas de convecção.

De acordo com os perfis verticais mostrados anteriormente, as fontes de calor mais intensas estão localizadas entre os níveis de 700 e 150 hPa, calculou-se então, as fontes e sumidouros de calor para o composto de episódios de ZCAS mediados na vertical entre estes níveis, cujos campos são ilustrados nas Figuras 4.12 e 4.13.

Para as Análises T126L28 e T170L42 (Figura 4.12 a,b), observa-se fontes de calor (com núcleos da ordem de 6 K/dia) sobre as regiões convectivas, ZCAS e ZCIT, e sumidouros de calor sobre a região dos Andes. Em ambas as resoluções, os padrões observados não apresentam diferenças significativas.

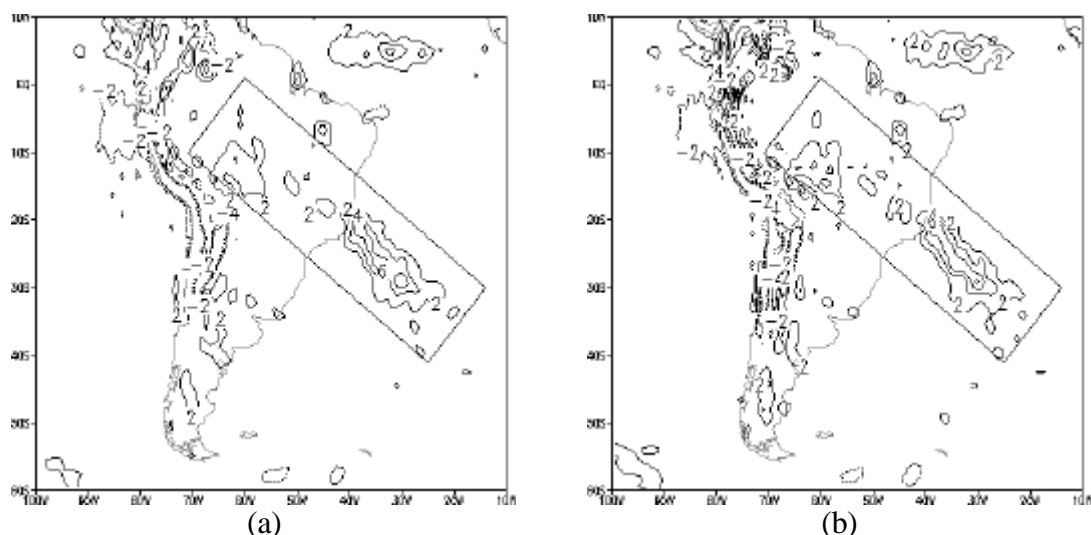


FIGURA 4.12- Fontes e sumidouros de calor (K/dia) para o composto de ZCAS, média entre os níveis 1000 hPa e 150 hPa, Análises NCEP: (a) T126L28 e (b) T170L42.

Na Figura 4.13 são ilustradas as fontes e sumidouros de calor previstas pelo MCGA-CPTEC, utilizando os esquemas de convecção profunda Kuo, RAS e GRELL. Em geral, o padrão das fontes e sumidouros de calor são bem previstas pelo modelo global para os três esquemas de convecção profunda, entretanto, nota-se que há subestimativa da intensidade das fontes de calor, especialmente sobre a parte oceânica do composto de ZCAS e sobre a ZCIT e superestimativa de alguns núcleos de fontes e sumidouros de calor sobre o continente Sul-Americano.

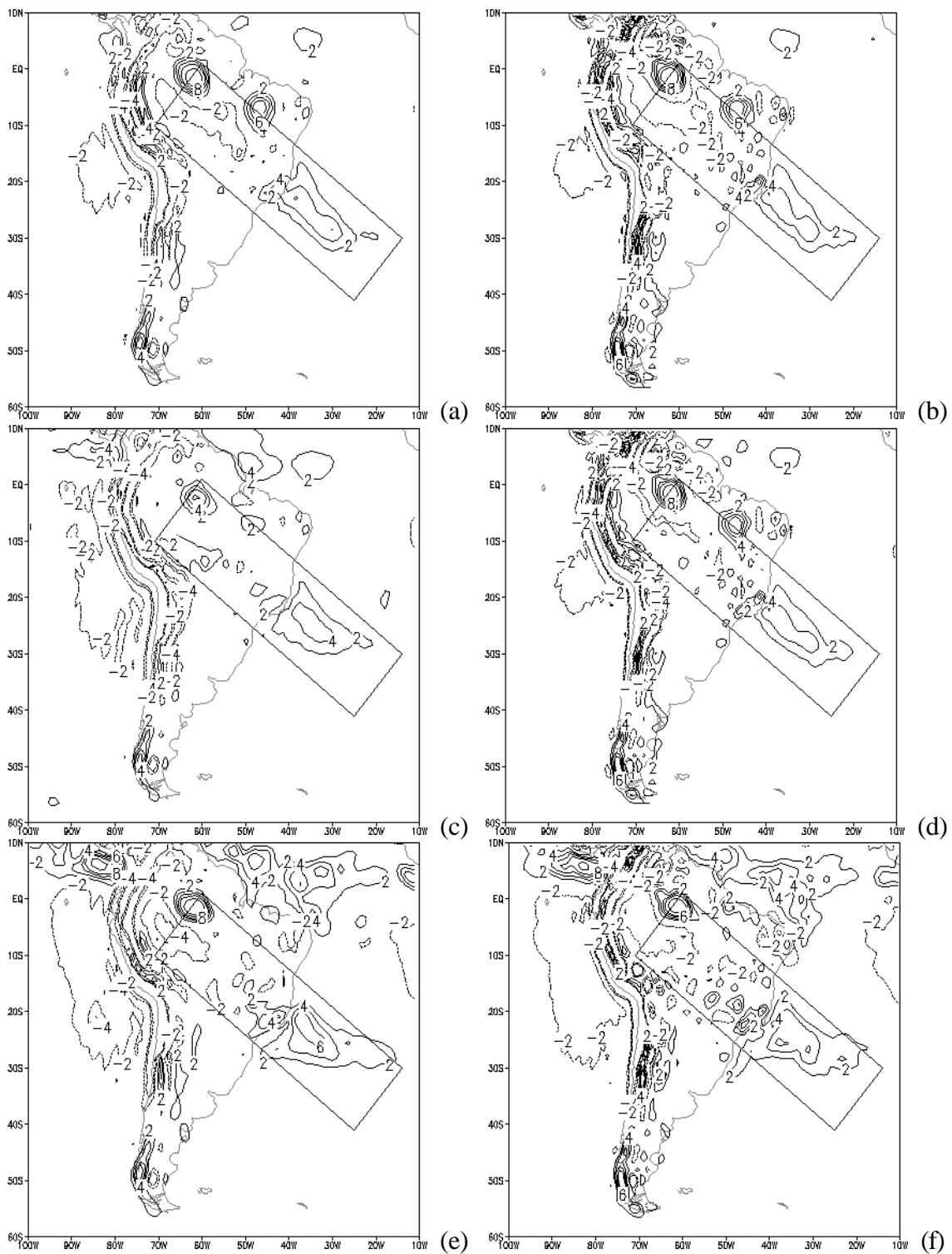


FIGURA 4.13- Fontes e sumidouros de calor (K/dia) para o composto de ZCAS, média entre os níveis 1000 hPa e 150 hPa, previsão de 24 horas, Modelo CPTec -T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), respectivamente: (a) e (b) KUO, (c) e (d) RAS, (e) e (f) GRELL.

As fontes e sumidouros de energia total para o composto de ZCAS em cada uma das categorias de modos verticais, bem como para a soma dos 12 e 14 primeiros modos verticais das Análises T126L28 e T170L42, respectivamente, são representadas na Figura 4.14. Em geral, observa-se, em todas as categorias, que a Análise T170L42 tende a apresentar fontes e sumidouros de energia total relativamente mais intensas em relação às daquelas da Análise T126L28, principalmente para as categorias I e III, o que está associado ao fato do modelo com 42 níveis verticais apresentar uma discretização vertical com maior detalhamento para os modos verticais 1 a 3 e 8 a 14.

Para a categoria I (Figura 4.14a,b), observa-se pequenas fontes e sumidouros de energia sobre a Cordilheira dos Andes, indicando que o efeito orográfico é o que basicamente determina as fontes e sumidouros de energia para os modos verticais 1 a 3, uma vez que a pressão à superfície é considerada na decomposição dos modos verticais e sua variação (“efeito  $p_s$ ”) é refletida nos modos mais externos; sobre a região da ZCAS, nota-se um pequeno núcleo de sumidouro de energia, mas não relevante, quando comparado com aqueles sobre os Andes. Na categoria II (modos verticais 4 a 7), nota-se fontes de energia total bem definidas na região da ZCAS e da ZCIT, regiões convectivamente ativas; e sumidouros de energia na região dos vórtices ciclônicos de altos níveis, no Nordeste brasileiro, e sobre a Cordilheira dos Andes. Nos painéis (e) e (f), as fontes e sumidouros de energia para os modos verticais 8 a 12 (14, para T170L42) apresentam um padrão semelhante àquele verificado na categoria II, porém com núcleos menos intensos. Este mesmo padrão também pode ser observado nos painéis (g) e (h), quando consideramos as fontes e sumidouros de energia total para a soma dos 12 e 14 primeiros modos verticais dos modelos com 28 e 42 níveis verticais, respectivamente.

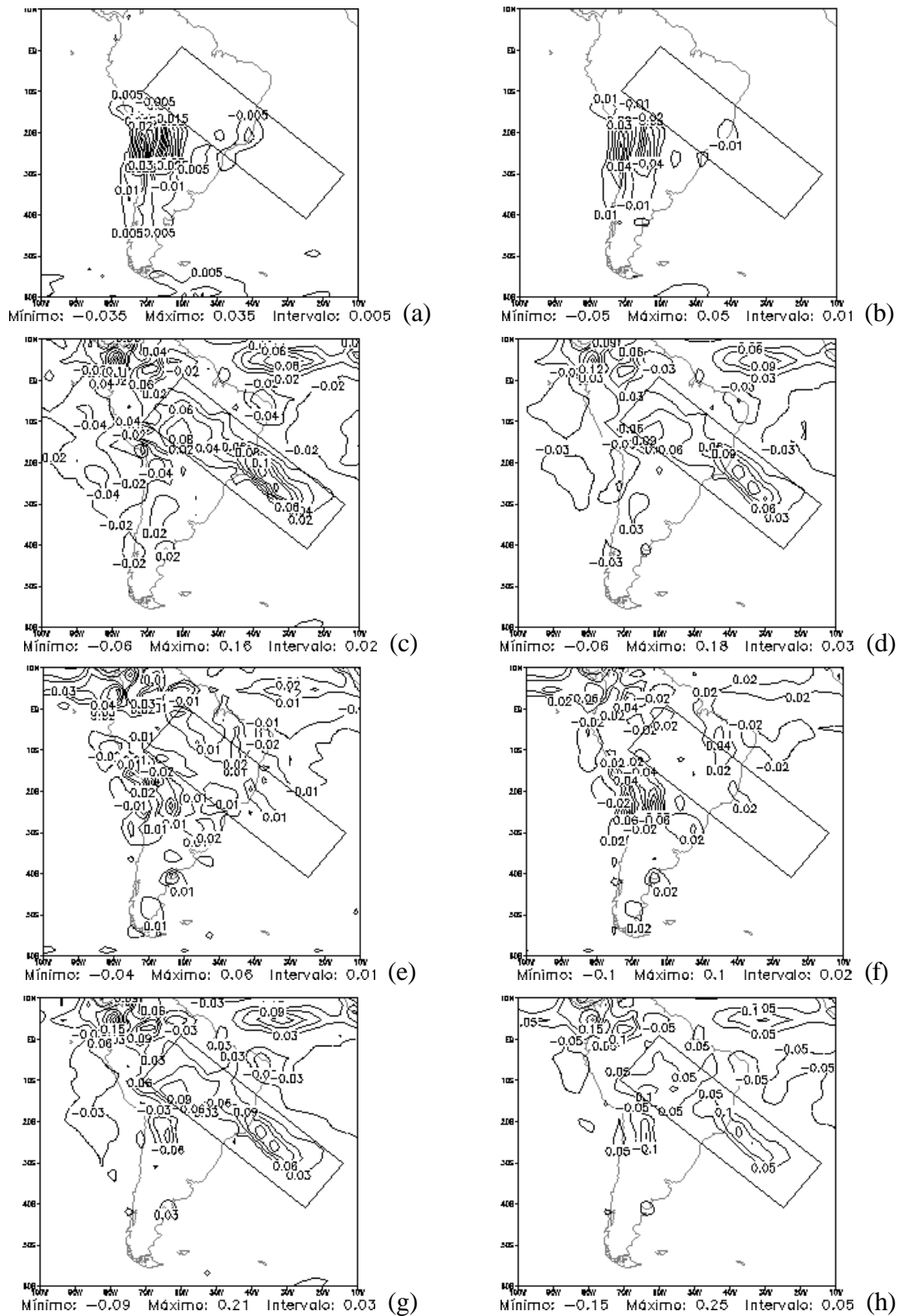


FIGURA 4.14 - Fontes e Sumidouros de Energia Total, Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), para os modos verticais: (a) e (b) 1 a 3; (c) e (d) 4 a 7; (e) e (f) 8 a 12 (14, para 42 níveis); e (g) e (h) 1 a 12 (14).

Uma breve análise da variação diária da partição vertical de energia para cada episódio de ZCAS deste estudo é apresentada nas Figuras 4.15 e 4.16, a fim de investigar algum efeito transiente na partição de energia entre os modos verticais e a atividade convectiva associada a ZCAS.

Em todos os episódios, observa-se que, em ambos os modelos T126L28 e T170L42, a energia cinética apresenta-se maior que a energia potencial disponível para os modos 1 a 3, sendo o inverso observado nas categorias II e III (modos 4-7 e 8-12). Há um aumento significativo nos valores de energia cinética para a categoria III do modelo com 42 níveis, o que reflete o impacto do aumento da resolução vertical do modelo. De acordo com Andrade (1994), para utilizar uma decomposição em modos normais com 9 modos verticais é necessário que o modelo tenha 32 níveis, o que indica que a discretização vertical do modelo de 42 níveis representa melhor a distribuição de energia nos níveis atmosféricos. Nota-se ainda que, cerca de 60% da energia está concentrada nos modos internos 4-7, sendo que a energia cinética é da ordem de  $10^{-1}$  menor do que a energia potencial disponível. Em geral, verifica-se que há simultaneidade no decréscimo de  $EP_n$  e aumento de  $EC_n$ , o que deve estar associado à processos de instabilidade baroclínica úmida, comuns na região em estudo. Além disso, os aumentos de  $EP_n$  correspondem aos períodos convectivamente ativos sobre a região, provavelmente devido ao efeito da liberação de calor latente.

Alguns padrões comuns que podem ser inferidos a partir da análise da variação diária da energética dos episódios estudados e utilizados como possíveis ferramentas para monitoramento da configuração e dissipação de um evento de ZCAS são sintetizados a seguir:

- um aumento de energia cinética e diminuição da energia potencial disponível 1 a 2 dias antes do período de atuação da ZCAS;
- um aumento da energia potencial disponível a partir do primeiro dia de configuração da ZCAS;



- um decréscimo da energia potencial disponível durante a dissipação da ZCAS.

É importante salientar que para episódios subseqüentes, estas características mostram-se variantes, o que pode estar relacionado à presença de resíduos de episódios anteriores ou outros padrões de circulação atmosférica que exercem influência na região da ZCAS. Experimentos com um maior número de episódios e utilizando técnicas mais detalhadas para a classificação de eventos de ZCAS, como as apresentadas por Carvalho et al. (2004) são interessantes e devem ser considerados para o estabelecimento de ferramentas que auxiliem os grupos que trabalham com previsão de tempo, no monitoramento operacional destes eventos.

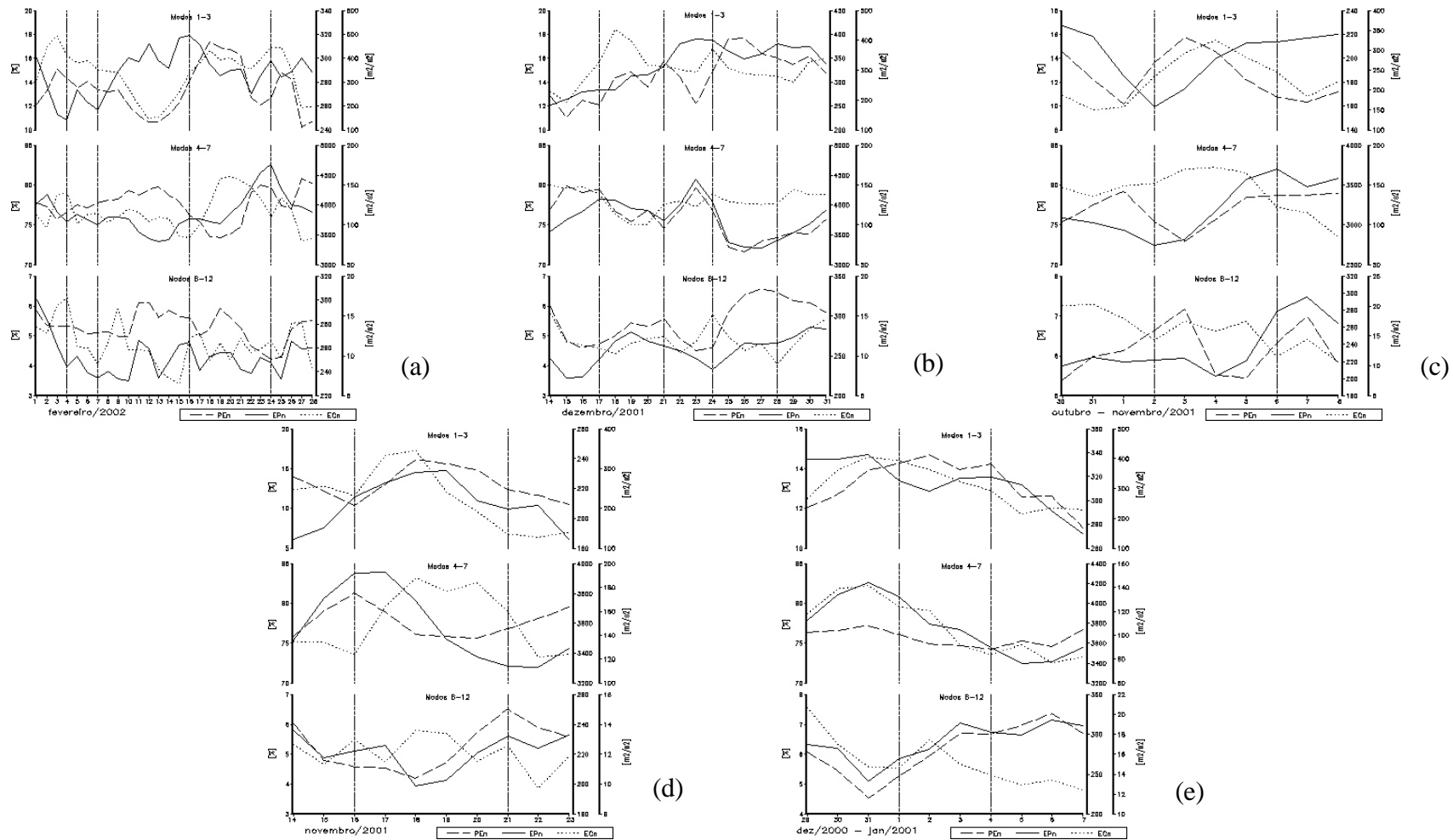


FIGURA 4.15 – Variação temporal da energética dos modos verticais 1-3, 4-7 e 8-12 na região da ZCAS, Análise NCEP T126L28, para os Episódios: (a) 1-2; (b) 3-4; (c) 5; (d) 6; e (e) 7. Os eixos no lado direito dos gráficos representam as energias potencial disponível (EP<sub>n</sub>) e cinética (EK<sub>n</sub>), respectivamente. As linhas verticais tracejadas indicam o período de atuação da ZCAS.

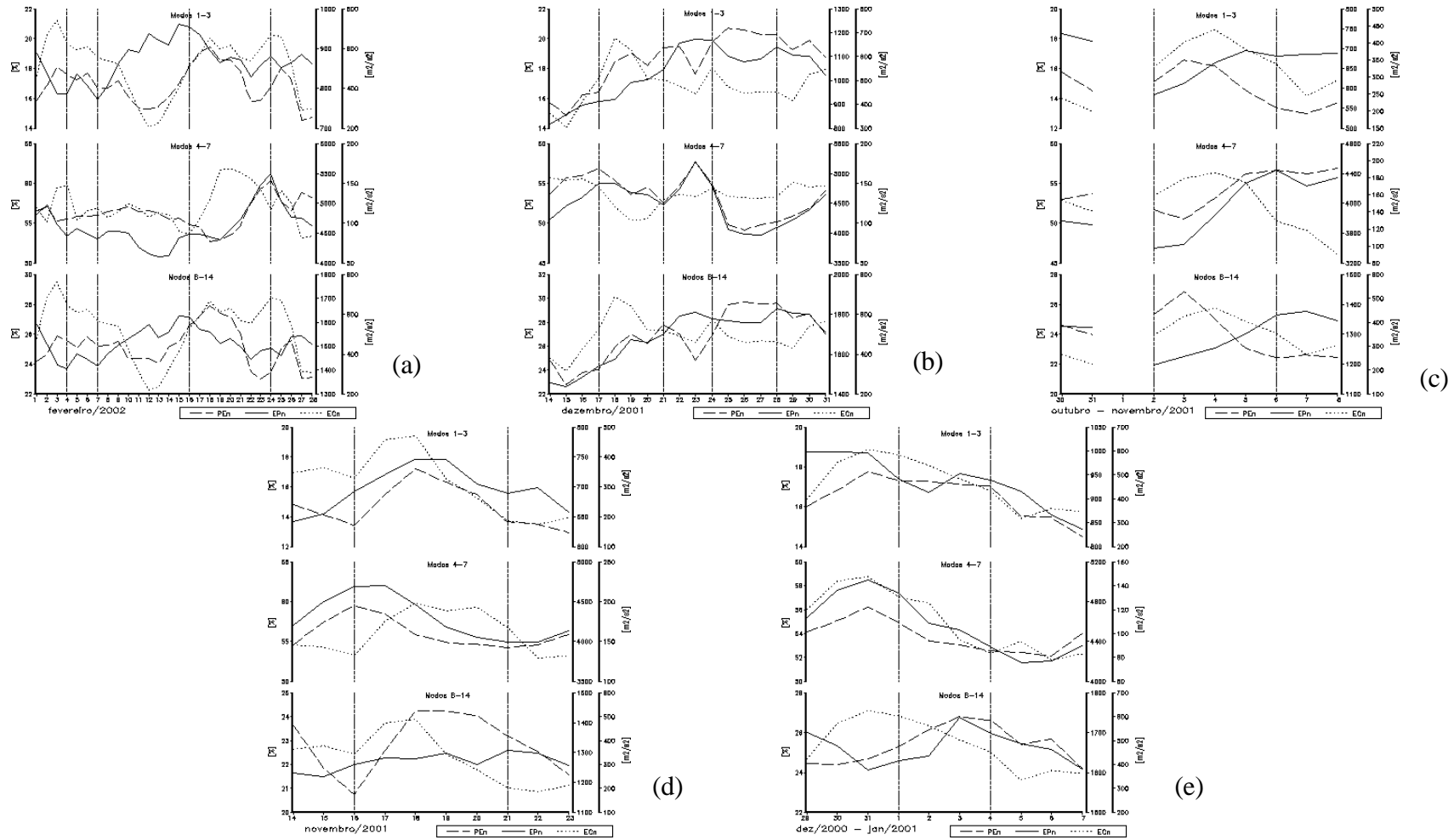


FIGURA 4.16 – Variação temporal da energética dos modos verticais 1-3, 4-7 e 8-14 na região da ZCAS, Análise NCEP T170L42, para os Episódios: (a) 1-2; (b) 3-4; (c) 5; (d) 6; e (e) 7. Os eixos no lado direito dos gráficos representam as energias potencial disponível (EP<sub>n</sub>) e cinética (EK<sub>n</sub>), respectivamente. As linhas verticais tracejadas indicam o período de atuação da ZCAS.

## 4.2 Partição de Energia entre os Modos Horizontais

Nesta seção é apresentada uma análise da partição de energia entre os modos horizontais que mais contribuem para cada uma das categorias de modos verticais descritas na seção anterior, destacando-se principalmente os resultados sobre a região de interesse deste estudo.

Os modos verticais são decompostos em modos horizontais seguindo o procedimento descrito em Andrade (1994) e a energia total ( $E_Cn + EPn$ ) é calculada para cada estrutura horizontal. A porcentagem de energia total de cada estrutura horizontal em relação à soma de energia de todos os modos horizontais é calculada para cada categoria de modo vertical a partir da expressão:

$$PE_w = \frac{\sum_{n=n_1}^{n_2} E_{wn}}{\sum_{n=1}^M E_{Tn}} \times 100\%, \quad (4.2)$$

com

$$E_{Tn} = E_{Tsoma} + E_{Tint}, \quad (4.3)$$

em que  $PE_w$  representa a porcentagem da energia total do modo horizontal  $w$  em relação a todos os modos, incluindo as interações entre eles, contida na categoria considerada.  $E_{wn}$ ,  $E_{Tsoma}$  e  $E_{Tint}$  são, respectivamente, as energias totais de cada modo horizontal  $w$ , ou seja, Rossby ( $E_{TRB}$ ), Kelvin ( $E_{TKV}$ ), Mista Rossby-Gravidade ( $E_{TMX}$ ), Gravidade Oeste ( $E_{TGO}$ ) e Gravidade Leste ( $E_{TGE}$ ), a soma de todos os modos horizontais ( $E_{TRB} + E_{TKV} + E_{TMX} + E_{TGO} + E_{TGE}$ ) e as interações entre os pares de modos horizontais, para um dado modo vertical  $n$ . O limiar  $M$  da somatória no denominador de (4.3) denota o número de modos verticais considerados, neste caso,  $M=12$  (14) para 28 (42) níveis verticais.

A energia total devido a interação entre os pares de modos horizontais é obtida de acordo com o segundo termo da equação (3.48), descrita no Capítulo 3. Seguindo a nomenclatura acima, tem-se:

$$E_{Tint} = ET_{RBKV} + ET_{RBMX} + ET_{RBGO} + ET_{RBGE} + ET_{KVMX} + ET_{KVG0} + ET_{KVGE} + ET_{MXGO} + ET_{MXGE} + ET_{GOGE} , \quad (4.4)$$

em que cada parcela do lado direito representa interação dos pares de modos horizontais indexados. Integrados globalmente, os produtos cruzados se anulam (ortogonalidade das Funções de Hough), entretanto, localmente, estes produtos podem ser interpretados como interferência construtiva (valores positivos) ou destrutiva (valores negativos) de energia, resultante da interação entre os modos que produzem o produto.

Devido a grande quantidade de informações e figuras, são apresentados neste Capítulo apenas os resultados mais expressivos desta análise.

#### **4.2.1 Análise Energética das Auto-Interações entre Modos Horizontais**

De um modo geral, a análise energética das estruturas horizontais indica que, em ambas as resoluções T126L28 e T170L42, as contribuições para a porcentagem de energia são bem distribuídas entre as três categorias de modos verticais, destacando-se os modos Rossby e Kelvin como os principais determinantes do padrão espacial de energia (Figuras 4.17-4.19). Quantitativamente, observa-se que os valores foram ligeiramente maiores para os modos verticais 1 a 3 e 8 a 14 na resolução T170L42, enquanto a categoria II (modos 4 a 7), que detém as maiores porcentagens de energia, apresenta valores relativamente inferiores aos obtidos na resolução T126L28. Isto deve estar associado ao maior detalhamento da discretização vertical quando são considerados 42 níveis verticais.

Na Figura 4.17a,b, observa-se que as maiores porcentagens de energia estão localizadas nas latitudes mais altas, diminuindo na região central da América do Sul, incluindo a

região da ZCAS e voltando a aumentar ao norte do equador. Estas máximas porcentagens de energia em latitudes mais altas estão basicamente associadas ao modo Rossby (Figura 4.17c,d) e podem ser interpretadas como uma resposta ao aquecimento equatorial, que, em concordância com o trabalho de Kasahara e Silva Dias (1986), são mais fortes e barotrópicas equivalente em latitudes médias e altas, e geradas principalmente pela conversão de energia dos modos internos para o modo externo. Próximo ao equador e, especialmente na região da ZCAS (regiões convectivamente ativas), as maiores contribuições de energia devem-se ao modo Kelvin (Figura 4.17e,f).

Para os modos verticais 4 a 7 (Figura 4.18 a,b), o somatório de energia de todos os modos horizontais mostra máximos de porcentagem de energia confinados equatorialmente, com valores acima de 100%, o que indica uma região de interação entre os modos horizontais, como será apresentado posteriormente. As porcentagens de energia diminuem com o aumento da latitude, sendo que o padrão espacial observado na região equatorial é basicamente determinado pelo modo Kelvin (Figura 4.18c,d). O modo Rossby (Figura 4.18e,f) apresenta maiores contribuições na região central da América do Sul e, particularmente, sobre a região Amazônica e ZCAS.

O campo de porcentagem de energia da soma de todos os modos horizontais para a categoria de modos verticais 8 a 12 (14, para T170L42) apresenta padrões semelhantes aos observados para a categoria I, com máximos de energia total em latitudes médias e altas associados as ondas de Rossby e máximos confinados equatorialmente associados ao modo Kelvin (Figura 4.19). Particularmente, na região da ZCAS, observa-se contribuições significativas de energia do modo Rossby (Figura 4.19c,d), com padrões espacialmente bem definidos, ao contrário do padrão mais zonal verificado para os modos verticais 1 a 3 (Figura 4.17c,d). Nota-se ainda que, neste caso, o modelo com resolução T170L42 apresenta valores significativamente maiores, comparados àqueles da resolução T126L28.

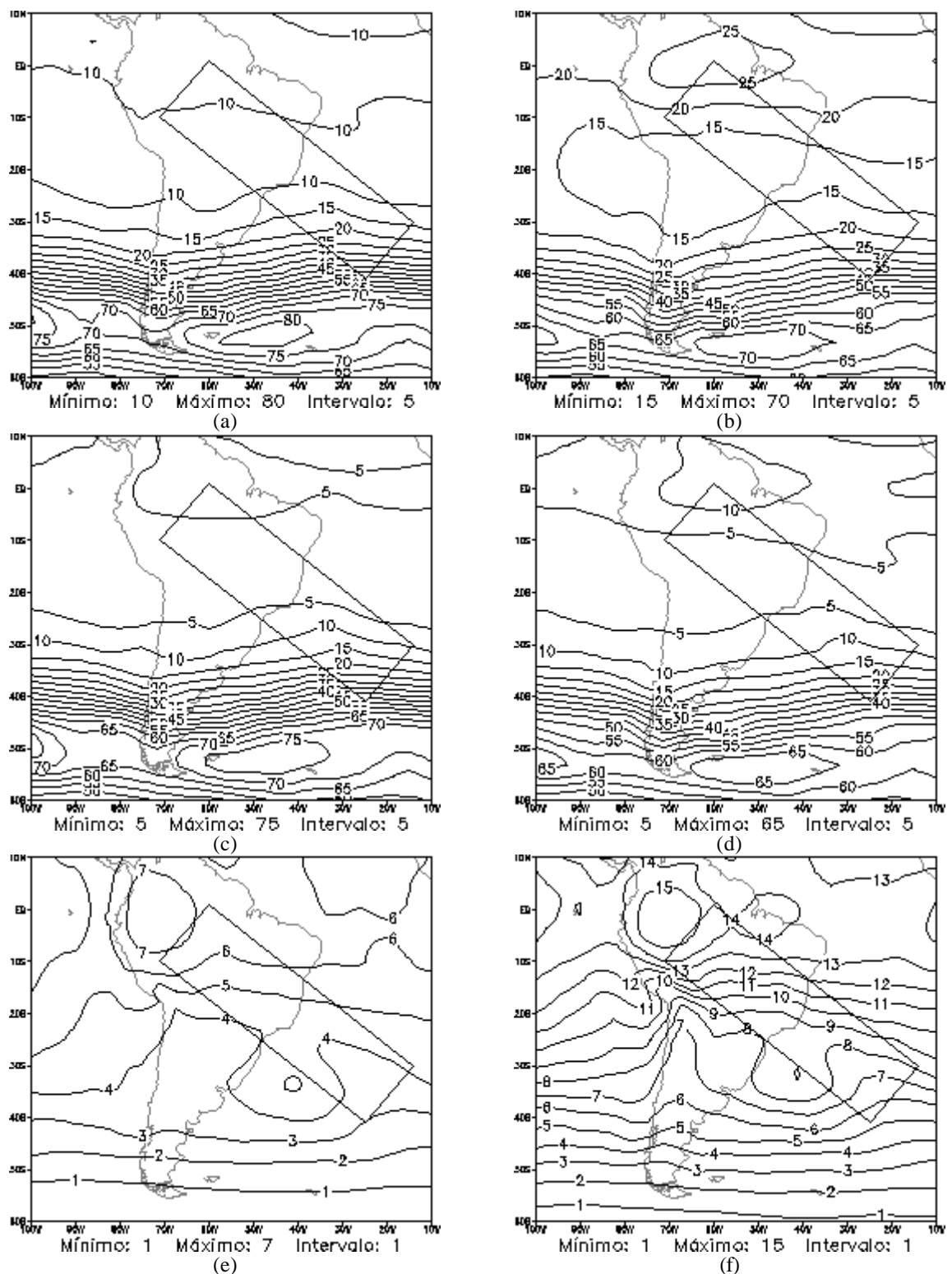


FIGURA 4.17 – Energia Total (%) dos modos horizontais referente aos modos verticais 1 a 3, para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Soma; (c) e (d) Rossby; (e) e (f) Kelvin.

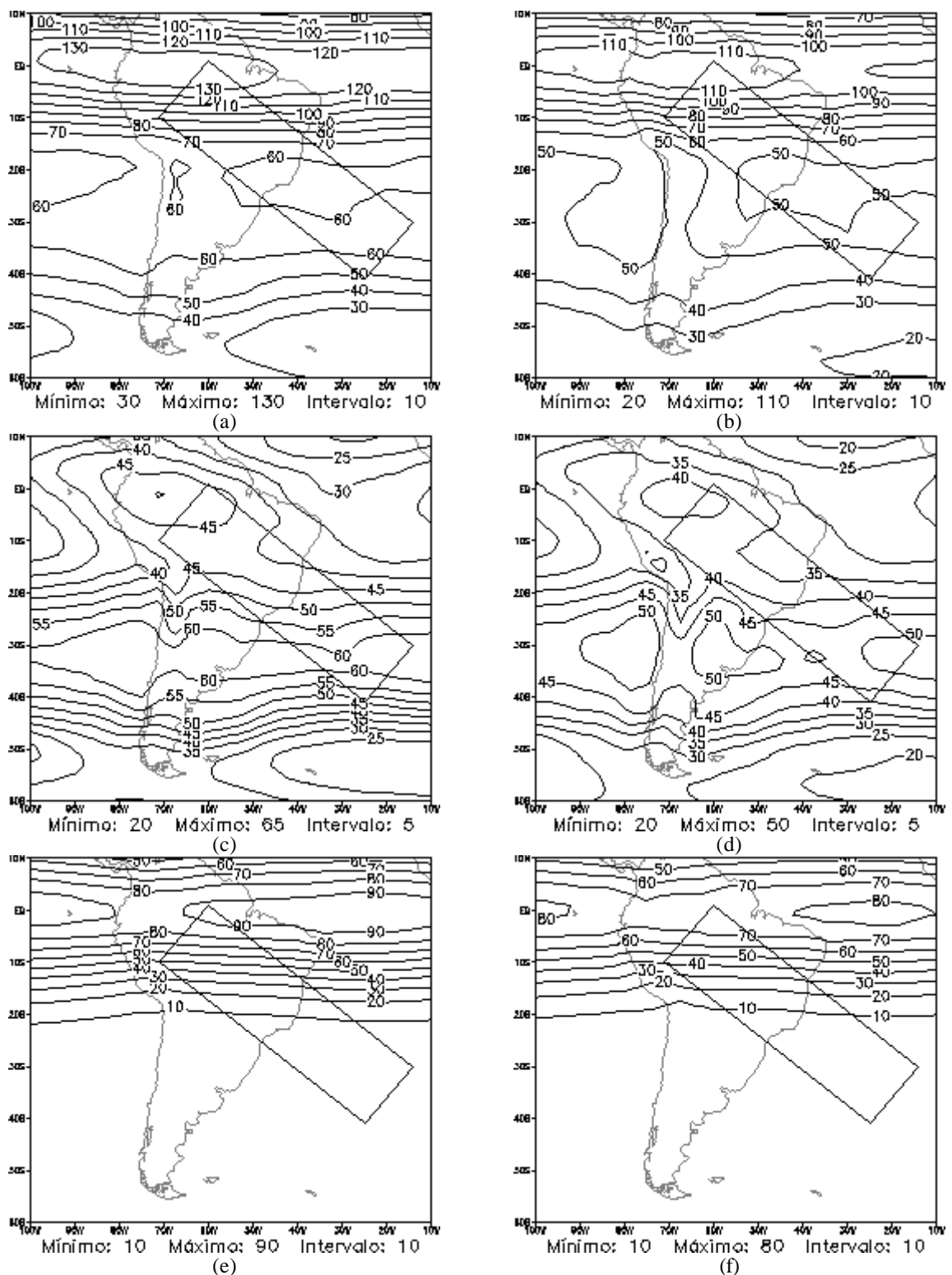


FIGURA 4.18 – Energia Total (%) dos modos horizontais referente aos modos verticais 4 a 7, para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Soma; (c) e (d) Rossby; (e) e (f) Kelvin.



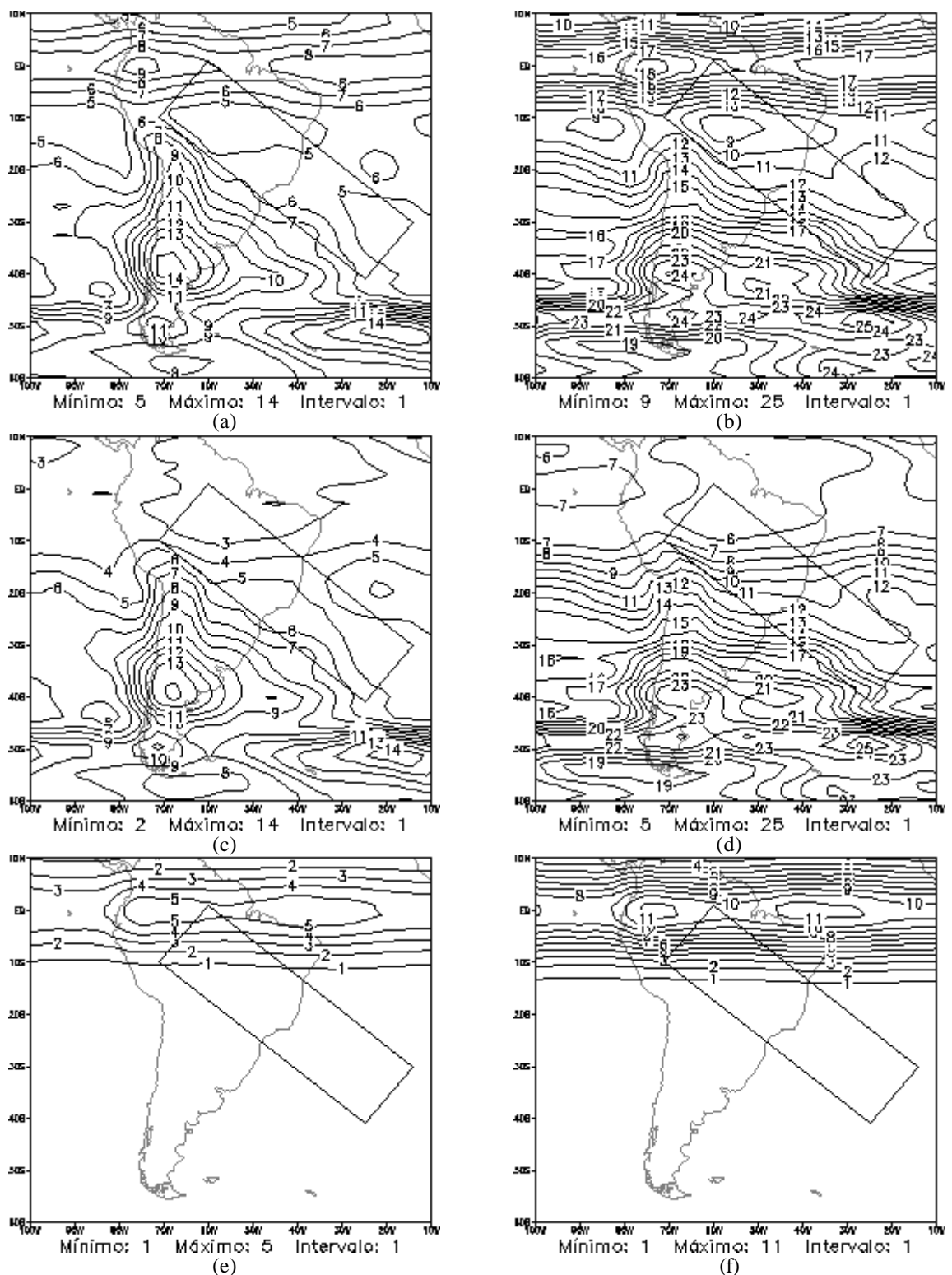


FIGURA 4.19 – Energia Total (%) dos modos horizontais referente aos modos verticais 8 a 12 (14, para T170L42), para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Soma ; (c) e (d) Rossby; (e) e (f) Kelvin.

Em todas as categorias de modos verticais, as auto-interações dos modos horizontais Misto Rossby-Gravidade, Gravidade Oeste e Gravidade Leste apresentaram valores desprezíveis de porcentagem de energia na região de interesse deste estudo e, portanto, foram omitidos.

#### **4.2.2 Análise Energética das Interações entre Modos Horizontais**

As interações entre pares de modos horizontais indicam contribuições relevantes para a energética nas duas primeiras categorias de modos verticais, 1 a 3 e 4 a 7. Para a categoria III, os resultados são pouco expressivos, com pequenas contribuições apenas sobre o continente na região de interesse. A porcentagem de energia da soma de todas as interações entre as estruturas horizontais (resíduo) para as resoluções T126L28 e T170L42 mostra que as maiores interações ocorreram na categoria II, que inclui os modos verticais 4 a 7. Novamente, nota-se que a resolução T170L42 apresenta valores maiores de porcentagem de energia para os modos verticais 1 a 3 e 8 a 14, enquanto valores mais elevados são observados para os modos verticais 4 a 7 na Análise T126L28. Os principais resultados são apresentados nas Figuras 4.20-4.24 a seguir.

A interação total entre os modos horizontais (resíduo) para os modos verticais 1 a 3, representada pela Figura 4.20a,b, indica duas faixas de interferência destrutiva entre os modos horizontais, uma provocando diminuição de energia na região equatorial, e outra, com núcleos máximos negativos ao sul de 40°S; entre 10°S e 40°S, nota-se uma região de interferência construtiva, provocando aumento ou criação de energia na América do Sul central e, especialmente, sobre a região da ZCAS.

Dentre os produtos cruzados de pares de modos horizontais, verifica-se que as interações entre os modos horizontais Rossby e Kelvin (Figura 4.20c,d) são as que mais contribuem para o padrão observado na Figura 4.20a,b, com interferências construtivas de energia bem definidas na posição média do composto de ZCAS, e núcleos máximos em 40°S. Valores máximos de interferências negativas entre modos horizontais são encontrados em torno do equador. Estes resultados vão de encontro àqueles do trabalho

de Raupp e Silva Dias (2002) que mostram que as interações entre os modos Rossby e Kelvin têm um papel importante na propagação inter-hemisférica de energia. Seus resultados indicam mecanismos de instabilidade do escoamento zonal de oeste, excitados pela forçante térmica na região equatorial através de ondas de Kelvin, cuja propagação têm um impacto expressivo sobre a propagação inter-hemisférica da energia, além de modular a propagação inter-hemisférica da energia associada às ondas de Rossby.

Na Figura 4.20e,f, as interações entre os modos Rossby e Misto Rossby-Gravidade indicam uma alternância de interferências construtivas e destrutivas de energia em relação às faixas de latitudes, com núcleos negativos bem configurados em torno de 35°S, apresentando máxima diminuição de energia na região da ZCAS sobre o oceano. Um núcleo de máxima interferência construtiva de energia é verificado sobre a Região Nordeste do Brasil, determinando um padrão dipolo em torno de 30°W. Embora estes valores sejam de uma ordem de grandeza inferior, suas contribuições são relevantes na região de interesse deste estudo, especialmente sobre o oceano.

As interferências destrutivas devido as interações entre os modos Rossby e gravitacionais propagando-se para oeste e para leste (não apresentadas) apresentam valores significativos de redução de energia na categoria I, entretanto confinados ao sul de 30 °S, sendo pouco expressivos sobre a região da ZCAS.

As porcentagens de energia total para as interações do modo Kelvin com os modos Misto Rossby-Gravidade, Gravidade Oeste e Gravidade Leste são ilustradas na Figura 4.21. Apesar dos baixos valores, inferiores a 1%, nota-se algumas contribuições secundárias para a construção/destruição de energia na região da ZCAS. As interação KVMX indica diminuição de energia em toda a região do Hemisfério Sul considerada, enquanto interferências construtivas (destrutivas) de energia são observadas sobre o continente (oceano) na região da ZCAS, resultantes das interações KVGO e KVGE.

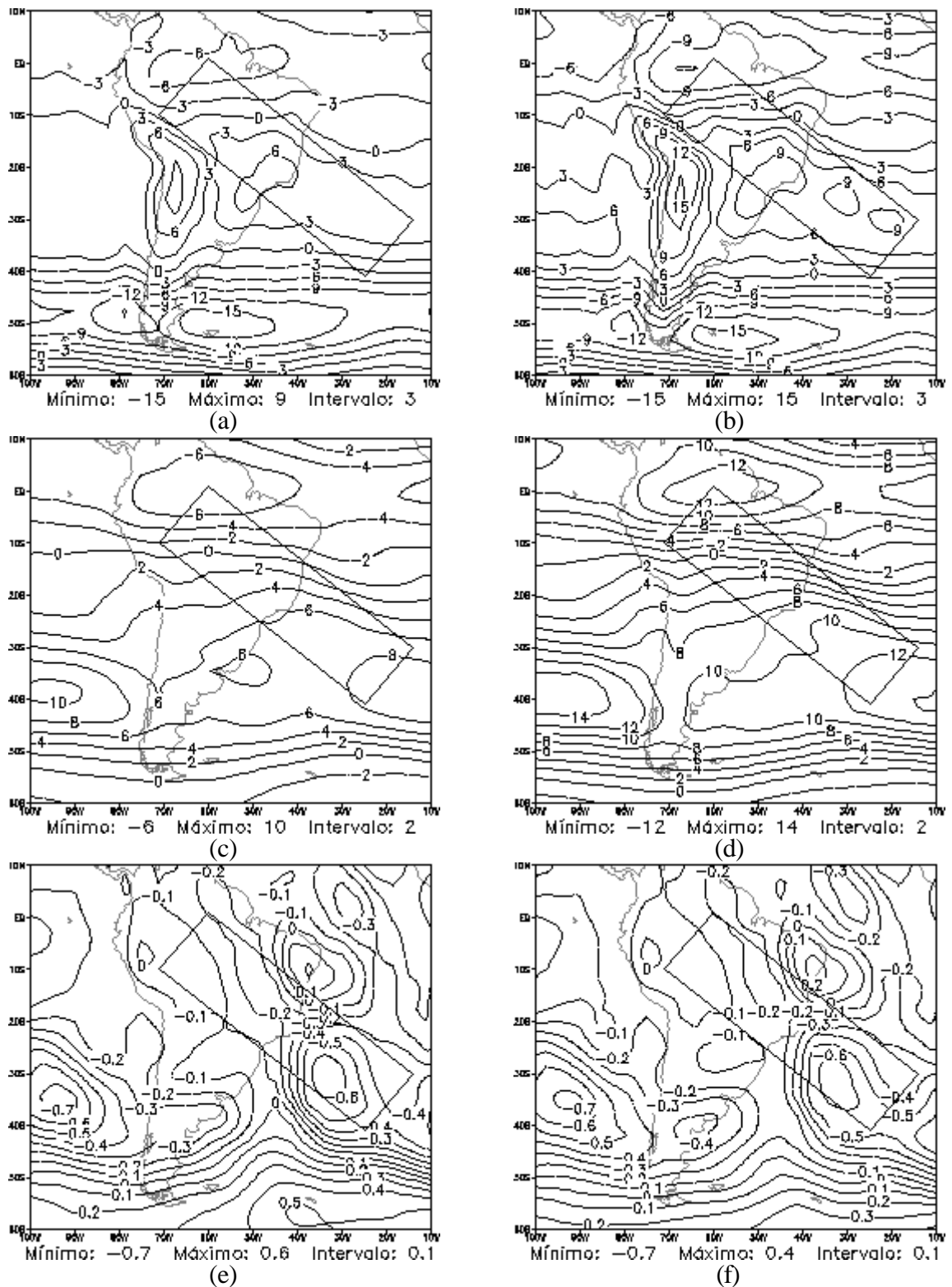


FIGURA 4.20 – Energia Total (%) das interações entre os modos horizontais referente aos modos verticais 1 a 3, para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Resíduo; (c) e (d) Rossby-Kelvin; (e) e (f) Rossby-Misto.

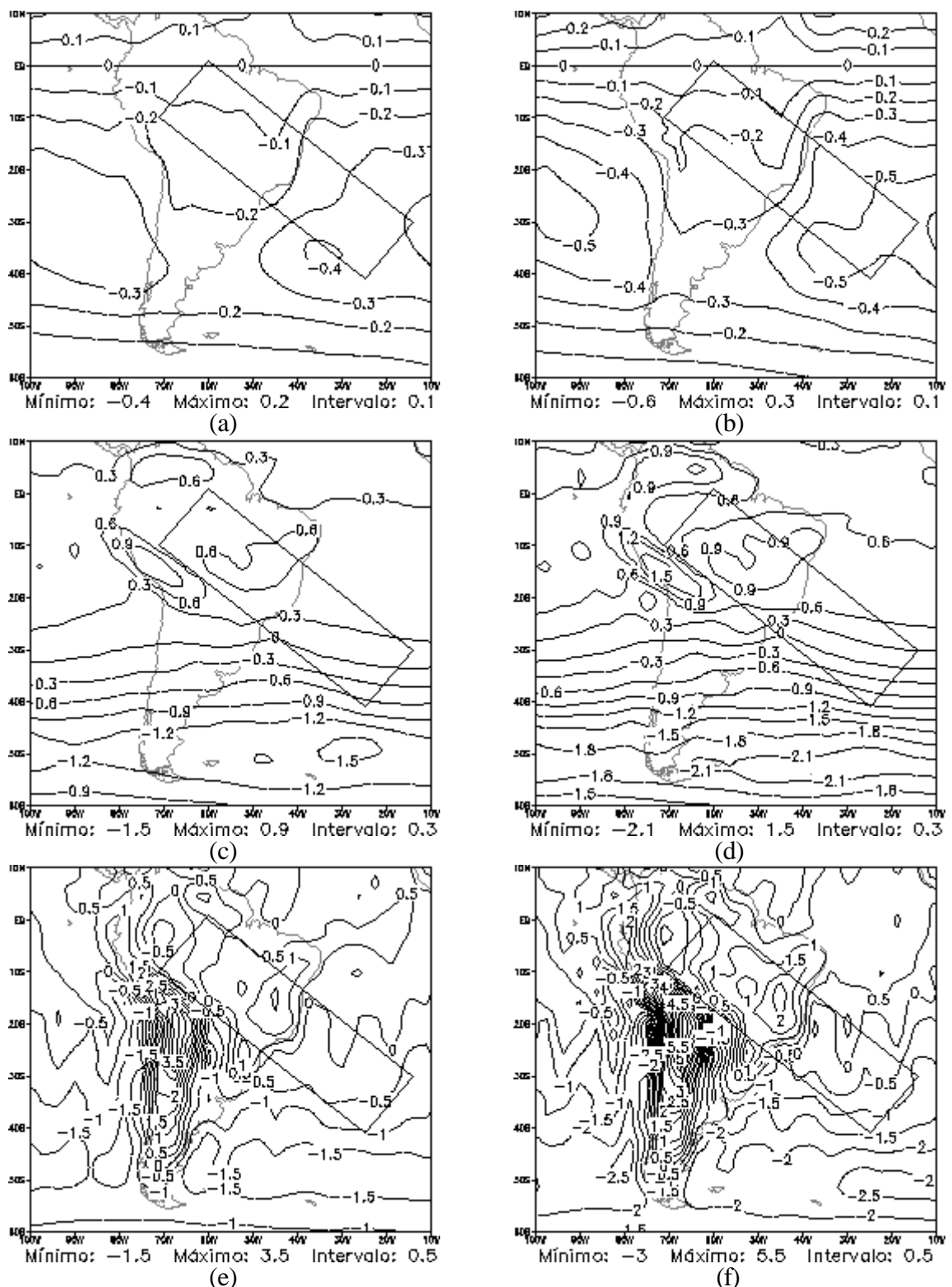


FIGURA 4.21 – Energia Total (%) das interações entre os modos horizontais referente aos modos verticais 1 a 3, para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Kelvin-Misto; (c) e (d) Kelvin-Gravidade Oeste; (e) e (f) Kelvin-Gravidade Este.

As interações entre os modos Misto Rossby-Gravidade, Gravidade Oeste e Gravidade Leste não apresentaram valores expressivos na região de interesse para a categoria de modos verticais 1 a 3 e, portanto, não são incluídos nesta discussão.

As Figuras 4.22 e 4.23 ilustram as principais interações entre os modos horizontais para os modos verticais 4 a 7. Os padrões observados foram bastante semelhantes em ambas as resoluções, T126L28 e T170L42, com valores ligeiramente maiores para a Análise de menor resolução. Neste caso, a porcentagem da interação total entre todos os modos horizontais (Figura 4.22a,b) indica núcleos de máxima interferência destrutiva de energia em torno do equador, com valores em torno de 40-50%. Entre 10°S e 30°S observa-se uma faixa de interferências construtivas, com aumento de energia máximo abrangendo a região da ZCAS. Ao sul de 40°S, os valores nulos sugerem que não há contribuições devido a interação de todos os modos horizontais; pequenas interferências resultantes das interações envolvendo os modos de gravidade nesta região tendem a se cancelar. O confinamento das interações entre a região equatorial e tropical concordam com o fato de que os modos verticais que compõe esta categoria são aqueles excitados pelo aquecimento convectivo, cuja resposta é baroclínica nos trópicos, gerada, principalmente, pelos modos 4 e 5, como observado por Kasahara e Silva Dias (1986).

Nos painéis (c) e (d) da Figura 4.22, verifica-se que a interação entre os modos Rossby e Kelvin (RBKV) é a responsável pelo padrão observado no resíduo. Algumas contribuições secundárias, mas importantes para a região da ZCAS, são obtidas dos produtos cruzados Rossby-Misto, Rossby-Gravidade Oeste e Rossby-Gravidade Este, representados na Figura 4.23 (a)-(f).

A interação entre os modos Rossby e Misto Rossby-Gravidade (Figura 4.23a,b) apresenta características similares àquelas observadas na categoria I, com interferência destrutiva de energia sobre o Oceano Atlântico na região da ZCAS, e interferência construtiva de energia sobre a Região Nordeste, configurando novamente um padrão dipolo. Já as interações entre o modo Rossby e os modos de Gravidade Oeste e Gravidade Leste têm contribuições significativas na região da ZCAS, para os modos

verticais 4 a 7. Do produto cruzado RBGO (Figura 4.23c,d) nota-se interferência destrutiva, com diminuição de energia sobre o continente e, construção ou aumento de energia sobre o Oceano Atlântico. Na Figura 4.23e,f, nota-se um gradiente de interferências destrutivas/construtivas de energia sobre a zona de convergência, particularmente sobre o oceano, com valores máximos negativos (positivos) a oeste (leste) da posição média do composto de ZCAS, resultante da interação entre os modos Rossby e Gravidade Leste. Os resultados referentes às interações entre os modos Kelvin, Misto e Gravidade com propagação para oeste e para leste, não são discutidos nesta seção, pois são pouco expressivos na região de interesse deste estudo para esta categoria de modos verticais.

No caso da categoria III, modos verticais 8 a 12 (14, para a resolução T170L42), são apresentados, apenas o resíduo e as interferências resultantes da interação Rossby-Kelvin, que apresentam uma pequena contribuição sobre a parte continental da ZCAS, conforme Figura 4.24. A comparação entre os painéis (a) e (c) e (b) e (d) mostram que a porcentagem da interação total é basicamente explicada pela interação Rossby-Kelvin, com interferências destrutivas de energia confinadas equatorialmente, e núcleos máximos sobre o equador. Nota-se ainda, que os valores obtidos para a resolução T170L42, são relativamente maiores, aproximadamente o dobro, daqueles observados para a Análise T126L28. As demais interações (não apresentadas) indicaram valores nulos ou pouco significativos, da ordem de  $10^{-2}$ , em toda a área da América do Sul, não sendo relevantes para esta categoria.

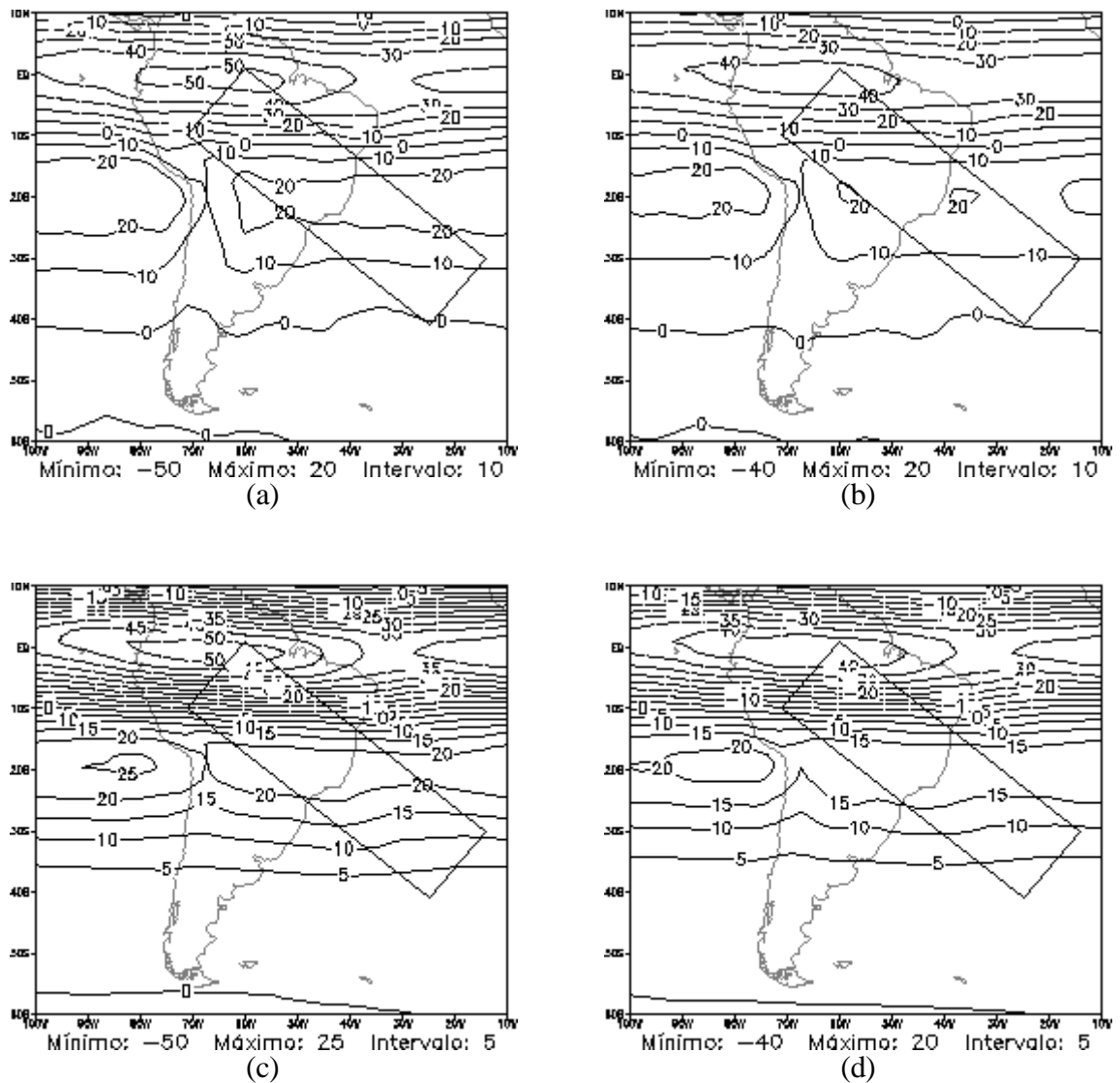


FIGURA 4.22 – Energia Total (%) das interações entre os modos horizontais, referente aos modos verticais 4 a 7, para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Resíduo (todas as interações); (c) e (d) Rossby-Kelvin.



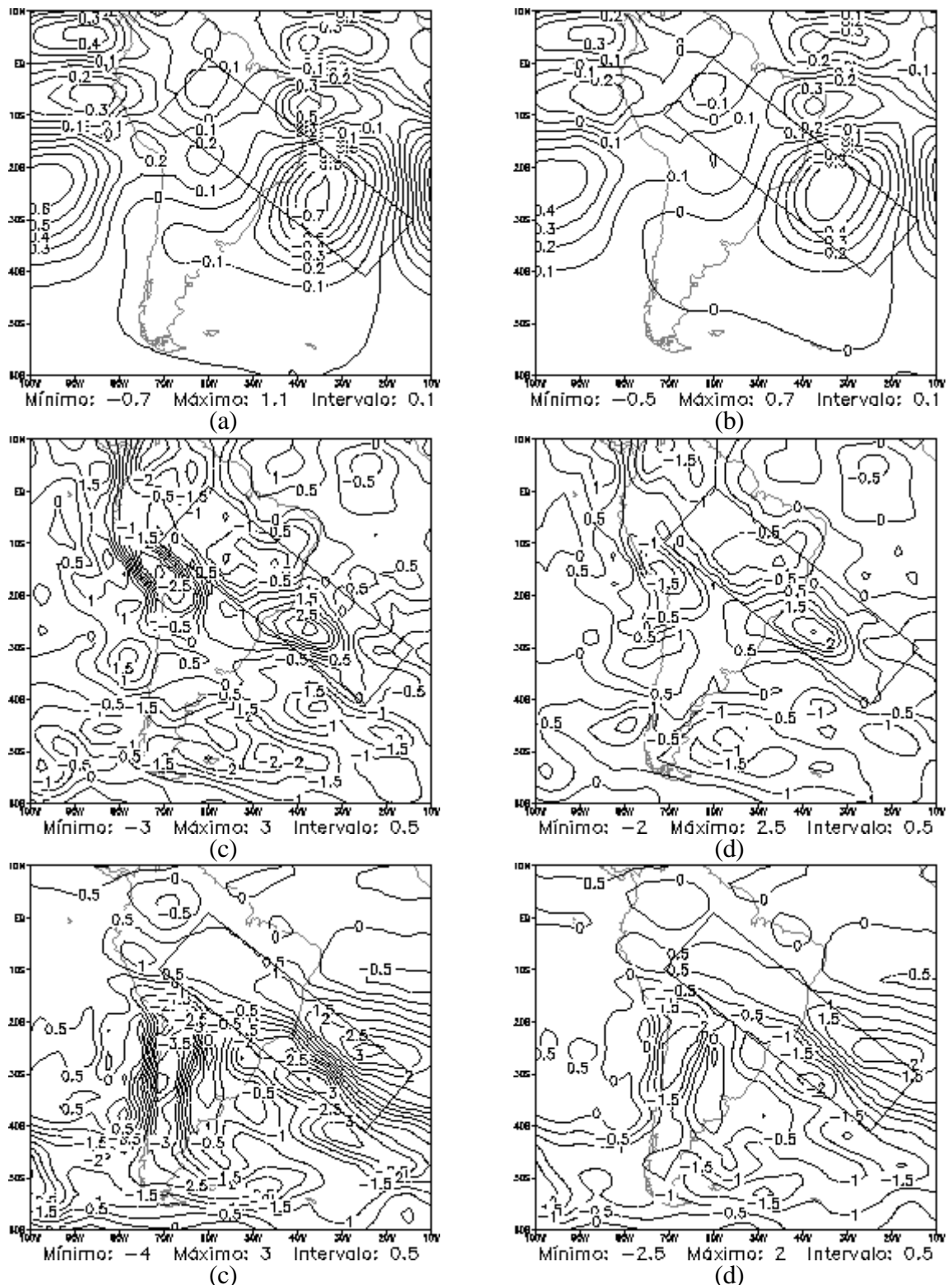


FIGURA 4.23 – Energia Total (%) das interações entre os modos horizontais, referente aos modos verticais 4 a 7, para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Rossby-Misto; (c) e (d) Rossby-Gravidade Oeste; (e) e (f) Rossby-Gravidade Este.

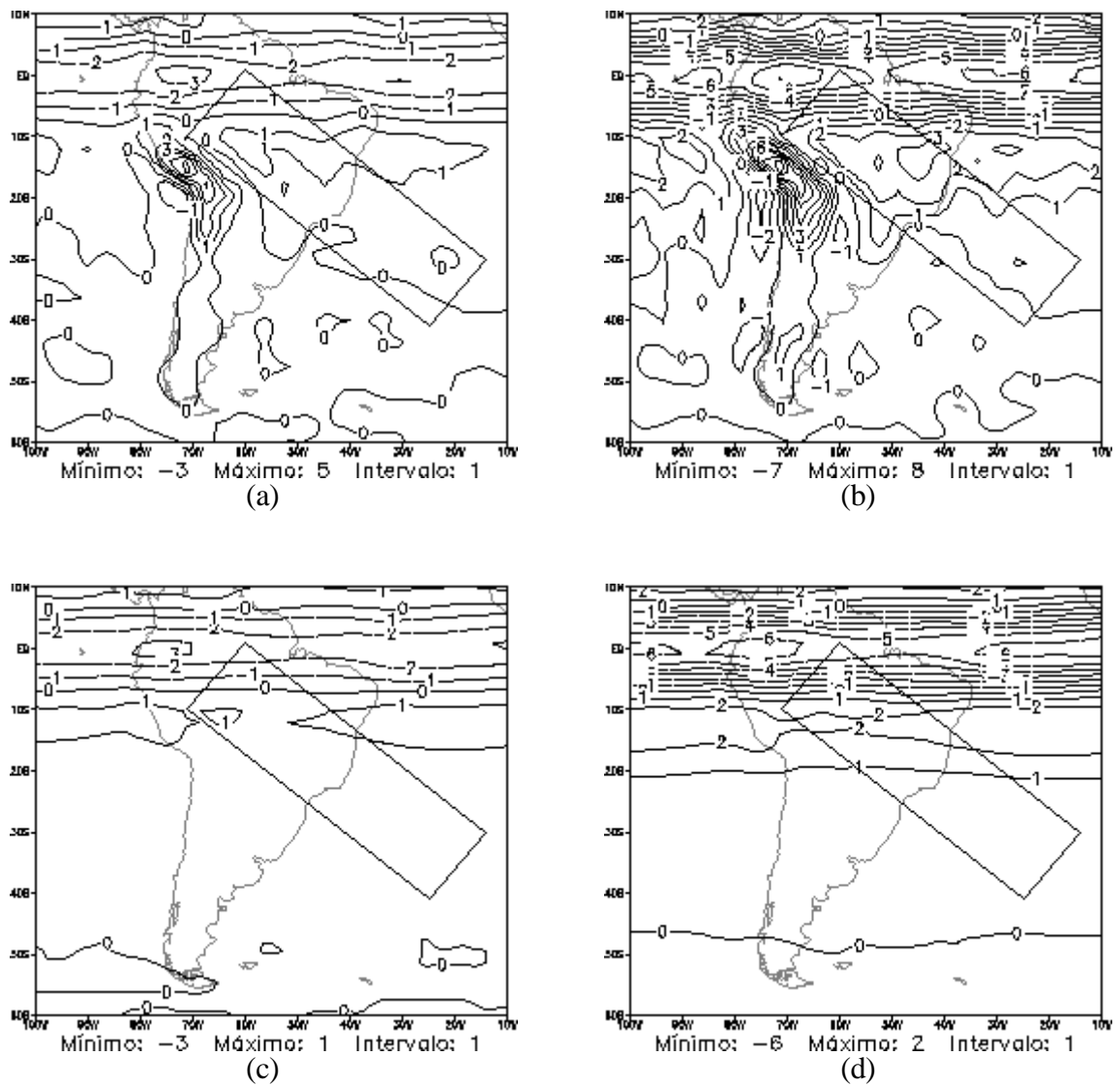


FIGURA 4.24 – Energia Total (%) das interações entre os modos horizontais, referente aos modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), para a Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Resíduo (todas as interações); (c) e (d) Rossby-Kelvin.

### 4.2.3 Influência dos Esquemas de Convecção Profunda

Nesta subseção é discutido o impacto dos esquemas de convecção profunda KUO, RAS e GRELL (Experimentos de Modelagem – EXP5-6, 8-9 e 11-12) na partição de energia entre os modos horizontais, para as resoluções T126L28 e T170L42. Os resultados apresentados correspondem a média das previsões de 24 horas válidas para os períodos referentes aos episódios do composto de ZCAS, para cada uma das categorias de modos verticais. Analogamente ao observado nos experimentos de controle e discutido nas subseções anteriores, são ilustradas a seguir as principais auto-interações e interações entre os modos horizontais para cada um dos esquemas KUO, RAS e GRELL.

De um modo geral, os resultados desta subseção indicam que, em ambas as resoluções, o modelo reproduz os padrões observados na partição de energia entre os modos horizontais, independente do esquema de convecção profunda utilizado, para todas as categorias de modos verticais. Para a resolução T126L28, uma análise global dos resultados mostra que os esquemas KUO e RAS tendem a apresentar resultados ligeiramente melhores, embora o esquema GRELL mostre um maior detalhamento de alguns padrões, regionalmente. Já a combinação do modelo com resolução espacial mais alta (T170L42) e o esquema GRELL tendem a apresentar uma pequena melhoria nos resultados, com alguns padrões regionais reproduzidos mais precisamente, principalmente para as categorias I e III. Entretanto, o modelo com o esquema RAS parece reproduzir melhor os padrões globais, verificados nos experimentos de controle.

Nas Figuras 4.25-4.27 são apresentados, respectivamente, os campos de porcentagem de energia total para a soma de todas as auto-interações e para os modos Rossby e Kelvin para a categoria I. Comparando-se a Figura 4.25 e 4.17a,b, nota-se que, para todos os esquemas de convecção e resoluções espaciais, a média das previsões de 24h tende a superestimar as porcentagens de energia em latitudes médias e altas. Embora os padrões previstos nos painéis (a)-(f) sejam muito similares entre si, o modelo com esquema KUO apresenta melhor desempenho na região equatorial, tanto para T126L28 como

para T170L42. Em latitudes médias, o modelo com o esquema GRELL e resolução T170L42 reproduz os padrões observados com um maior detalhamento.

Os campos de porcentagem de energia total para o modo Rossby, mostrados na Figura 4.26, indicam resultados muito semelhantes para os três esquemas de convecção profunda, especialmente para a resolução T126L28. Para o modelo T170L42, o esquema GRELL tende a suavizar o campo; os esquemas KUO e RAS conseguem prever bem os detalhes dos padrões observados na região equatorial (Figura 4.17c,d). Para o modo Kelvin (Figura 4.27), observa-se um bom desempenho do modelo tanto em prever os padrões espaciais, como os valores de porcentagem de energia obtidos nos experimentos de controle (Figura 4.17e,f). Na região equatorial, o modelo com o esquema KUO define melhor o padrão espacial para a resolução T126L28; as previsões com os esquemas RAS e GRELL foram muito similares, sendo que este último tende a realçar os detalhes regionais do campo. Para a resolução T170L42, os modelos reproduziram bem o padrão espacial, notando-se um melhor desempenho do modelo com o esquema RAS, comparado ao modelo de baixa resolução; o esquema GRELL descreve melhor o padrão espacial, porém subestima as porcentagens de energia em algumas regiões.

As Figuras 4.28-4.30 mostram, respectivamente, as porcentagens de energia total da soma de todas as auto-interações (Soma), modo Rossby e modo Kelvin, previstas pelo modelo global com resoluções T126L28 e T170L42, para os modos verticais 4 a 7. No caso da Soma (Figura 4.28), os resultados do modelo para a região da ZCAS foram ligeiramente melhores para a resolução T170L42. Apesar da similaridade entre os padrões previstos pelos três esquemas, em ambas resoluções o esquema RAS parece representar melhor os padrões encontrados nos experimentos de controle, embora superestime os núcleos de máxima porcentagem de energia na região equatorial no modelo T126L28.

Para o modo Rossby (Figura 4.29), nota-se que, quantitativamente, o modelo T126L28 com o esquema KUO consegue prever bem os núcleos de máxima porcentagem de

energia na região equatorial. Em latitudes médias e altas, a comparação entre os modelos mostra que os padrões previstos, utilizando os três esquemas de convecção, são bastante semelhantes entre si; em relação a Análise, nota-se que os modelos tendem a suavizar as isolinhas na região da ZCAS. Na resolução T170L42, os modelos apresentaram resultados muito semelhantes, reproduzindo bem os padrões observados. Na Figura 4.30, as auto-interações do modo Kelvin mostram que os modelos têm um bom desempenho em ambas as resoluções, com todos os esquemas de convecção representando muito bem os padrões de controle. Resultados ligeiramente melhores são observados para o esquema KUO (RAS) na resolução T126L28 (T170L42).

Nas Figuras 4.31-4.33 são ilustrados os campos de porcentagem de energia total dos modos horizontais Soma, modo Rossby e modo Kelvin para os modos verticais da categoria III. Em geral, observa-se que o modelo com o esquema GRELL é o que apresenta um melhor desempenho nesta categoria, prevendo com maior detalhamento os padrões em torno do equador e sobre a região da ZCAS. Para a soma de todas as auto-interações, o modelo com o esquema KUO tende a subestimar os valores na região equatorial, enquanto o modelo RAS superestima os valores nesta região. No caso dos modos Rossby e Kelvin, não há diferenças significativas entre os padrões previstos pelos três esquemas de convecção e as Análises T126L28 e T170L42.

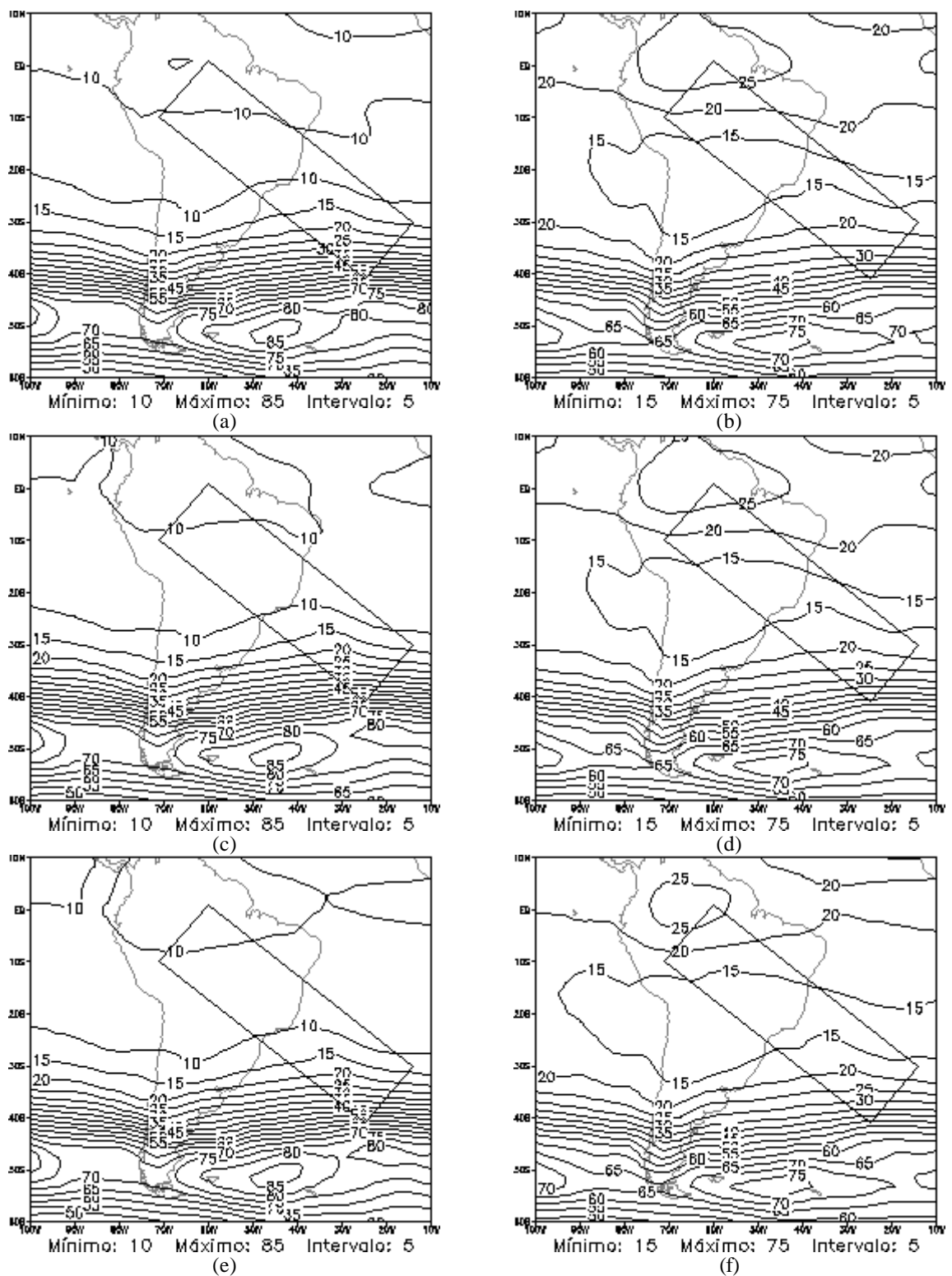


FIGURA 4.25 – Energia Total (%) do modo horizontal Soma, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Kuo; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

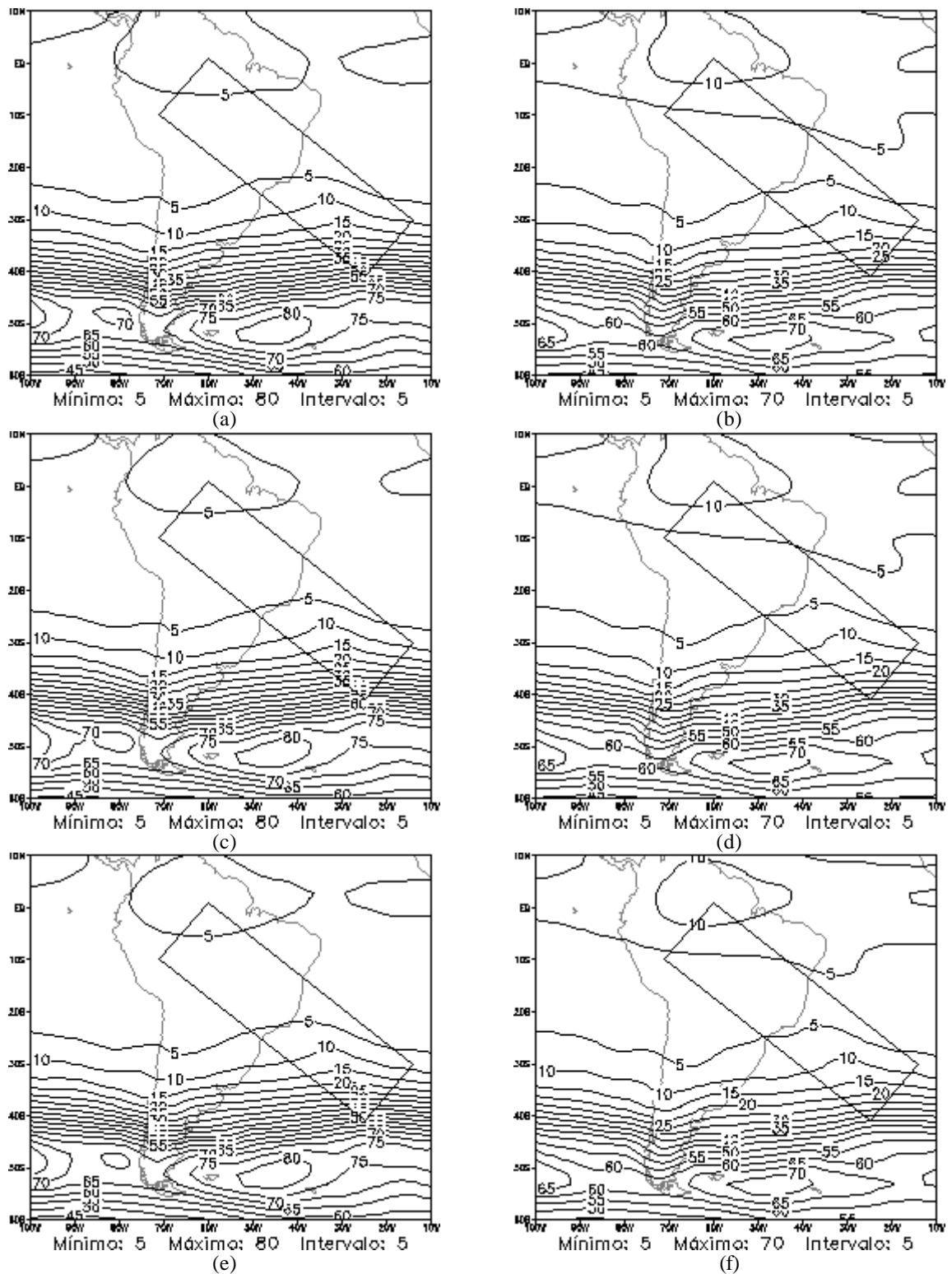


FIGURA 4.26 – Energia Total (%) do modo horizontal Rossby para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Kuo; (c) e (d) RAS; (e) e (f) Grell.

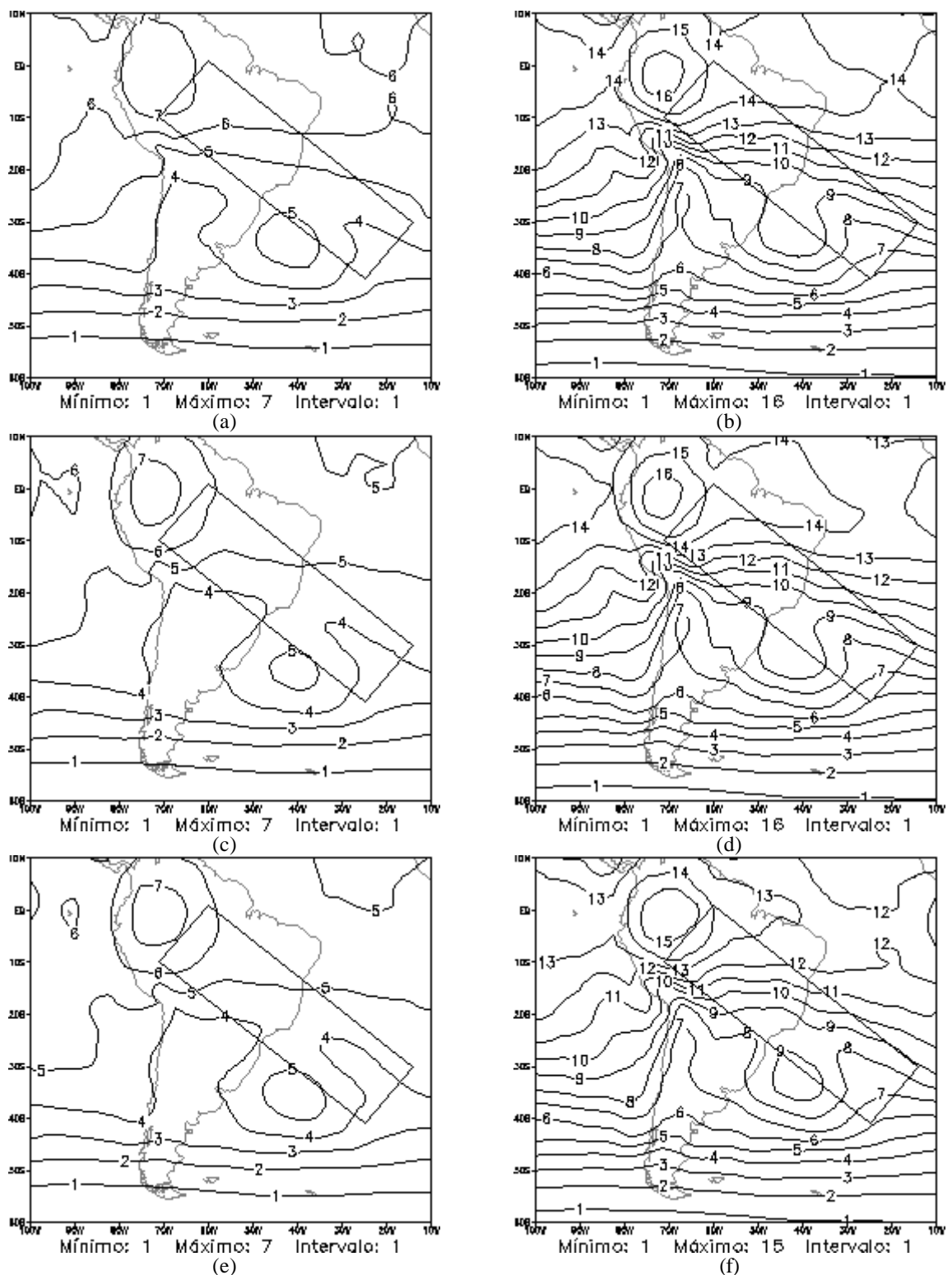


FIGURA 4.27 – Energia Total (%) do modo horizontal Kelvin para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.



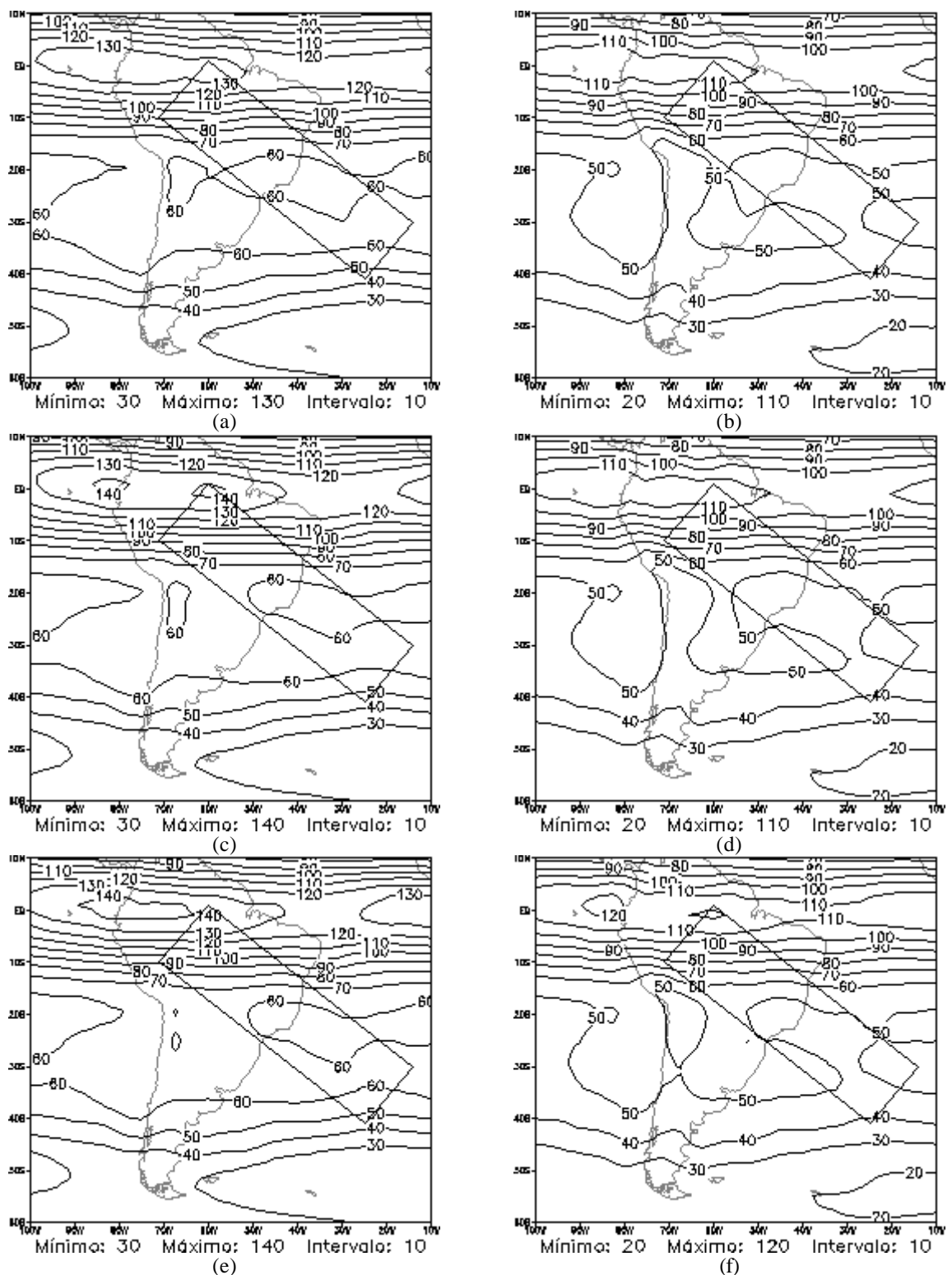


FIGURA 4.28 – Energia Total (%) do modo horizontal Soma para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

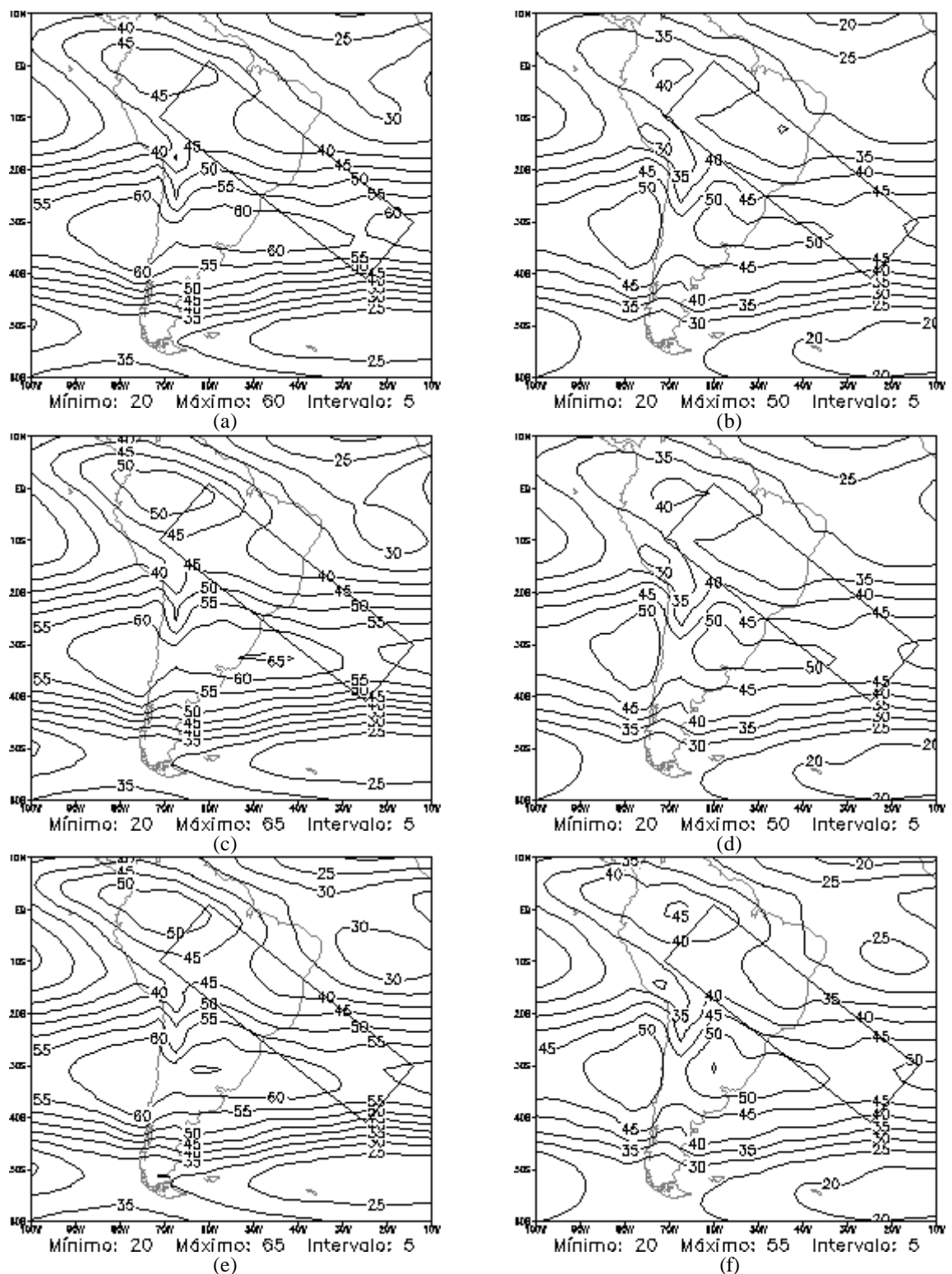


FIGURA 4.29 – Energia Total (%) do modo horizontal Rossby para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

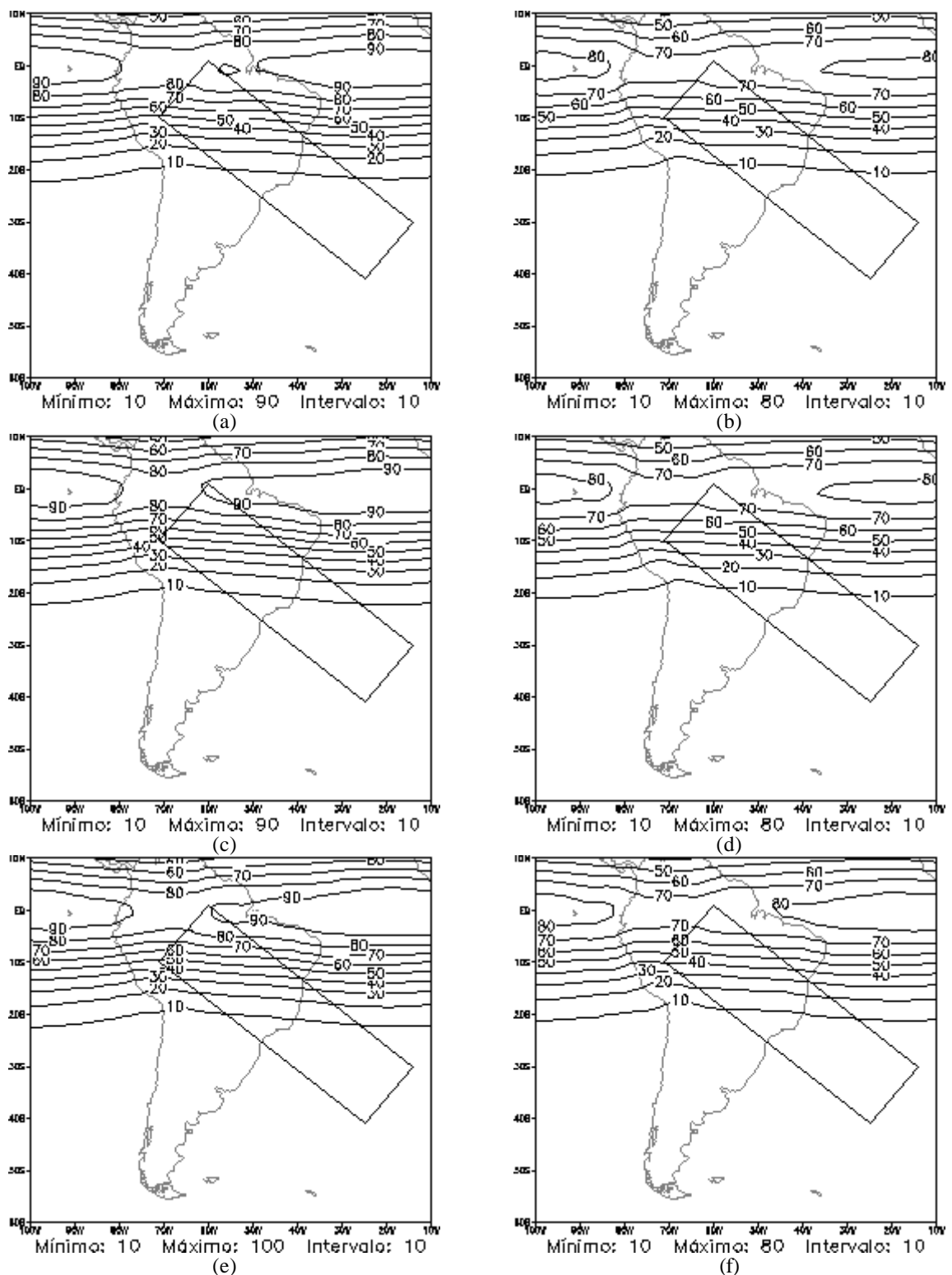


FIGURA 4.30 – Energia Total (%) do modo horizontal Kelvin para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

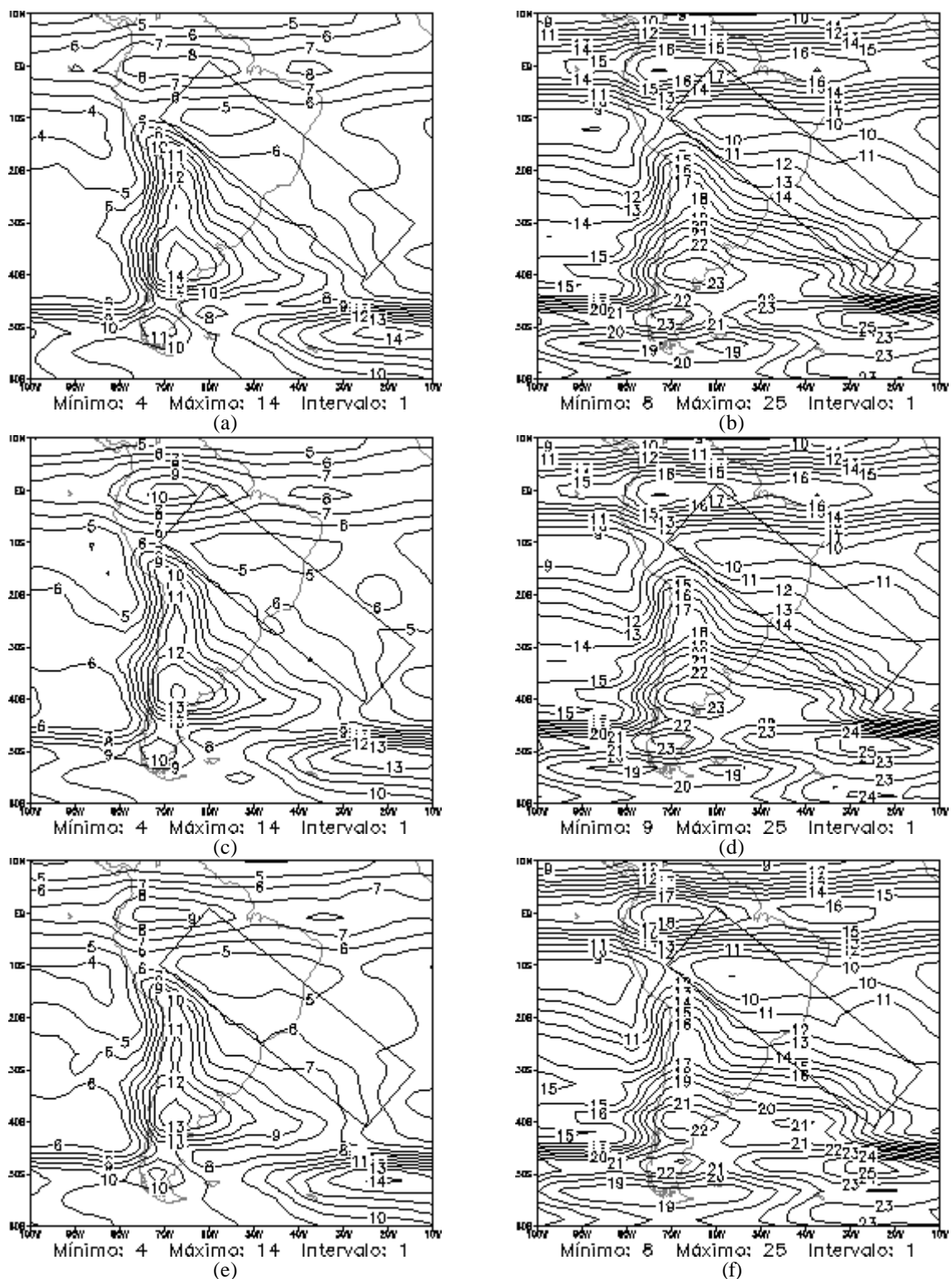


FIGURA 4.31 – Energia Total (%) do modo horizontal Soma para os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

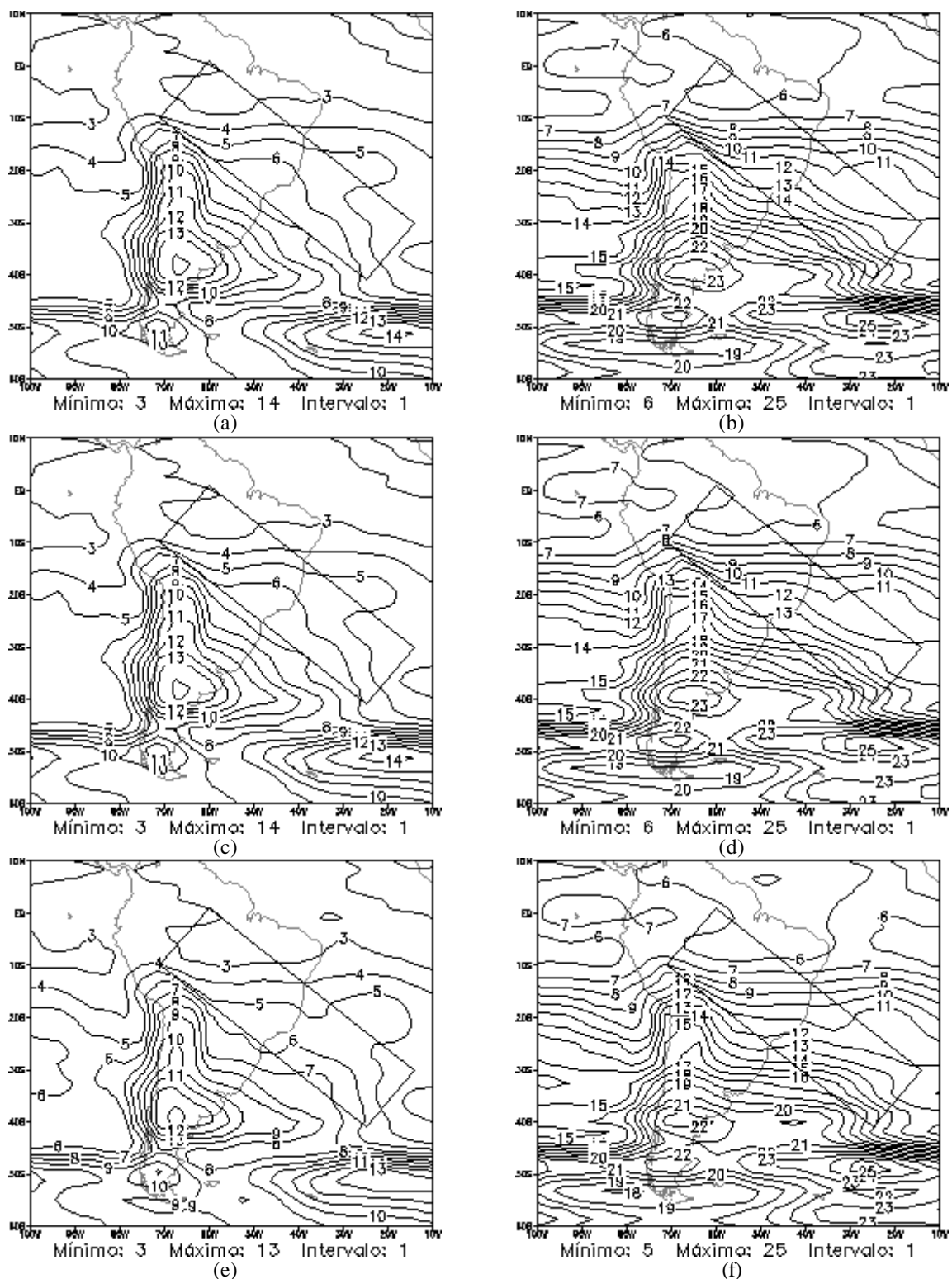


FIGURA 4.32 – Energia Total (%) do modo horizontal Rossby para os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

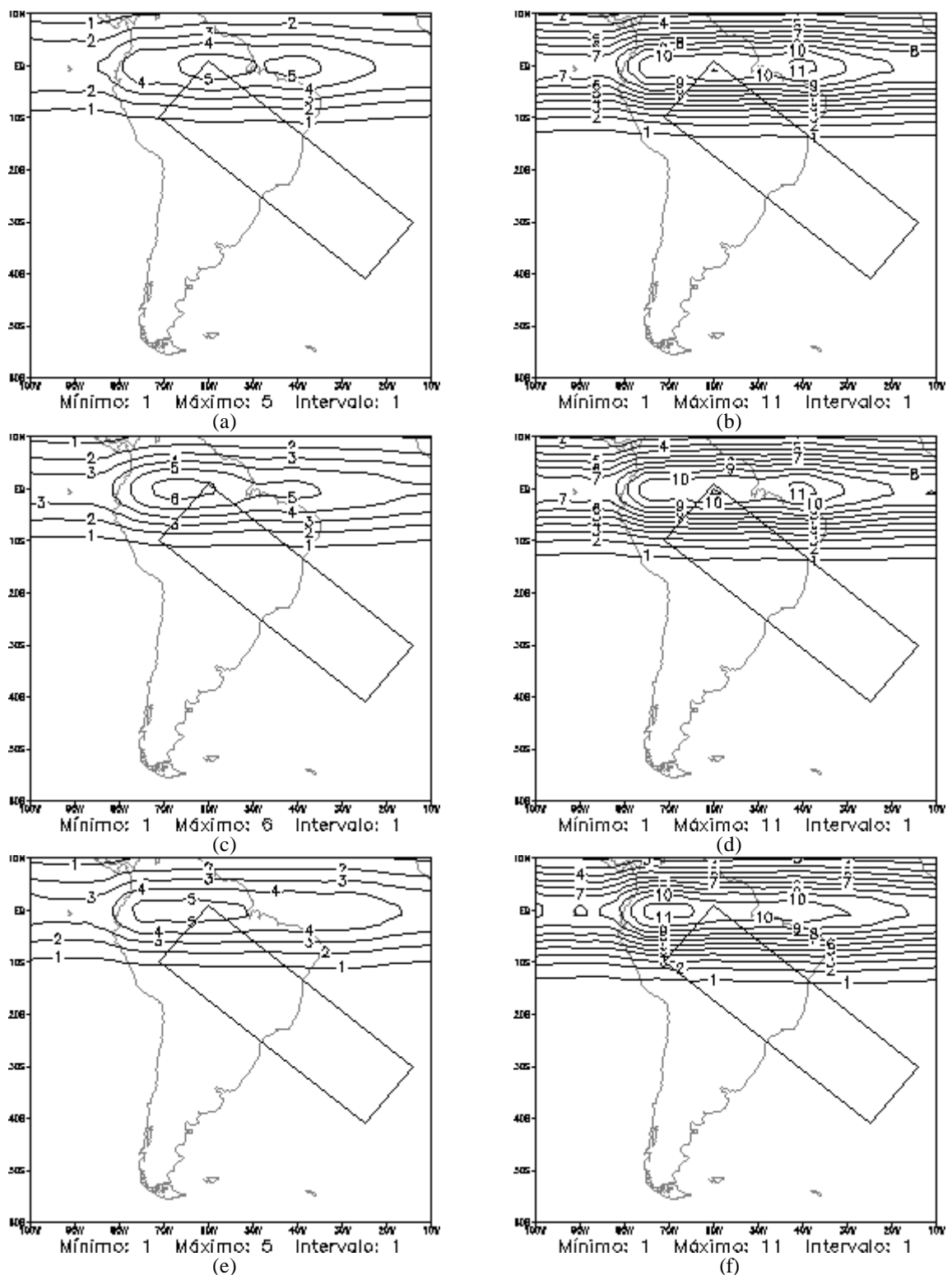


FIGURA 4.33 – Energia Total (%) do modo horizontal Kelvin para os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

A soma das interações entre todos os modos horizontais e os produtos cruzados entre modos horizontais para os modos verticais 1 a 3 são apresentados nas Figuras 4.34 a 4.39, respectivamente. Em geral, nota-se um melhor desempenho do modelo com o esquema KUO para a resolução T126L28, e com o esquema RAS para a resolução T170L42, em comparação aos resultados obtidos para os experimentos de controle. No caso do Resíduo (Figura 4.34), nota-se que o modelo T126L28 com os esquemas RAS e GRELL apresenta resultados muito semelhantes entre si e, apesar de reproduzir bem o padrão global, não consegue representar bem os núcleos de máximas interferências de energia sobre o equador. Para a resolução T170L42, os três modelos indicam resultados muito similares entre si e em relação a Análise, embora o modelo com o esquema GRELL apresente deficiência em prever os núcleos de máxima interferência construtiva de energia sobre a região da ZCAS.

Na Figura 4.35, as previsões da porcentagem de energia total das interações entre os modos Rossby e Kelvin indicam que todos os modelos, em ambas as resoluções, têm um bom desempenho, quando comparadas com as respectivas Análises (Figura 4.20c,d), definindo bem o padrão sobre a região da ZCAS. Para a resolução T170L42, nota-se a superestimativa de alguns núcleos de máxima interferência construtiva/destrutiva de energia em latitudes altas. As previsões de 24h do modelo com o esquema RAS apresentam resultados ligeiramente melhores para ambas as resoluções, T126L28 e T170L42.

Para o produto cruzado Rossby-Misto (Figura 4.36), verifica-se que todos os modelos conseguem capturar o dipolo na costa leste da América do Sul, como observado nas Análises, porém tendem a superestimá-lo em ambas as resoluções. Nota-se também, um melhor desempenho do modelo com o esquema KUO (RAS) para a resolução T126L28 (T170L42).

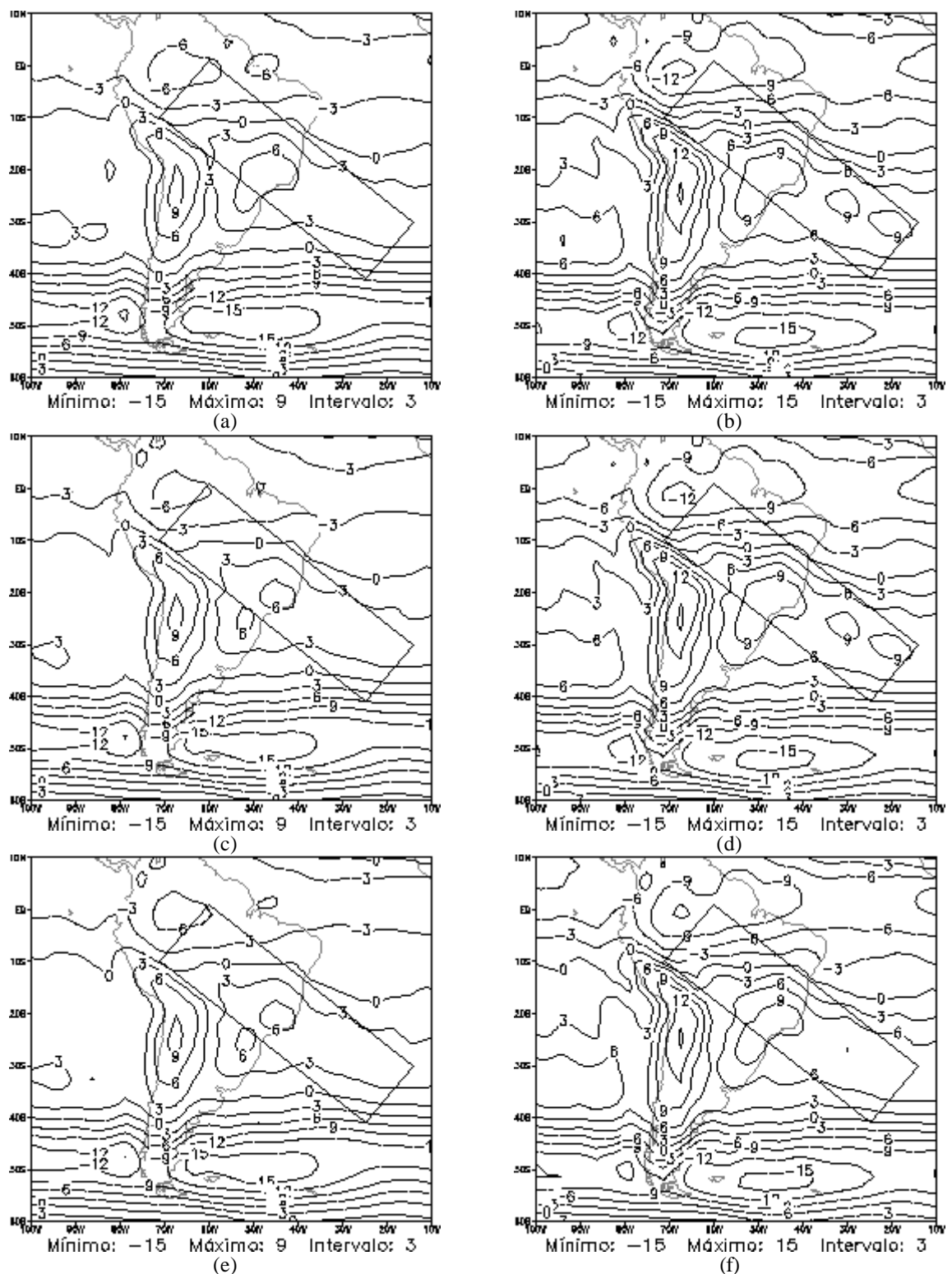


FIGURA 4.34 – Energia Total (%) para a soma de todas as interações – Resíduo, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.



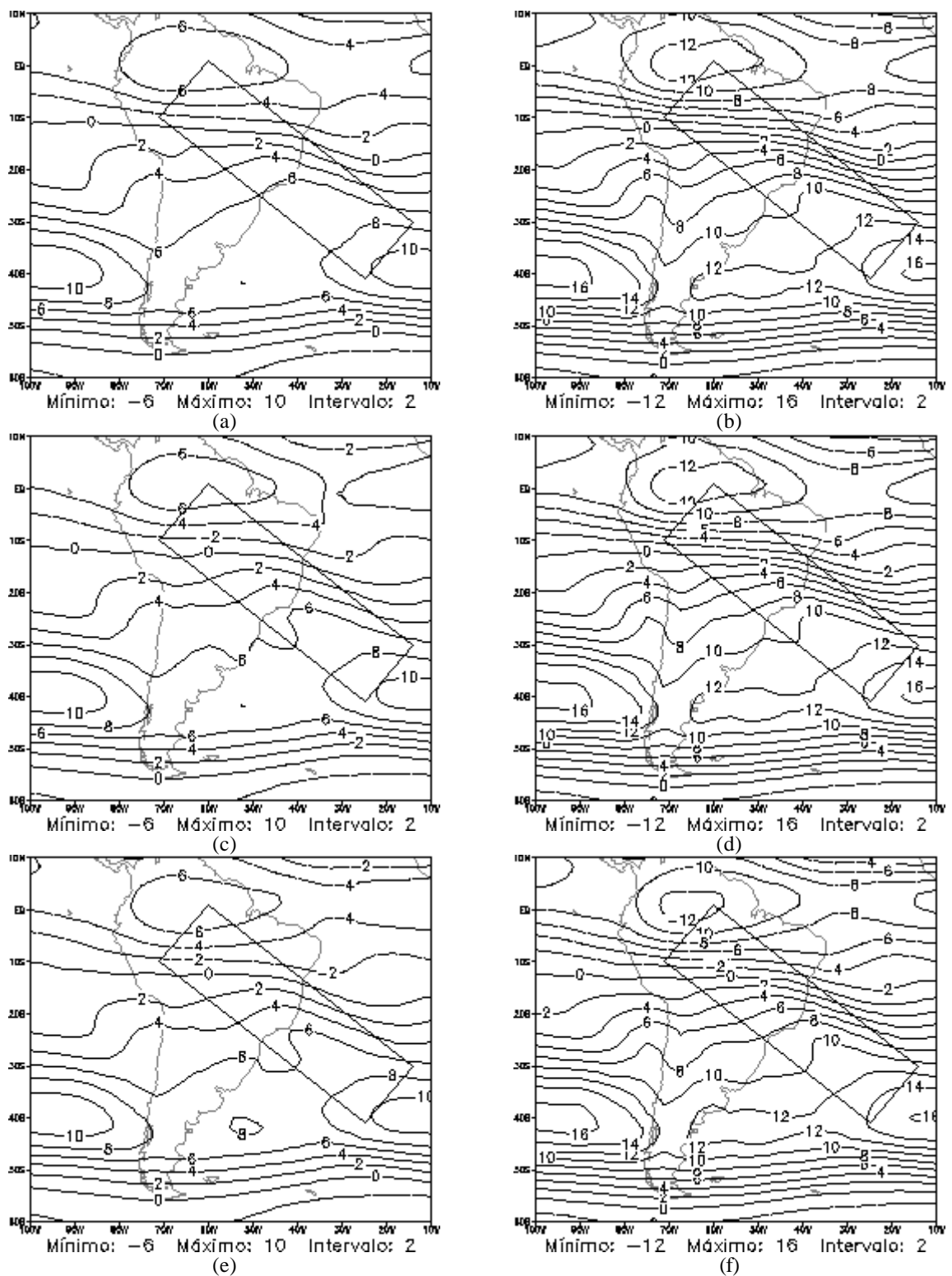


FIGURA 4.35 – Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Kelvin, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

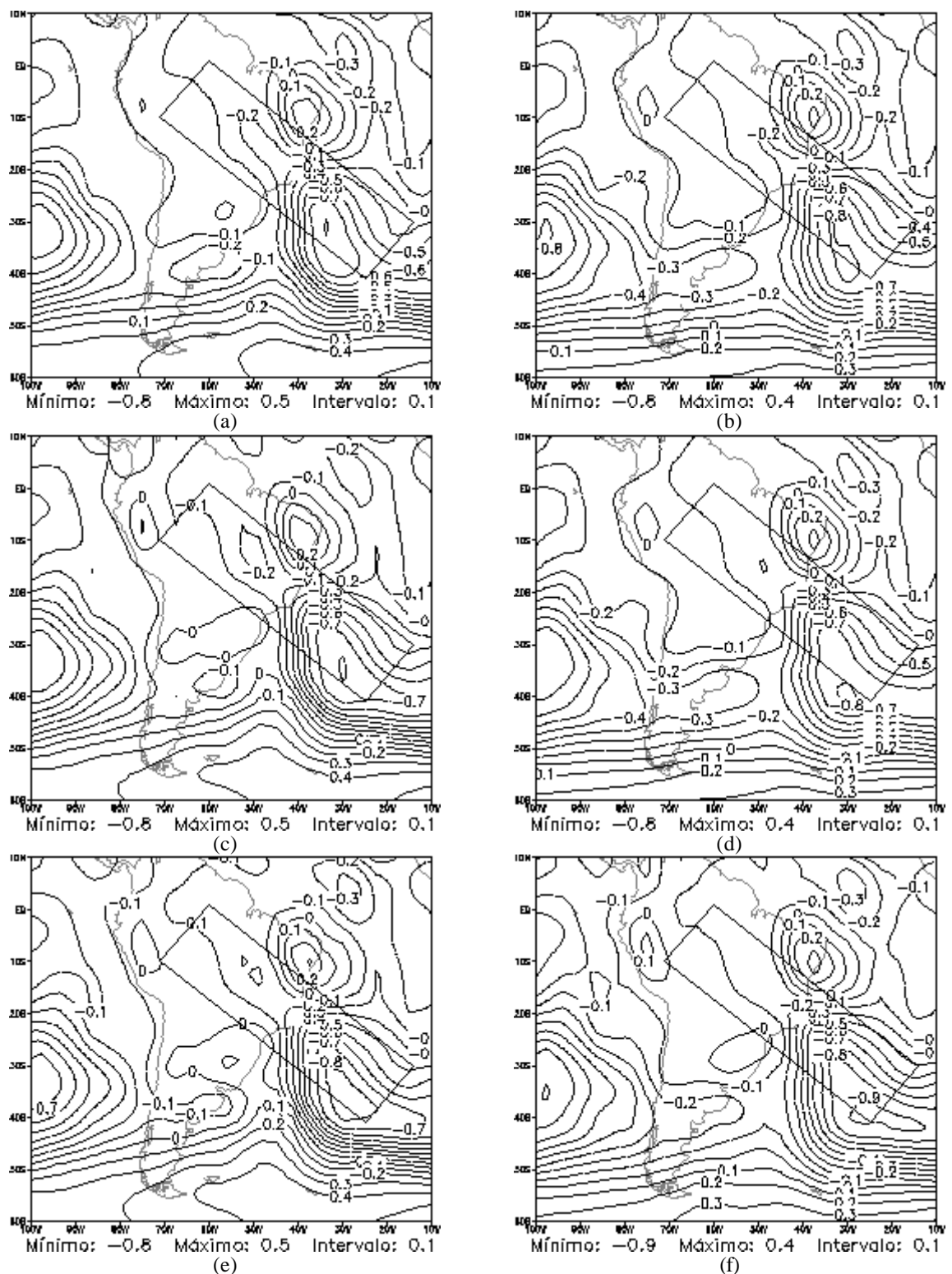


FIGURA 4.36 – Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Misto, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

Para as interações entre o modo Kelvin e os modos Misto Rossby-Gravidade, Gravidade Oeste e Gravidade Leste (produtos cruzados KVMX, KVGO, KVGE), ilustradas nas Figuras 4.37-4.39, respectivamente, as previsões do modelo foram muito semelhantes entre si, com todos os modelos apresentando um bom desempenho em relação as Análises T126L28 e T170L42. No caso do produto KVMX, os padrões gerais são bem previstos por todos os modelos, em ambas as resoluções, porém os valores são superestimados. Regionalmente, nota-se um melhor detalhamento dos padrões previstos pelo modelo T170L42 com o esquema GRELL. Os padrões previstos para as interações KVGO e KVGE também apresentaram resultados muito similares, sendo que para esta última, observa-se uma superestimativa dos valores na região da ZCIT. Em ambos os casos, há uma maior concordância em relação às Análises do modelo com o esquema KUO (GRE) para a resolução T126L28 (T170L42).

As Figuras 4.40 a 4.44 representam as principais interações entre os modos horizontais para os modos verticais 4 a 7, previstas pelo modelo global do CPTEC com resoluções T126L28 e T170L42. A soma de todas as interações (Resíduo) para esta categoria indica que os modelos T126L28 e T170L42 conseguem reproduzir bem os padrões globais observados nos experimentos de controle com previsões muito semelhantes para os três esquemas de convecção. Para ambas as resoluções, nota-se que o modelo com o esquema RAS apresenta resultados ligeiramente melhores, embora o esquema GRELL reproduza os padrões regionais com maiores detalhes, como pode ser observado na Figura 4.40.

Para as interações entre os modos Rossby e Kelvin (Figura 4.41), as previsões obtidas com os esquemas de convecção profunda KUO, RAS e GRELL não apresentaram diferenças significativas entre si. Em geral, os valores e os padrões espaciais dos núcleos de máxima interferência construtiva/destrutiva de energia foram bem previstos, verificando-se um melhor desempenho do modelo com os esquemas KUO e RAS para as resoluções T126L28 e T170L42, respectivamente. Para a resolução T170L42, o modelo com o esquema GRELL tende a superestimar os núcleos de máxima interação.

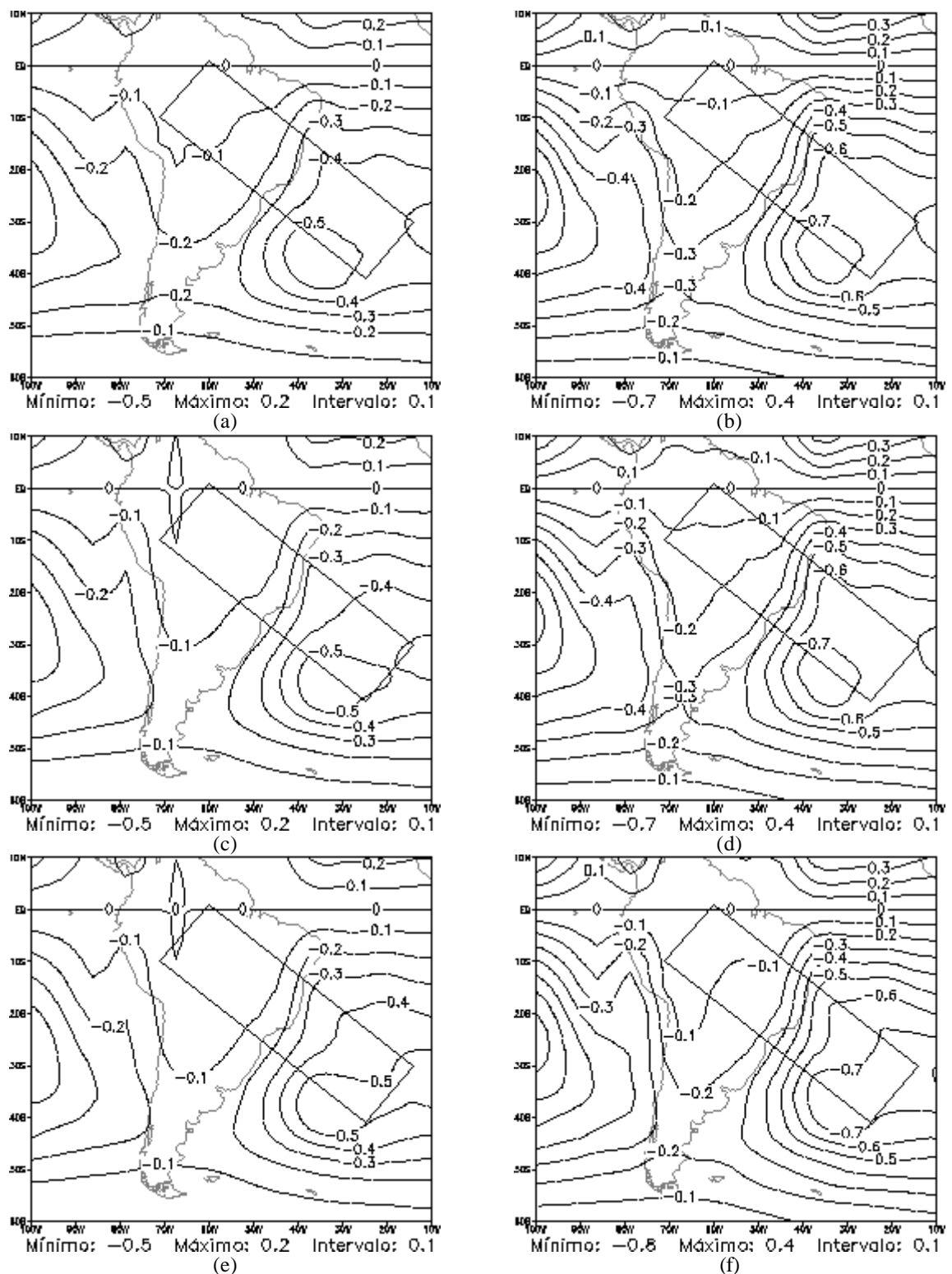


FIGURA 4.37 – Energia Total (%) das interações entre os modos Kelvin e Misto, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

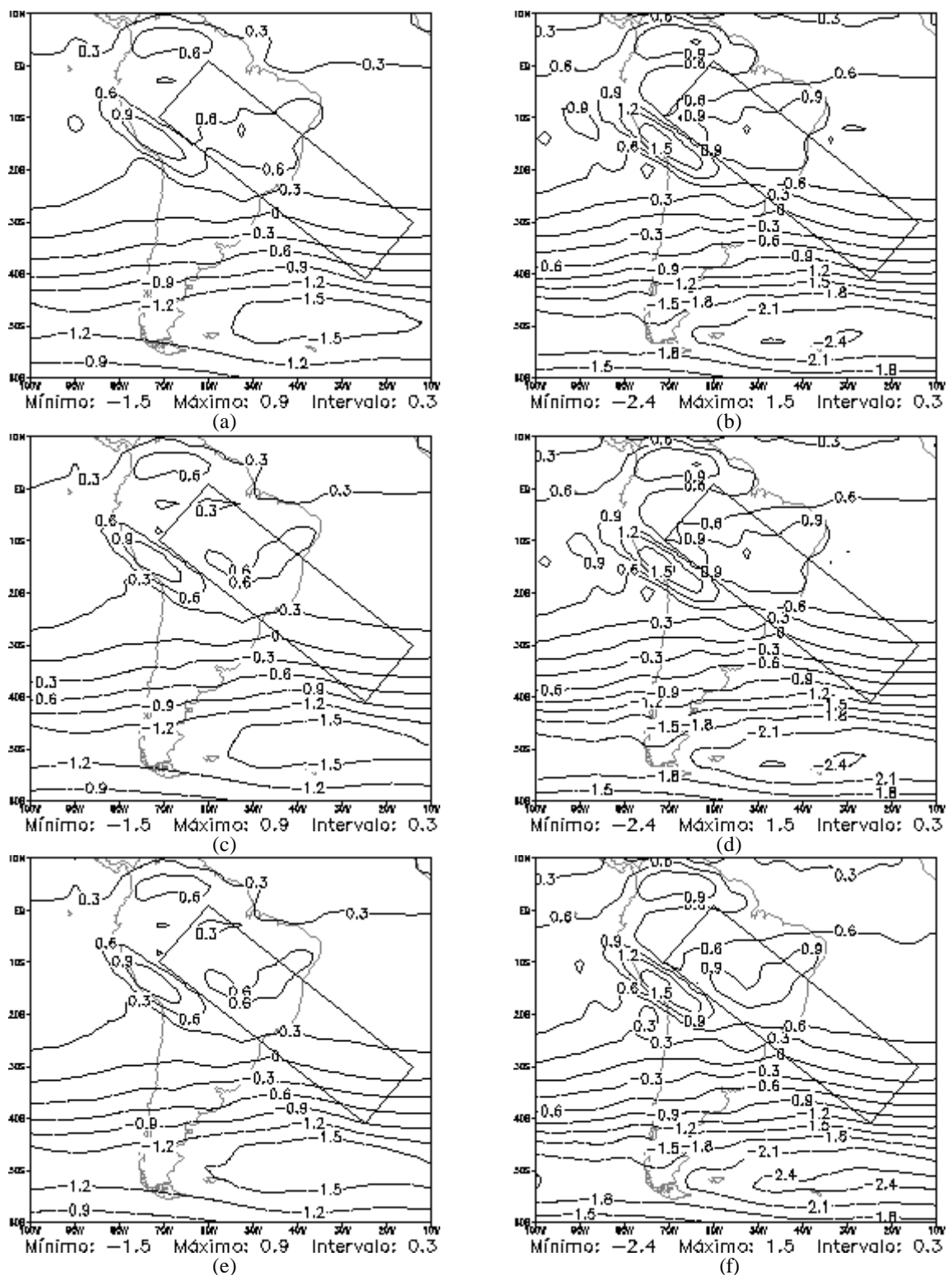


FIGURA 4.38 – Energia Total (%) das interações entre os modos Kelvin e Gravidade Oeste, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

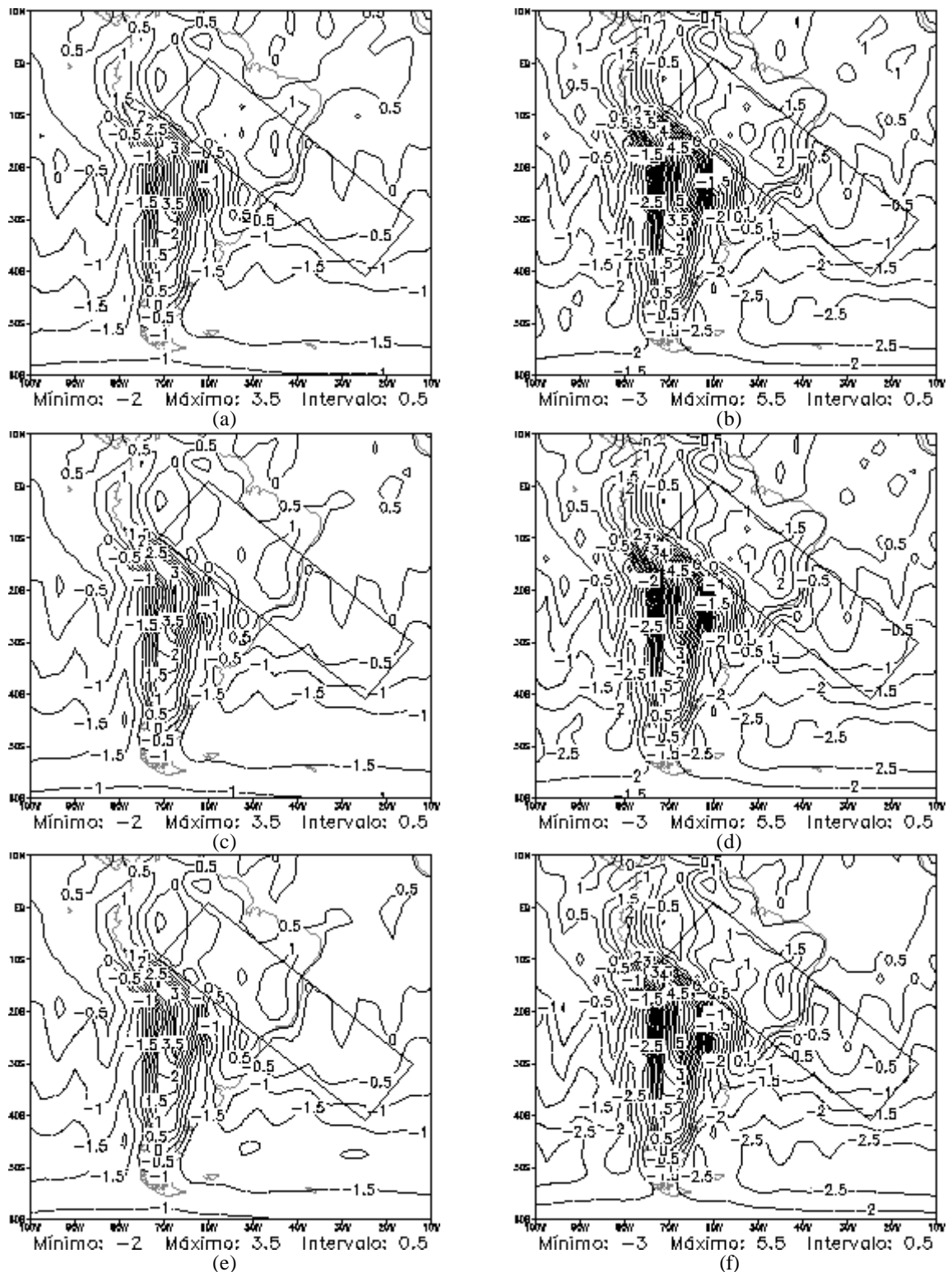


FIGURA 4.39 – Energia Total (%) das interações entre os modos Kelvin e Gravidade Este, para os modos verticais 1 a 3, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

Na Figura 4.42, as previsões das interações entre os modos Rossby e Misto mostram que, em todos os experimentos, o modelo reproduz os núcleos de máxima porcentagem de energia na região central da América do Sul, porém desloca-os para leste, na costa oeste da América do Sul, em relação ao observado nas Análises T126L28 e T170L42. O modelo T126L28 (T170L42) com o esquema de convecção RAS (Kuo) representam um pouco melhor os padrões observados. Verifica-se que, em ambas as resoluções, o modelo com os esquemas RAS e GRELL tendem a superestimar as porcentagens de energia.

Para as interações entre os modos Rossby e Gravidade Oeste (Figura 4.43), nota-se que o esquema Kuo reproduz bem o núcleo de máxima interferência construtiva de energia sobre o oceano, porém os valores são subestimados; sobre o continente, próximo ao equador, o modelo alterna núcleos de interferência construtiva/destrutiva de energia. Com o esquema RAS, observa-se uma melhor configuração do padrão observado sobre o continente para ambos os modelos, T126L28 e T170L42, entretanto os valores de máxima construção de energia na região da ZCAS é subestimado pelo modelo de maior resolução espacial. Já as previsões com o esquema GRELL indicam que o modelo T170L42 define melhor o núcleo de máxima porcentagem de energia na região da ZCAS, embora deslocado em direção ao continente; para a resolução T126L28, os valores são superestimados nesta região. Os modelos com os esquemas RAS e GRELL apresentam resultados relativamente melhores, para as resoluções T126L28 e T170L42, respectivamente.

No caso do produto cruzado Rossby-Gravidade Este (RBGE), os padrões são bem previstos pelos modelos T126L28 e T170L42, com os três esquemas de convecção profunda, conforme pode ser observado na Figura 4.44. Na região da ZCAS, o modelo com o esquema GRELL define melhor o padrão observado, embora os modelo com os esquemas Kuo e RAS apresentem um melhor desempenho para as resoluções T126L28 e T170L42, respectivamente.

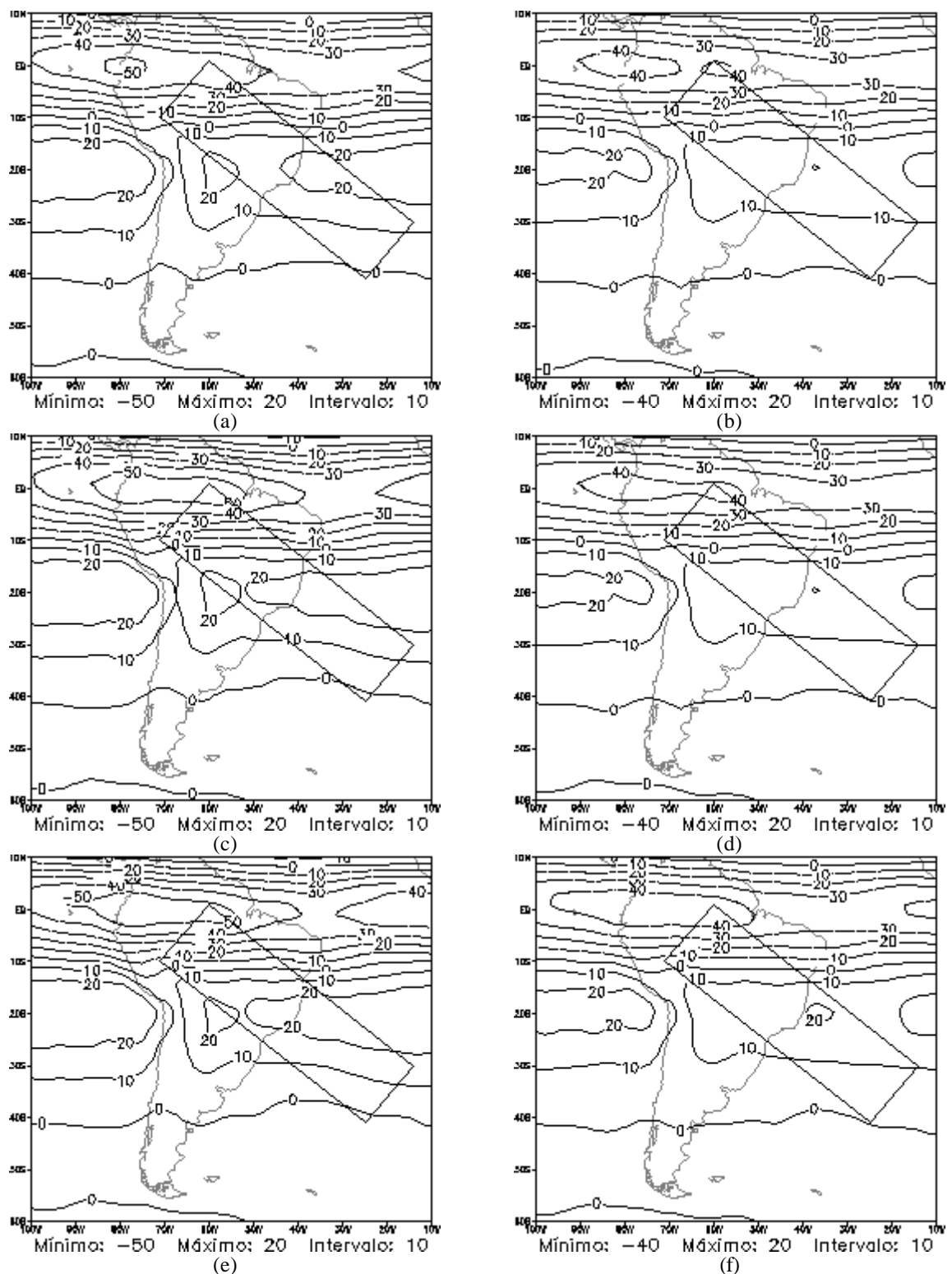


FIGURA 4.40 – Energia Total (%) da soma de todas as interações - Resíduo, para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.



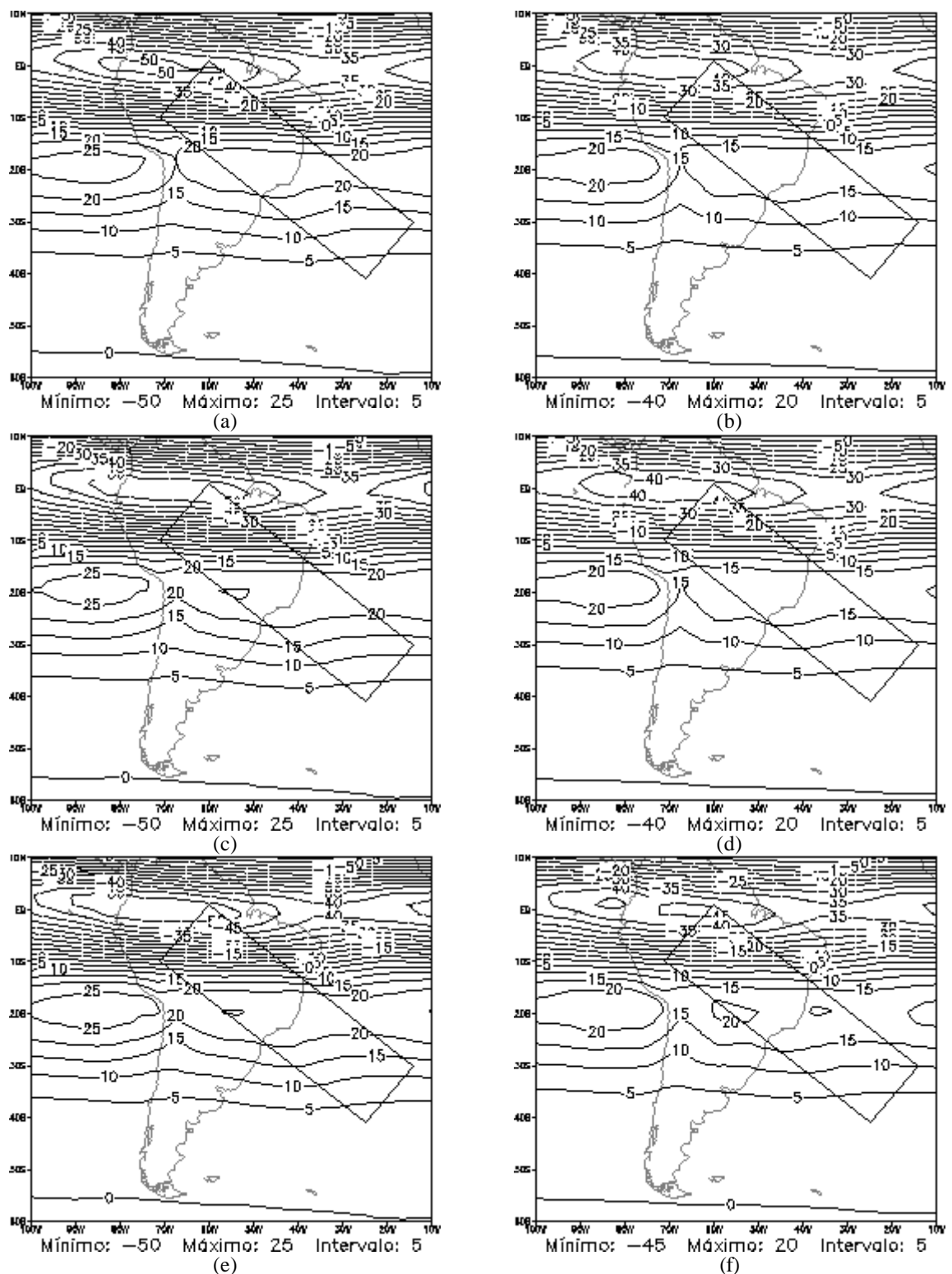


FIGURA 4.41 – Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Kelvin, para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

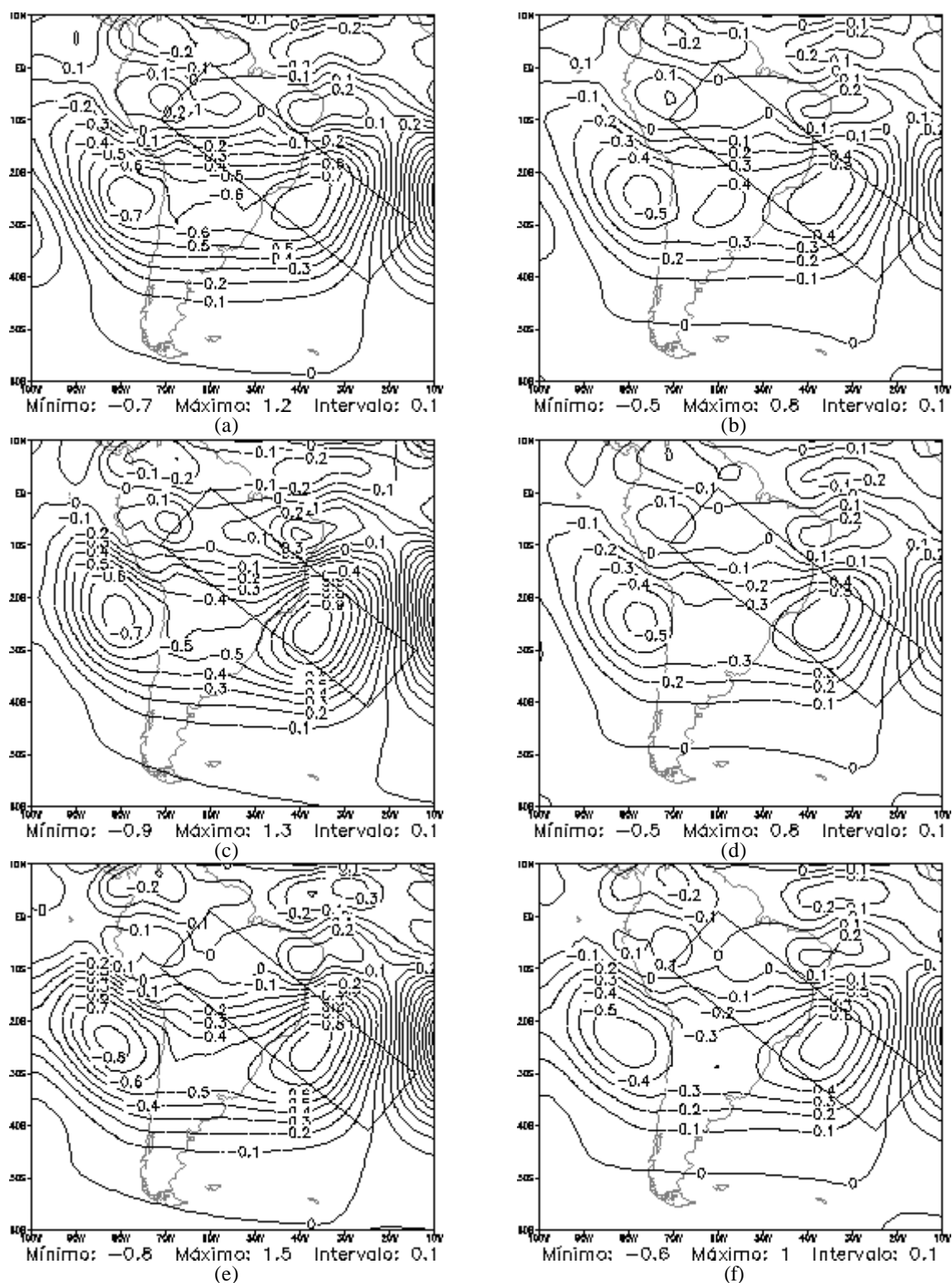


FIGURA 4.42 – Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Misto, para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

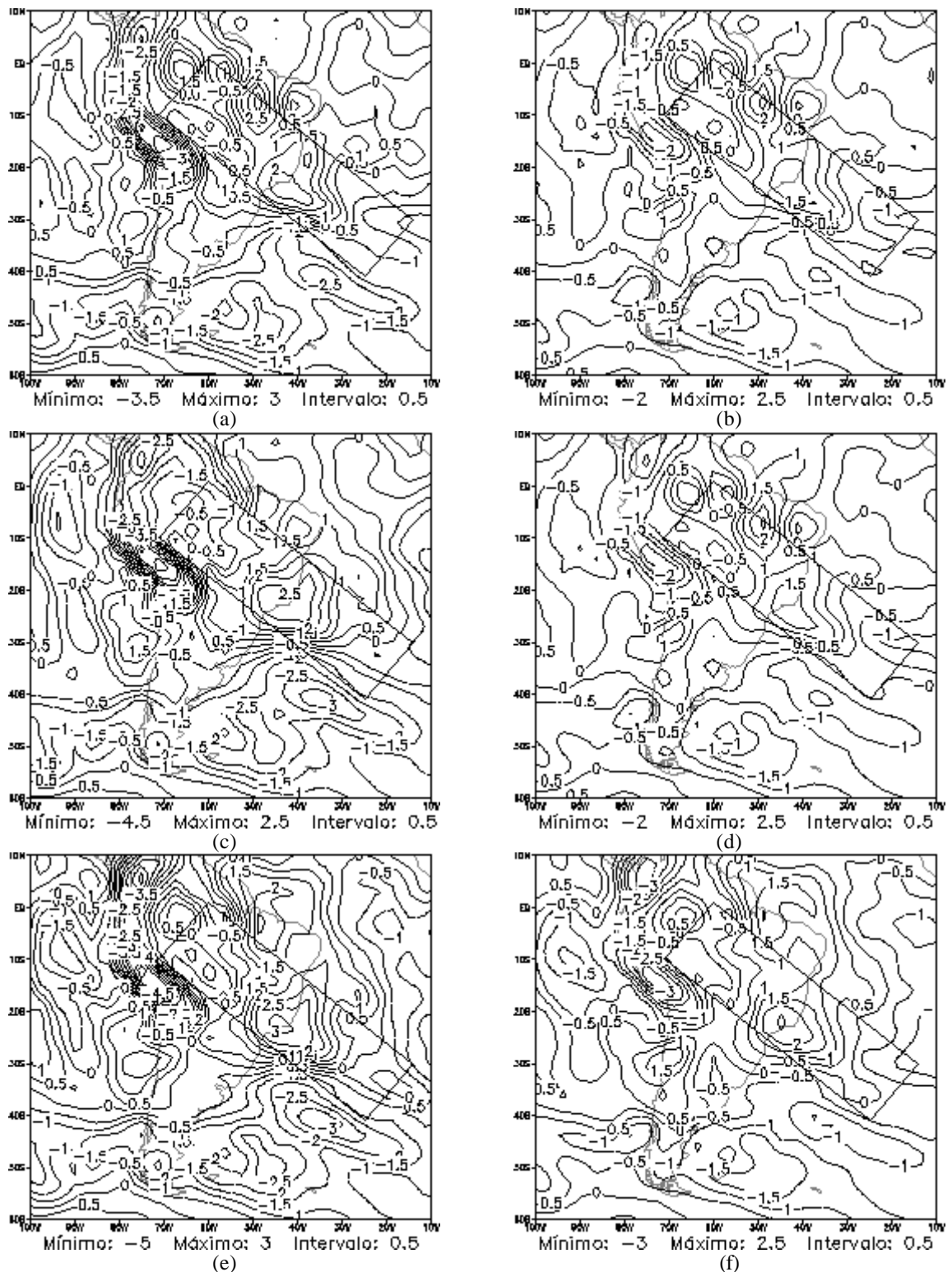


FIGURA 4.43 – Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Gravidade Oeste, para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

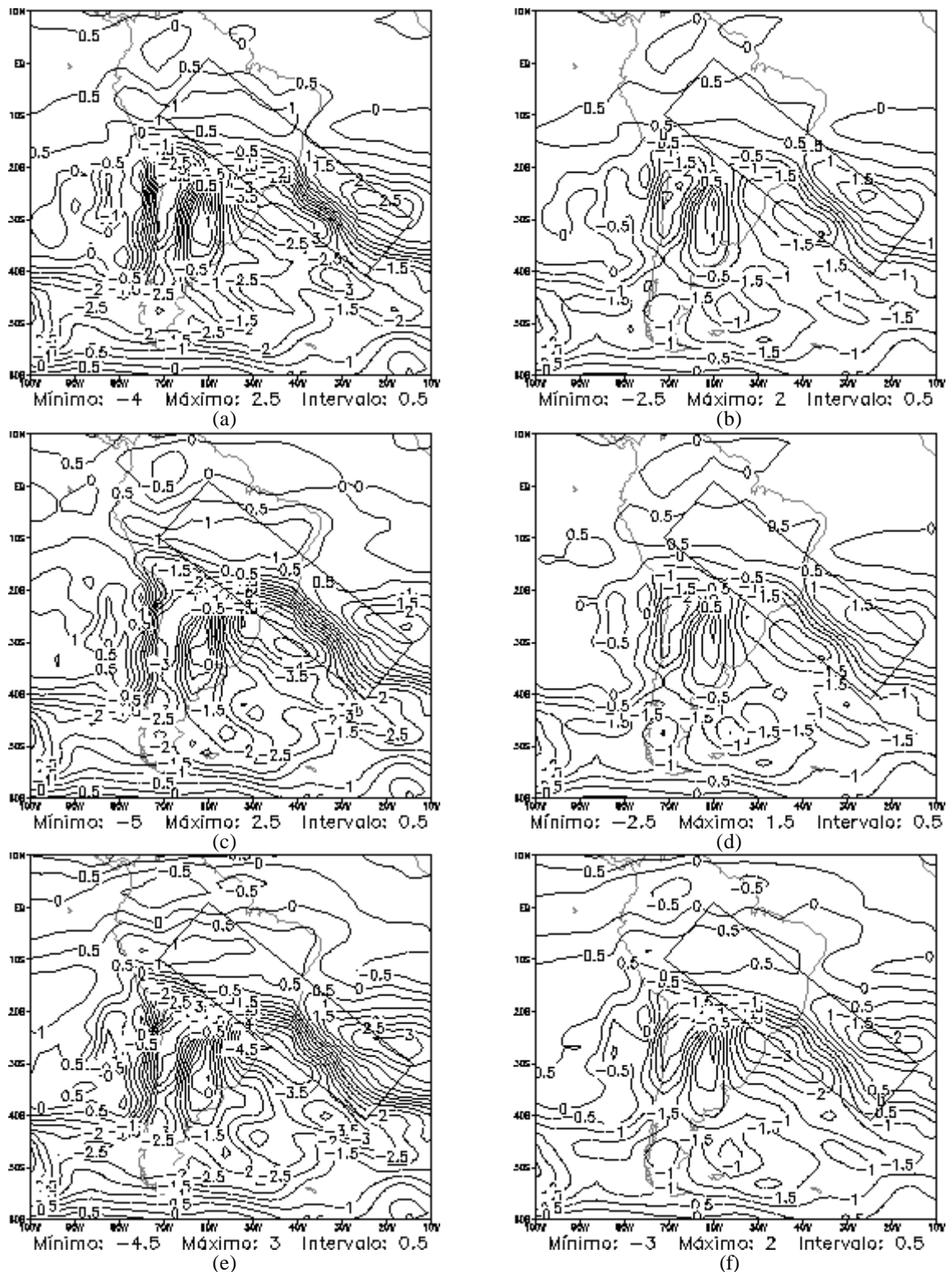


FIGURA 4.44 – Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Gravidade Este, para os modos verticais 4 a 7, média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

Para a categoria de modos verticais 8 a 12 (14, para T170L42), a soma de todas as interações entre os modos horizontais (Resíduo) indica que as previsões do modelo com os esquemas de convecção Kuo, RAS e GRELL, representadas na Figura 4.45, são muito semelhantes entre si, reproduzindo satisfatoriamente o campo de porcentagem de energia observado nas Análises T126L28 e T170L42. Para o modelo T170L42, o esquema GRELL define relativamente melhor os padrões, localmente. Considerando toda a região da América do Sul, os padrões globais parecem ser melhor reproduzidos pelo modelo com o esquema de convecção profunda RAS, em ambas as resoluções.

A Figura 4.46 ilustra as interações entre os modos Rossby e Kelvin previstas para os modos verticais da categoria III. Em ambas as resoluções, T126L28 e T170L42, todos os esquemas de convecção profunda reproduzem bem o padrão espacial e os valores das porcentagens de energia, não se observando diferenças significativas entre as Análises e previsões, bem como entre as próprias previsões. Entretanto, nota-se um melhor desempenho do modelo com o esquema GRELL, cujas previsões apresentam um maior detalhamento dos padrões regionais observados nos experimentos de controle.

Para sintetizar e avaliar objetivamente o desempenho do modelo global do CPTEC em relação as Análises T126L28 e T170L42, são apresentados nas Tabelas 4.1-4.4, o índice de correlação ( $r$ ) e o erro médio quadrático (EMQ) das auto-interações e interações entre os modos horizontais, para as três categorias de modos verticais e regiões da América do Sul e do composto de ZCAS, conforme definida na Figura 4.3.. Na primeira coluna das tabelas, a partição de energia total entre os modos horizontais  $H_a$  e  $H_b$  é descrita seguindo a nomenclatura  $etHaHb$ .  $H_a$  e  $H_b$ , representam os modos horizontais rb (Rossby), kv (Kelvin), mx (Misto), gw (Gravidade Oeste) e ge (Gravidade Leste). No caso das auto-interações,  $H_a = H_b$ . As variáveis  $etnsum$  e  $etnres$  indicam, respectivamente, a soma das auto-interações e das interações entre todos os modos horizontais. Os números escritos na frente de cada variável referem-se aos modos verticais de cada categoria. Os valores sublinhados indicam os valores de máxima correlação entre a Análise e a previsão; no caso de correlações iguais, considerou-se aquele com menor erro médio quadrático.

Observa-se nas Tabelas 4.1-4.4 que, em geral, os índices de correlação apresentam valores relativamente altos (em torno 0.90) e similares para os três esquemas de convecção profunda, o que confirma o bom desempenho dos esquemas KUO, RAS e GRELL em prever os padrões observados nas Análises T126L28 e T170L42, além da semelhança entre as previsões utilizando estas três parametrizações.

Uma rápida análise dos valores sublinhados, indica que o esquema KUO apresenta um desempenho ligeiramente melhor para o Modelo T126L28, em ambas as regiões, América do Sul e composto de ZCAS. No caso do modelo com resolução T170L42, as previsões utilizando o esquema RAS apresenta correlações ligeiramente mais elevadas para a região da América do Sul, enquanto o modelo com o esquema GRELL apresenta uma melhor destreza, quando restringimos a área do cálculo dos índices para a região do composto de ZCAS. Um aspecto interessante é que, em ambas as resoluções, o esquema GRELL tende a ser superior para as auto-interações/interações entre modos horizontais na categoria III, ou seja, para os modos internos 8 a 12 e 8 a 14, respectivamente.

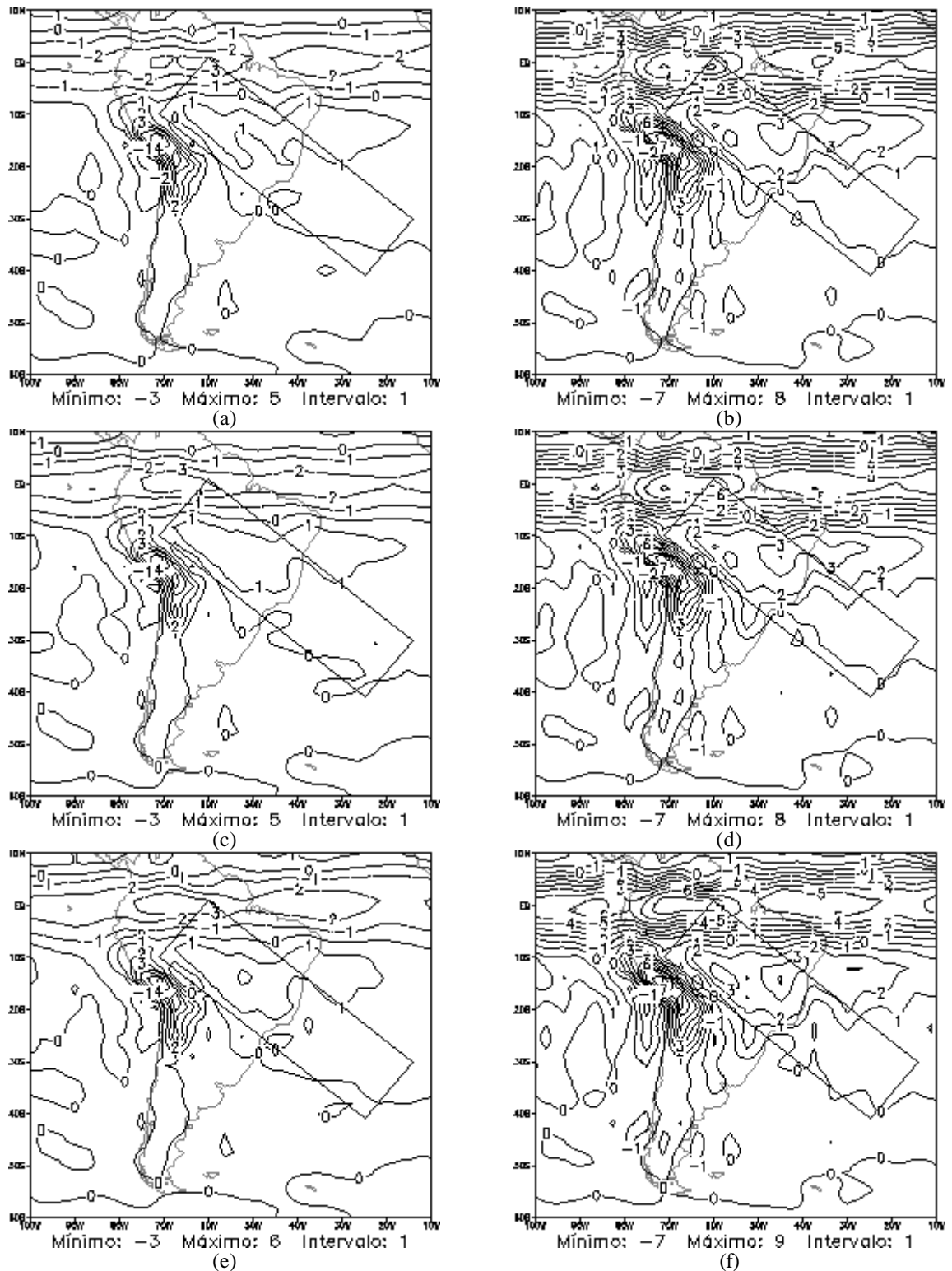


FIGURA 4.45 – Energia Total (%) da soma de todas as interações - Resíduo, para os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.

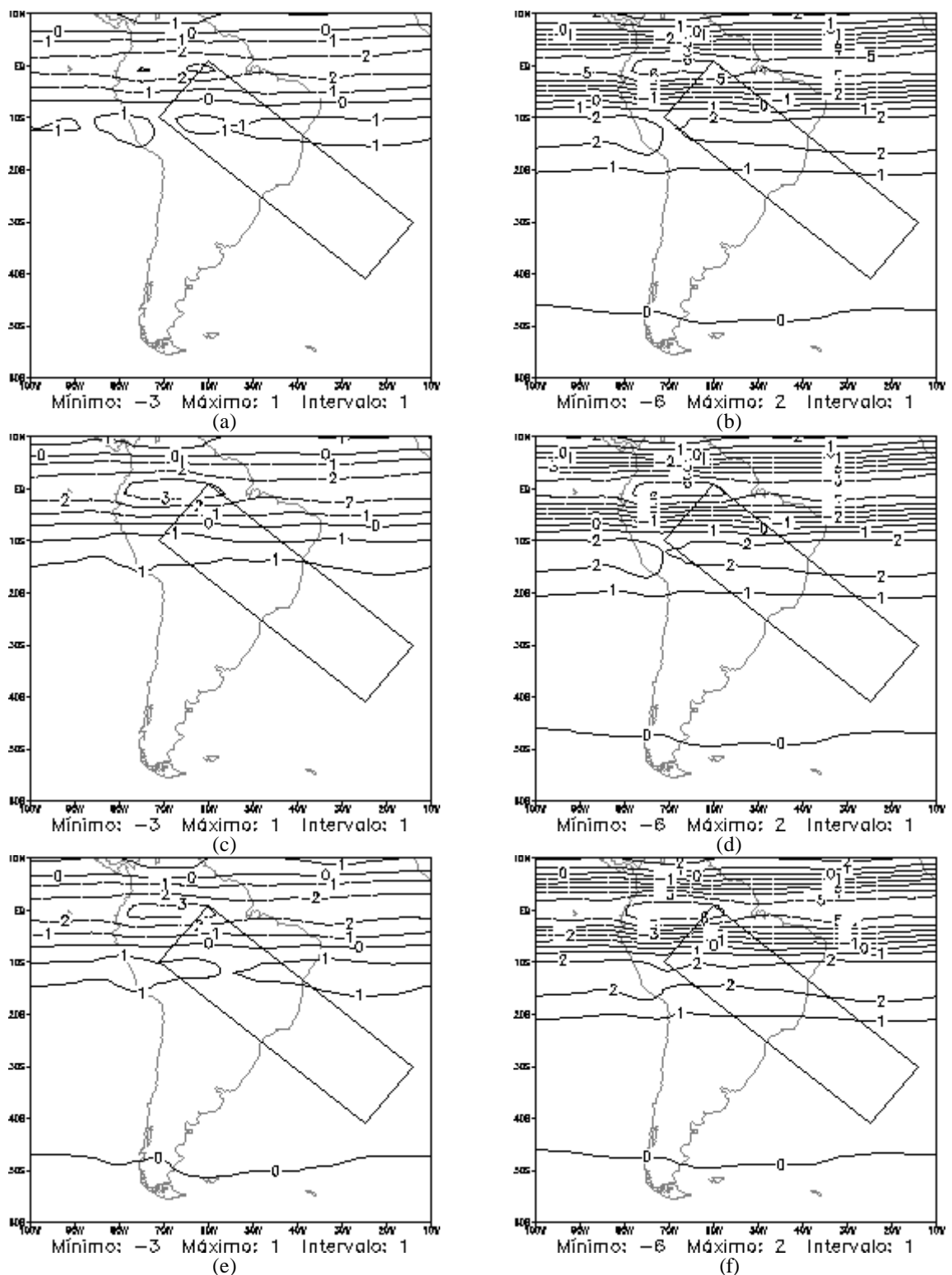


FIGURA 4.46 – Energia Total (%) das interações entre os modos Rossby e Kelvin, para os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), média das previsões de 24h, Modelo Global do CPTEC - T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; (e) e (f) GRELL.



TABELA 4.1 – Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Horizontais – Modelos T126L28 – Região: América do Sul.

MODO HORIZONTAL	KUO		RAS		GRELL	
	r	EMQ (%)	r	EMQ (%)	r	EMQ (%)
etrbrb13	0.998	1.944	0.999	1.773	0.998	1.738
etrbrb47	0.993	1.697	0.987	1.931	0.981	2.340
etrbrb812	0.977	0.650	0.988	0.493	0.985	0.543
etkvkv13	0.996	0.289	0.981	0.424	0.975	0.459
etkvkv47	0.999	1.072	0.999	1.300	0.999	1.524
etkvkv812	0.992	0.306	0.991	0.238	0.997	0.215
etmxmx13	0.967	0.014	0.948	0.018	0.961	0.016
etmxmx47	0.980	0.033	0.970	0.031	0.966	0.034
etmxmx812	0.996	0.014	0.978	0.012	0.974	0.015
etgwgw13	0.997	0.027	0.997	0.029	0.997	0.030
etgwgw47	0.990	0.049	0.981	0.076	0.971	0.098
etgwgw812	0.967	0.050	0.957	0.052	0.960	0.047
etgege13	0.997	0.024	0.998	0.022	0.997	0.024
etgege47	0.996	0.069	0.994	0.087	0.995	0.086
etgege812	0.981	0.036	0.978	0.030	0.976	0.032
etnsum13	0.997	2.106	0.998	2.009	0.998	2.005
etnsum47	0.998	2.137	0.999	1.879	0.998	2.298
etnsum812	0.953	0.756	0.966	0.601	0.971	0.599
etnres13	0.994	0.657	0.991	0.713	0.991	0.720
etnres47	0.998	1.733	0.998	1.461	0.997	1.864
etnres812	0.969	0.272	0.975	0.245	0.970	0.274
etrbkv13	0.998	0.497	0.995	0.545	0.994	0.600
etrbkv47	0.999	0.881	0.999	1.202	0.998	1.794
etrbkv812	0.992	0.149	0.991	0.131	0.994	0.117
etrbmx13	0.938	0.084	0.912	0.107	0.905	0.114
etrbmx47	0.476	0.298	0.515	0.303	0.395	0.335
etrbmx812	0.915	0.015	0.849	0.021	0.836	0.020
etrbgw13	0.988	0.465	0.986	0.470	0.986	0.469
etrbgw47	0.689	0.863	0.719	0.897	0.683	1.027
etrbgw812	0.948	0.123	0.928	0.126	0.925	0.139
etrbge13	0.998	0.328	0.999	0.301	0.998	0.298
etrbge47	0.948	0.429	0.886	0.718	0.934	0.597
etrbge812	0.942	0.111	0.951	0.100	0.957	0.100
etkvmx13	0.940	0.064	0.916	0.070	0.901	0.077
etkvmx47	0.499	0.623	0.533	0.613	0.376	0.694
etkvmx812	0.881	0.029	0.782	0.044	0.837	0.035
etkvgw13	0.998	0.048	0.998	0.052	0.998	0.066
etkvgw47	0.651	0.367	0.721	0.251	0.603	0.393
etkvgw812	0.718	0.017	0.572	0.035	0.638	0.024
etkvge13	0.996	0.097	0.997	0.088	0.996	0.106
etkvge47	0.854	0.627	0.718	0.948	0.739	1.064
etkvge812	0.651	0.098	0.671	0.091	0.701	0.088
etmxgw13	0.948	0.013	0.927	0.015	0.918	0.016
etmxgw47	0.916	0.020	0.916	0.019	0.886	0.026
etmxgw812	0.907	0.006	0.746	0.008	0.608	0.009
etmxge13	0.958	0.018	0.942	0.020	0.932	0.022
etmxge47	0.892	0.041	0.922	0.036	0.894	0.043
etmxge812	0.714	0.010	0.555	0.014	0.526	0.013
etgwge13	0.997	0.044	0.997	0.043	0.997	0.047
etgwge47	0.952	0.055	0.934	0.071	0.917	0.079
etgwge812	0.964	0.023	0.947	0.024	0.944	0.023

TABELA 4.2 – Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Horizontais - Modelos T170L42 – Região: América do Sul.

MODO HORIZONTAL	KUO		RAS		GRELL	
	r	EMQ	r	EMQ	r	EMQ
etrbrb13	0.998	1.427	0.998	1.411	<u>0.998</u>	1.312
etrbrb47	0.994	1.329	<u>0.994</u>	1.298	<u>0.983</u>	1.737
etrbrb814	0.991	0.793	<u>0.993</u>	0.738	<u>0.994</u>	0.759
etkvkv13	0.999	0.667	<u>0.999</u>	0.592	<u>0.992</u>	0.616
etkvkv47	0.999	1.035	<u>0.999</u>	1.018	0.999	1.440
etkvkv814	0.996	0.429	<u>0.996</u>	0.423	<u>0.998</u>	0.344
etmxmx13	0.969	0.014	<u>0.972</u>	0.013	<u>0.964</u>	0.015
etmxmx47	<u>0.977</u>	0.022	<u>0.972</u>	0.023	0.965	0.025
etmxmx814	<u>0.993</u>	0.013	0.990	0.012	0.959	0.015
etgwgw13	<u>0.997</u>	0.034	0.996	0.035	0.996	0.037
etgwgw47	<u>0.989</u>	0.026	0.989	0.027	0.967	0.058
etgwgw814	<u>0.937</u>	0.026	0.933	0.027	0.910	0.035
etgege13	0.998	0.026	0.998	0.026	<u>0.998</u>	0.025
etgege47	0.994	0.056	<u>0.995</u>	0.057	<u>0.993</u>	0.063
etgege814	<u>0.971</u>	0.018	0.971	0.019	0.958	0.024
etnsum13	0.997	1.766	0.997	1.712	<u>0.997</u>	1.673
etnsum47	0.998	1.870	<u>0.999</u>	1.743	<u>0.999</u>	2.021
etnsum814	0.978	0.943	<u>0.980</u>	0.896	<u>0.985</u>	0.882
etnres13	0.995	0.740	<u>0.995</u>	0.720	<u>0.994</u>	0.773
etnres47	0.998	1.401	<u>0.998</u>	1.283	0.997	1.425
etnres814	0.990	0.329	<u>0.991</u>	0.317	0.989	0.350
etrbkv13	0.998	0.743	<u>0.999</u>	0.725	0.997	0.773
etrbkv47	0.999	0.715	<u>0.999</u>	0.656	0.998	1.415
etrbkv814	0.997	0.198	0.997	0.197	<u>0.997</u>	0.180
etrbm13	0.948	0.082	<u>0.948</u>	0.081	<u>0.917</u>	0.109
etrbm47	<u>0.455</u>	0.217	<u>0.453</u>	0.212	0.390	0.243
etrbm814	<u>0.904</u>	0.025	<u>0.904</u>	0.024	0.839	0.030
etrbgw13	0.982	0.494	<u>0.982</u>	0.491	0.981	0.491
etrbgw47	0.550	0.714	0.571	0.693	<u>0.615</u>	0.782
etrbgw814	0.964	0.139	<u>0.964</u>	0.138	0.948	0.172
etrbge13	0.997	0.326	<u>0.997</u>	0.325	<u>0.998</u>	0.294
etrbge47	0.935	0.307	<u>0.940</u>	0.295	0.915	0.422
etrbge814	0.958	0.130	<u>0.962</u>	0.126	<u>0.969</u>	0.124
etkvm13	<u>0.975</u>	0.083	0.974	0.080	0.945	0.097
etkvm47	<u>0.510</u>	0.477	0.497	0.473	0.420	0.523
etkvm814	<u>0.912</u>	0.052	<u>0.914</u>	0.049	0.878	0.059
etkvgw13	<u>0.998</u>	0.091	0.998	0.093	0.997	0.101
etkvgw47	0.471	0.271	0.476	0.262	<u>0.508</u>	0.319
etkvgw814	<u>0.843</u>	0.025	0.817	0.026	<u>0.706</u>	0.035
etkvge13	0.995	0.162	0.996	0.159	<u>0.996</u>	0.151
etkvge47	0.783	0.515	<u>0.796</u>	0.499	0.641	0.821
etkvge814	0.828	0.125	<u>0.842</u>	0.115	0.833	0.124
etmxgw13	<u>0.967</u>	0.012	<u>0.965</u>	0.012	0.941	0.015
etmxgw47	<u>0.887</u>	0.015	0.886	0.015	0.861	0.020
etmxgw814	<u>0.878</u>	0.006	0.875	0.006	0.632	0.008
etmxge13	<u>0.969</u>	0.016	<u>0.969</u>	0.016	0.944	0.020
etmxge47	0.861	0.029	0.874	0.027	<u>0.887</u>	0.029
etmxge814	0.741	0.011	<u>0.742</u>	0.011	0.672	0.013
etgwge13	<u>0.998</u>	0.051	0.998	0.052	0.997	0.056
etgwge47	0.943	0.034	<u>0.948</u>	0.033	0.907	0.046
etgwge814	<u>0.950</u>	0.014	<u>0.949</u>	0.014	0.920	0.019

TABELA 4.3 – Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Horizontais - Modelos T126L28 – Região: Composto ZCAS.

MODO HORIZONTAL	KUO		RAS		GRELL	
	r	EMQ (%)	r	EMQ (%)	r	EMQ (%)
etrbrb13	0.998	0.919	0.998	0.877	0.997	0.810
etrbrb47	0.989	1.670	0.979	1.535	0.977	1.593
etrbrb812	0.971	0.510	0.980	0.374	0.976	0.373
etkvkv13	0.996	0.328	0.973	0.376	0.975	0.314
etkvkv47	1.000	1.117	0.999	1.234	1.000	1.066
etkvkv812	0.998	0.095	0.998	0.221	1.000	0.054
etmxmx13	0.915	0.014	0.908	0.011	0.891	0.012
etmxmx47	0.954	0.016	0.973	0.013	0.948	0.016
etmxmx812	0.998	0.002	0.992	0.009	0.995	0.009
etgwgw13	0.992	0.012	0.980	0.019	0.982	0.016
etgwgw47	0.923	0.037	0.882	0.076	0.849	0.106
etgwgw812	0.731	0.022	0.739	0.035	0.773	0.036
etgege13	0.994	0.010	0.993	0.009	0.990	0.010
etgege47	0.922	0.044	0.867	0.079	0.886	0.083
etgege812	0.902	0.017	0.874	0.022	0.896	0.017
etnsum13	0.997	1.123	0.998	1.108	0.997	1.009
etnsum47	0.998	2.436	0.998	1.456	0.998	1.387
etnsum812	0.936	0.535	0.939	0.536	0.956	0.398
etnres13	0.996	0.331	0.996	0.498	0.995	0.548
etnres47	0.998	2.314	0.998	1.369	0.998	1.434
etnres812	0.982	0.193	0.979	0.223	0.979	0.231
etrbkv13	0.998	0.452	0.996	0.405	0.996	0.420
etrbkv47	1.000	0.991	1.000	1.448	1.000	1.468
etrbkv812	0.998	0.078	0.996	0.152	0.998	0.084
etrbmx13	0.980	0.079	0.965	0.098	0.956	0.115
etrbmx47	0.715	0.238	0.860	0.227	0.828	0.206
etrbmx812	0.960	0.010	0.885	0.015	0.957	0.009
etrbgw13	0.998	0.206	0.997	0.249	0.997	0.226
etrbgw47	0.354	1.407	0.555	1.292	0.515	1.359
etrbgw812	0.785	0.118	0.798	0.103	0.827	0.127
etrbge13	0.999	0.142	0.999	0.114	0.998	0.112
etrbge47	0.960	0.469	0.908	0.996	0.941	0.771
etrbge812	0.801	0.101	0.851	0.106	0.840	0.098
etkvmx13	0.965	0.093	0.976	0.088	0.973	0.093
etkvmx47	0.206	0.670	0.576	0.560	0.513	0.515
etkvmx812	0.957	0.019	0.845	0.027	0.915	0.014
etkvgw13	0.999	0.034	0.998	0.036	0.997	0.041
etkvgw47	0.165	0.543	0.347	0.288	0.144	0.407
etkvgw812	0.386	0.024	0.691	0.030	0.709	0.017
etkvge13	0.994	0.094	0.994	0.073	0.991	0.090
etkvge47	0.711	0.943	0.651	1.196	0.716	1.363
etkvge812	0.701	0.051	0.719	0.094	0.715	0.070
etmxgw13	0.950	0.007	0.954	0.009	0.948	0.010
etmxgw47	0.733	0.015	0.595	0.017	0.494	0.024
etmxgw812	0.681	0.005	0.818	0.005	0.690	0.007
etmxge13	0.943	0.019	0.935	0.020	0.934	0.021
etmxge47	0.875	0.029	0.926	0.040	0.900	0.033
etmxge812	0.655	0.009	0.316	0.011	0.282	0.011
etgwge13	0.989	0.022	0.977	0.027	0.977	0.025
etgwge47	0.877	0.054	0.886	0.060	0.859	0.074
etgwge812	0.880	0.012	0.817	0.015	0.838	0.014

TABELA 4.4 – Índice de Correlação e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Horizontais - Modelos T170L42 – Região: Composto ZCAS.

MODO HORIZONTAL	KUO		RAS		GRELL	
	r	EMQ (%)	r	EMQ (%)	r	EMQ (%)
etrbrb13	<u>0.998</u>	0.586	0.997	0.553	0.997	0.477
etrbrb47	0.991	1.535	<u>0.992</u>	1.427	0.978	1.208
etrbrb814	0.991	0.684	<u>0.993</u>	0.609	<u>0.995</u>	0.391
etkvkv13	0.999	0.694	<u>0.999</u>	0.600	0.994	0.433
etkvkv47	1.000	1.162	1.000	1.137	<u>1.000</u>	0.897
etkvkv814	0.999	0.151	0.999	0.146	<u>1.000</u>	0.068
etmxmx13	0.938	0.012	<u>0.951</u>	0.011	0.927	0.011
etmxmx47	0.938	0.013	0.940	0.014	<u>0.942</u>	0.013
etmxmx814	<u>0.996</u>	0.002	0.996	0.003	0.994	0.007
etgwgw13	<u>0.988</u>	0.017	0.986	0.018	0.973	0.021
etgwgw47	0.890	0.025	<u>0.895</u>	0.024	0.809	0.063
etgwgw814	0.672	0.018	<u>0.640</u>	0.019	<u>0.764</u>	0.028
etgege13	0.994	0.010	0.994	0.009	<u>0.995</u>	0.007
etgege47	<u>0.945</u>	0.021	0.938	0.023	0.868	0.051
etgege814	<u>0.877</u>	0.012	<u>0.894</u>	0.012	0.885	0.013
etnsum13	0.995	1.110	<u>0.995</u>	0.987	0.992	0.775
etnsum47	0.999	2.484	0.999	2.348	<u>0.999</u>	1.131
etnsum814	0.977	0.735	0.982	0.665	<u>0.991</u>	0.427
etnres13	0.998	0.405	0.998	0.383	<u>0.999</u>	0.509
etnres47	0.998	1.948	0.998	1.869	<u>0.999</u>	0.953
etnres814	0.994	0.287	<u>0.995</u>	0.284	0.994	0.295
etrbkv13	0.998	0.652	<u>0.999</u>	0.598	0.998	0.481
etrbkv47	1.000	0.882	<u>1.000</u>	0.818	0.999	1.151
etrbkv814	<u>0.999</u>	0.127	0.999	0.136	0.999	0.135
etrbm13	<u>0.985</u>	0.085	0.983	0.079	0.968	0.126
etrbm47	0.729	0.172	0.761	0.158	<u>0.809</u>	0.160
etrbm814	0.896	0.022	0.899	0.021	<u>0.937</u>	0.015
etrbgw13	<u>0.998</u>	0.177	0.998	0.186	0.997	0.205
etrbgw47	0.303	1.159	0.342	1.112	<u>0.554</u>	0.997
etrbgw814	0.899	0.151	0.906	0.144	<u>0.921</u>	0.147
etrbge13	0.999	0.137	0.999	0.133	<u>0.999</u>	0.080
etrbge47	<u>0.966</u>	0.286	0.961	0.324	0.925	0.557
etrbge814	0.904	0.136	<u>0.913</u>	0.132	0.911	0.130
etkvm13	0.980	0.127	0.980	0.123	<u>0.982</u>	0.136
etkvm47	0.169	0.514	0.273	0.456	<u>0.442</u>	0.431
etkvm814	<u>0.977</u>	0.050	0.975	0.041	0.968	0.031
etkvgw13	0.997	0.066	<u>0.997</u>	0.064	0.995	0.060
etkvgw47	<u>0.341</u>	0.421	0.317	0.416	0.322	0.081
etkvgw814	<u>0.655</u>	0.033	0.624	0.034	0.618	0.028
etkvge13	0.992	0.180	0.992	0.167	<u>0.994</u>	0.123
etkvge47	0.626	0.736	<u>0.655</u>	0.662	0.590	0.988
etkvge814	0.833	0.082	<u>0.853</u>	0.079	0.842	0.086
etmxgw13	0.954	0.007	0.953	0.007	<u>0.958</u>	0.010
etmxgw47	0.635	0.012	<u>0.669</u>	0.011	0.528	0.016
etmxgw814	0.811	0.004	<u>0.825</u>	0.004	0.756	0.005
etmxge13	0.947	0.017	<u>0.954</u>	0.016	0.948	0.017
etmxge47	0.864	0.022	0.901	0.019	<u>0.909</u>	0.023
etmxge814	0.550	0.007	<u>0.603</u>	0.007	<u>0.520</u>	0.009
etgwge13	<u>0.984</u>	0.028	0.983	0.029	0.975	0.029
etgwge47	0.808	0.035	<u>0.824</u>	0.034	0.815	0.044
etgwge814	<u>0.867</u>	0.010	0.866	0.010	0.821	0.011

### 4.3 Interação da Energia Total entre os Modos Verticais em Diferentes Níveis de Pressão

A análise da interação da energia total entre os modos verticais para diferentes classes de níveis de pressão é apresentada nesta seção. Os resultados apresentados referem-se às porcentagens de energia total, da interação de energia total entre os modos de cada uma das categorias de modos verticais, da interação entre duas categorias de modos verticais (I-II, I-III e II-III) e o resíduo da interação de energia total entre os 12 primeiros modos verticais do modelo T126L28 e dos 14 primeiros modos verticais do modelo T170L42, considerando-se as classes de níveis de pressão descritas na Tabela 4.5, a seguir.

TABELA 4.5 – Classes de Níveis de Pressão.

<b>Classes</b>	<b>Níveis de Pressão</b>
a- Baixos Níveis	Superfície até 800 hPa
b- Níveis Médios	800 hPa até 300 hPa
c- Altos Níveis	300 hPa até 150 hPa
d - Estratosfera	150 hPa até o Topo

Nas Figuras 4.47-4.50, são apresentadas as porcentagens de energia total para os níveis baixos, médios e altos da troposfera e para a estratosfera, respectivamente. Verifica-se que as máximas porcentagens de energia total, em todas as classes de níveis de pressão, são obtidas para os modos verticais 4 a 7, sendo observado um crescimento da energia dos baixos níveis para a estratosfera, onde os valores estão em torno de 40 a 50%, na região da ZCAS. Para as categorias I e III as distribuições de energia indicam um aumento de energia total dos baixos para os níveis médios, seguido de um decréscimo em altos níveis e máximos de energia na estratosfera, principalmente em latitudes altas, com valores da ordem de 15 a 20% para os modos verticais 1 a 3, e de 3 a 7% para os modos verticais da categoria III. Em geral, valores menores de porcentagem de energia total são observados na Análise T170L42 para a categoria II, enquanto valores mais elevados são encontrados na Análise T126L28 para os modos verticais 1 a 3 e 8 a 12.

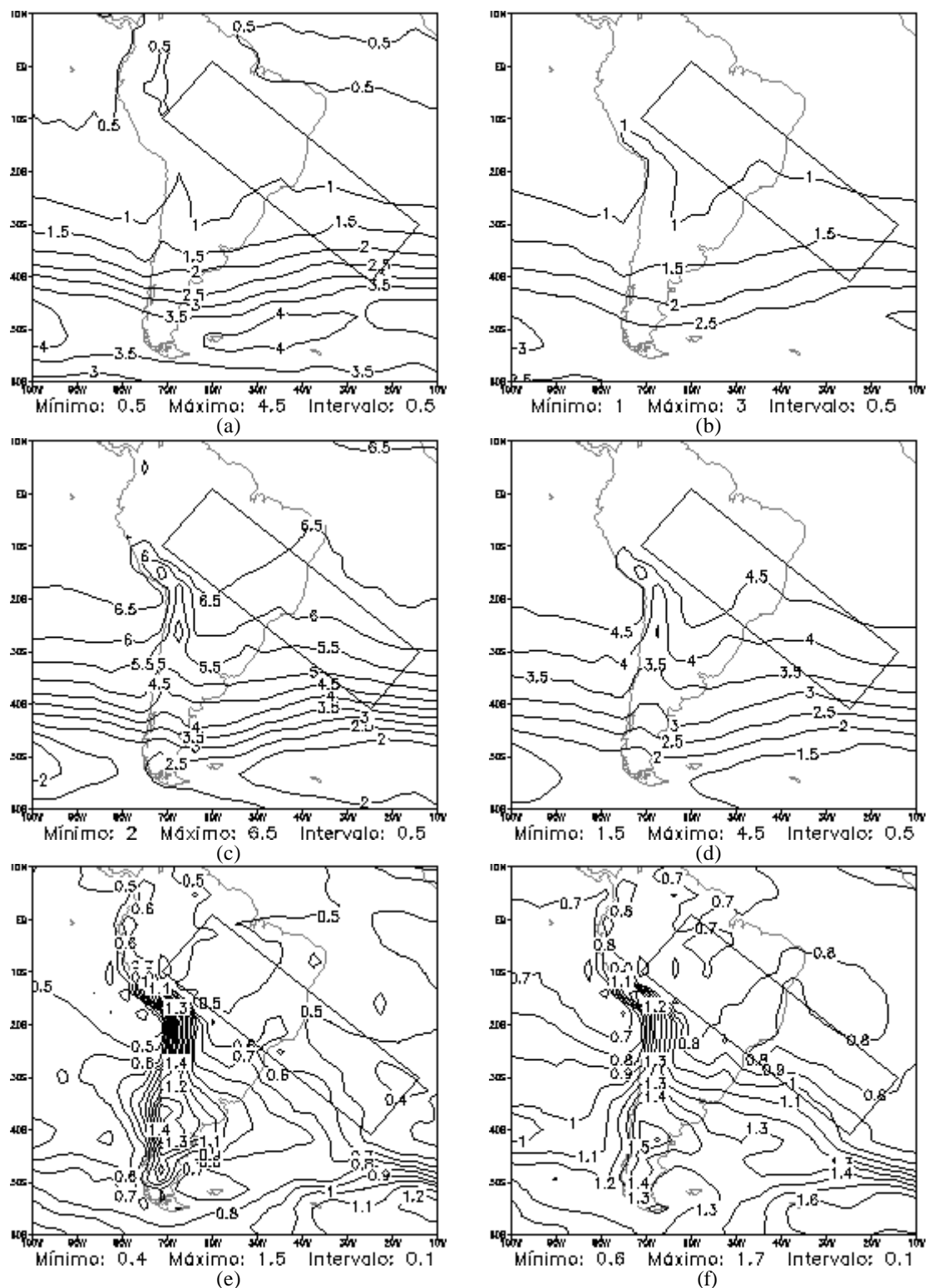


FIGURA 4.47 – Energia total (%) em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a12 (8 a 14, para T170L42).

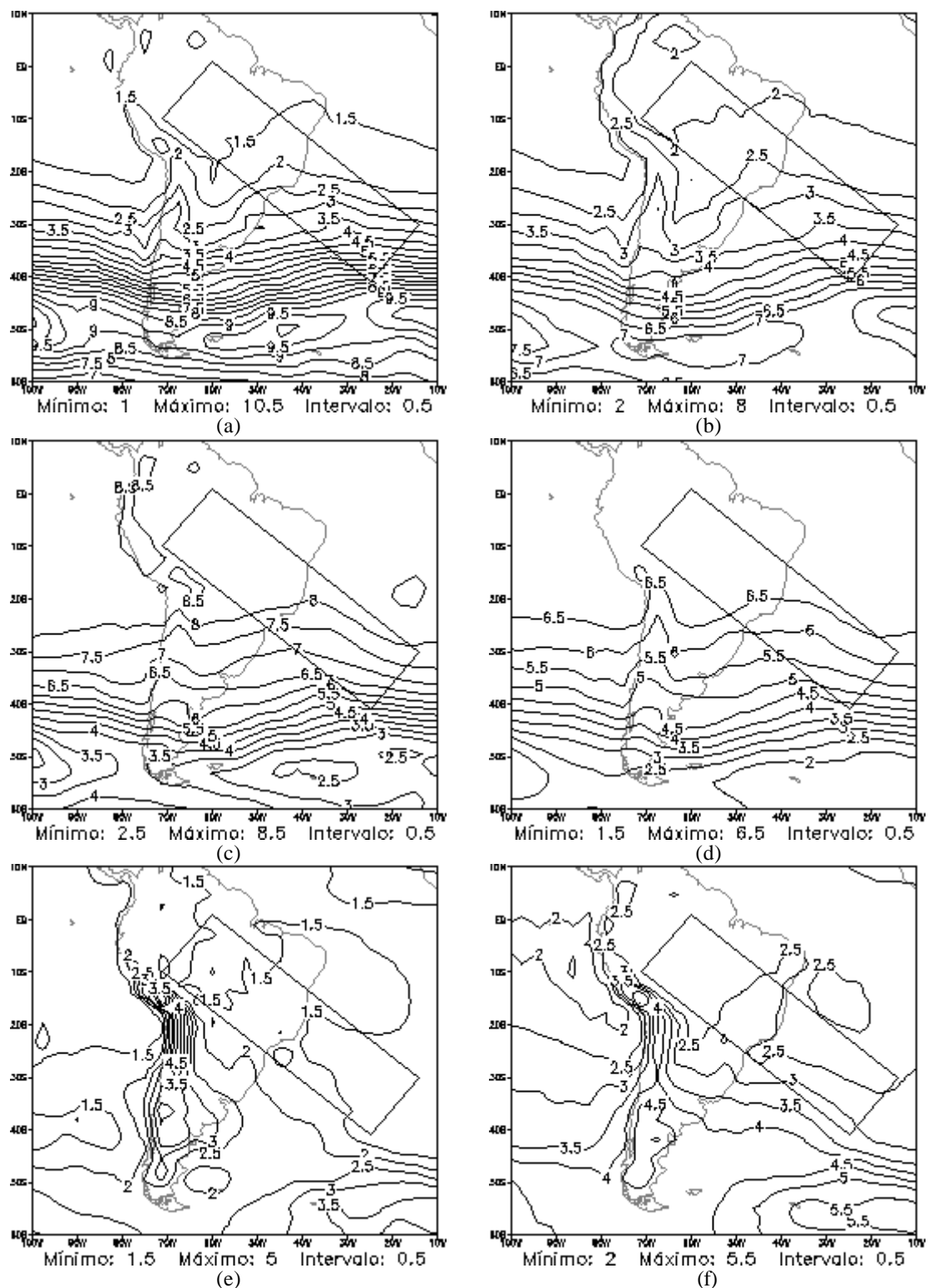


FIGURA 4.48 – Energia total (%) em níveis médios (800 hPa a 300 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a12 (8 a 14, para T170L42).

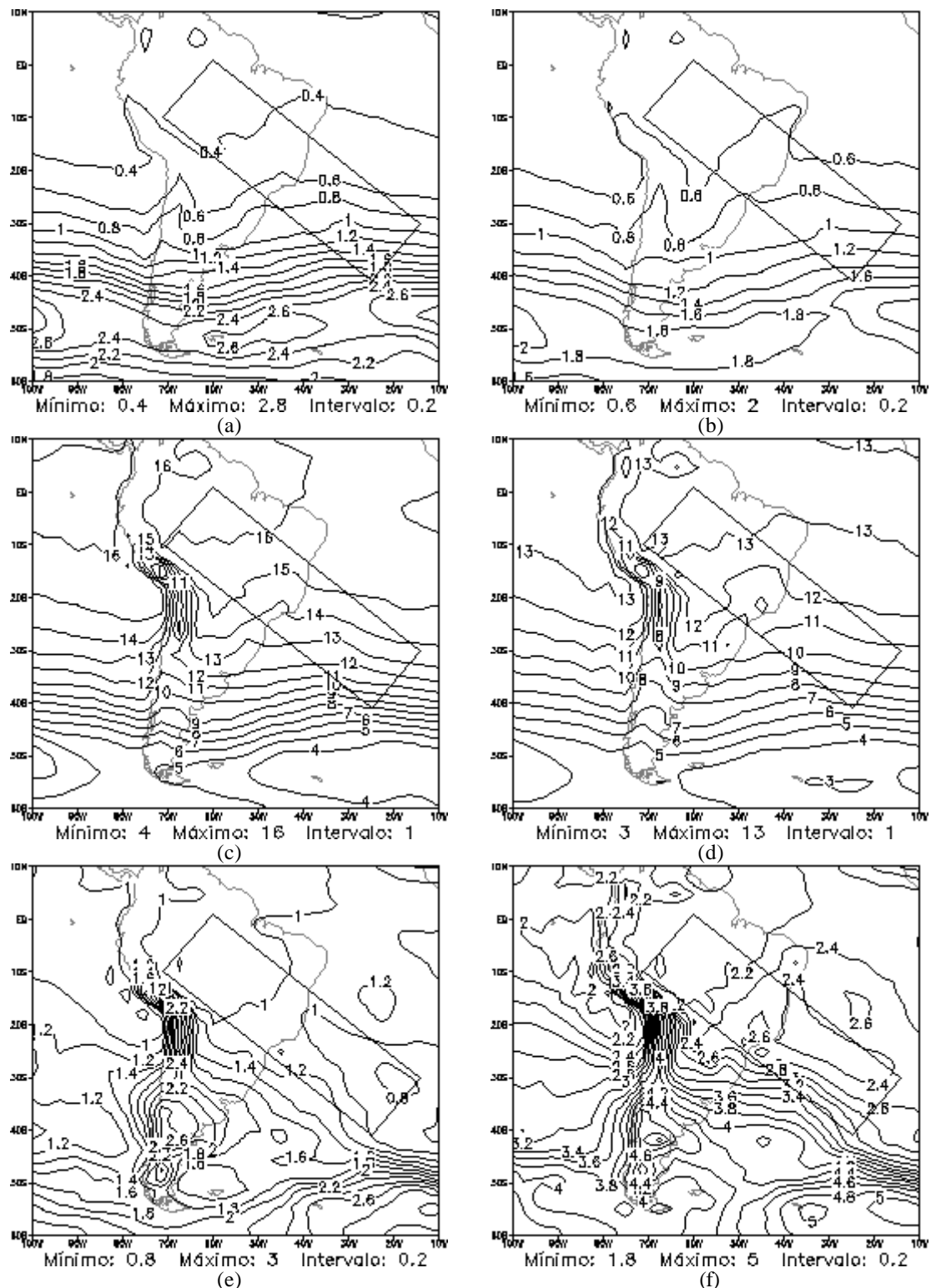


FIGURA 4.49 – Energia total (%) em altos níveis (300 hPa a 150 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 14 (8 a 14, para T170L42).



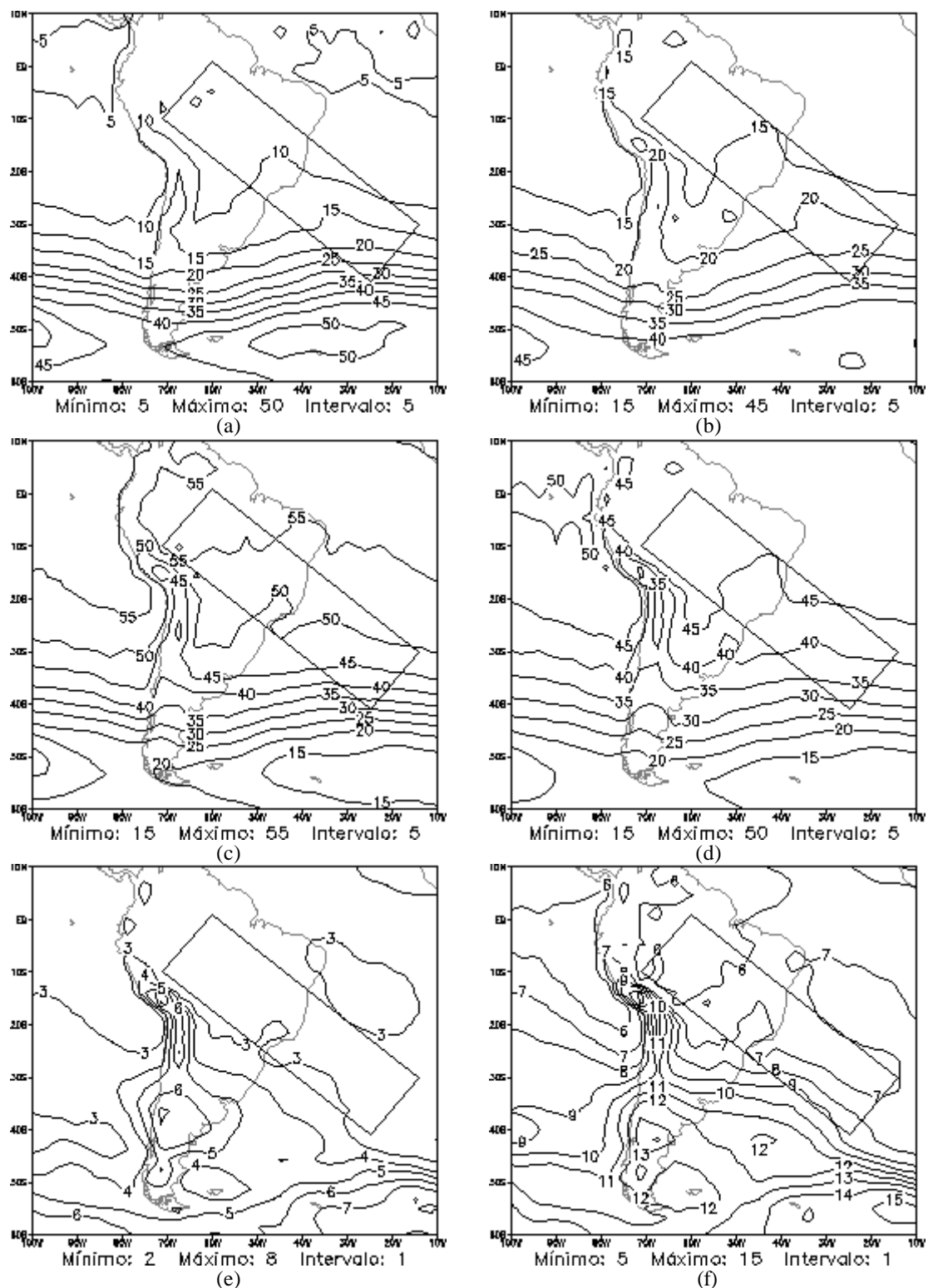


FIGURA 4.50 – Energia total (%) para Estratosfera (150 hPa até o topo), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) modos verticais 1 a 3; (c) e (d) modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42).

A interação entre modos verticais de uma mesma categoria indica que os valores mais significativos de interferência construtiva/destrutiva de energia total ocorrem na categoria II, entre os modos 4 a 7, para todas as classes de pressão. Em Baixos Níveis (Figura 4.51), nota-se máxima construção de energia na região da ZCAS, com valores atingindo 17% e 12% para as Análises T126L28 e T170L42, respectivamente. Na Figura 4.52, observa-se uma pequena diminuição na interação de energia entre os modos verticais 4 a 7 e 8 a 12 (14, para T170L42), enquanto os modos 1 a 3 apresentam uma maior interação em Níveis Médios. Para a classe c (Altos Níveis), como pode ser verificado na Figura 4.53, há novamente um decréscimo das interações entre os modos verticais da categoria I; interferências construtivas máximas são observados para os modos verticais 4 a 7, com valores em torno de 20% na região da ZCAS; e interferências destrutivas de energia são obtidas para a categoria III. Na Estratosfera (Figura 4.54), nota-se campos com interferências destrutivas de energia total para as três categorias de modos verticais. Valores máximos negativos de porcentagem de energia, em torno de 40 a 50%, são obtidos na região da ZCAS, para a categoria II.

A Figura 4.55 ilustra a porcentagem de energia total resultante da interação entre duas categorias de modos verticais, ou seja, entre as categorias I e II (int01030407), II e III (int04070812; int04070814) e I e III (int01030812; int01030814), para os níveis mais baixos da atmosfera (classe a). As interações entre as categorias I e II, indicam valores máximos de interferência destrutiva de energia na região da ZCAS (cerca de 15%), com as porcentagens diminuindo em direção às latitudes altas, enquanto as interações entre os modos verticais 4 a 7 e 8 a 12 (14, para T170L42), apresentam valores máximos de interferência construtiva de energia na região da ZCAS. No caso das interações entre os modos das categorias I e III, observa-se um campo de porcentagem de energia total com interferências destrutivas de energia, porém com um padrão inverso de distribuição dos valores, quando comparado àquele obtido das interações I-II: valores máximos negativos são encontrados em latitudes altas, diminuindo na faixa entre 40 e 50°S, e aumentando novamente em direção ao equador.

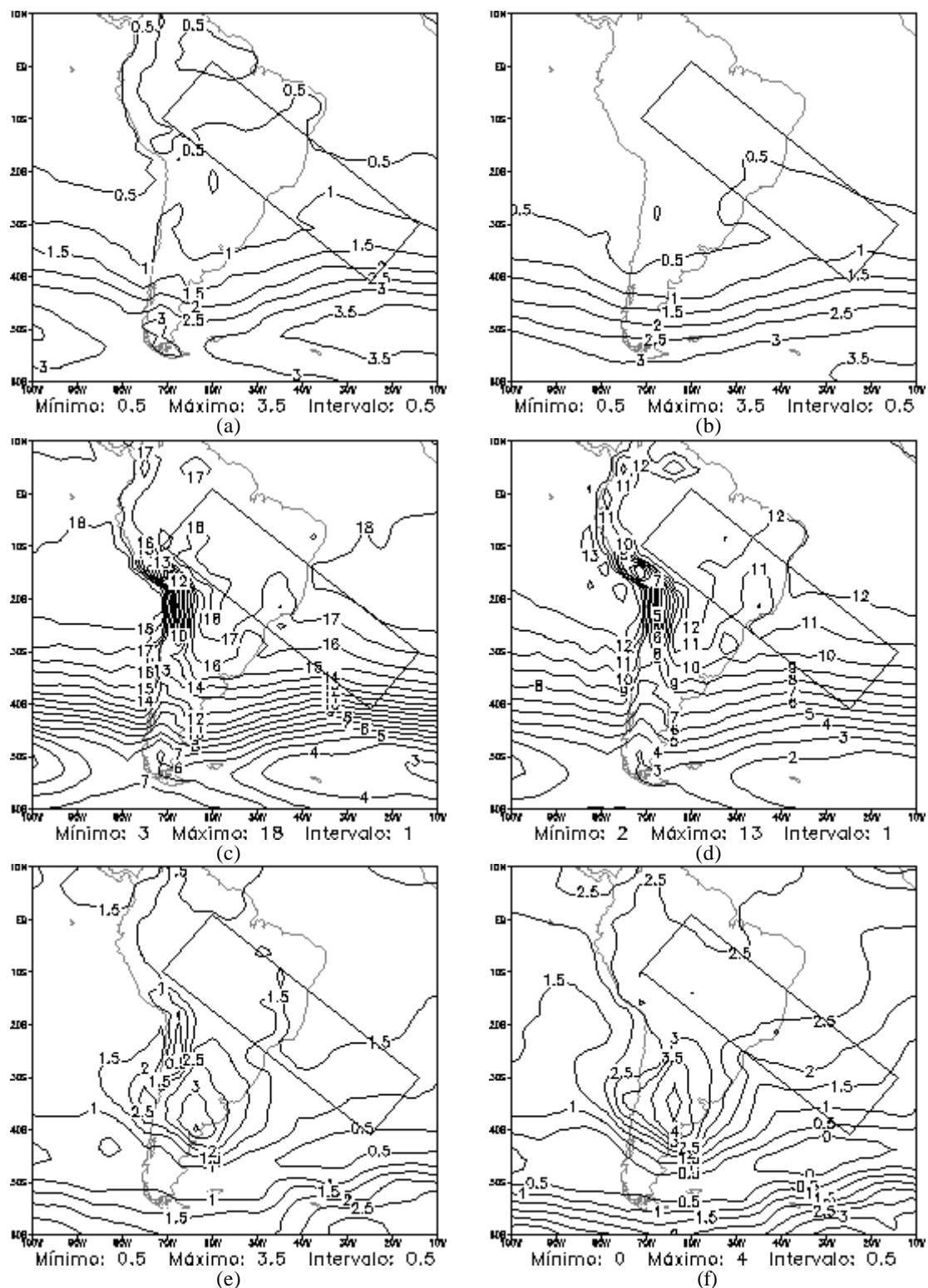


FIGURA 4.51 – Interação Energia Total (%) em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) entre os modos verticais 1 a 3; (c) e (d) entre os modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) entre os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42).

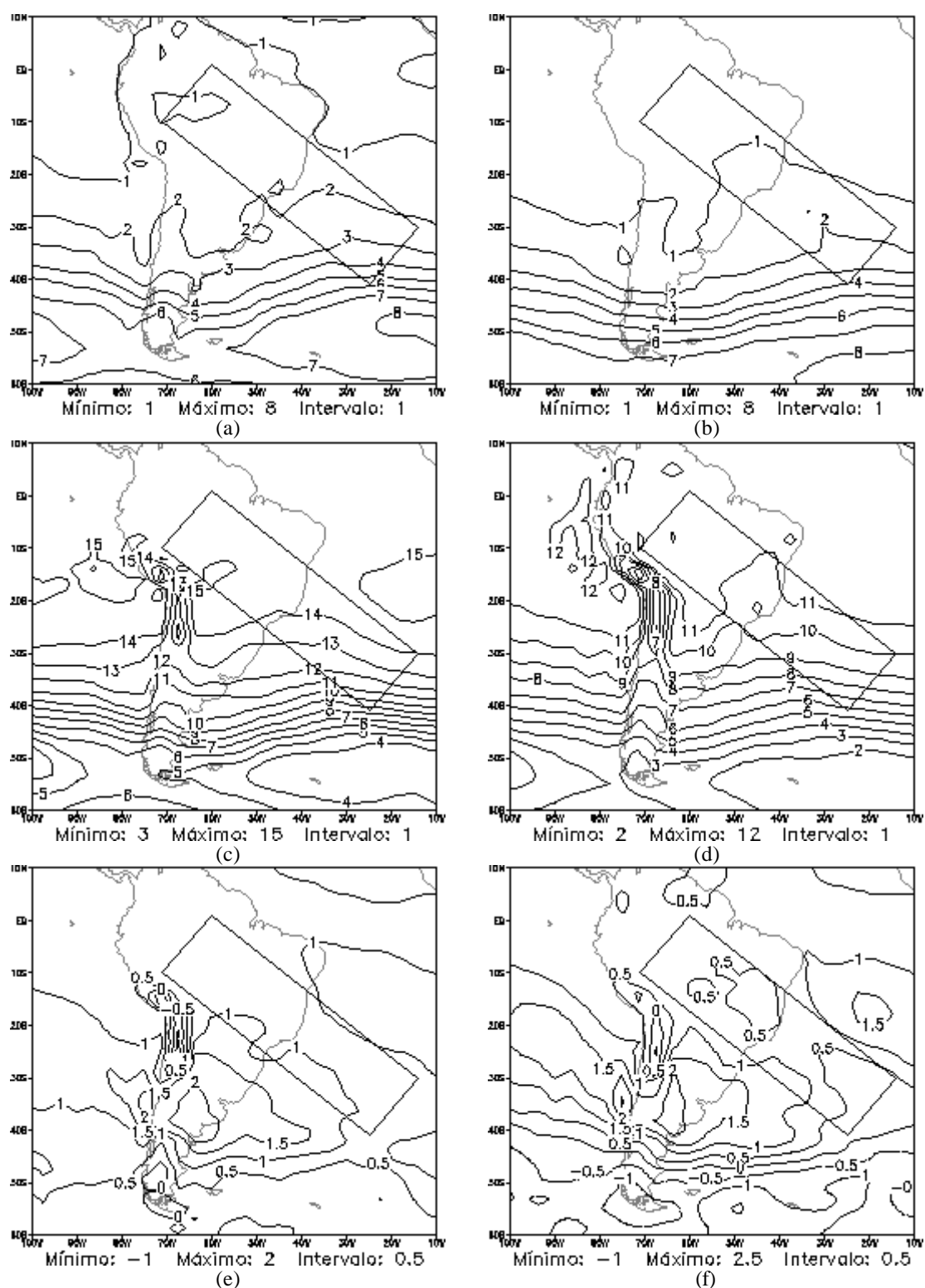


FIGURA 4.52 – Interação Energia Total (%) em níveis médios (800 hPa a 300 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) entre os modos verticais 1 a 3; (c) e (d) entre os modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) entre os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42).

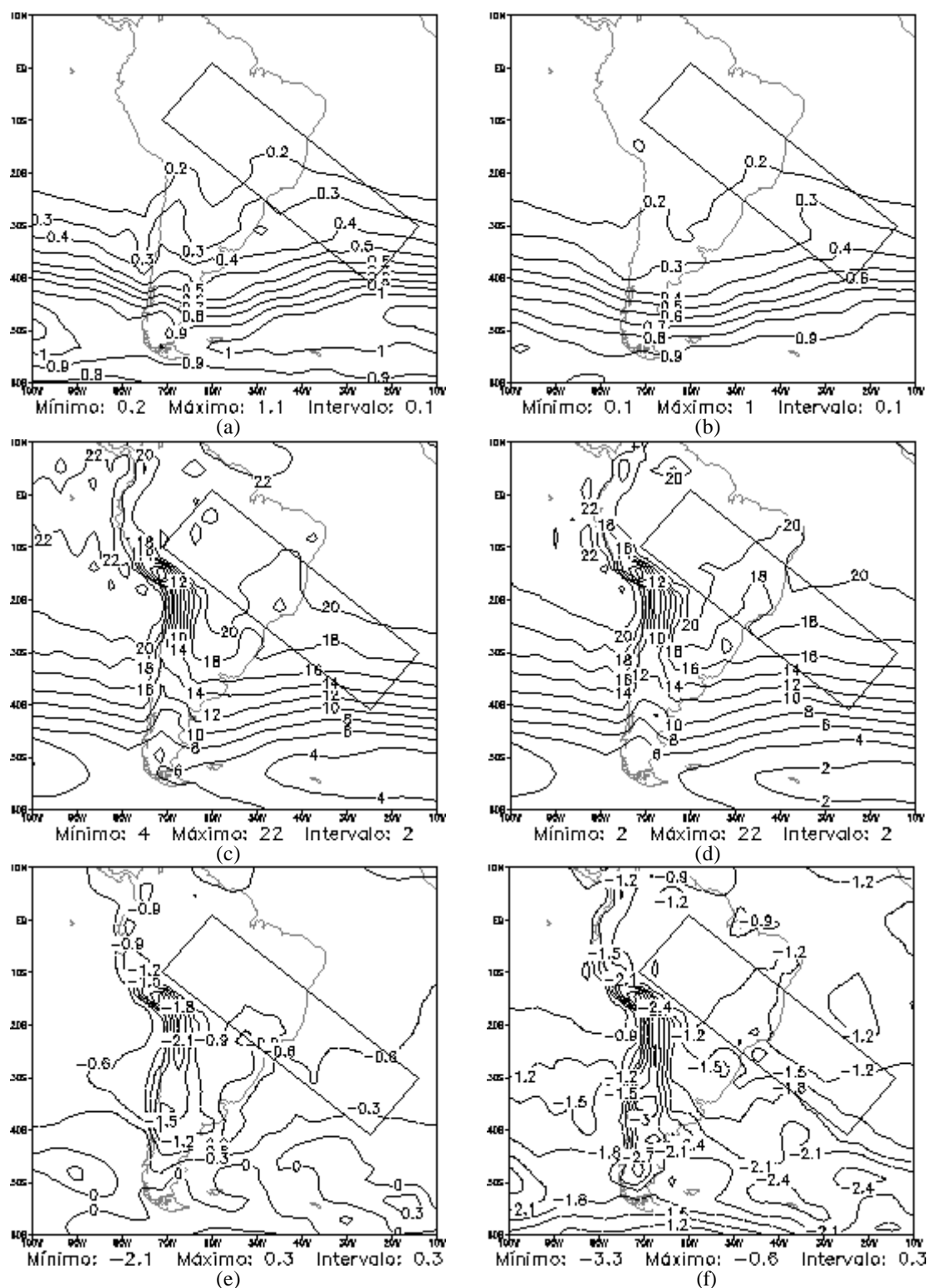


FIGURA 4.53 – Interação Energia Total (%) em altos níveis (300 hPa a 150 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) entre os modos verticais 1 a 3; (c) e (d) entre os modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) entre os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42).

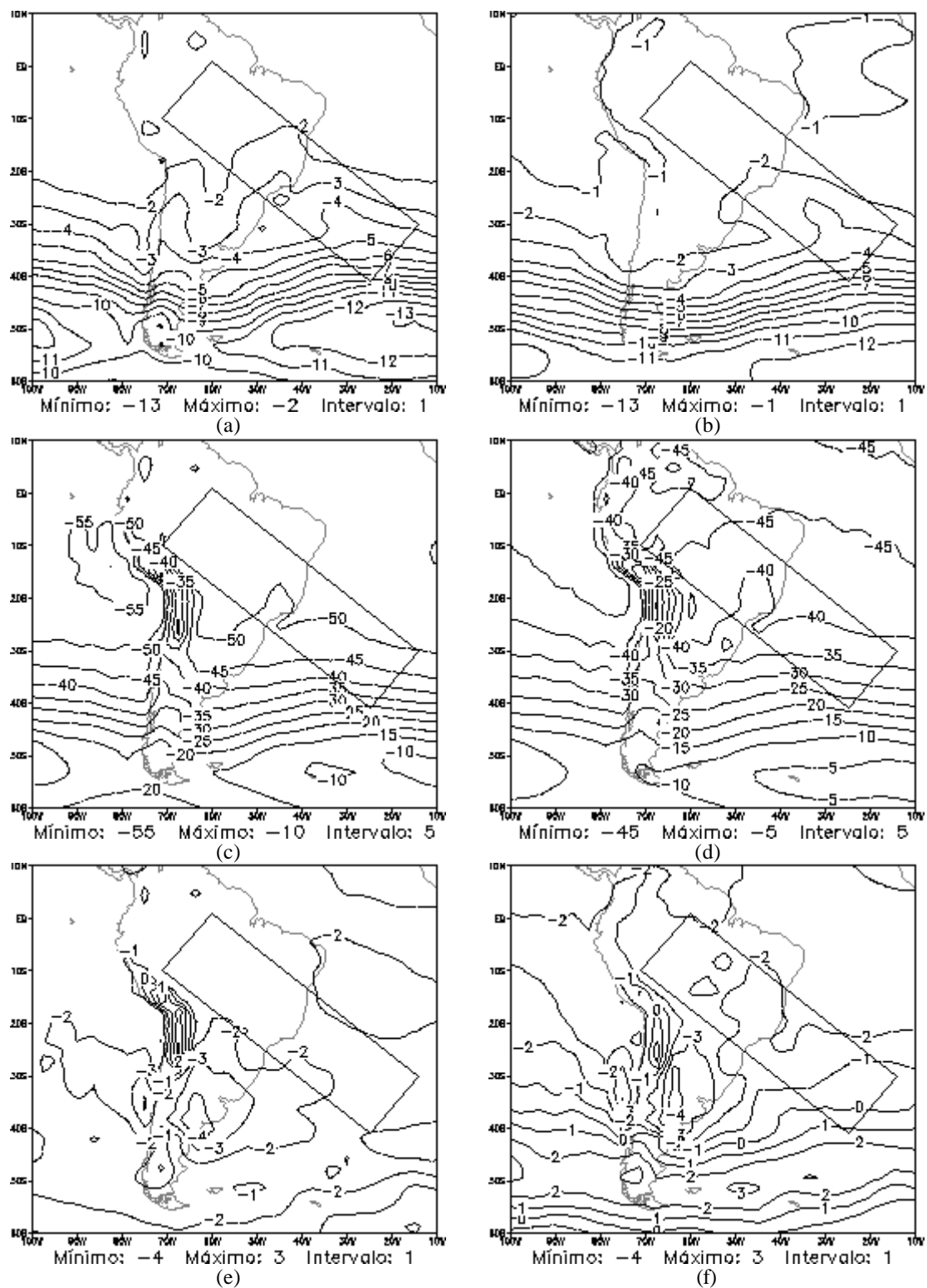


FIGURA 4.54 – Interação Energia Total (%) na Estratosfera (150 hPa até o topo), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) entre os modos verticais 1 a 3; (c) e (d) entre os modos verticais 4 a 7; e (e) e (f) entre os modos verticais 8 a 12 (8 a 14, para T170L42).

A interação de energia total entre as categorias de modos verticais para os Níveis Médios é apresentada na Figura 4.56. Entre as categorias I e II, as porcentagens de energia decrescem substancialmente, indicando que há poucas interações entre os modos verticais 1 a 3 e 4 a 7, entre 800 e 300 hPa. Interferências destrutivas de energia total, resultante da interação entre as categorias II e III (int04070812; int04070814), apresentam valores máximos e um padrão bem configurado na região da ZCAS. Valores relativamente maiores são obtidos para a Análise T126L28. Das interações entre as categorias I e III, observa-se interferências construtivas de energia, com valores máximos em latitudes altas. Embora o padrão espacial observado seja muito semelhante àquele de Baixos Níveis, há uma inversão do sinal das interações.

Em Altos Níveis (Figura 4.57), observa-se máximas interferências construtiva de energia sobre a região da ZCAS, resultante das interações entre os modos verticais 1 a 3 e 4 a 7. O padrão espacial é semelhante àquele observado em Baixos Níveis, porém com valores positivos. As interações entre as categorias II e III apresentam algumas diferenças entre os padrões observados para as resoluções T126L28 e T170L42. Para o modelo de menor resolução, há um decréscimo da interferência negativa sobre a região da ZCAS, enquanto estas são intensificadas na Análise T170L42. Nas demais áreas, os padrões encontrados nas duas resoluções são bastante semelhantes, realçando o impacto do aumento da resolução vertical. Entre as categorias I e III, nota-se uma diminuição substancial das interações entre os modos 1 a 3 e 8 a 12 (14, para T170L42), observando-se, neste caso, valores negativos de porcentagem de energia, ou seja, interferências destrutivas, entre 300 e 150hPa.

Para a classe d, que representa a Estratosfera, observa-se uma redução das interações entre todas as categorias de modos verticais (Figura 4.58). Entre os modos verticais 1 a 3 e 4 a 7 (categorias I e II), nota-se interações bem pequenas com valores negativos (positivos) sobre a região da ZCAS para a Análise T126L28 (T170L42). O campo de porcentagem de interação entre as categorias II e III, indicam que, basicamente, não há interferências construtivas/destrutivas de energia na região da ZCAS, onde os valores são, em geral, nulos. Das interações entre as categorias I e III, verifica-se que, além da

redução nas interações entre os modos 1 a 3 e 8 a 12 (8 a 14, para T170L42), há uma troca de sinal das interferências, que passam a ser construtivas de energia, nesta classe.

Resumidamente, a análise das interações entre as categorias de modos verticais sugere que, em geral, os modos verticais 1 a 3 são responsáveis pela redução da energia nas demais categorias. Além disso, nota-se que as contribuições mais significativas, resultantes das interações entre estas categorias estão concentradas em Baixos e Altos Níveis, para os modos 1 a 3 e 4 a 7 e, em Baixos e Médios Níveis, para as interações entre as categorias II e III e I e III.

A Figura 4.59 ilustra os resíduos da interação de energia total entre os primeiros 12 e 14 modos verticais das Análises T126L28 e T170L42, respectivamente, para as quatro classes de níveis de pressão. Em Baixos Níveis, nota-se valores máximos positivos na região da ZCAS, em ambas as resoluções, sendo que a Análise T126L28 apresenta porcentagens da ordem de três a 4 vezes maior do que aquelas obtidas com a Análise T170L42. Em latitudes altas, o padrão espacial e os valores do resíduo são semelhantes em ambas as análises, notando-se máximos negativos da ordem de 10%. Nos Níveis Médios, a Análise T126L28 indica um padrão bem configurado sobre a região da ZCAS, com valores positivos aumentando do continente para o oceano, na direção noroeste-sudeste; valores máximos positivos são observados em latitudes altas. Para a resolução T170L42, o padrão sobre a região da ZCAS não é bem configurado como na análise de menor resolução, embora as características gerais do campo sejam similares entre as duas Análises. Resíduos com valores máximos positivos são obtidos em Altos Níveis, com padrão espacial e porcentagens de energia sem diferenças significativas em relação ao aumento de resolução, na região da ZCAS. Em latitudes altas, verifica-se porcentagens de energia maiores para a Análise T126L28. Na Estratosfera, observa-se valores negativos de resíduo em toda a região da América do Sul, que tendem a compensar a partição de energia entre os níveis troposféricos. As máximas porcentagens de energia estão localizadas sobre a região da ZCAS, sendo os valores mais elevados para a resolução T126L28.



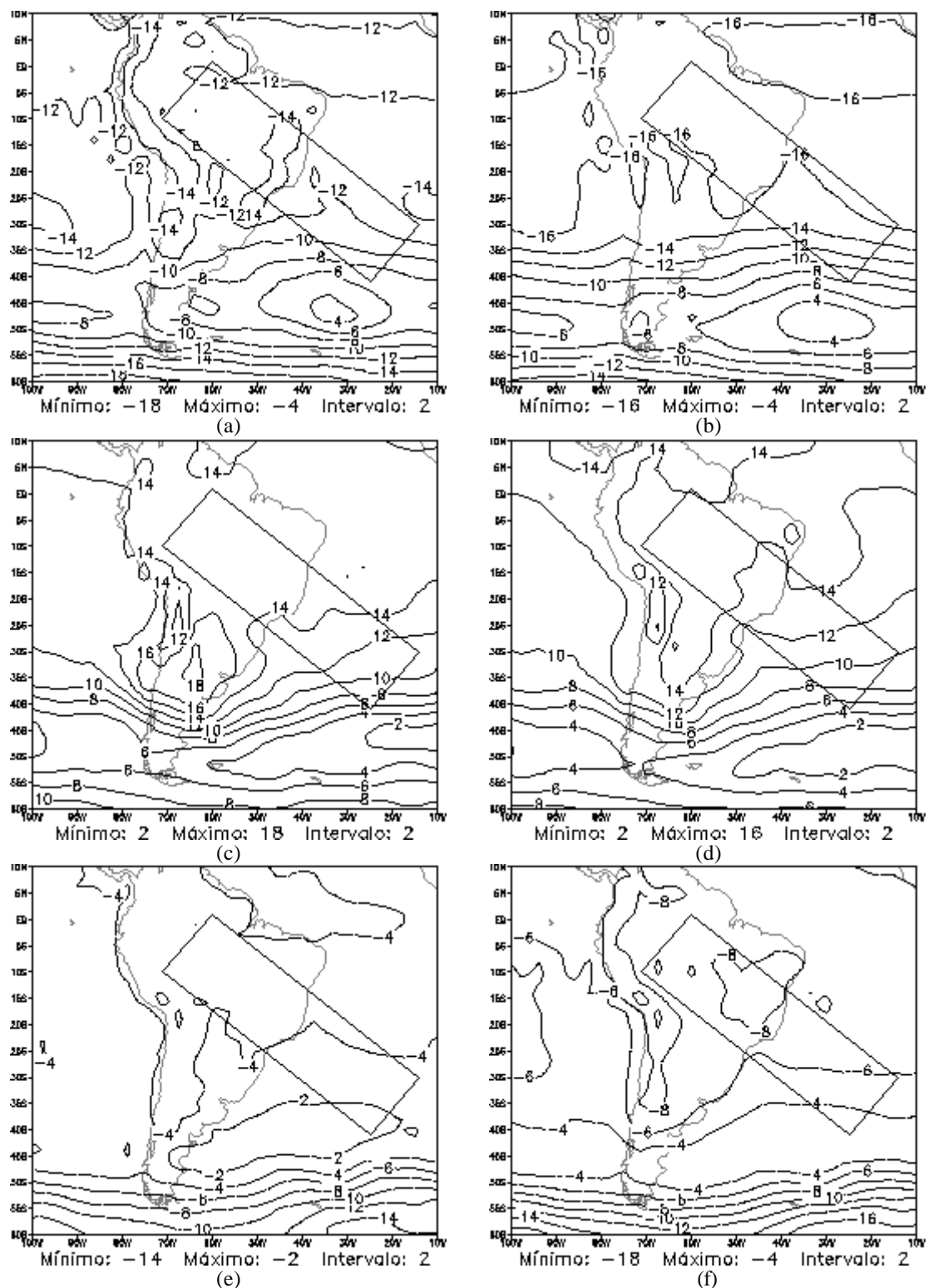


FIGURA 4.55 – Interação Energia Total (%) entre as categorias de modos verticais, em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) 0103-0407; (c) e (d) 0407-0812 (14, para T170L42); e (e) e (f) 0103-0812(14).

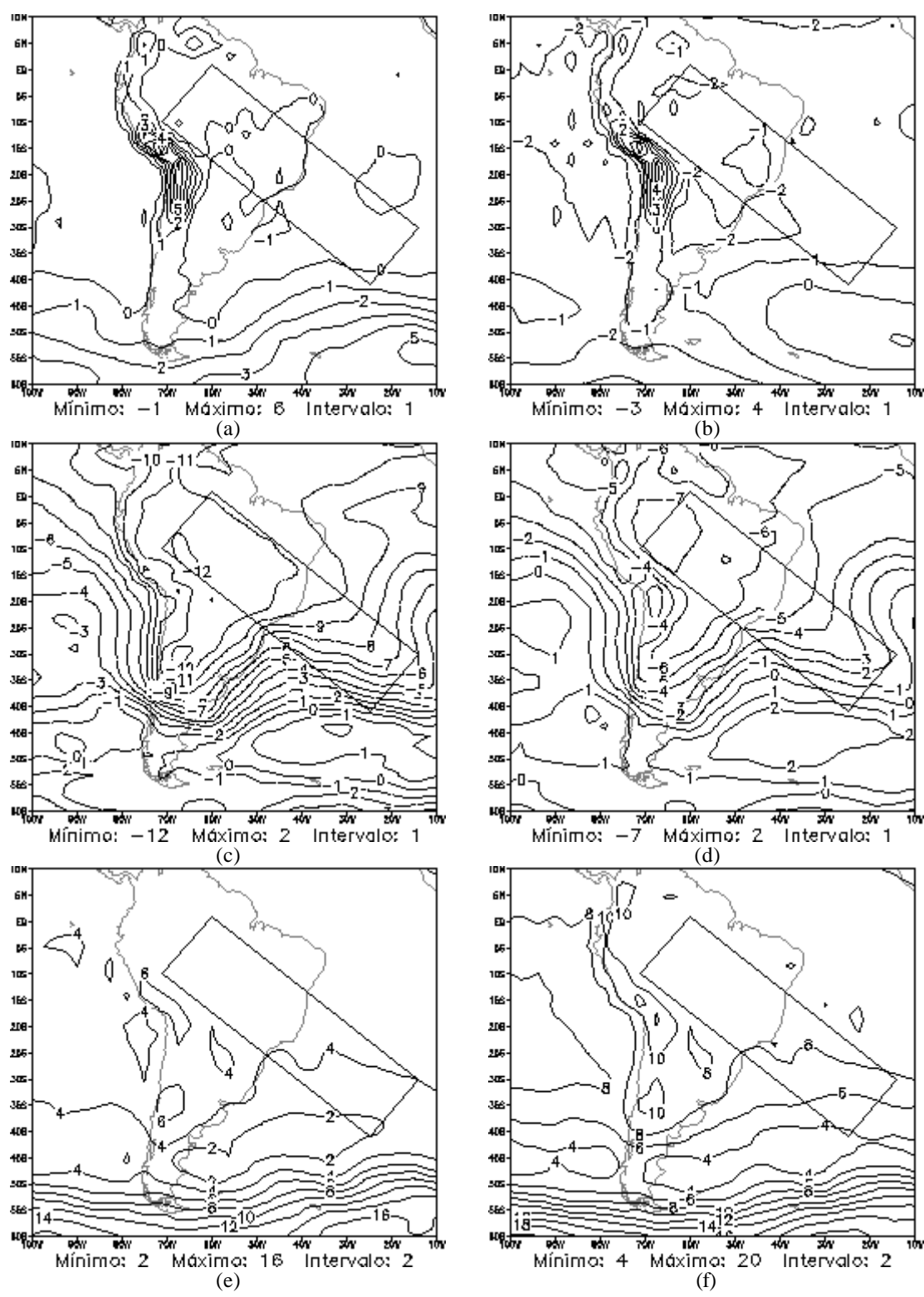


FIGURA 4.56 – Interação Energia Total (%) entre as categorias de modos verticais, em níveis médios (800 hPa a 300 hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) 0103-0407; (c) e (d) 0407-0812 (14, para T170L42); e (e) e (f) 0103-0812(14).

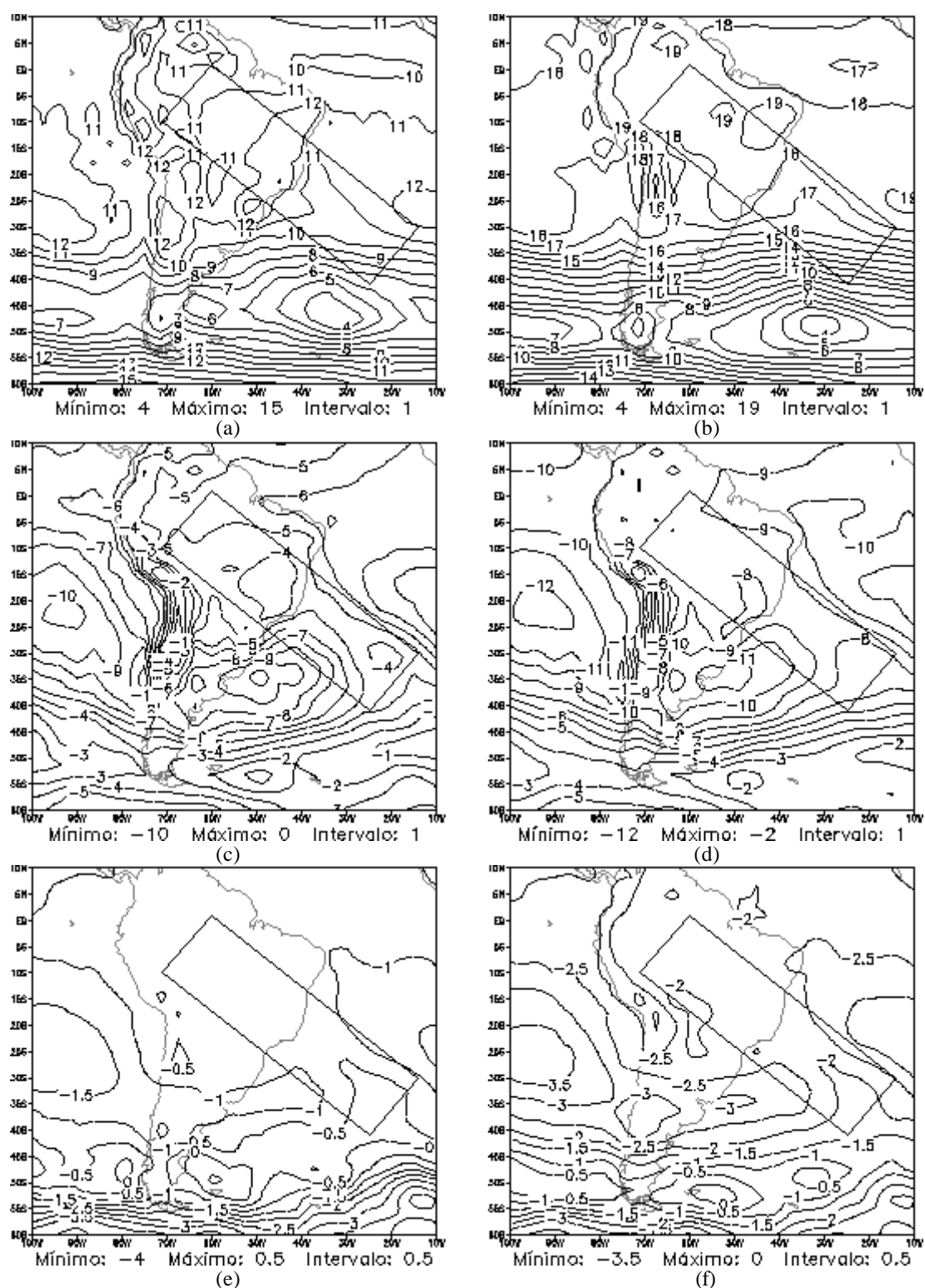


FIGURA 4.57 – Interação Energia Total (%) entre as categorias de modos verticais, em altos níveis (300 hPa até 150hPa), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) 0103-0407; (c) e (d) 0407-0812 (14, para T170L42); e (e) e (f) 0103-0812(14).

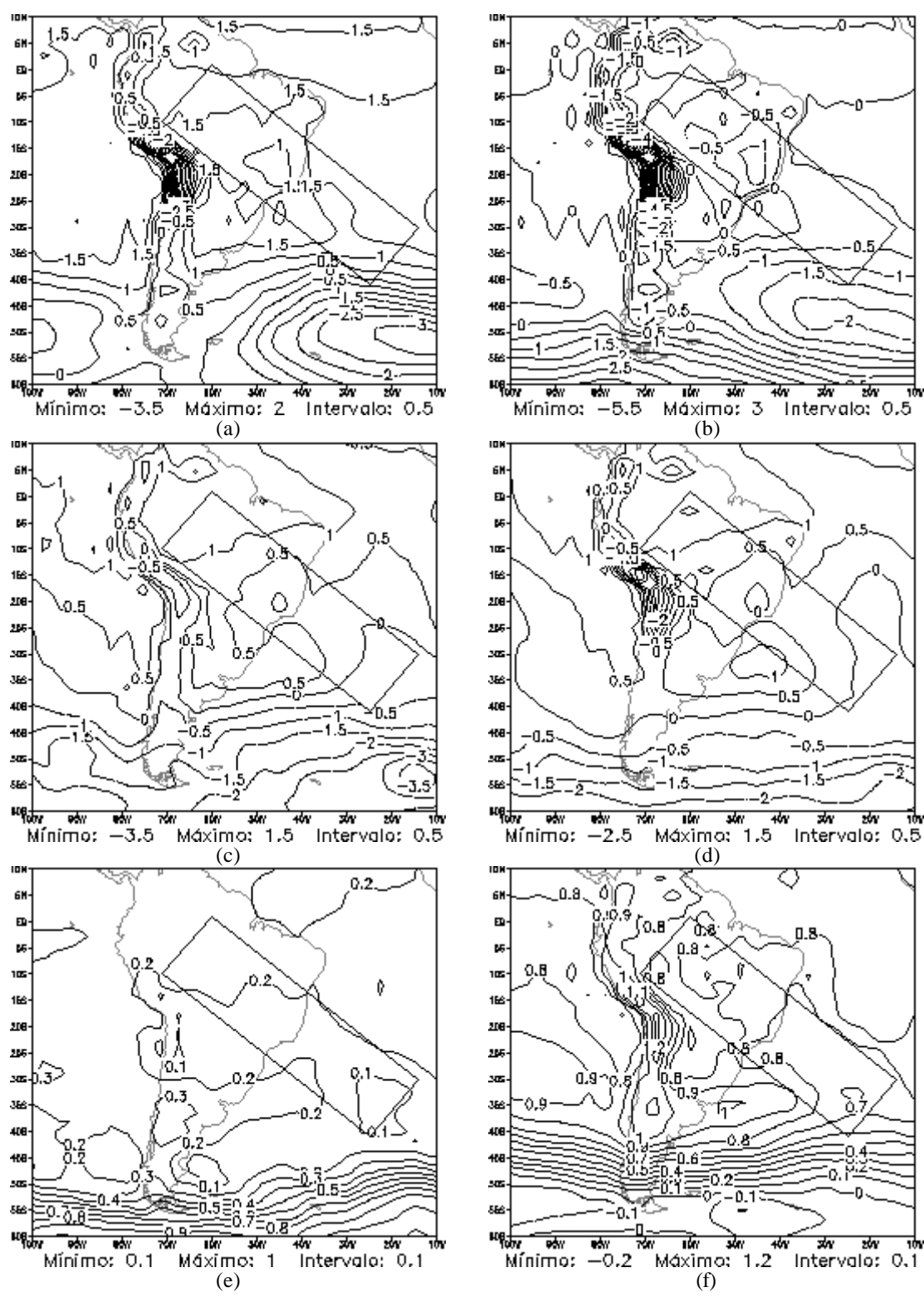


FIGURA 4.58 – Interação Energia Total (%) entre as categorias de modos verticais, Estratosfera (150 hPa até o topo), Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) 0103-0407; (c) e (d) 0407-0812 (14, para T170L42); e (e) e (f) 0103-0812(14).

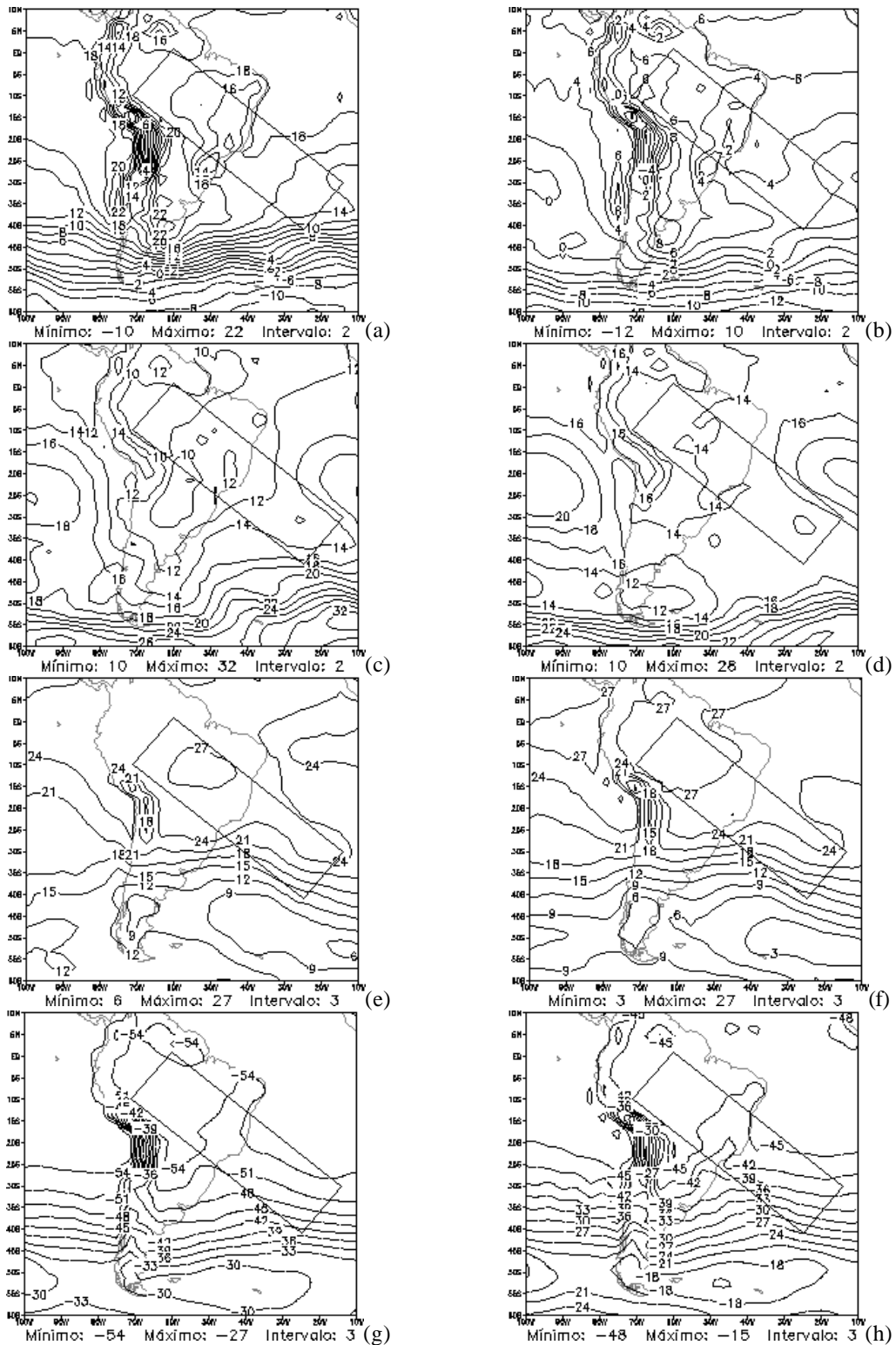


FIGURA 4.59 – Resíduo da Interação Energia Total (%), modos verticais 1 a 12 - Análise NCEP T126L28 (a esquerda) e 1 a 14 - Análise T170L42 (a direita): (a) e (b) Baixos Níveis; (c) e (d) Níveis Médios; (e) e (f) Altos Níveis; e (g) e (h) Estratosfera.

O impacto dos esquemas de convecção profunda Kuo, RAS e GRELL na interação de energia entre os modos verticais é discutido a seguir, considerando-se apenas as categorias de modos verticais que apresentaram as maiores porcentagens de energia em cada classe de níveis de pressão (Figuras 4.60-4.75). O desempenho dos modelos em relação às demais categorias são sumarizados nas Tabelas 4.6-4.9, no final desta seção.

Analogamente ao observado para a interação de energia entre os modos horizontais, os resultados dos experimentos de modelagem mostram que o modelo apresenta boa concordância em relação aos padrões observados nos experimentos de controle, independente do esquema de convecção profunda utilizado, uma vez que as previsões geradas com cada esquema são muito similares entre si. Para a resolução T126L28, nota-se que o modelo com o esquema GRELL apresenta resultados ligeiramente melhores para a porcentagem de energia total, especialmente para a categoria III de modos verticais e para a Estratosfera. Já para a interação entre modos verticais de uma mesma categoria e entre categorias, há um melhor desempenho do modelo com o esquema RAS nos Baixos e Médios Níveis, enquanto o modelo com o esquema Kuo apresenta uma maior concordância em Altos Níveis e na Estratosfera; o resíduo também é melhor previsto utilizando-se o esquema Kuo nos níveis troposféricos.

No caso do modelo T170L42, observa-se que os modelos com o esquema RAS e com o esquema GRELL apresentam um melhor desempenho para a previsão das porcentagens de energia total, sendo que este último apresenta resultados ligeiramente melhores para os Altos Níveis e Estratosfera. Para a interação de energia entre os modos verticais e categorias de modos verticais, previsões ligeiramente melhores foram obtidas com o esquema RAS. O modelo com os esquemas Kuo e RAS também apresentaram um melhor desempenho para a previsão do resíduo, especialmente nos Baixos e Médios Níveis, em relação ao esquema GRELL.

Os resultados discutidos acima são comprovados quando se analisa os índices de correlação e erro médio quadrático apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7 para a região da América do Sul e Tabelas 4.8 e 4.9, para a região do composto de ZCAS. Em geral, o

modelo com resolução T170L42 apresenta índices de correlações maiores, o que sugere que a resolução vertical das Análises e dos Modelos têm um maior impacto na partição modal de energia, do que a resolução horizontal e o esquema de convecção utilizado. Além disso, nota-se que quando o cálculo da destreza do modelo é restrito à região do composto de ZCAS, há uma significativa melhora das previsões de 24 horas utilizando-se o modelo com esquema GRELL e resolução T170L42.

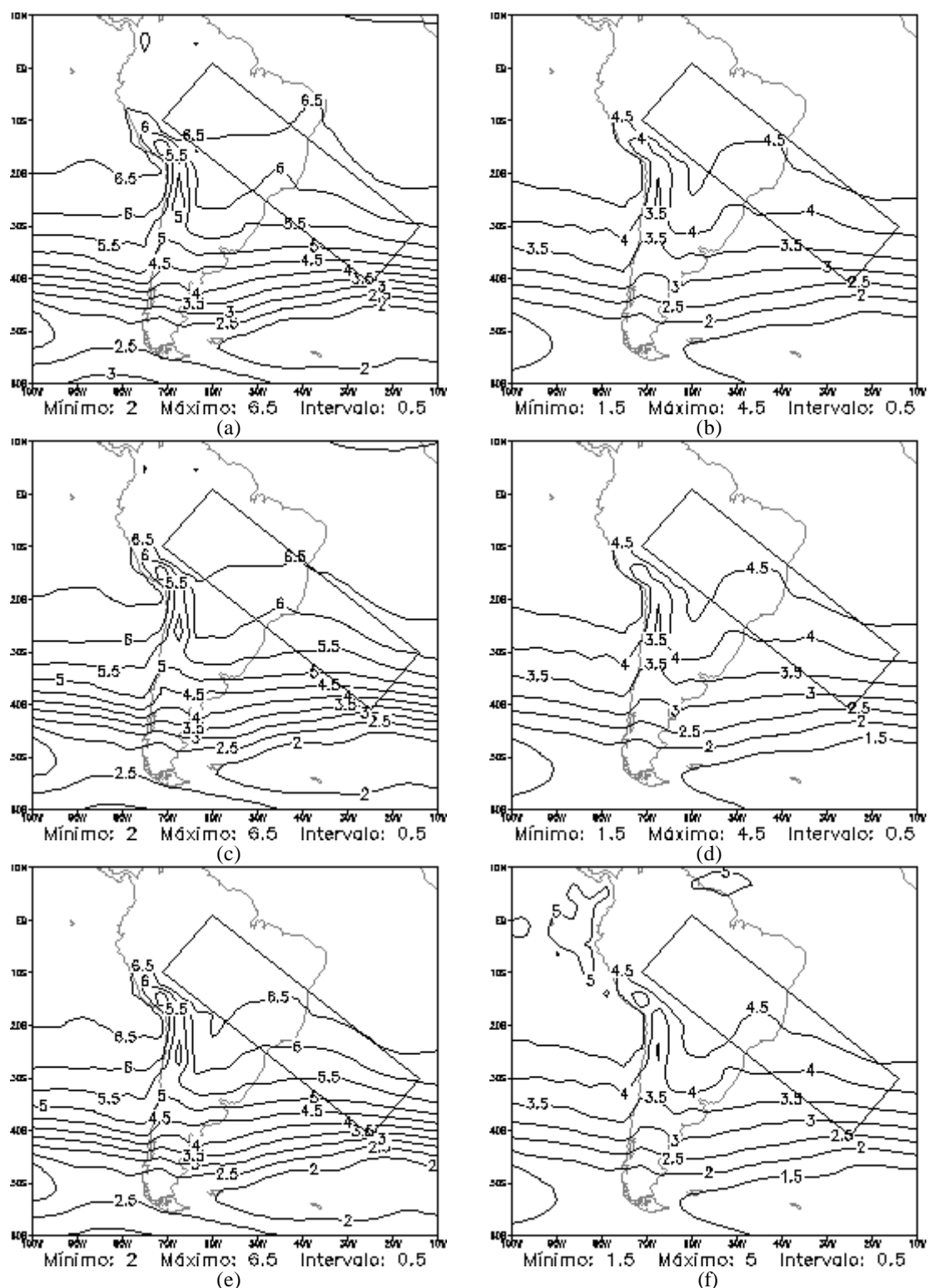


FIGURA 4.60 – Energia total (%) em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.



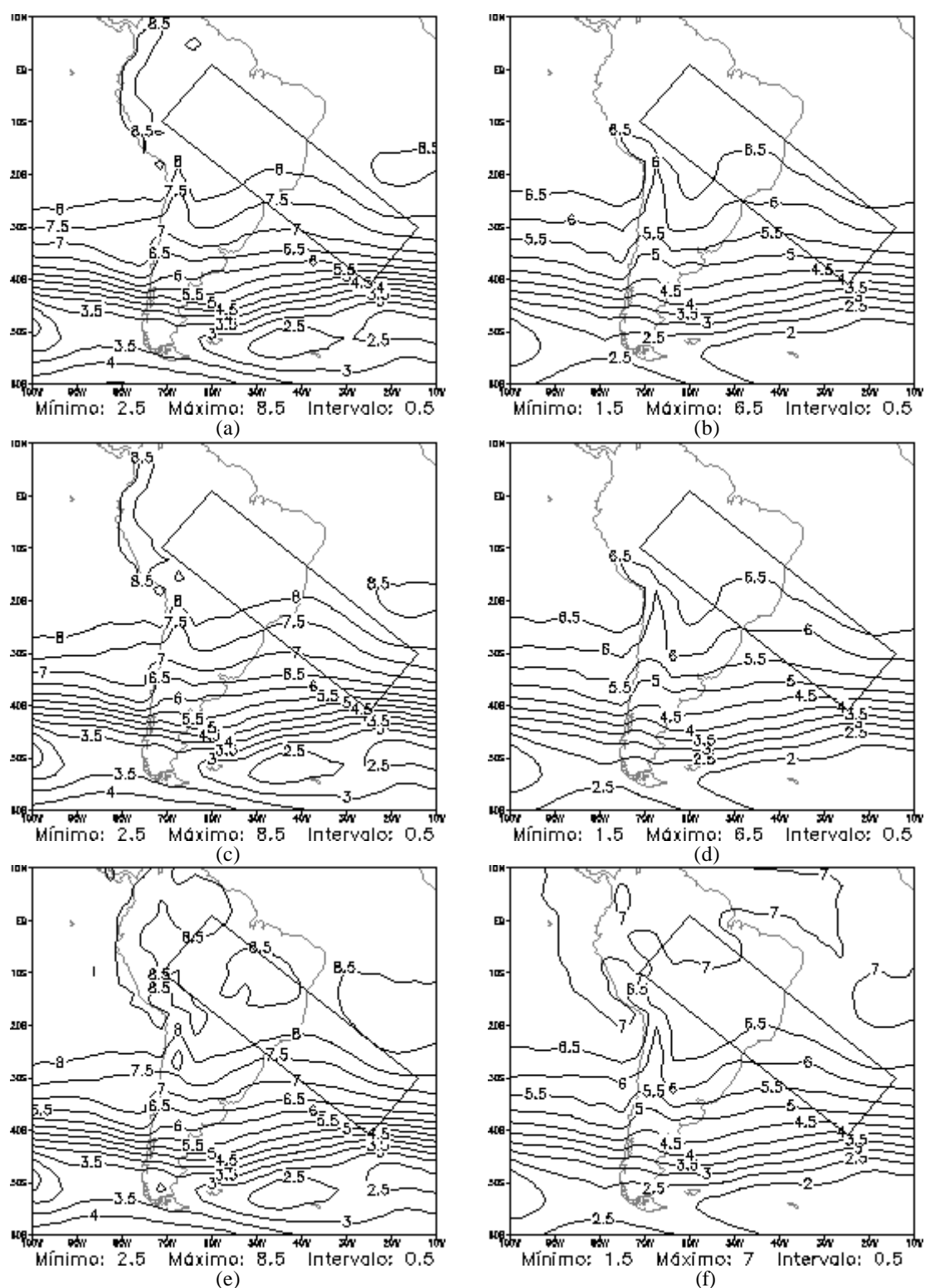


FIGURA 4.61 – Energia total (%) em níveis médios (800 hPa a 300 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.

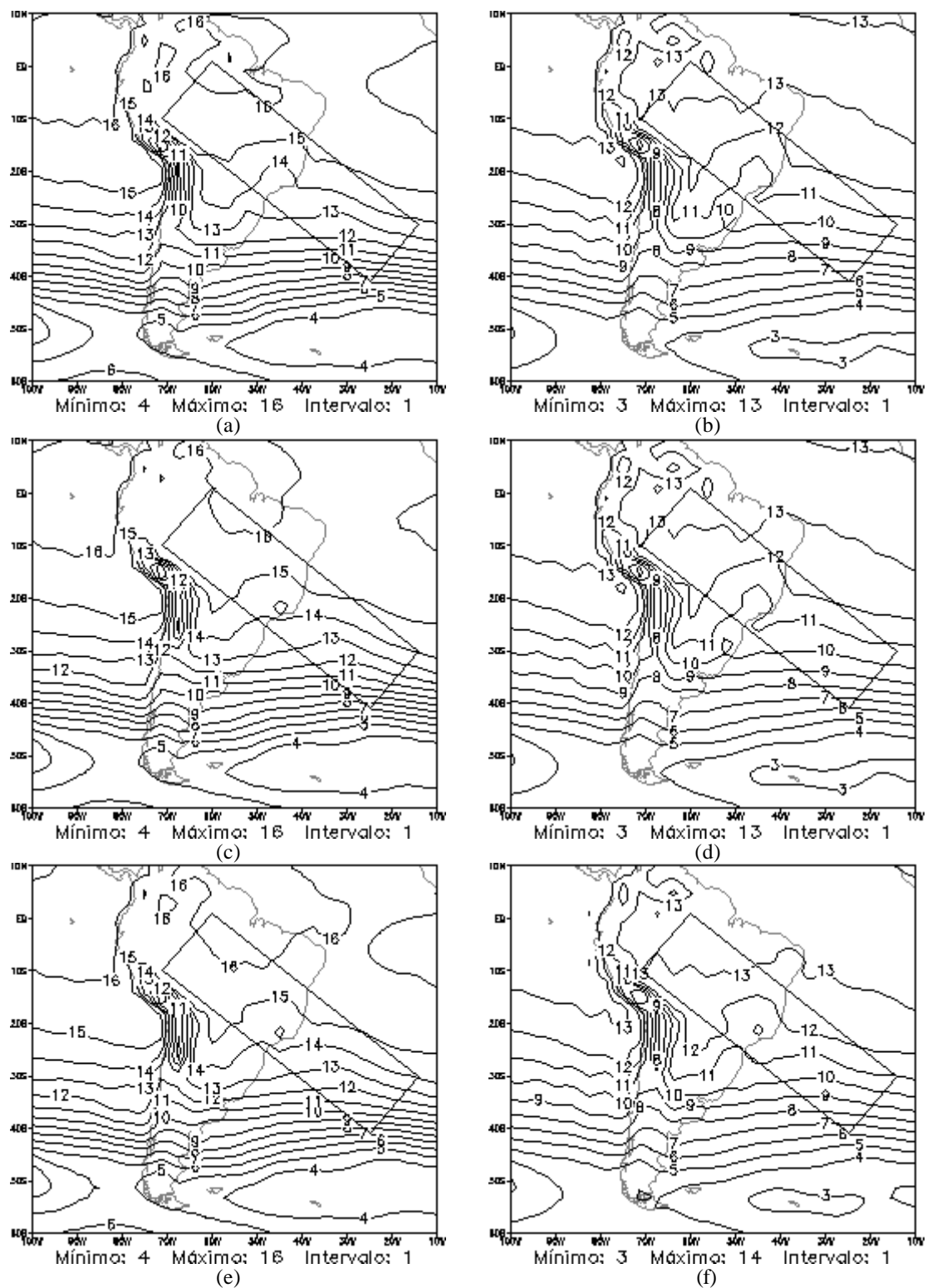


FIGURA 4.62 – Energia total (%) em altos níveis (300 hPa a 150 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.

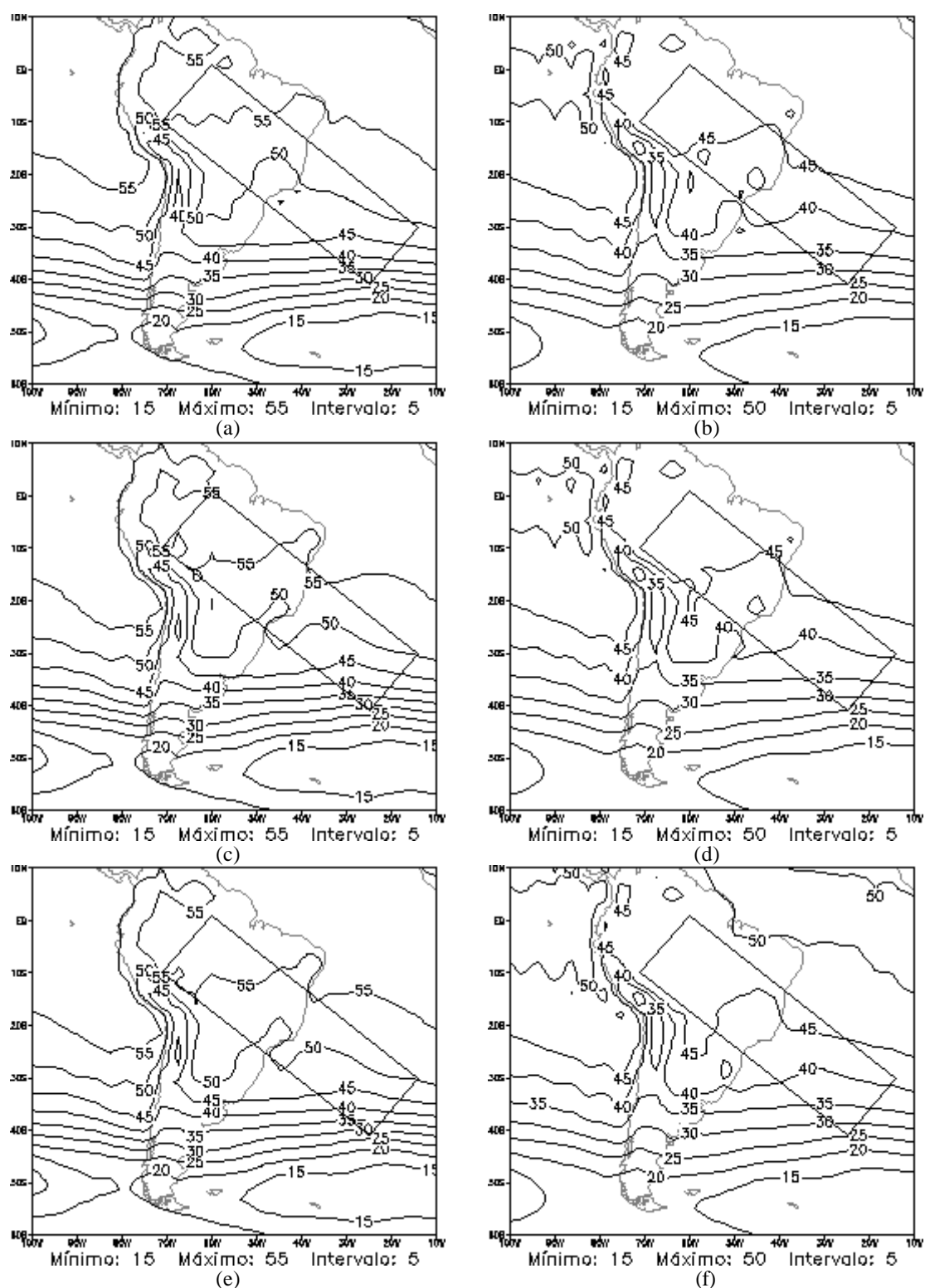


FIGURA 4.63 – Energia total (%) para Estratosfera (150 hPa até o topo), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.

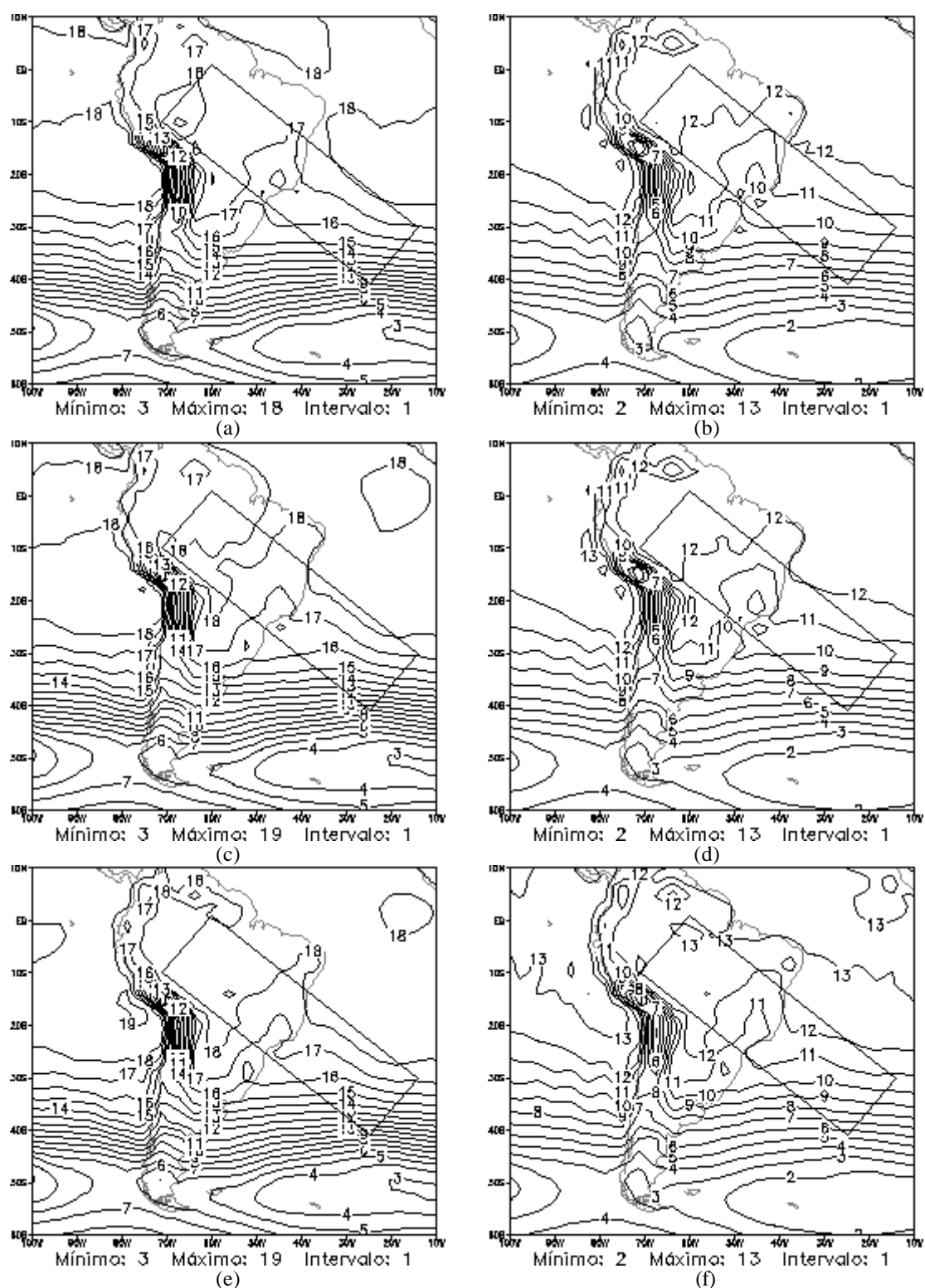


FIGURA 4.64 – Interação energia total (%) em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.

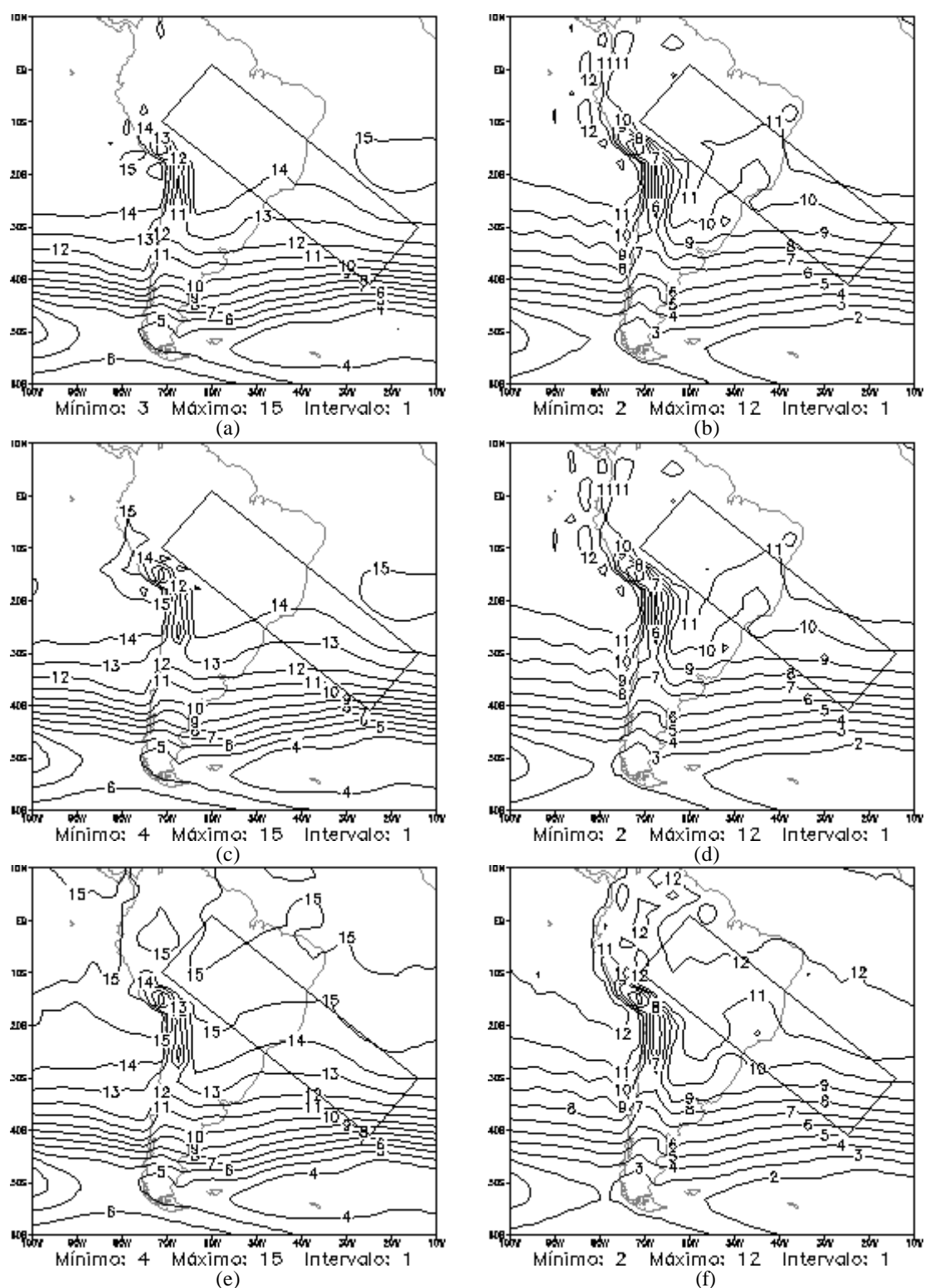


FIGURA 4.65 – Interação energia total (%) em níveis médios (800 hPa a 300 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.

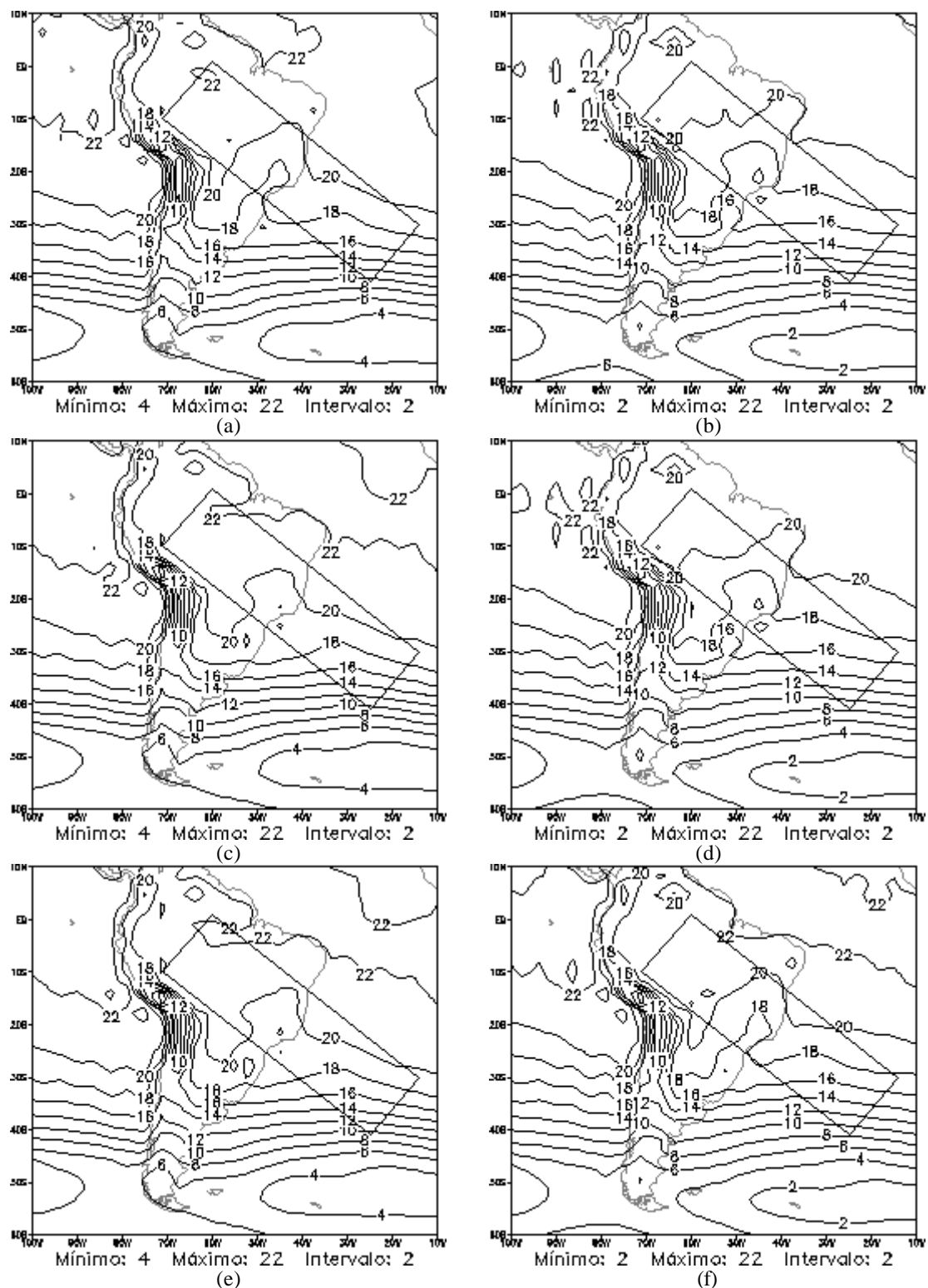


FIGURA 4.66 – Interação energia total (%) em altos níveis (300 hPa a 150 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.

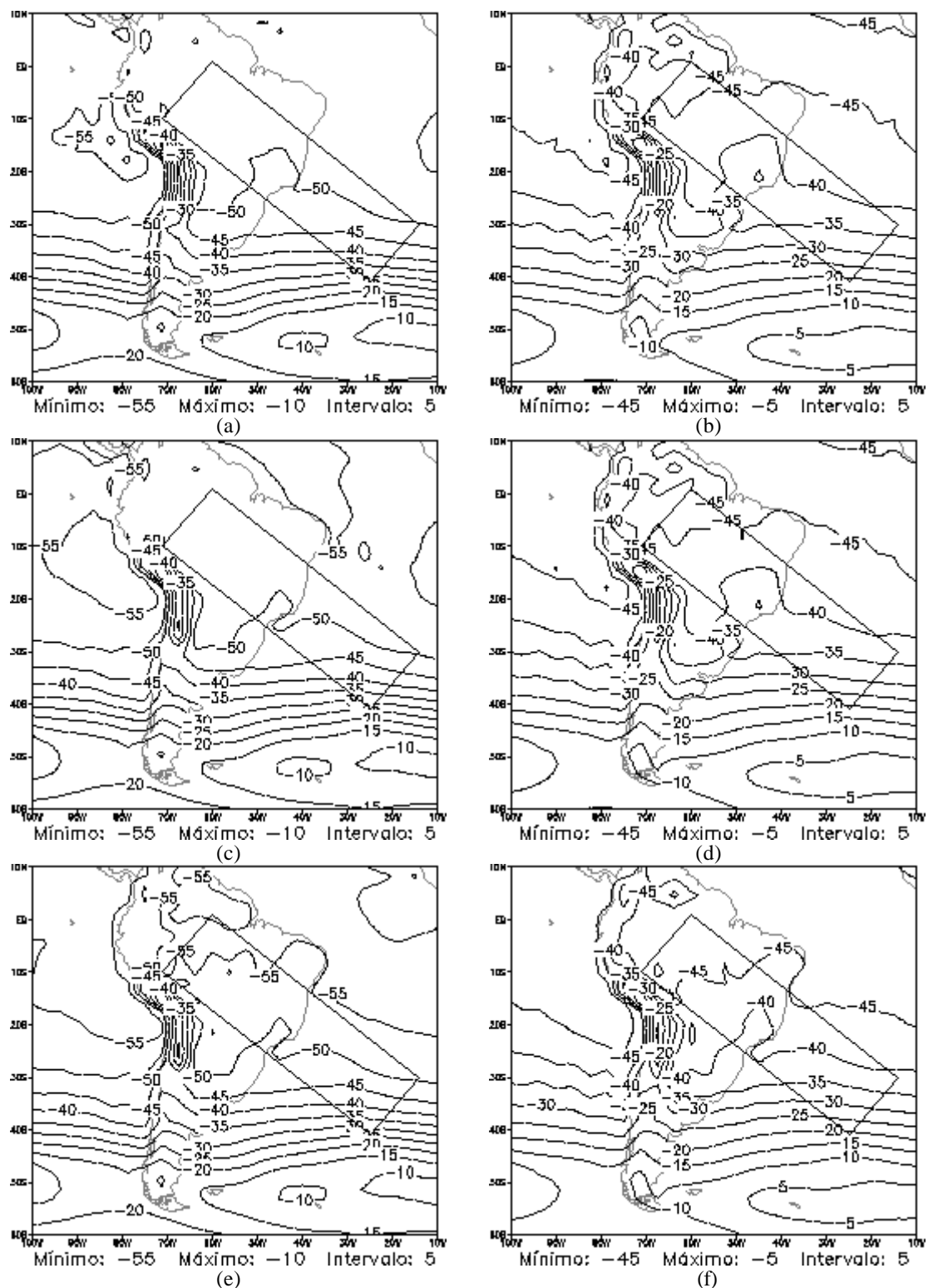


FIGURA 4.67 – Interação energia total (%) para Estratosfera (150 hPa até o topo), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), modos verticais 4 a 7: (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.

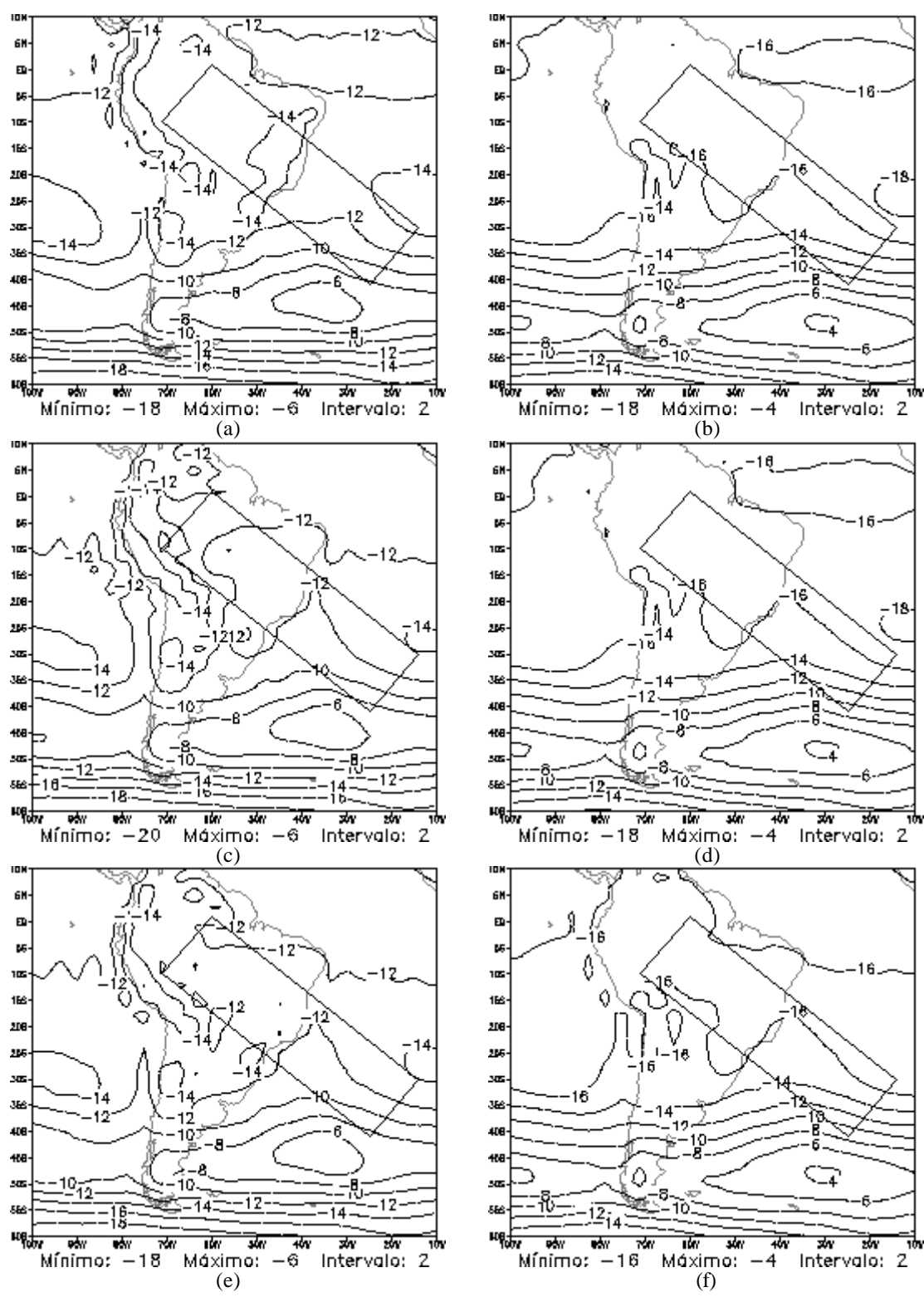


FIGURA 4.68 – Interação energia total (%) entre as categorias de modos verticais 0103-0407, em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.



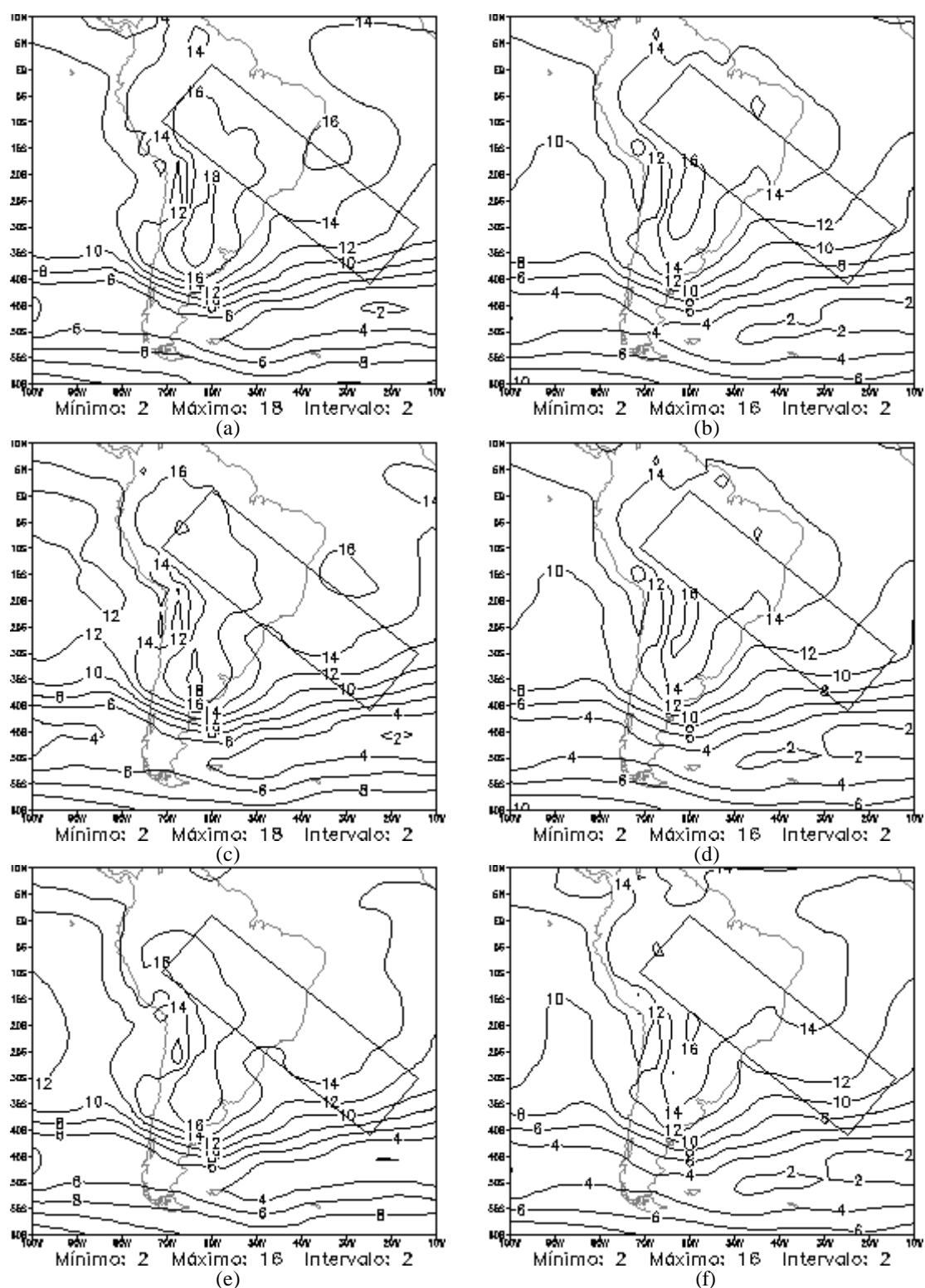


FIGURA 4.69 – Interação energia total (%) entre as categorias de modos verticais 0407-0812 e 0407-0814, em baixos níveis (superfície a 800 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) KUO; (c) e (d) RAS; e (e) e (f) GRELL.

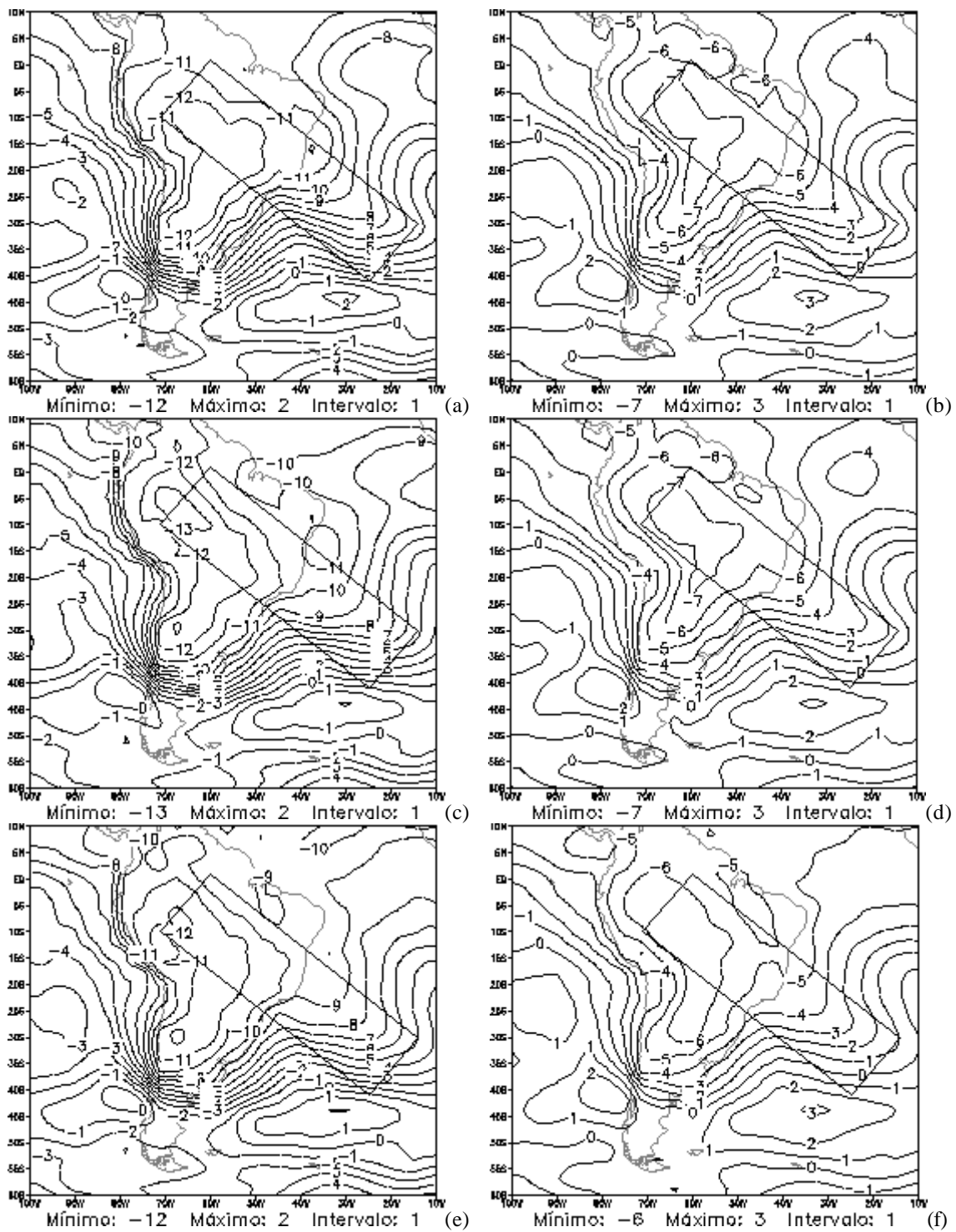


FIGURA 4.70 – Interação energia total (%) entre as categorias de modos verticais 0407-0812 e 0407-0814, em níveis médios (800 hPa a 300 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Kuo; (c) e (d) Raschke; e (e) e (f) Grell.

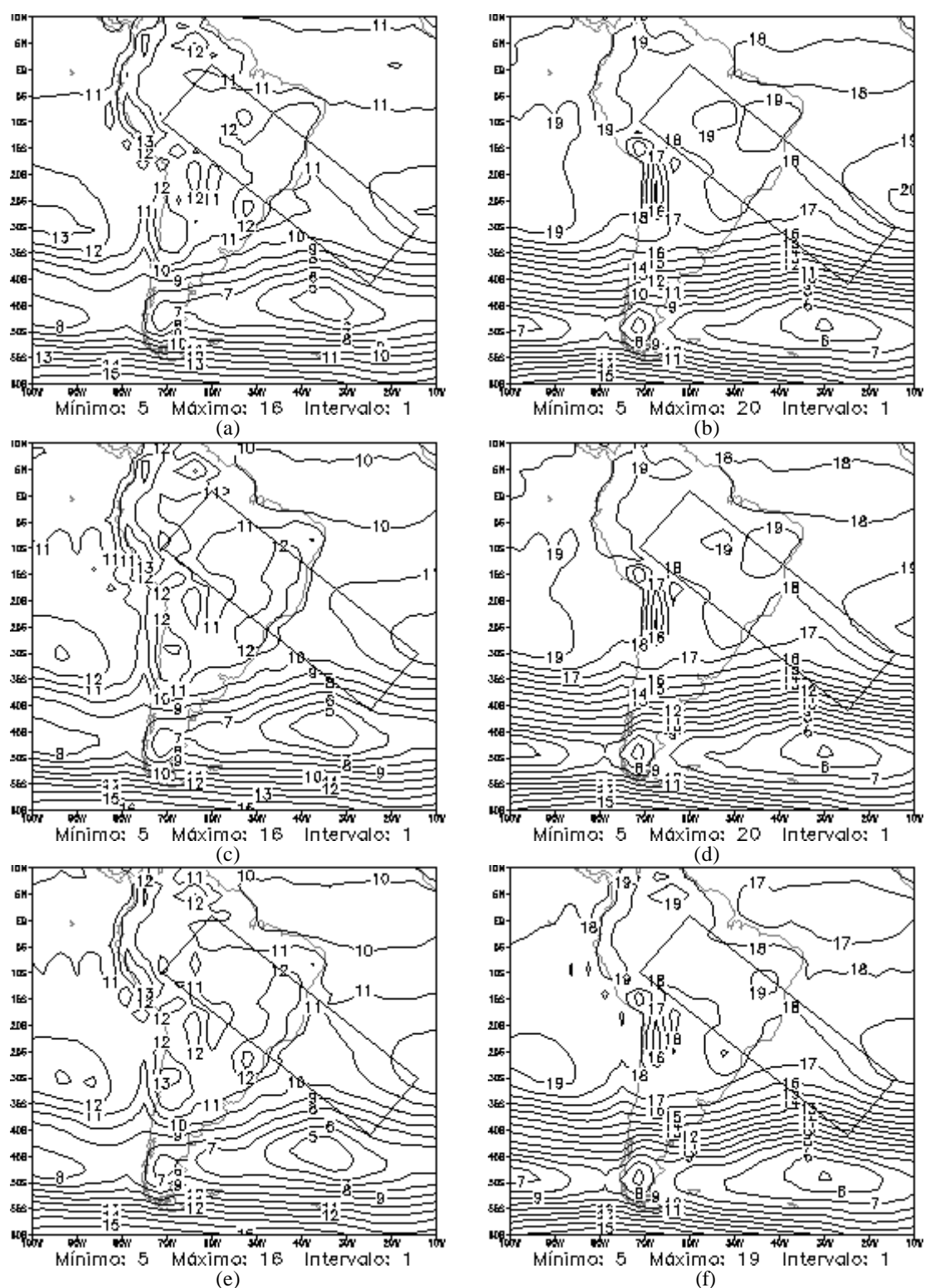


FIGURA 4.71 – Interação energia total (%) entre as categorias de modos verticais 0103-0407, em altos níveis (300 hPa a 150 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Kuo; (c) e (d) Raschke; e (e) e (f) Grell.

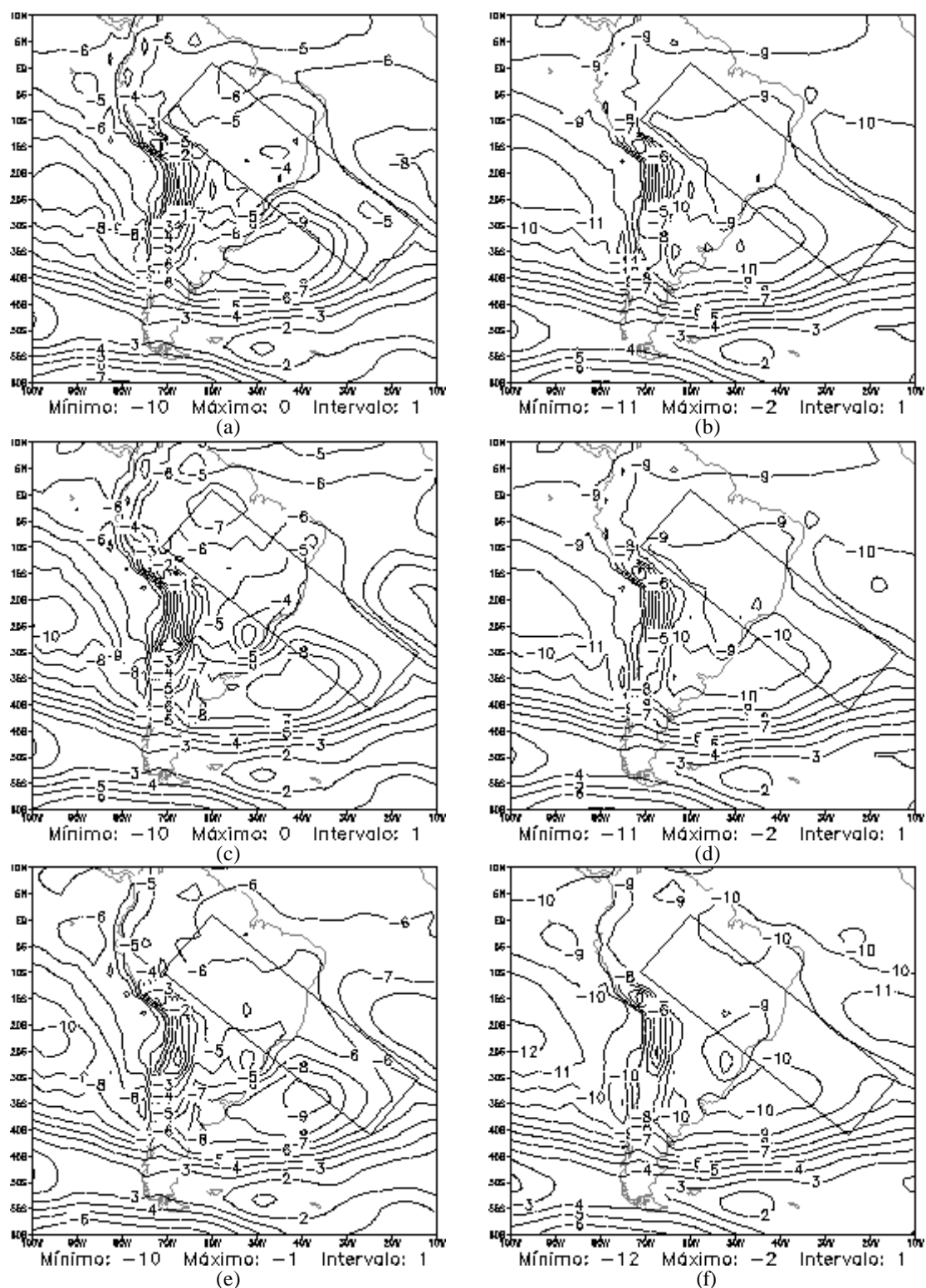


FIGURA 4.72 – Interação energia total (%) entre as categorias de modos verticais 0407-0812 e 0407-0814, em altos níveis (300 hPa a 150 hPa), Modelo Global do CPTEC, média das previsões de 24h, T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita): (a) e (b) Kuo; (c) e (d) Raschke; e (e) e (f) Grell.

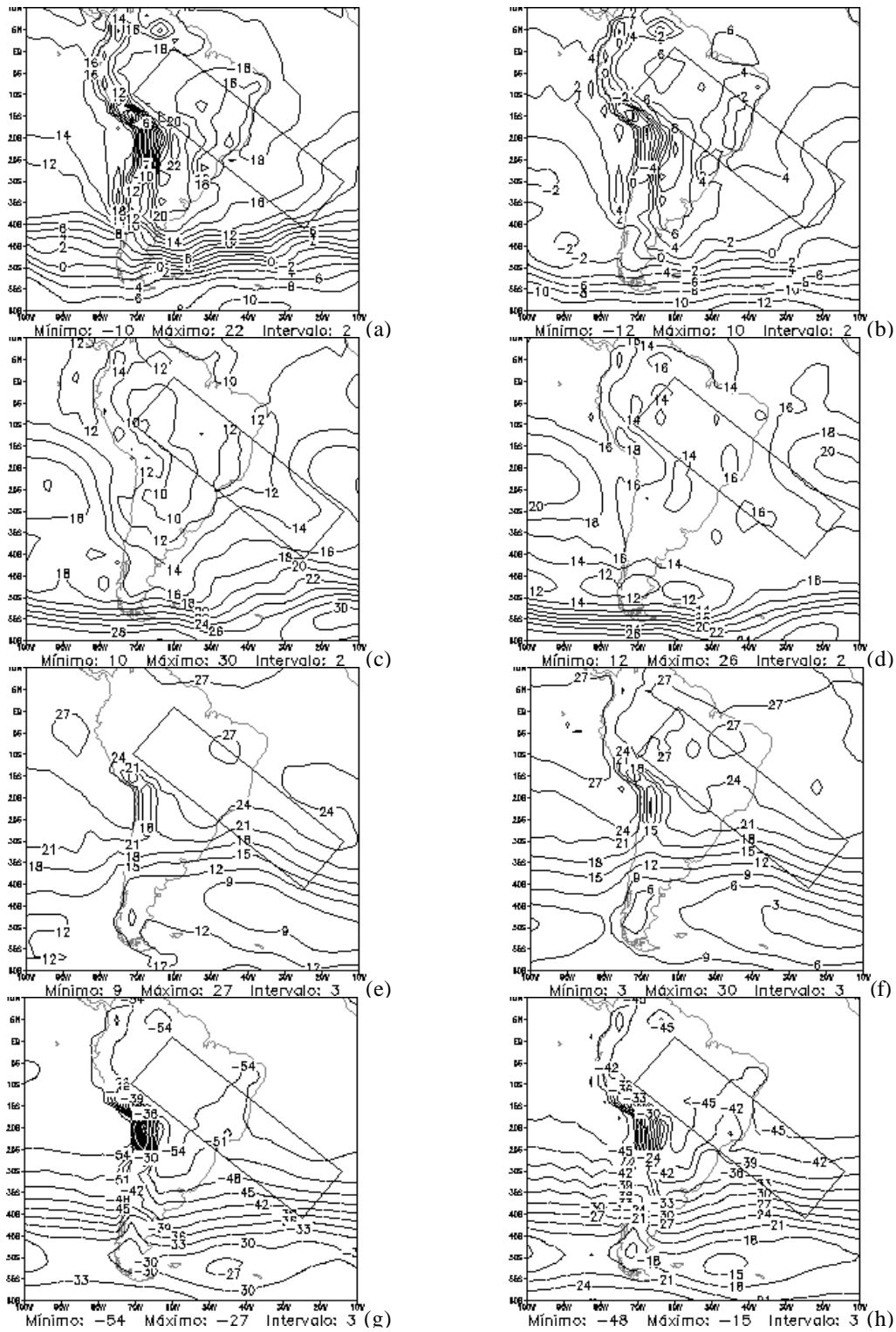


FIGURA 4.73 – Resíduo da interação de energia total (%) entre os modos verticais 1 a 12 e 1 a 14, respectivamente, para o Modelo Global do CPTEC – KUO T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), média das previsões de 24h, (a) e (b) Baixos Níveis; (c) e (d) Níveis Médios; (e) e (f) Altos Níveis; e (g) e (h) Estratosfera.

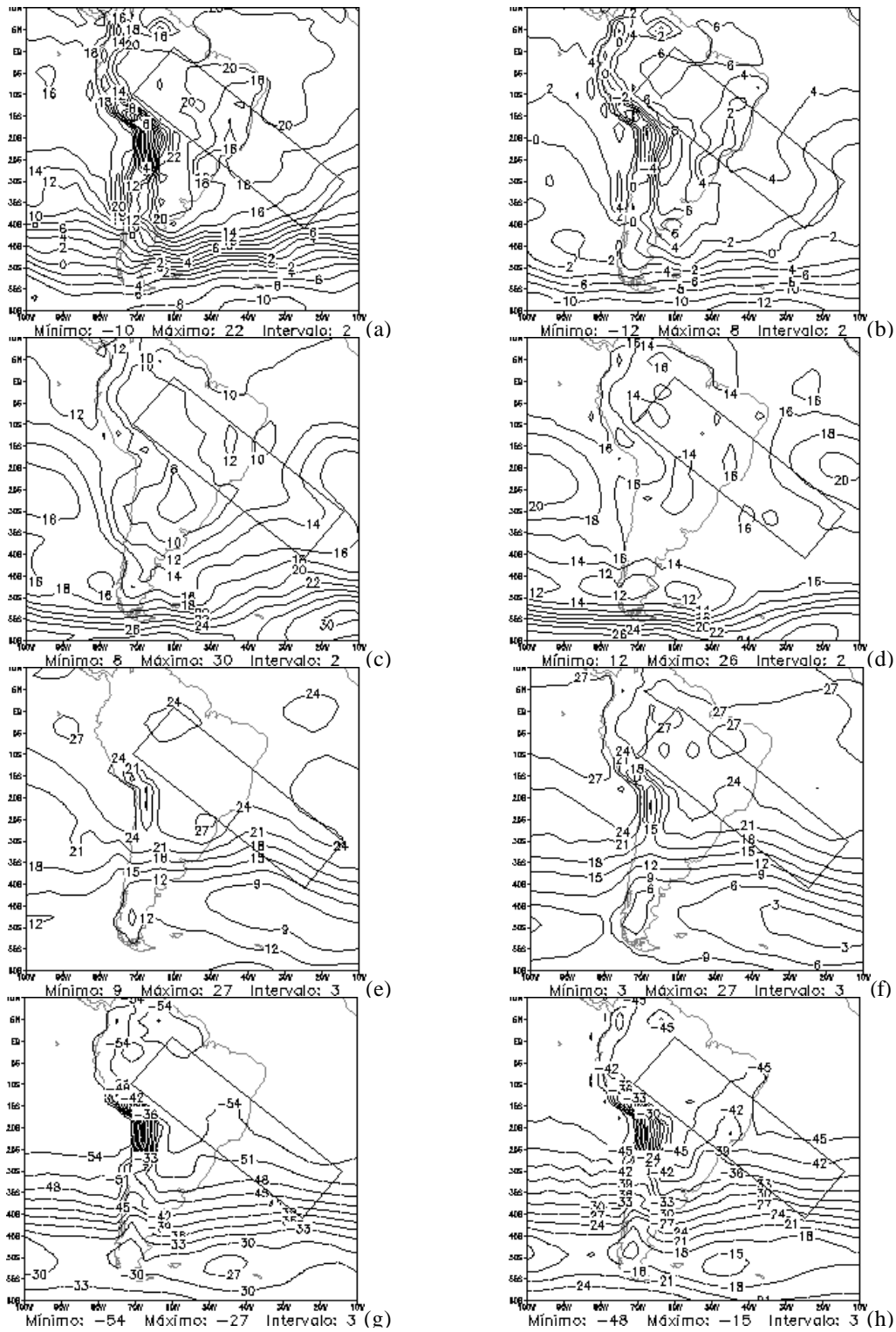


FIGURA 4.74 – Resíduo da interação de energia total (%) entre os modos verticais 1 a 12 e 1 a 14, respectivamente, para o Modelo Global do CPTEC – RAS T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), média das previsões de 24h: (a) e (b) Baixos Níveis; (c) e (d) Níveis Médios; (e) e (f) Altos Níveis; e (g) e (h) Estratosfera.

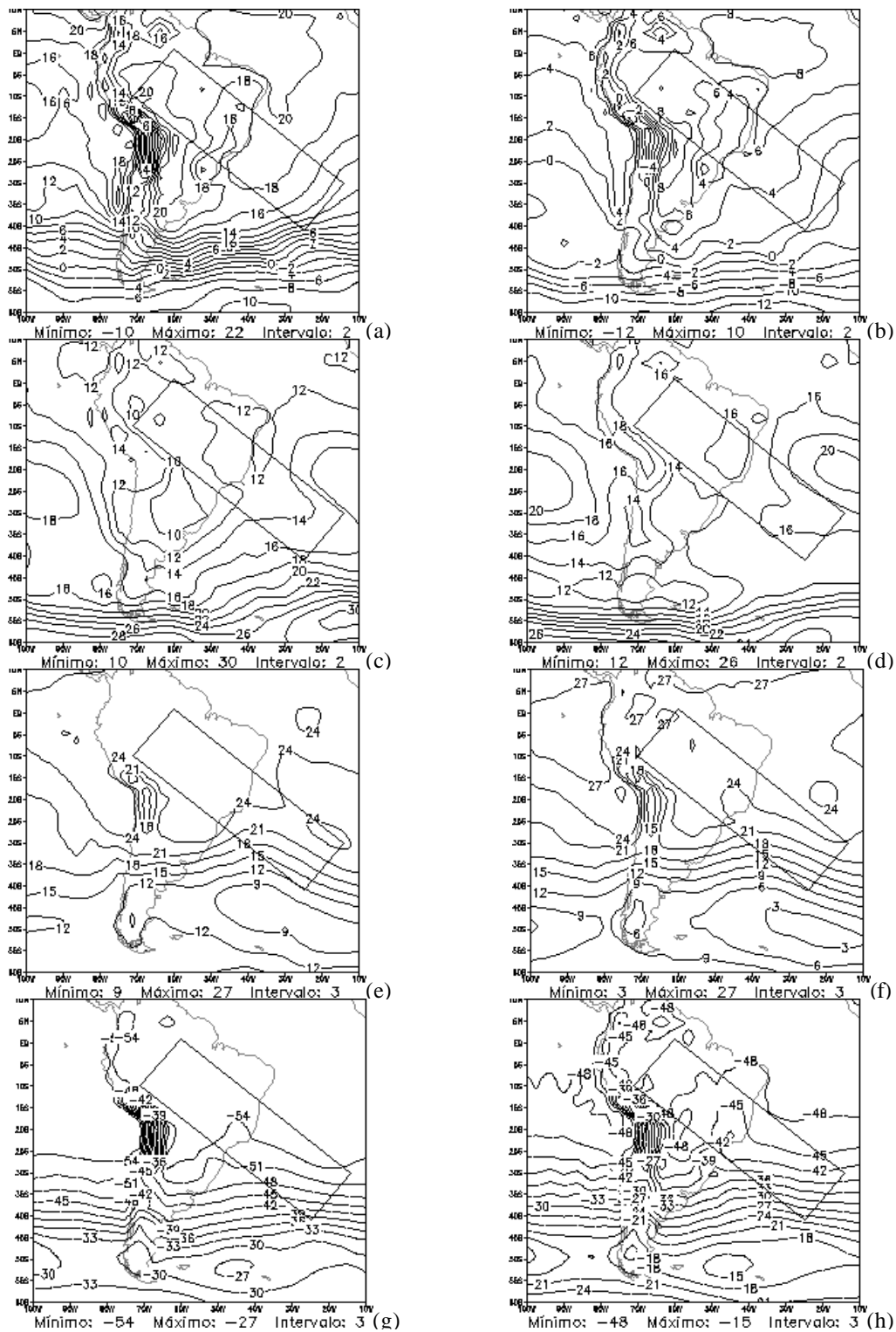


FIGURA 4.75 – Resíduo da interação de energia total (%) entre os modos verticais 1 a 12 e 1 a 14, respectivamente, para o Modelo Global do CPTEC – GRELL T126L28 (a esquerda) e T170L42 (a direita), média das previsões de 24h: (a) e (b) Baixos Níveis; (c) e (d) Níveis Médios; (e) e (f) Altos Níveis; e (g) e (h) Estratosfera.

TABELA 4.6 – Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Verticais - Modelos T126L28 – Região: América do Sul.

VARIÁVEIS / MODOS VERTICAIS	KUO		RAS		GRELL	
	r	EMQ (%)	r	EMQ (%)	r	EMQ (%)
<b>Energia Total (%)</b>						
etn0103a	<u>0.997</u>	0.143	0.997	0.154	0.997	0.155
etn0407a	0.998	0.127	<u>0.998</u>	0.122	0.998	0.132
etn0812a	0.962	0.072	0.960	0.064	<u>0.967</u>	0.065
etn0103b	<u>0.997</u>	0.343	0.997	0.371	0.997	0.374
etn0407b	<u>0.996</u>	0.182	<u>0.997</u>	0.185	0.996	0.207
etn0812b	0.971	0.209	<u>0.969</u>	0.179	<u>0.977</u>	0.179
etn0103c	<u>0.997</u>	0.102	0.997	0.112	<u>0.997</u>	0.114
etn0407c	0.998	0.288	<u>0.998</u>	0.266	0.998	0.267
etn0812c	0.966	0.140	0.965	0.132	<u>0.969</u>	0.131
etn0103d	0.997	1.265	0.998	1.246	<u>0.998</u>	1.197
etn0407d	0.998	1.171	0.998	1.189	<u>0.998</u>	1.099
etn0812d	0.962	0.377	0.963	0.345	<u>0.964</u>	0.352
<b>Interação-Modos</b>						
int0103a	0.996	0.105	<u>0.997</u>	0.113	0.996	0.109
int0407a	<u>0.997</u>	0.401	<u>0.997</u>	0.407	0.997	0.500
int0812a	0.882	0.280	<u>0.932</u>	0.200	0.902	0.229
int0103b	0.996	0.235	<u>0.997</u>	0.246	0.996	0.238
int0407b	0.997	0.319	<u>0.997</u>	0.306	0.997	0.354
int0812b	0.901	0.211	<u>0.933</u>	0.172	0.932	0.166
int0103c	0.997	0.039	0.997	0.035	<u>0.997</u>	0.034
int0407c	0.998	0.398	0.998	0.456	<u>0.999</u>	0.447
int0812c	0.924	0.159	<u>0.972</u>	0.109	0.954	0.118
int0103d	0.996	0.378	<u>0.997</u>	0.389	0.996	0.378
int0407d	<u>0.998</u>	1.067	<u>0.998</u>	1.069	0.998	1.244
int0812d	0.918	0.376	<u>0.930</u>	0.312	0.919	0.316
<b>Interação-Classes</b>						
int01030407a	<u>0.981</u>	0.746	0.948	0.770	0.951	0.763
int01030812a	0.976	0.522	<u>0.987</u>	0.343	0.977	0.478
int04070812a	0.956	1.160	<u>0.973</u>	0.929	0.969	0.971
int01030407b	0.990	0.194	<u>0.991</u>	0.226	0.989	0.196
int01030812b	0.969	0.681	<u>0.982</u>	0.471	0.970	0.625
int04070812b	0.979	0.850	<u>0.985</u>	0.740	0.983	0.844
int01030407c	<u>0.983</u>	0.566	0.960	0.579	0.959	0.609
int01030812c	0.939	0.225	<u>0.940</u>	0.217	0.936	0.230
int04070812c	<u>0.959</u>	0.610	0.916	0.854	0.918	0.857
int01030407d	<u>0.992</u>	0.207	0.989	0.201	0.985	0.241
int01030812d	<u>0.978</u>	0.036	0.969	0.042	0.972	0.040
int04070812d	<u>0.991</u>	0.151	0.987	0.226	0.989	0.171
<b>Resíduo</b>						
res0112a	<u>0.987</u>	1.684	0.984	1.550	0.983	1.528
res0112b	<u>0.985</u>	0.896	0.980	1.083	0.981	0.968
res0112c	<u>0.988</u>	1.033	0.982	1.203	0.981	1.220
res0112d	<u>0.996</u>	0.968	<u>0.997</u>	0.926	0.996	1.186



TABELA 4.7 – Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) Energética dos Modos Verticais - Modelos T170L42 – Região: América do Sul.

VARIÁVEIS / MODOS VERTICAIS	KUO		RAS		GRELL	
	r	EMQ	r	EMQ	r	EMQ
<b>Energia Total (%)</b>						
etn0103a	<u>0.997</u>	0.095	<u>0.997</u>	0.095	0.996	0.101
etn0407a	<u>0.998</u>	0.095	<u>0.998</u>	0.093	0.998	0.105
etn0814a	0.975	0.063	<u>0.978</u>	0.060	<u>0.980</u>	0.064
etn0103b	<u>0.997</u>	0.248	<u>0.997</u>	0.246	<u>0.996</u>	0.264
etn0407b	<u>0.998</u>	0.142	<u>0.998</u>	0.141	0.997	0.169
etn0814b	0.981	0.191	<u>0.984</u>	0.180	<u>0.987</u>	0.195
etn0103c	<u>0.997</u>	0.075	<u>0.997</u>	0.075	<u>0.996</u>	0.081
etn0407c	<u>0.998</u>	0.266	<u>0.998</u>	0.257	<u>0.998</u>	0.256
etn0814c	0.976	0.192	0.979	0.181	<u>0.981</u>	0.196
etn0103d	<u>0.997</u>	1.226	<u>0.997</u>	1.188	<u>0.997</u>	1.115
etn0407d	<u>0.998</u>	0.998	<u>0.998</u>	0.956	<u>0.998</u>	0.927
etn0814d	0.979	0.536	<u>0.981</u>	0.509	<u>0.980</u>	0.553
<b>Interação-Modos</b>						
int0103a	0.998	0.073	<u>0.998</u>	0.069	0.998	0.085
int0407a	0.998	0.295	<u>0.998</u>	0.283	0.998	0.409
int0814a	0.922	0.363	<u>0.926</u>	0.349	<u>0.952</u>	0.277
int0103b	0.998	0.176	<u>0.998</u>	0.167	0.998	0.200
int0407b	0.998	0.251	<u>0.998</u>	0.243	0.998	0.308
int0814b	0.949	0.237	<u>0.954</u>	0.225	0.951	0.231
int0103c	<u>0.997</u>	0.027	<u>0.997</u>	0.026	<u>0.997</u>	0.024
int0407c	0.998	0.469	<u>0.998</u>	0.447	<u>0.998</u>	0.555
int0814c	0.967	0.193	0.970	0.182	<u>0.981</u>	0.169
int0103d	<u>0.998</u>	0.276	<u>0.997</u>	0.261	0.998	0.305
int0407d	<u>0.998</u>	1.005	<u>0.998</u>	0.964	0.998	1.262
int0814d	0.960	0.469	0.960	0.468	<u>0.967</u>	0.448
<b>Interação-Classes</b>						
int01030407a	0.996	0.664	<u>0.996</u>	0.647	0.992	0.605
int01030814a	0.972	0.609	<u>0.973</u>	0.588	<u>0.976</u>	0.506
int04070814a	0.974	0.925	0.975	0.908	<u>0.983</u>	0.745
int01030407b	0.985	0.167	<u>0.986</u>	0.168	0.985	0.191
int01030814b	0.960	0.806	0.961	0.784	<u>0.967</u>	0.662
int04070814b	0.982	0.588	<u>0.984</u>	0.551	0.984	0.652
int01030407c	0.996	0.621	<u>0.996</u>	0.611	0.993	0.597
int01030814c	0.943	0.249	<u>0.943</u>	0.246	0.942	0.242
int04070814c	0.977	0.562	<u>0.977</u>	0.561	0.965	0.672
int01030407d	<u>0.984</u>	0.198	<u>0.983</u>	0.202	0.977	0.201
int01030814d	<u>0.991</u>	0.040	<u>0.991</u>	0.040	0.987	0.047
int04070814d	0.988	0.152	<u>0.989</u>	0.142	0.977	0.260
<b>Resíduo</b>						
res0114a	0.976	1.460	<u>0.976</u>	1.408	0.964	1.314
res0114b	<u>0.959</u>	0.847	<u>0.959</u>	0.823	0.946	0.958
res0114c	<u>0.991</u>	1.150	<u>0.992</u>	1.092	0.991	1.163
res0114d	<u>0.997</u>	1.028	<u>0.997</u>	1.049	0.997	1.513

TABELA 4.8 – Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Verticais - Modelos T126L28 – Região: Composto ZCAS.

VARIÁVEIS / MODOS VERTICAIS	KUO		RAS		GRELL	
	r	RMS	r	RMS	r	RMS
<b>Energia Total (%)</b>						
etn0103a	0.997	0.079	<u>0.997</u>	0.075	0.996	0.072
etn0407a	0.992	0.097	<u>0.995</u>	0.078	0.994	0.096
etn0812a	<u>0.901</u>	0.052	0.807	0.057	0.885	0.039
etn0103b	<u>0.997</u>	0.188	<u>0.997</u>	0.179	0.996	0.172
etn0407b	0.987	0.124	<u>0.993</u>	0.117	0.993	0.163
etn0812b	<u>0.929</u>	0.150	<u>0.867</u>	0.142	0.898	0.089
etn0103c	<u>0.997</u>	0.054	<u>0.998</u>	0.054	0.996	0.051
etn0407c	<u>0.995</u>	0.254	<u>0.994</u>	0.199	0.994	0.196
etn0812c	<u>0.868</u>	0.106	0.721	0.125	0.850	0.096
etn0103d	<u>0.997</u>	0.720	0.997	0.779	0.995	0.848
etn0407d	<u>0.996</u>	0.988	0.993	0.725	0.995	0.607
etn0812d	<u>0.879</u>	0.282	0.741	0.317	0.854	0.280
<b>Interação-Modos</b>						
int0103a	<u>0.996</u>	0.074	0.996	0.097	0.993	0.092
int0407a	0.992	0.276	0.994	0.260	<u>0.995</u>	0.404
int0812a	<u>0.938</u>	0.213	0.902	0.276	<u>0.887</u>	0.199
int0103b	<u>0.996</u>	0.163	0.996	0.207	0.993	0.198
int0407b	<u>0.990</u>	0.219	<u>0.995</u>	0.181	0.995	0.276
int0812b	0.713	0.170	<u>0.648</u>	0.202	<u>0.794</u>	0.132
int0103c	0.997	0.023	<u>0.997</u>	0.020	<u>0.995</u>	0.019
int0407c	<u>0.994</u>	0.336	<u>0.992</u>	0.366	0.993	0.329
int0812c	<u>0.954</u>	0.108	0.953	0.109	0.949	0.070
int0103d	0.996	0.259	<u>0.997</u>	0.322	0.993	0.308
int0407d	0.994	0.790	0.994	0.707	<u>0.996</u>	0.945
int0812d	<u>0.881</u>	0.288	0.761	0.384	<u>0.799</u>	0.299
<b>Interação-Classes</b>						
int01030407a	<u>0.979</u>	0.519	0.952	0.547	0.971	0.410
int01030812a	<u>0.975</u>	0.413	0.969	0.294	0.965	0.267
int04070812a	<u>0.978</u>	0.871	0.971	1.188	0.961	0.869
int01030407b	<u>0.969</u>	0.106	0.941	0.193	0.964	0.123
int01030812b	<u>0.968</u>	0.524	0.956	0.441	0.950	0.404
int04070812b	<u>0.984</u>	0.599	0.972	0.750	0.975	0.817
int01030407c	<u>0.977</u>	0.367	0.970	0.331	0.972	0.306
int01030812c	<u>0.842</u>	0.153	0.696	0.233	0.725	0.240
int04070812c	<u>0.931</u>	0.668	0.745	1.256	0.868	1.347
int01030407d	<u>0.948</u>	0.162	0.901	0.154	0.902	0.207
int01030812d	<u>0.905</u>	0.024	0.737	0.056	0.659	0.046
int04070812d	0.983	0.106	<u>0.985</u>	0.300	0.974	0.137
<b>Resíduo</b>						
res0112a	<u>0.961</u>	0.724	0.943	1.697	0.939	1.355
res0112b	<u>0.967</u>	0.688	0.929	0.818	0.946	1.156
res0112c	<u>0.986</u>	0.851	0.955	1.587	0.981	1.548
res0112d	0.991	0.529	<u>0.993</u>	0.555	0.992	1.045

TABELA 4.9 – Índice de Correlação (r) e Erro Médio Quadrático (EMQ) – Energética dos Modos Verticais - Modelos T170L42 – Região: Composto ZCAS.

VARIÁVEIS / MODOS VERTICAIS	KUO		RAS		GRELL	
	r	EMQ (%)	r	EMQ (%)	r	EMQ (%)
<b>Energia Total (%)</b>						
etn0103a	0.997	0.055	0.997	0.050	<u>0.997</u>	0.039
etn0407a	0.991	0.107	0.992	0.095	<u>0.994</u>	0.074
etn0814a	0.896	0.055	0.914	0.050	<u>0.953</u>	0.030
etn0103b	0.997	0.142	0.997	0.129	<u>0.997</u>	0.100
etn0407b	0.985	0.142	0.986	0.128	<u>0.992</u>	0.126
etn0814b	0.894	0.166	0.911	0.151	<u>0.964</u>	0.071
etn0103c	0.997	0.041	0.997	0.037	<u>0.997</u>	0.030
etn0407c	0.994	0.329	<u>0.994</u>	0.292	<u>0.993</u>	0.183
etn0814c	0.921	0.165	0.935	0.150	<u>0.965</u>	0.093
etn0103d	0.996	0.857	0.996	0.754	<u>0.996</u>	0.670
etn0407d	0.994	1.211	0.995	1.066	<u>0.997</u>	0.458
etn0814d	0.940	0.467	0.952	0.428	<u>0.963</u>	0.378
<b>Interação-Modos</b>						
int0103a	0.995	0.046	<u>0.995</u>	0.036	0.993	0.082
int0407a	0.993	0.332	0.994	0.278	<u>0.996</u>	0.278
int0814a	0.973	0.324	<u>0.978</u>	0.317	0.963	0.264
int0103b	0.995	0.110	<u>0.995</u>	0.086	0.993	0.191
int0407b	0.993	0.280	<u>0.994</u>	0.241	<u>0.996</u>	0.226
int0814b	<u>0.863</u>	0.232	0.856	0.224	0.840	0.336
int0103c	<u>0.997</u>	0.016	<u>0.997</u>	0.013	0.996	0.016
int0407c	0.995	0.566	<u>0.995</u>	0.484	<u>0.995</u>	0.368
int0814c	0.761	0.172	0.762	0.159	<u>0.874</u>	0.114
int0103d	0.995	0.171	<u>0.996</u>	0.135	0.993	0.288
int0407d	0.994	1.171	<u>0.995</u>	0.995	<u>0.996</u>	0.854
int0814d	0.972	0.427	<u>0.973</u>	0.433	0.953	0.628
<b>Interação-Classes</b>						
int01030407a	0.986	0.465	<u>0.987</u>	0.428	0.978	0.391
int01030814a	0.982	0.703	<u>0.985</u>	0.664	0.979	0.392
int04070814a	0.990	0.685	<u>0.991</u>	0.709	0.985	0.715
int01030407b	0.964	0.135	<u>0.965</u>	0.125	0.960	0.114
int01030814b	0.975	0.908	<u>0.979</u>	0.867	0.966	0.634
int04070814b	0.986	0.407	<u>0.990</u>	0.359	0.982	0.686
int01030407c	0.985	0.421	<u>0.986</u>	0.400	0.974	0.417
int01030814c	0.877	0.256	<u>0.877</u>	0.255	0.725	0.335
int04070814c	0.934	0.408	<u>0.942</u>	0.434	0.864	0.959
int01030407d	0.963	0.102	<u>0.966</u>	0.100	<u>0.970</u>	0.130
int01030814d	<u>0.884</u>	0.039	0.866	0.042	<u>0.524</u>	0.054
int04070814d	0.972	0.166	<u>0.974</u>	0.149	0.934	0.318
<b>Resíduo</b>						
res0114a	<u>0.961</u>	0.714	0.955	0.667	0.927	1.130
res0114b	<u>0.926</u>	0.919	0.925	0.855	0.885	1.379
res0114c	0.985	1.110	<u>0.988</u>	1.039	0.987	1.124
res0114d	0.993	0.693	<u>0.993</u>	0.618	<u>0.996</u>	1.351



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

#### 5.1 Considerações Gerais

As trocas horizontais e verticais de energia para um composto de sete episódios de ZCAS foram estudadas, utilizando a decomposição em Funções Modos Normais Tridimensionais (FMN-3D), conforme teoria descrita em Kasahara e Puri (1981).

O estudo foi dividido em duas partes: uma parte observacional, onde foi realizada uma análise energética do composto de ZCAS, considerando-se as trocas verticais de energia e as interferências entre os modos horizontais de oscilação (Rossby, Kelvin, Misto Rossby-Gravidade, Gravidade Oeste e Gravidade Leste); a variação diária das energias cinética, potencial disponível e porcentagem de energia em função dos modos verticais, para cada episódio de ZCAS foram também avaliadas a fim de investigar algum efeito transiente na partição vertical de energia e da atividade convectiva associada a ZCAS. Outra parte, referente aos experimentos de modelagem (parte de modelagem), foi realizada para avaliar o impacto das resoluções horizontal e vertical do Modelo Global do CPTEC e dos esquemas de convecção profunda KUU, RAS e GRELL na decomposição modal de energia do composto de ZCAS.

As Análises do NCEP T126L28 e T170L42 foram utilizadas para gerar os resultados dos experimentos de controle da parte observacional. Para os resultados dos experimentos de modelagem, foram consideradas a média das previsões de 24 horas do Modelo Global do CPTEC com resoluções T126L28 e T170L42, válidas para os períodos em que a ZCAS esteve configurada.

Observa-se que a energia total na região da ZCAS está concentrada nos 7 primeiros modos verticais, com os modos internos 4 a 7, com alturas equivalentes entre 100 e 600m, apresentando as maiores porcentagens de energia total, com valores em torno de

60%. Um máximo secundário de porcentagem de energia total foi observado para os modos verticais da categoria I, que inclui o modo externo. A partição de energia do modelo nas formas cinética (EC<sub>n</sub>) e energia potencial (EP<sub>n</sub>), bem como a contribuição percentual de energia total em função dos modos verticais mostram que a energia cinética parece ser, em grande parte, representada pelos modos verticais 1 a 3, enquanto a energia potencial do modo externo é mínima, com um pico acentuado no modo interno n=5, com altura equivalente de 284m e 342m, respectivamente, para os modelos de 28 e 42 níveis, o qual determina a dominância na distribuição da porcentagem de energia. Estes resultados estão de acordo com os trabalhos de Kasahara e Puri (1981) e Silva Dias e Bonatti (1985).

Os campos de porcentagem de energia total para as Análises do NCEP T126L28 e T170L42 mostram padrões bastante semelhantes para ambas as resoluções, notando-se apenas algumas diferenças quantitativas. Os valores apresentados pela análise com maior resolução são ligeiramente inferiores àqueles da análise T126L28 para os modos verticais 1 a 3 (categoria I) e 4 a 7 (categoria II); o inverso é verificado para a categoria III, que inclui os modos 8 a 12 (14, para T170L42), ressaltando o impacto do aumento da resolução vertical, de 28 para 42 níveis. Isto está associado ao fato da discretização vertical do modelo de 42 níveis pode realçar e/ou definir melhor a partição de energia, incluindo aspectos da energética não capturados pelo modelo de 28 níveis.

De acordo com os resultados apresentados, verificou-se que a energia dos modos verticais 1 a 3 é mais significativa em latitudes mais altas, diminuindo em direção ao equador, o que pode estar associado à influência do jato subtropical, uma vez que este pode ser descrito por ondas de Rossby longas. Os modos internos 4 a 7 apresentaram valores maiores de energia em grande parte da faixa central da América do Sul e próximo ao equador, incluindo a região da ZCAS, com núcleos de máxima porcentagem de energia situados em regiões convectivamente ativas e, em concordância, com o posicionamento da banda de nebulosidade associada a ZCAS. Para a categoria III, os resultados foram semelhantes àqueles obtidos para os modos verticais 1 a 3, entretanto com menores porcentagens de energia total.

A análise das fontes e sumidouros de energia total para os modos verticais 4 a 7 indicou que há uma fonte de energia bem definida sobre a região da ZCAS e sobre a ZCIT, e um sumidouro de energia na região dos vórtices ciclônicos do Nordeste brasileiro. O mesmo padrão foi encontrado para a categoria III de modos verticais e para a soma dos 12 (14) primeiros modos verticais para a Análise T126L28 (T170L42), porém com núcleos de menor intensidade. Já para os modos verticais 1 a 3, as fontes e sumidouros de energia total estão concentradas sobre a Cordilheira dos Andes, ressaltando o efeito orográfico na energética modal, uma vez que a pressão a superfície utilizada na decomposição dos modos normais tem impacto direto no modo externo. Em geral, o padrão espacial das fontes e sumidouros de energia foi semelhante em ambas as resoluções, sendo que a Análise T170L42 indicou fontes e sumidouros de energia total mais intensas do que aquelas observadas para a resolução T126L28, especialmente para os modos verticais das categorias I e III.

Os resultados descritos anteriormente são realçados quando a variação temporal da partição vertical de energia para cada episódio de ZCAS é considerada. Em geral, observou-se que, em todos os episódios, há simultaneidade no decréscimo de EPn e aumento de ECn, com os aumentos ou picos de EPn correspondendo aos períodos convectivamente ativos sobre a região, provavelmente devido ao efeito da liberação de calor latente. Além disso, alguns padrões comuns aos episódios puderam ser inferidos e são sugeridos como possíveis ferramentas para o monitoramento da configuração e dissipação de um evento de ZCAS. Observa-se:

- um aumento de energia cinética e diminuição de energia potencial disponível 1 a 2 dias antes do período de atuação da ZCAS;
- um aumento de energia potencial disponível a partir do primeiro dia de configuração da ZCAS;
- um decréscimo de EPn durante a dissipação da ZCAS.

Como mencionado no Capítulo 4, estas características mostram-se variantes para episódios subsequentes, o que pode estar relacionado à presença de resíduos de episódios anteriores ou outros padrões atmosféricos que exercem influência na região da ZCAS.

A análise da partição de energia entre os modos horizontais considerou as auto-interações e as interações entre diferentes modos horizontais. No caso das auto-interações, a análise energética indicou que, em ambas as resoluções, T126L28 e T170L42, as porcentagens de energia foram bem distribuídas entre as três categorias de modos verticais, destacando-se os modos Rossby e Kelvin, como os principais determinantes do padrão espacial da energia total. Já as interações entre pares de modos horizontais indicaram contribuições relevantes para a energéticas nas duas primeiras categorias de modos verticais, 1 a 3 e 4 a 7. O resíduo, ou soma de todas as interações, apontou maiores interferências construtivas/destrutivas de energia para os modos internos 4 a 7, sendo o produto cruzado dos modos Rossby e Kelvin o maior contribuidor para o padrão observado em todas as categorias de modos verticais.

Quantitativamente, os valores obtidos, tanto nas auto-interações quanto nos produtos cruzados, foram ligeiramente maiores para os modos verticais 1 a 3 e 8 a 14 na resolução T170L42, enquanto a categoria II, que deteve as maiores contribuições para a energia total, apresentou valores relativamente inferiores aos obtidos na resolução T126L28. Isto deve estar associado ao maior detalhamento da discretização vertical, quando são considerados 42 níveis verticais e mostra que há um maior impacto do aumento da resolução vertical, do que da resolução horizontal.

Os resultados mais expressivos da partição de energia entre os modos horizontais são resumidos no quadro abaixo:



<b>Modos Verticais</b>	<b>Auto-Interações</b>	<b>Interações Horizontais</b>
<b>Categoria I: Modos 1 a 3</b>	<u>Rossby</u> : em latitudes altas <u>Kelvin</u> : ZCAS e próximo ao equador.  <b>Obs.:</b> Resposta em latitudes altas do modo Rossby ao aquecimento equatorial, geradas pelo modo externo. As maiores contribuições do modo Kelvin ocorrem em regiões convectivas.	Rossby-Kelvin  <u>Contribuições secundárias na região da ZCAS:</u> Rossby-Misto Kelvin-Misto Kelvin-Grav. Oeste Kelvin-Grav. Leste
<b>Categoria II: Modos 4 a 7</b>	<u>Rossby</u> : América do Sul central, incluindo a ZCAS <u>Kelvin</u> : região equatorial  <b>Obs.:</b> Máximas porcentagens de energia confinadas equatorialmente, com valores acima de 100%, indicando interação entre os modos horizontais.	Rossby-Kelvin  <u>Contribuições secundárias na região da ZCAS:</u> Rossby-Misto Rossby-Grav. Oeste Rossby-Grav. Leste
<b>Categoria III: Modos 8 a 12 e 8 a 14</b>	<u>Rossby</u> : em latitudes médias e altas, incluindo a ZCAS <u>Kelvin</u> : região equatorial  <b>Obs.:</b> Contribuições significativas e energia do modo Rossby, com padrões bem definidos na região da ZCAS.	Rossby-Kelvin

Da análise da interação da energia total entre os modos verticais em diferentes níveis de pressão, verificou-se que:

- a) as máximas porcentagens de energia total foram obtidas para os modos verticais 4 a 7, em todas as classes de níveis de pressão, sendo observado um crescimento da energia dos Baixos Níveis para a Estratosfera, onde os valores estiveram em torno de 40 a 50% na região da ZCAS;
- b) os valores mais significativos de interferência construtiva/destrutiva de energia total resultam da interação entre os modos 4 a 7, em todas as classes de níveis

de pressão, notando-se máxima construção (destruição) de energia em Altos Níveis (Estratosfera);

c) os modos verticais 1 a 3 são, em geral, responsáveis pela redução de energia das demais categorias de modos verticais, como pode ser observado nas interações entre categorias de modos verticais. As contribuições mais significativas, resultante destas interações estão concentradas em Baixos e Altos Níveis, para os modos 1 a 3 e 4 a 7 e, em Baixos e Médios Níveis, para as interações entre as categorias II e III e I e III;

d) os resíduos da interação de energia total entre os primeiros 12 e 14 modos verticais da Análise T126L28 e T170L42 apresentaram valores positivos em Baixos, Médios e Altos Níveis, e valores negativos na Estratosfera, que tendem a compensar a partição de energia entre os níveis troposféricos. Valores ligeiramente maiores são obtidos para a resolução T126L28, principalmente em Baixos Níveis e Estratosfera.

Os resultados dos experimentos de modelagem com diferentes esquemas de convecção profunda mostraram que as previsões utilizando os esquemas KUO, RAS e GRELL são bastante semelhantes entre si e têm boa concordância com os padrões obtidos nos experimentos de controle, não apresentando grandes impactos na partição e interação de energia entre os modos verticais e horizontais. Em geral, o modelo, com os esquemas KUO e RAS, apresentou as maiores correlações, respectivamente para as resoluções T126L28 e T170L42. O modelo com o esquema GRELL apresentou melhor desempenho nas previsões para os modos verticais 8 a 12 (14, para T170L42), além de apresentar, localmente ou regionalmente, um melhor detalhamento dos padrões observados.

Desta forma, nota-se que o aumento da resolução vertical do modelo é importante para a representação das características de grande escala dos fenômenos de ZCAS, independentemente do esquema de convecção profunda utilizado.



## 5.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Considerando-se as discussões apresentadas nesta Tese, sugere-se como trabalho futuro:

- experimentos com um maior número de episódios de ZCAS, utilizando-se técnicas mais detalhadas para a classificação e composição de eventos de ZCAS, como as apresentadas por Carvalho et al. (2004), a fim de estabelecer possíveis critérios que auxiliem os previsores de tempo no monitoramento operacional destes sistemas;

- analisar o impacto de outros esquemas de convecção profunda, como por exemplo, o Grell ensemble, bem como a influência de outros processos físicos, tais como radiação, convecção rasa, entre outro, nas trocas de energia entre os modos verticais e horizontais;

- aplicar a técnica de decomposição em modos normais para estudar a energética da ZCAS e de outros fenômenos meteorológicos (passagem frontal, nuvem vírgula, situação normal de verão sem a presença da ZCAS, etc.) com modelos com resoluções verticais maiores do que aquelas utilizadas neste estudo, bem como diferentes análises para condições iniciais do modelo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, C.R. **Análise das trocas de energia entre modos verticais e horizontais em resposta à fontes tropicais de calor de grande escala.** 1994. 366p. (INPE-5681-TDI/567) Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

Anthes, R.A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. **Monthly Weather Review**, v. 105, n. 3, p. 270-300, 1977.

Arakawa, A.; Schubert, W.H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 3, p. 674-701, 1974.

Betts, A.K. A new convective adjustment scheme. Part I: observational and theoretical basis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 112, n. 473, p. 677-692, 1986a.

Betts, A.K.; Miller, M.J. A new convective adjustment scheme. Part II: single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 112, n. 473, p. 693-709, 1986b.

Bonatti, G. R. **Estudos observacionais, de simulação numérica e de partição e interação de energia de nuvem vírgula invertida sobre a América do Sul.** 2004. 276p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

Bonatti, J. P. Modelo de circulação geral do CPTEC. **Climanálise Especial 10 anos**, v.11, n. especial, out. 1996. Disponível em:  
<<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliensp10a/bonatti.html>>. Acesso em: 24 nov 2001.

Cavalcanti, I.F.A.; Marengo J.A.; Satyamurty, P.; Nobre, C.A.; Trosnikov, I.; Bonatti, J.P.; Manzi, A.O.; Tarasova, T.; Pezzi, L.P.; D’Almeida C.; Sampaio, G.; Castro C.C.; Sanches, M.B.; Camargo, H. Global climatological features in a simulation using CPTEC-COLA AGCM. **Journal of Climate**, v. 15, n. 21, p.2965-2988, 2002.

Carvalho, L.M.V.; Jones C.; Liebmann B. The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p.88-108, 2004.

Chapman, S.; Lindzen, R. **Atmospheric tides.** New York: Gordon and Breach, 1970.

Cho, H.R.; Ogura, Y. A relationship between the cloud activity and the low-level convergence as observed in Reed-Recker’s composite easterly waves. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 8, p. 2058-2065, 1974.

Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v.16, n.01, jan, 2001a.  
Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/0101/index.html>>. Acesso em: 17 mar 2003.

Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v.16, n.11, nov, 2001b.  
Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/1101/index.html>>. Acesso em: 17 mar 2003.

Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v.16, n.12, dez, 2001c.  
Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/1201/index.html>>. Acesso em: 17 mar 2003.

Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v.17, n.02, fev, 2002.  
Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/0202/index.html>>. Acesso em: 17 mar 2003.

Cohn, S.E.; Dee, D.P. Analysis of the vertical structure equation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 115, n. 485, p. 143-171, 1989.

Daley, R. Normal mode initialization. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 19, n. 3, p. 450-468, 1981

Daley, R. **Atmospheric data analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 457p.

Dee, D.P.; da Silva, A.M. Using Hough harmonics to validate and assess nonlinear shallow-water models. **Monthly Weather Review**, v.114, n. 11, p. 2191-2196, 1986.

Figueroa, S.N.; Satyamurty, P.; Silva Dias, P.L. Simulations of the summer circulation over the South American region with na eta coordinate model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 10, p. 1573-1584, 1995.

Figueroa, S.N. **Estudos dos sistemas de circulação de verão sobre a América do Sul e suas simulações com modelos numéricos**. 1997. 190p. (INPE-7121-TDI/672). Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.

Flattery, T.W. Spectral models for global analysis and forecasting. In: AWS Technical Exchange Conference, 6., 1970. **Proceedings Sixth AWS Technical Exchange Conference**. USA: U. S. Naval Academy, 1970. p.42-53. (Air Weather Service Technical Report, 242).

Frank, W.M. The cumulus parameterization problem. **Monthly Weather Review**, v. 111, n. 9, p. 1859-1871, 1983.

- Fritsch, J.M.; Chappell, C.F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: convective parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 37, n. 8, p. 1722-1733, 1980.
- Fulton, S.R.; Schubert, W.H. Vertical normal mode transforms: theory and application. **Monthly Weather Review**, v. 113, n. 4, p. 647-658, 1985.
- Gandu, A.W. **Modelagem numérica da resposta troposférica regional à fontes tropicais de calor**. 1993. 209p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo - Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico, São Paulo, 1993.
- Gandu, A.W.; Silva Dias, P.L. Impact of tropical heat sources on the South American tropospheric upper circulation and subsidence. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D6, p. 6001-6015, 1998.
- Gelaro, R. A normal-mode analysis of rapid teleconnections in a numerical weather prediction model. Part I: global aspects. **Monthly Weather Review**, v. 120, n. 12, p. 2897-2913, 1992a.
- Gelaro, R. A normal-mode analysis of rapid teleconnections in a numerical weather prediction model. Part II: tropical and extratropical aspects. **Monthly Weather Review**, v. 120, n. 12, p. 2914-2927, 1992b.
- Geleyn, J.F. On a simple parameter-free partition between moistening and precipitation in the Kuo scheme. **Monthly Weather Review**, v. 113, n. 3, p. 405-407, 1985.
- Gill, A.E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 106, n. 449, p. 447-462, 1980.
- Grell, G.A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 3, p. 764-787, 1993.
- Grell, G. A.; Dudhia J.; Stauffer D. R. **A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)**. Colorado: NCAR, 1994. 117p. Technical Note (NCAR/TN-398 + STR).
- Grimm, A.M.; Silva Dias, P.L. Analysis of tropical-extratropical interactions with influence functions of a barotropic model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 20, p. 3538-3555, 1995.
- Haas, R. **Uso de modos verticais na simulação numérica de equações primitivas**. 1993. 103p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade de São Paulo - Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico, São Paulo, 1993.

Huffmann, G.J.; Bolvin, D.T. **GPCP one-degree daily precipitation data set documentation** [S.1]: SSAI; Laboratory for Atmospheres, NASA Goddard Space Flight Center, 2005.

Kain, J.S.; Fritsch, J.M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 47, n. 23, p. 2784-2802, 1990.

Kain, J.S.; Fritsch, J.M. Convective parameterization for mesoscale models: the Kain-Fritsch scheme. In: Emanuel, K.A.; Raymond, D.J. (ed). **The representation of cumulus convection in numerical models**. Boston: AMS, 1993. v. 24, cap. 16, p. 165-170.

Kasahara, A. Numerical integration of the global barotropic primitive equations with Hough harmonic expansions. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 34, n. 5, p. 687-701, 1977.

Kasahara, A.; Puri, K. Spectral representation of three-dimensional global data by expansion in normal mode functions. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 1, p. 37-51, 1981.

Kasahara, A. The linear response of a stratified global atmosphere to tropical thermal forcing. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 41, n. 14, p. 2217-2237, 1984.

Kasahara, A.; Silva Dias, P.L. Response of planetary waves to stationary tropical heating in a global atmosphere with meridional and vertical shear. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 43, n. 18, p. 1893-1911, 1986.

Kinter III, J. L. et. al. **The COLA atmosphere - biosphere general circulation model. Volume 1: Formulation**. Calverton, MA: Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA), 1997. Report n. 51. 44p.

Ko, S.D.; Tribbia J.J.; Boyd, J.P. Energetics analysis of a multilevel global spectral model. Part I: balanced energy and transient energy. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 9, p. 1941-1953, 1989.

Kodama, Y.M. Large-scale common features of sub-tropical convergence zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 70, n. 4, p. 813-836, 1992.

Kodama, Y.M. Large-scale common features of sub-tropical convergence zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part II: conditions of the circulations for generating the STCZs. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 71, n. 5, p. 581-610, 1993.



- Kreitzberg, C.W.; Perkey, D.J. Release of potential instability. Part I: a sequential plume model within a hydrostatic primitive equation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 33, n. 3, p. 456-475, 1976.
- Krishnamurti, T.N.; Kanamitsu, M.; Koss, W.J.; Lee, J.D. Tropical east-west circulations during the northern winter. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 30, n. 5, p. 780-787, 1973.
- Kuo, H.L. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.22, n. 1, p. 40-63, 1965.
- Kuo, H.L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 5, p. 1232-1240, 1974.
- Kuo, Y.H.; Bresh, J.F.; Cheng, M.-D; Kain, J.; Parsons, D.B.; Tao, W.-K.; Zhang, D.-L. Summary of a mini workshop on cumulus parameterization for mesoscale models. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 3, p. 475-491, 1997.
- Longuet-Higgins, M. S. The eigenfunctions of Laplace's tidal equations over a sphere. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. A262, p. 511-601, 1968.
- Malkus, J.S.; Williams, R.T. On the interaction between severe storms and large cumulus clouds. **Meteorological Monographs**, v. 5, n. 27, p. 59-64, 1963.
- Marengo, J.A.; Cavalcanti I.F.A.; Satyamurty, P.; Trosnikov, I.; Nobre, C.A.; Bonatti, J.P.; Camargo, H.; Sampaio, G.; Sanches, M.B.; Manzi, A.O.; Castro C.A.C.; D'Almeida C.; Pezzi, L.P.; Cândido L. Assessment of regional seasonal rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM. **Climate Dynamics**, v.21, n.5/6, p. 459-475, 2003.
- Matsumoto, S.; Ninomiya, K.; Akiyama, T. Cumulus activities in relation to the meso-scale convergence field. **Journal of the Meteorological Society of Japan.**, v. 45, n. 4, p. 292-305, 1967.
- Mendonça, A.M. **Desempenho do modelo global CPTEC/COLA durante episódios de ZCAS, utilizando os esquemas de convecção profunda tipo Kuo e Arakawa-Schubert Relaxada**. 1999. 166p. (INPE-9660-TDI/850). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.
- Moorthi, S.; Suarez, M.J. Relaxed Arakawa-Schubert – A parameterization of moist convection for general-circulation models. **Monthly Weather Review**, v. 120, n. 6, p. 978-1002, 1992.

NMC Development Division Staff. **Research version of the medium range forecast model.** Washington D.C.: NMC Documentation Series, n. 1, 1988.

Nogués-Paegle, J.; Mo, K.C. Alternating Wet and Dry Conditions over South America during Summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 2, p. 279-291, 1997.

Nunes, A.M.B. **Inicialização física em modelos de previsão de tempo e estudo de seus efeitos na partição de energia em modos verticais e horizontais nos trópicos e na América do Sul.** 2002. 217p. (INPE-9359-TDI/821) Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.

Puri, K. The relationship between convective adjustment, Hadley circulation and normal modes of the ANMRC spectral model. **Monthly Weather Review**, v. 111, n. 1, p. 23-33, 1983.

Quadro, M.F.L. **Estudo de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul.** 1994. 94p. (INPE-6341-TDI/593) Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

Raupp, C.F.M.; Silva Dias, P.L. Efeitos de processos não lineares sobre a influência inter-hemisférica de fontes tropicais de calor. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12., Foz do Iguaçu PR, 04 a 09 ago. 2002. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia – A Meteorologia e a Gestão de Energia.** São José dos Campos: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002.

Rocha, R. P. **Impacto de parametrizações de convecção em ciclogênese sobre o oceano.** 2000. 201p. (INPE-7505-TDI/720). Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

Salby, M.L. Survey of planetary-scale traveling waves: the state of theory and observations. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 22, n. 2, p. 209-236, 1984.

Satyamurty, P.; Nobre, C.; Silva Dias, P. L. South America. **Meteorology of the Southern Hemisphere**, v. 27, n. 49, p. 119-139, 1998.

Siebert, M. Atmospheric tides. In: Landsberg, H.E; van Mieghem, J. (eds). **Advances in Geophysics.** New York: Academic Press, 1961. p.105-187.

Silva Dias, P.L.; Schubert W.H.; Demaria, M. Large-scale response of the tropical atmosphere to transient convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 40, n. 11, p. 2689-2707, 1983.

Silva Dias, P.L.; Bonatti, J.P. A preliminary study of the observed vertical mode structure of the summer circulation over tropical South America. **Tellus**, v. 37A, n. 2, p. 185-195, 1985.

Silva Dias, P.L.; Bonatti, J.P. Vertical mode decomposition and model resolution. **Tellus**, v. 38A, n. 3, p. 205-214, 1986.

Silva Dias, P.L.; Bonatti, J.P.; Kousky, V.E. Diurnally forced tropical tropospheric circulation over South America. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 8, p. 1465-1478, 1987.

Straus, D.M.; Huntley, M.A. Interactions between Moist Heating and Dynamics in Atmospheric Predictability. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 51, n. 3, p.447-464, 1994.

Streten, N. A. Some characteristics of satellite-observed bands of persistent cloudiness over the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 101, n. 6, p. 486-495, 1973.

Taljaard, J.J. Synoptic Meteorology of the Southern Hemisphere. **American Meteorological Society**, Boston, p. 139-213, 1972.

Tanaka, H. Global energetics analysis by expansion into three-dimensional normal mode functions during the FGGE Winter. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 63, n. 2, p. 180-200, 1985.

Tanaka, H.L.; Kimura, K. Normal-modes energetics analysis and the intercomparison for the recent ECMWF, NMC, and JMA global analyses. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 74, n. 4, p. 525-538, 1996.

Taylor, G.I. The oscillations of the atmosphere. **Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences**, v. 156, n. 888, p. 318-326, 1936.

Wang, W.; Seaman, N.L. A comparison study of convective parameterization schemes in a mesoscale model. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 2, p. 252-278, 1997.

Webster, P. J. Response of tropical atmosphere to local steady forcing. **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 7, p. 518-541, 1972.



## APÊNDICE A

### MODELO GLOBAL DO CPTEC

#### A.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

O Modelo Global do CPTEC originou-se do modelo de circulação geral atmosférico do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) utilizado para previsão climática, e posteriormente transferido para Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies (COLA), onde sofreu, desde sua implementação, modificações nos processos de superfície (tratamento da radiação de onda longa, parametrização de cumulus, física da superfície e propagação de ondas de gravidade).

O modelo adotado pelo CPTEC foi a versão 1.7 do COLA, que continha truncamento romboidal. Essa versão foi generalizada para truncamento triangular, foram introduzidas resoluções horizontal e vertical versáteis, adaptações na geração de arquivos de entrada e saída para as necessidades operacionais do CPTEC e utilização de temperatura da superfície do mar média observada da última semana (Bonatti, 1996).

As leis físicas básicas que governam os movimentos atmosféricos utilizadas pelo Modelo Global do CPTEC são: conservação de massa e umidade, de energia e de momentum angular. As equações principais são: equação do movimento, equação da continuidade para o ar seco e vapor d'água e a primeira lei da termodinâmica. Além disso, considera-se os movimentos em aproximado equilíbrio hidrostático.

A geometria utilizada pelo modelo é esférica com coordenada vertical sigma ( $\sigma = p/p_s$ ), que permite a simples introdução da topografia. Do ponto de vista numérico, aplicam-se um esquema de diferenças finitas na vertical e no tempo, e decomposição espectral na horizontal. A integração no tempo é realizada através de um esquema semi-implícito.

Os processos físicos - camada limite planetária, radiação, condensação de grande escala, convecção rasa e profunda – são incluídos de forma parametrizada no modelo.

Atualmente, o modelo global do CPTEC é rodado operacionalmente com a resolução, T126L28, que corresponde à uma resolução horizontal de aproximadamente 100x100 km, próximo ao equador, possui as opções de parametrização cumulus tipo Kuo e Arakawa-Schubert Relaxada e são realizadas previsões para um prazo de 15 dias.

Uma descrição mais detalhada das características, parametrizações e equações empregadas no Modelo Global do CPTEC estão documentadas em Kinter et al. (1997).

## A.2 FORMA DISCRETA DAS EQUAÇÕES DO MCGA-CPTEC

**a) Equação do movimento horizontal em coordenadas horizontais esféricas e vertical sigma:**

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -RT\nabla_{\sigma}(\ln p_s) - \nabla_{\sigma}(gz) - \vec{f}\vec{k} \times \vec{V} + \vec{F} ,$$

onde:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{V}}{dt} &= \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla_{\sigma} \vec{V} + \dot{\sigma} \frac{\partial\vec{V}}{\partial\sigma} = \\ &= \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \nabla_{\sigma} \left( \frac{\vec{V} \cdot \vec{V}}{2} \right) + \zeta \vec{k} \times \vec{V} - \vec{V} \frac{\partial\dot{\sigma}}{\partial\sigma} + \frac{\partial(\dot{\sigma}\vec{V})}{\partial\sigma} \end{aligned}$$

$t$  = tempo

$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j}$  = vento horizontal

$\vec{i}$  = versor esférico horizontal oeste-leste

$\vec{j}$  = versor esférico horizontal sul-norte

$u$  = componente oeste-leste de  $\vec{V}$

$v$  = componente sul-norte de  $\vec{V}$

$\zeta$  = componente vertical da vorticidade

$\hat{\sigma}$  = velocidade vertical em coordenada sigma

$R$  = constante do gás para o ar sêco

$T$  = temperatura absoluta

$$\nabla_{\sigma}(\ ) \equiv \left( \frac{\partial(\ )}{a \cos \varphi \partial \lambda} \Big|_{\sigma} \vec{i} + \frac{\partial(\ )}{a \partial \varphi} \Big|_{\sigma} \vec{j} \right)$$

$\sigma = p/p_s$  = coordenada vertical

$p$  = pressão no ponto ( $I, j, z$ )

$p_s$  = pressão à superfície

$a$  = raio médio da Terra

$I$  = longitude = coordenada horizontal zonal

$j$  = latitude = coordenada horizontal meridional

$g$  = aceleração da gravidade

$z$  = altura geopotencial

$f = 2\Omega \sin \varphi$  = parâmetro de Coriolis

$\Omega$  = velocidade angular de rotação da Terra

$\vec{k}$  = versor esférico vertical

$\vec{F}$  = forçantes dissipativas de momentum

Derivada vertical em diferenças finitas:

$$\frac{\partial(\hat{\sigma}\vec{V})}{\partial \sigma} \Big|_k = \frac{1}{\Delta_k} \left( \hat{\sigma}_{k+1} \hat{V}_{k+1} - \hat{\sigma}_k \hat{V}_k \right)$$

onde:

$$\hat{V}_{k+1} = (\vec{V}_k + \vec{V}_{k+1})/2 ; \Delta_k = \Delta \hat{\sigma}_k ; \hat{\sigma}_k = 1 - \sigma_k$$

$k = \text{índice da camada vertical} = 1, 2, \dots, K$

$K = \text{número de camadas verticais}$



Pode-se, então escrever:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_k}{\partial t} = & -\nabla \left( \frac{\vec{V}_k \cdot \vec{V}_k}{2} \right) - \zeta_k \vec{k} \times \vec{V}_k \\ & - \frac{1}{2\Delta_k} \left[ \hat{\sigma}_{k+1} (\vec{V}_{k+1} - \vec{V}_k) + \hat{\sigma}_k (\vec{V}_k - \vec{V}_{k-1}) \right] \\ & - \nabla (gz_k) - RT_k \nabla (\ln p_S) - f \vec{k} \times \vec{V}_k + \vec{F}_k \end{aligned}$$

**b) Equação da Termodinâmica:**

$$\frac{d(\ln \theta)}{dt} = \frac{H}{C_p T} ,$$

onde:

$\theta$  = temperatura potencial

$H$  = taxa de aquecimento diabático

$C_p$  = calor específico do ar à pressão constante

Considerando:

$$T(\lambda, \varphi, k, t) = T_O(k) + T'(\lambda, \varphi, k, t)$$

$T_O$  = temperatura de referência para cada camada

$T'$  = desvio de  $T$  em relação a  $T_O$

Obtem-se:  $\frac{\partial T_k}{\partial t} = Y_k + B_k \delta_k$ , em que:

$$Y_k = -\nabla \cdot (T_k \vec{V}_k) + T'_k \delta_k - \kappa T'_k \bar{\delta} + \kappa T_k (C_k - \bar{C})$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2\Delta_k} \left[ \hat{\sigma}_{k+1} (P_k^1 T'_{k+1} - T'_k) + \hat{\sigma}_k (T'_k - P_k^2 T'_{k-1}) \right] \\
& + \left( \hat{\sigma}_{k+1} \bar{C} - \sum_{j=1}^k \Delta_j C_j \right) H_k^1 + \left( \hat{\sigma}_k \bar{C} - \sum_{j=1}^{k-1} \Delta_j C_j \right) H_k^2 \Big] \\
B_k \delta_k = & \left[ -\kappa T_{OK} + (\hat{\sigma}_{k+1} H_k^1 + \hat{\sigma}_k H_k^2) / (2\Delta_k) \right] \bar{\delta} \\
& + \left[ H_k^1 \sum_{j=1}^k \Delta_j \delta_j + H_k^2 \sum_{j=1}^{k-1} \Delta_j \delta_j \right] / (2\Delta_k)
\end{aligned}$$

$\delta$  = divergência do vento horizontal

$$\kappa = R/C_p$$

$$\bar{\delta} = \sum_{j=1}^K \Delta_j \delta_j ; \quad \bar{C} = \sum_{j=1}^K \Delta_j \vec{V}_j \cdot \nabla(\ln p_S) = \sum_{j=1}^K \Delta_j C_j$$

$$P_k^1 = \Pi_k / \Pi_{k+1}, k = 1, \dots, K-1; \quad P_K^1 = 0$$

$$P_1^2 = 0; \quad P_k^2 = \Pi_k / \Pi_{k-1}, k = 2, \dots, K$$

$$\Pi_k = T_k / \theta_k = (p_k / p_O)^k ; \quad p_O = 10^5 \text{ Pa}$$

$$H_k^1 = P_k^1 T_{OK+1} - T_{OK}, k = 1, \dots, K-1; \quad H_K^1 = 0$$

$$H_1^2 = 0; \quad H_k^2 = T_{OK} - P_k^2 T_{OK-1}, k = 2, \dots, K$$

**c) Equação da continuidade de massa em coordenada sigma:**

$$\frac{\partial \ln p_S}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla(\ln p_S) - \nabla \cdot \vec{V} + \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma}$$

Integrando no domínio vertical com condições de contorno:  $\hat{\sigma}(0) = \hat{\sigma}(1) = 0$  , obtem-se a equação para a tendência de pressão à superfície:

$$\frac{\partial \ln p_s}{\partial t} = - \sum_{k=1}^K (\delta_k + C_k) \Delta_k = -\bar{\delta} - \bar{C}$$

e usando diferenças finitas na vertical, obtem-se a equação para determinação da velocidade vertical:

$$\hat{\sigma}_{k+1} = \hat{\sigma}_k + \Delta_k [(\bar{\delta} - \delta_k) + (\bar{C} - C_k)]$$

**d) Hidrostática**, com  $\Pi = (p/p_0)^K = (\sigma_{p_s}/p_0)^{R/C} P$  :

$$\frac{\partial z}{\partial \sigma} = - \frac{RT}{g\sigma} = - \frac{C_p T}{g\Pi} \frac{\partial \Pi}{\partial \sigma}$$

e, em diferenças finitas obtida pela conservação de energia:

$$z_k = z_{k-1} - \frac{C_p}{2g} \left[ \left( \frac{\Pi_k}{\Pi_{k-1}} - 1 \right) T_{k-1} + \left( 1 - \frac{\Pi_{k-1}}{\Pi_k} \right) T_k \right]$$

para  $k = 2, \dots, K$  , de modo que :

$$\sum_{k=1}^K z_k \Delta_k = z_1 + (R/g) \sum_{k=1}^K T_k \Delta_k$$

onde  $z_1 = z_s$  representa a topografia de superfície.

Para uso posterior define-se:

$$\tilde{\xi} = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \dots \quad \xi_k \dots \quad \xi_{K-1} \quad \xi_K]^T$$

onde  $[( )]^T$  significa o transposto.

Os modos normais da versão linear do modelo são as soluções de  $\mathbf{z}$ ,  $\mathbf{d}$ ,  $T$  e  $\ln p_S$  tendo a mesma variação no tempo. O número de tais modos é função da resolução do modelo, tanto vertical como horizontal. Para se determinar todas as oscilações possíveis do modelo, uma versão linear do modelo deve ser primeiramente estabelecida e posta na forma espectral. Para permitir separação das estruturas horizontal e vertical, considera-se perturbações sobre uma atmosfera em repouso com temperatura  $T_o(k)$  :

**e) Equação linearizada da componente vertical da vorticidade  $V$  :**

$$\frac{\partial \tilde{\zeta}}{\partial t} = -\nabla \cdot (f \tilde{\mathbf{V}}) ; \text{ com } \tilde{\zeta} = \bar{\mathbf{k}} \cdot \nabla \times \tilde{\mathbf{V}}$$

**f) Equação linearizada da divergência horizontal  $\delta$  :**

$$\frac{\partial \tilde{\delta}}{\partial t} = \bar{\mathbf{k}} \cdot \nabla (f \tilde{\mathbf{V}}) - g \nabla^2 \tilde{h}$$

onde:  $\tilde{\delta} = \nabla \cdot \tilde{\mathbf{V}}$  e  $h = z + (RT_o/g) \ln p_S$ .

**g) Relações entre Vorticidade e Função de Corrente  $\psi$  e Divergência e Potencial de Velocidade  $\chi$  :**

$$\zeta = \nabla^2 \psi' = a^2 \nabla^2 \psi$$

$$\delta = \nabla^2 \chi' = a^2 \nabla^2 \chi$$

Então:

$$\frac{\partial \tilde{\zeta}}{\partial t} = -2\Omega \left( \tilde{\delta} \sin \varphi + \frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \lambda} + \cos \varphi \frac{\partial \tilde{\chi}}{\partial \varphi} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{\delta}}{\partial t} = -2\Omega \left( -\tilde{\zeta} \sin \varphi + \frac{\partial \tilde{\chi}}{\partial \lambda} - \cos \varphi \frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \varphi} \right) - g \nabla^2 \tilde{h} \quad (2)$$

**h) Equação linearizada da Termodinâmica:**

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} = \underline{\underline{B}} \tilde{\delta}$$

onde:  $\underline{\underline{B}}$  = matriz que depende apenas da discretização vertical e de  $T_0$

**i) Equação da continuidade de massa linearizada:**

$$\frac{\partial \ln p_S}{\partial t} = - \sum_{k=1}^K \Delta_k \delta_k = -\tilde{S} \cdot \tilde{\delta}$$

**j) Equação da Hidrostática:**

$$\tilde{z} = \underline{\underline{A}} \tilde{T} + z_S$$

onde  $\underline{\underline{A}}$  = matriz que depende apenas da discretização vertical e  $z_S$  é considerado nulo.

Através das equações anteriores pode-se mostrar que:

$$\frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} = \left[ \left( \underline{\underline{AB}} - (R/g) \tilde{T}_0 \cdot \tilde{S} \right) \right] \tilde{\delta} = \underline{\underline{G}} \tilde{\delta} \quad (3)$$

onde:

$\underline{\underline{G}} = \underline{\underline{G}}(\sigma_k)$  = matriz que possibilita a separação das estruturas horizontal e vertical