

ANÁLISE DA PARTIÇÃO DE ENERGIA EM MODOS VERTICAIS UTILIZANDO O MODELO GLOBAL DO CPTEC: ESTUDO DE CASO DE PASSAGEM DE FRENTE FRIA SOBRE O BRASIL

José Paulo Bonatti

Divisão de Modelagem e Desenvolvimento – DMD
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE / MCT
bonatti@cptec.inpe.br

ABSTRACT

It is analysed the role of resolution and vertical mode energy partition using results from a simulation with the CPTEC global model for a case study of a cold front over Brazil during 24 to 27 September 2001. It is found that major resolution contributes in general to more detailed structures, in particular at the region of cold front. Although the major vertical resolution is important to get a better detailed vertical structures it seems that it is not important for the precipitable water and reduced surface pressure. The model reproduces better the stream function than the velocity potential but the resolution T170L42 gets a better divergent portion of the flow. The model simulates very well the vertical mode energy partition with the following characteristics. The vertical mode energy partition resembles well-known results for the T062L28 and T126L28 resolutions. But the T170L42 resolution shows new significant maximum near convective regions. This suggests that the higher internal modes could play an important role in the energy partition. This means that with a higher vertical resolution the interaction among vertical modes has a better representation, as suggest by the theoretical studies of Andrade (1994). She shows that it is necessary a minimum vertical resolution for a given number of vertical modes under consideration to get a correct interaction among these vertical modes.

INTRODUÇÃO

Um fenômeno freqüente sobre o Brasil é a passagem de sistemas frontais. Muitos estudos têm sido realizados para seu entendimento, bem como sobre a energética de tais sistemas. Porém, restam questões relevantes sobre a partição de energia entre modos, tanto verticais quanto horizontais, bem como a importância da resolução de análises e de modelos que simulam esses fenômenos. A formação ou intensificação de um sistema frontal normalmente é precedida pela ocorrência de ciclogênese. A ciclogênese é a formação ou intensificação de um sistema de baixa pressão em superfície, geralmente provocada por perturbações em médios e altos níveis. O desenvolvimento de um ciclone inicia-se quando uma perturbação ondulatória leva ar quente para as altas latitudes e ar frio para as baixas latitudes, proporcionando uma troca de calor entre regiões quentes e frias. Os ventos associados contribuem para a formação de duas zonas frontais, uma frente fria e outra quente e na vanguarda da frente fria ocorre queda de pressão. Os principais fatores que favorecem o desenvolvimento e a intensificação dos ciclones extratropicais são: o aquecimento nos níveis baixos da atmosfera, os movimentos verticais adiabáticos, a advecção de vortacidade e a advecção térmica. A presença de uma montanha provoca intensificação do ciclone quando desce a montanha e vice-versa. Então, a Cordilheira dos Andes na América do Sul fornece condições para que a leste desta haja uma região ciclogênética. Na costa leste da América do Sul, a maior freqüência das ciclogêneses ocorre nos meses de inverno (Gan, 1992).

Os modelos atuais utilizam as equações primitivas. Tais equações podem ser escritas em forma espectral tanto na horizontal quanto na vertical, resultando em um sistema de equações tal que a estrutura vertical forma, juntamente com as condições de contorno um problema de Sturm-Liouville, enquanto que a estrutura horizontal, fazendo-se uso das funções vetoriais de Hough, é um problema de um oscilador harmônico acoplado forçado. Muitos artigos trazem esse tipo de decomposição e análise, mas em Andrade (1994) há uma descrição bastante detalhada desse procedimento. Os autovalores da solução vertical são conhecidos como alturas equivalentes e os autofunções dão a estrutura vertical dos campos, separando-as em um modo externo (barotrópico equivalente) e os demais sendo modos internos (baroclínicos). A solução linearizada das equações horizontais, que são formalmente idênticas às da água rasa linearizadas, levam aos chamados modos horizontais: de Rossby, de Kelvin, misto Rossby-gravidade e de gravidade inercial com propagação para leste e para oeste. As estruturas horizontais associadas a esses modos são as funções vetoriais de Hough, enquanto que os autovalores do problema correspondem às respectivas freqüências de oscilação. Essas funções podem ser utilizadas na análise de campos tridimensionais (Kashara e Puri, 1981) e também no estudo da partição de energia entre os modos verticais e horizontais, como mostra Andrade (1994).

Recentemente Nunes (2002) utilizou essa metodologia para analisar o efeito da inicialização física sobre a partição de energia em modos verticais e horizontais.

O objetivo é, através de um estudo de caso, analisar a passagem de uma frente fria do ponto de vista da partição de energia entre modos verticais utilizando o modelo global do CPTEC para várias resoluções, isto é, analisar a capacidade do modelo global do CPTEC em reproduzir a partição de energia observada.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados são análises espectrais (harmônicos esféricos) provenientes do National Centers for Environmental Predictions (NCEP/USA) para as resoluções T062L28, T126L28 e T170L42, onde T_{ttt} significa truncamento triangular na onda zonal ttt e L_{ll} significa ll camadas verticais em coordenadas sigma. Essas análises contêm campos espectrais de topografia, logaritmo natural da pressão à superfície, temperatura virtual, divergência horizontal do vento, vorticidade e umidade específica. O período dos dados é de 24 a 27 de setembro de 2001, para 00, 06 12 e 18 UTC. São também utilizadas análises globais diárias de precipitação provenientes do Global Precipitation Climatology Project (GPCP), disponíveis em <ftp://precip.gcf.nasa.gov/pub/1dd/>. Detalhes sobre a geração dos dados de precipitação do GPCP podem ser obtidos em Huffman e Bolvin (2002).

Para analisar a capacidade do modelo global do CPTEC em reproduzir a partição de energia em modos verticais observadas dadas em Bonatti (2002), foram feitos três experimentos, todos partindo de condições iniciais do dia 24/09/2001, 00 UTC: Esses experimentos compreendem rodadas do modelo com resoluções T062L28, T126L28 e T170L42. É dada a seguir uma breve descrição do modelo global do CPTEC. Maiores detalhes podem ser encontrados em Kinter et al. (1997) e Bonatti (1996).

O modelo global do CPTEC tem sua origem no NCEP e foi modificado pelo Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA/USA) nas décadas de 80/90, e pelo CPTEC nos últimos 10 anos. É espectral e tem coordenadas horizontais esféricas e vertical sigma (pressão do nível normalizada pela pressão de superfície no ponto considerado). Possui truncamento triangular, e têm condições de contorno dadas por velocidade vertical sigma nula no topo e na superfície, usa topografia espectralmente truncada, ozônio média zonal e sazonal climatológica interpolado para cada instante de tempo, dióxido de carbono constante, temperatura da superfície do mar e gelo do mar pré-fixados. Usa como condição inicial campos climatológicos de umidade do solo e neve. A parte dinâmica do modelo usa as equações espectrais primitivas em forma de divergência e vorticidade, temperatura virtual, umidade específica e logaritmo natural da pressão à superfície. Possui um procedimento de inicialização diabática não-linear por modos normais. Usa diferenças finitas na vertical e o esquema de integração no tempo é o semi-implícito com filtro de Asselin. Os processos físicos considerados são descritos a seguir. Na superfície sobre a terra usa-se um modelo biológico simplificado e sobre o oceano um esquema aerodinâmico tipo "bulk". A camada limite planetária é tratada com um esquema de difusão vertical turbulenta com fechamento de segunda ordem, considerando-se também os efeitos do arrasto devido às ondas de gravidade. Tem um tratamento para a radiação solar ativado a cada hora de integração e para radiação de onda longa ativado a cada três horas. A convecção profunda principal é do tipo Kuo, modificado por Anthes, possuindo uma opção para um esquema do tipo Arakawa-Schubert Relaxado. A convecção rasa é do tipo difusiva seguindo o esquema de Tiedke. Possui esquemas de ajustamentos para a precipitação na escala da grade, difusão horizontal bi-harmônica e esquema difusivo para controle de instabilidade computacional.

Para a análise da partição de energia em modos verticais, é feita a recomposição das previsões espectrais no espaço físico, calculado as variáveis vento zonal, vento meridional e geopotencial generalizado e é procedida a decomposição desses campos em modos verticais obtidos em coordenadas sigma, conforme descrito em Kasahara e Puri (1981). Neste caso os modos verticais são os mesmos que os do modelo global do CPTEC. A partir daí é calculada a energia em cada modo e sua porcentagem em relação ao total.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período de 24 a 27 de setembro de 2001 foi registrada a passagem de uma frente fria sobre o Brasil (Bonatti, 2002). A figura 1 apresenta as previsões de precipitação acumuladas em 24 horas e válidas para 26/09/2001, 00 UTC, para os três experimentos.

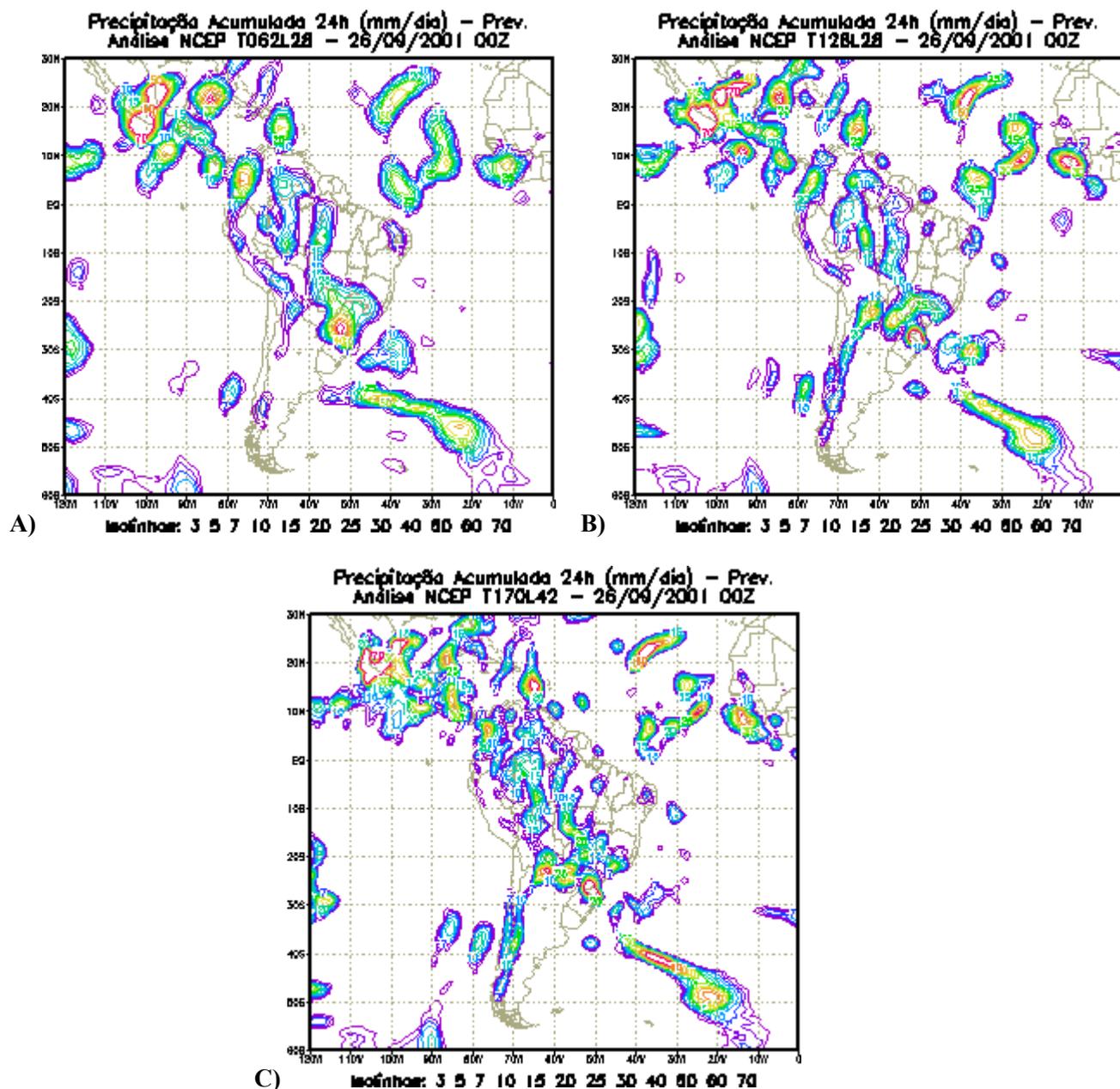


Figura 1 – Precipitação acumulada em 24 horas para 26/09/2001, 00 UTC, para as resoluções T062L28 (A), T126L28 (B) e T170L42 (C).

Nota-se na figura 1 que os três modelos reproduzem razoavelmente a precipitação observada (Bonatti, 2002), principalmente sobre o oceano Atlântico, porém a melhor definição é para o T170L42. Sobre o continente sul-americano, também o T170L42 consegue reproduzir melhor as chuvas a região do Pantanal e dá melhor definição para as chuvas da Região Amazônica. Todos os casos conseguem reproduzir a separação de precipitação entre o continente no litoral SE do Brasil e o oceano adjacente. Em todos os casos há uma ligeira defasagem para SO da posição da precipitação frontal sobre o oceano, e para a resolução T062L28 o atraso parece ser um pouco maior.

A figura 2 é mostra a água precipitável prevista para o dia 26/09, 00UTC. Apesar da melhor definição e do maior detalhamento à medida que a resolução aumenta, as previsões na região da precipitação frontal sobre o oceano são boas quando se compara individualmente cada resolução. Porém, quando se analisa a região da figura como um todo fica claro que a melhor performance na comparação individual das resoluções é a do T170L42.

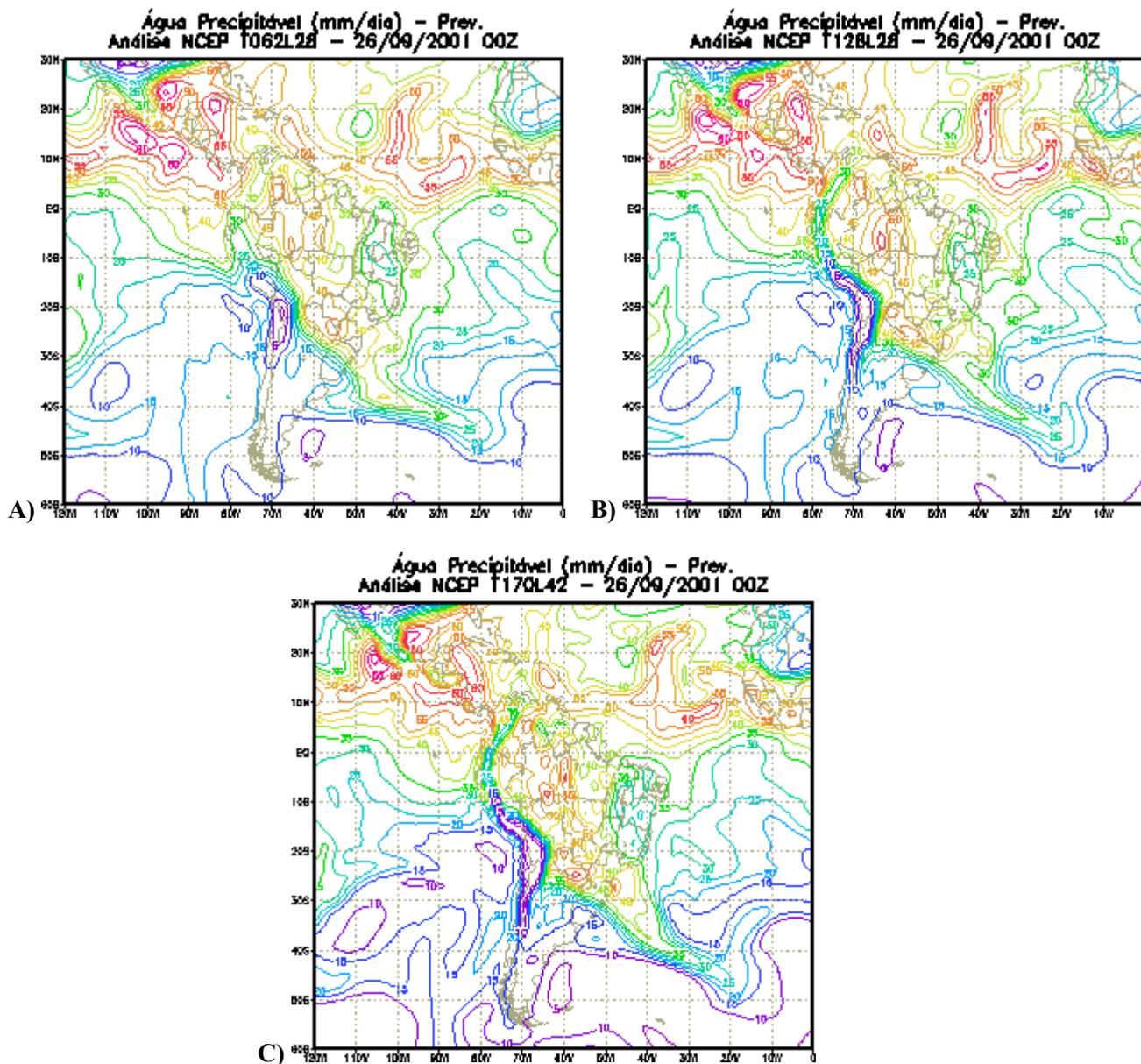


Figura 2 – Água precipitável prevista para o dia 26/09/2001, 00 UTC, e resoluções T062L28 (A), T126L28 (B) e T170L42 (C).

Os campos de pressão reduzida à superfície previstos para o dia 26/09/2001, 00 UTC e resoluções T062L28, T126L28 e T170L42 são mostrados na figura 3. Em todos os casos a posição dos centros de altas e baixas são razoavelmente bem previstas. Também em todos os casos há a presença da frente no litoral do SE do Brasil, avançando sobre o oceano, porém próximo ao litoral a posição é mais bem prevista para as resoluções T126L28 e T170L42, enquanto que as intensidades da baixa associada à frente fria e da alta sub-tropical sobre o Atlântico Sul são melhores previstas para a resolução T170L42.

Na figura 4 são apresentados os campos de função de corrente e de potencial de velocidade previstos para os níveis 200 hPa para o dia 26/09, 00 UTC, para as resoluções de T062L28, T126L28 e T170L42. Nota-se que, em geral, a função de corrente é razoavelmente bem prevista, em particular o cavado de altos níveis sobre o Atlântico Sul (ligeiramente a NE da região de precipitação da frente) que tem uma ligeira intensificação com o aumento da resolução. Ainda na figura 4 é notado que o potencial de velocidade tem a localização dos máximos e mínimos bem previstos, exceto sobre o Atlântico Sul subtropical; nesta região a resolução T170L42 é a que apresenta a melhor previsão. O setor de divergência a região de precipitação frontal tem também previsão muito melhor para a

resolução T170L42. O modelo consegue, portanto, uma melhor previsão da parte rotacional que da parte divergente do escoamento.

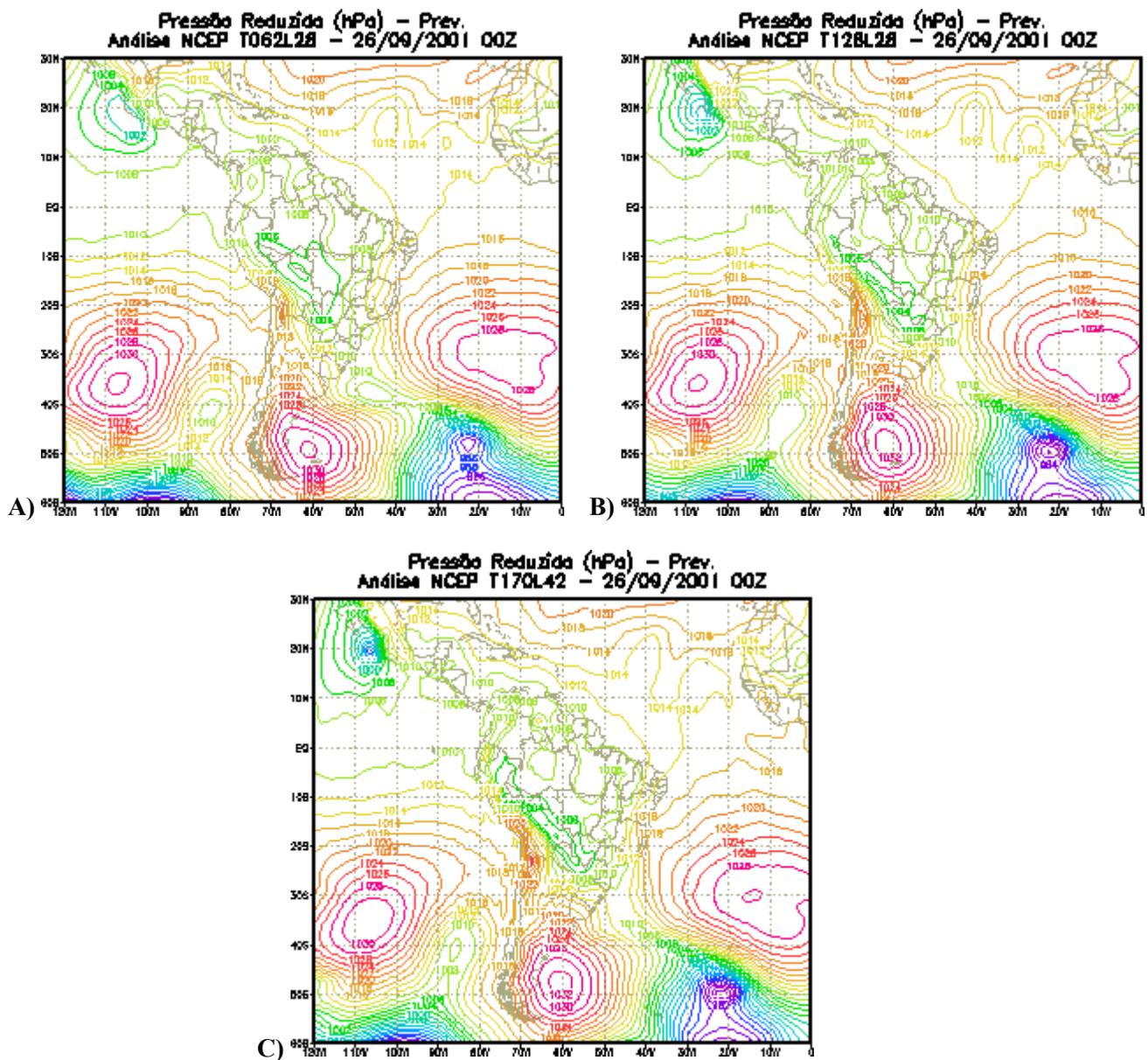


Figura 3- Pressão reduzida à superfície prevista para o dia 26/09/2001, 00 UTC, e resoluções T062L28 (A), T126L28 (B) e T170L42 (C).

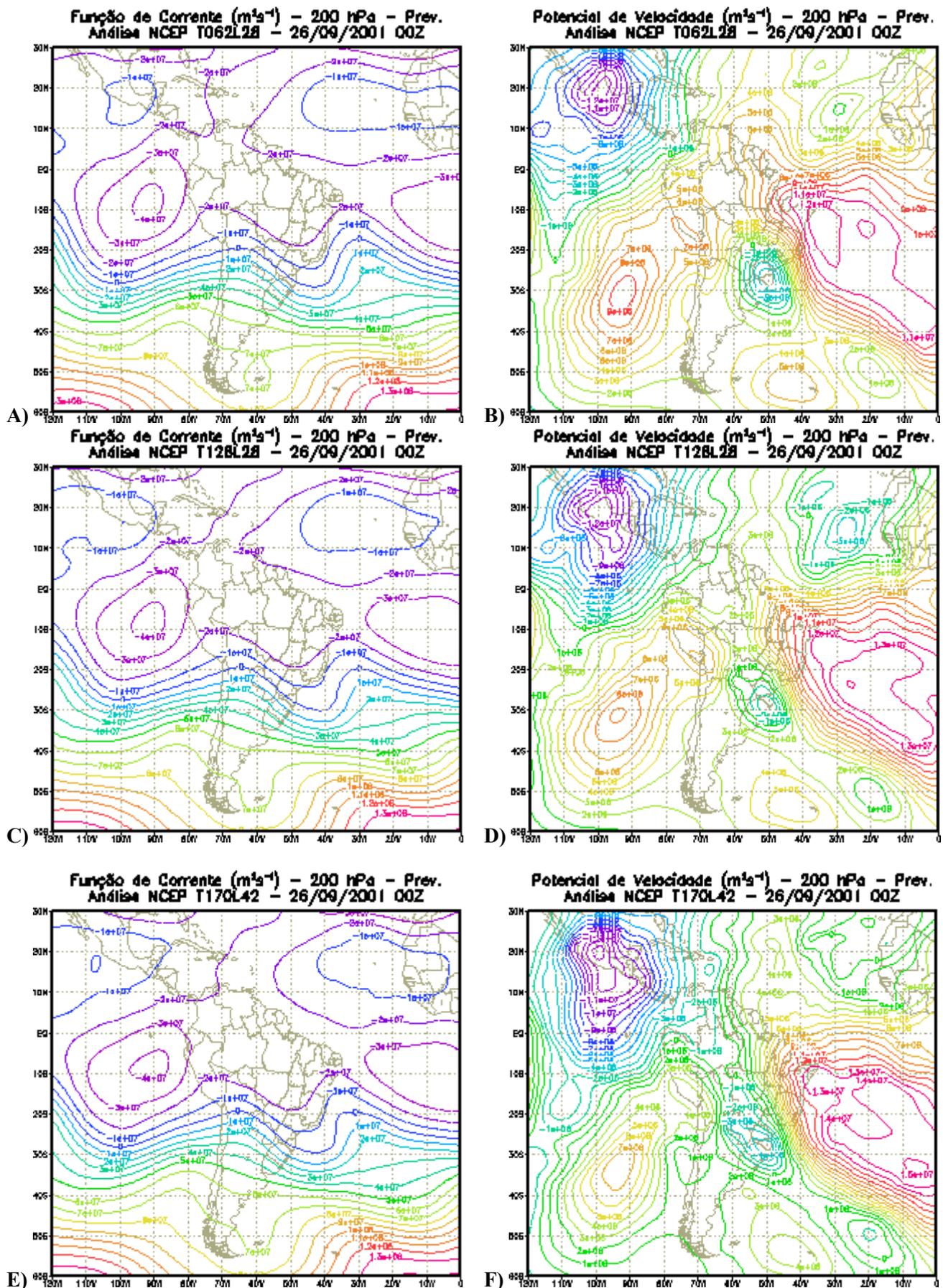
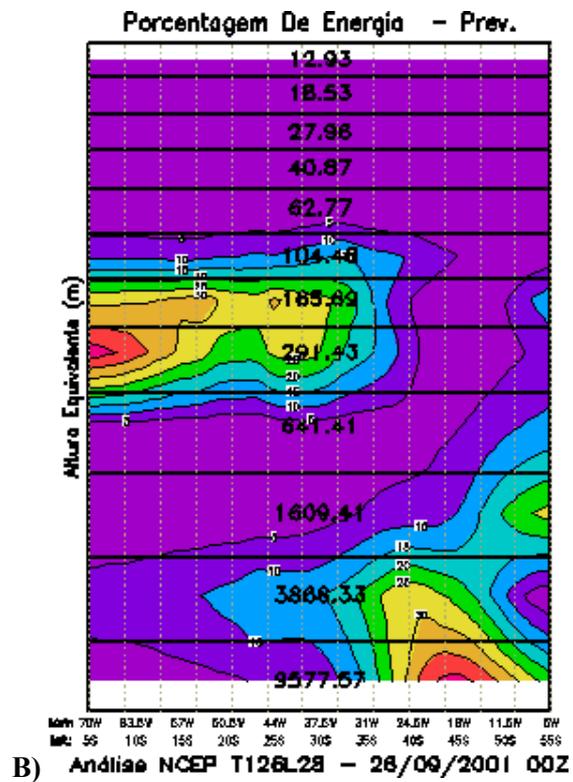
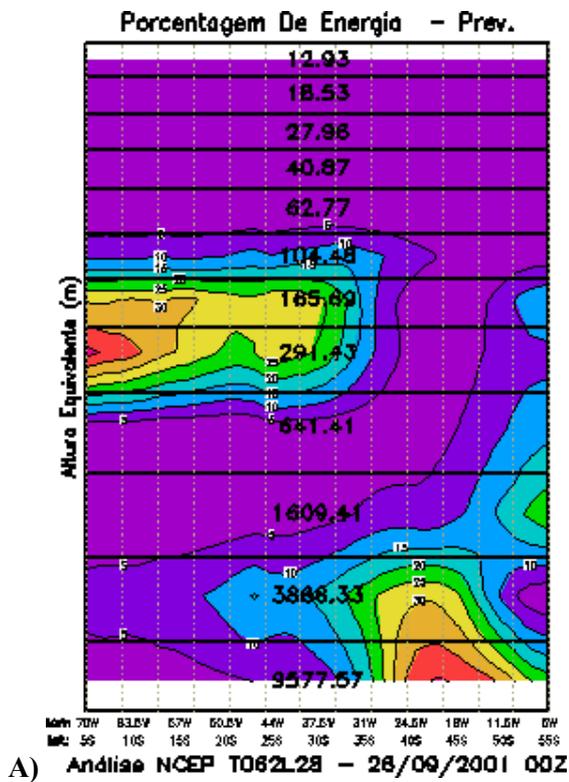


Figura 4 – Função de corrente e potencial de velocidade previstos para o dia 26/09/2001, 00 UTC, para as resoluções T062L28 (A e B), T126L28 (C e D) e T170L42 (E e F).

A seguir será apresentada a análise da partição de energia em modos verticais. Devido às características dos níveis verticais dos máximos, mínimos e zeros, as projeções sobre os modos verticais podem ser divididas em três categorias (Bonatti, 2002): a primeira compreende os modos com alturas equivalentes acima de 500 m, a segunda com modos com alturas entre 100 e 500m e a terceira com alturas entre 10 e 100m. Define-se uma quarta incluindo-se os demais modos com alturas abaixo de 10 m. Essa divisão é baseada e é uma extensão dos resultados de Silva Dias e Bonatti (1986) e pode ser visualizada no figura 5. A figura 5 apresenta uma seção para o dia 26/09 da porcentagem de energia em modos verticais; nota-se que as três primeiras categorias estão bem definidas na figura. Comparando-se com o resultado observacional (Bonatti, 2002) pode-se notar que o modelo reproduz bem a distribuição de energia pelos modos e nas mesmas áreas, ou seja, a primeira categoria tem maior porcentagem na região oceânica da frente e em latitudes médias, enquanto que a segunda tem maior porcentagem na parte continental e na região tropical. Não há diferenças substanciais entre as três resoluções, exceto sobre a parte oceânica da frente em latitudes médias onde a porcentagem para a resolução T170L42 é menor que para as demais resoluções.



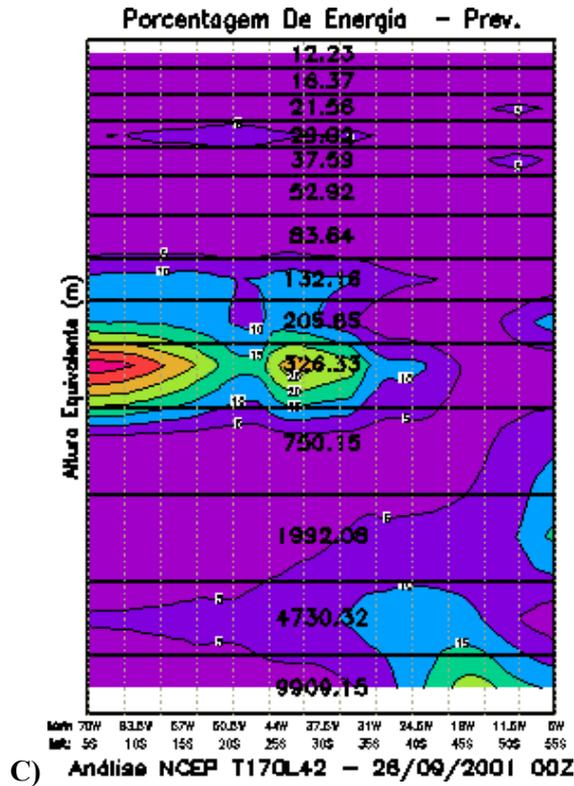
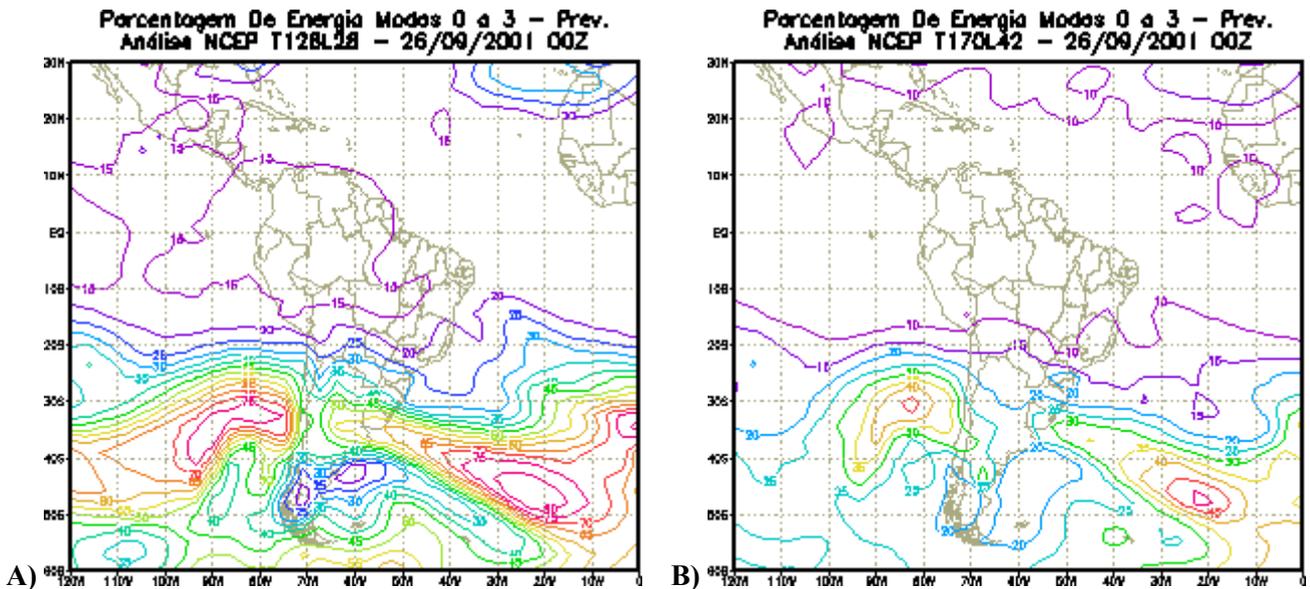
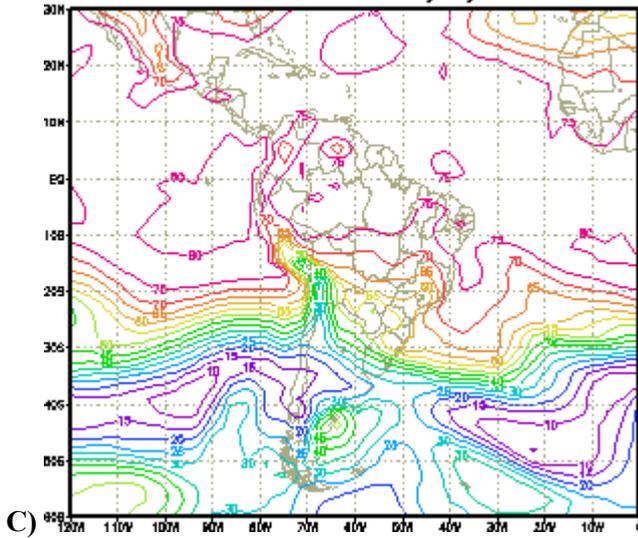


Figura 5 – Secção ao longo da frente fria no dia 26/09/2001 da porcentagem de energia para as resoluções T062L28 (A), T1126L28 (B) e T170L42 (C).

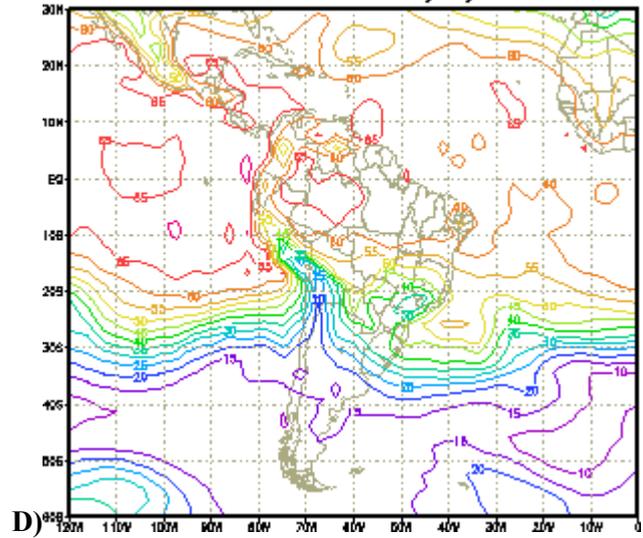
Na figura 6 encontram-se as porcentagens de energia previstas para os modos verticais de 0 a 3, de 4 a 6, de 8 a 11 (13) e de 12 (14) a 27 (41) para 28 (42) camadas para as resoluções T126L28 e T170L42, para 26/09, 00 UTC. Os resultados para T062L28 são muito semelhantes aos da resolução T126L28 e não são apresentados.



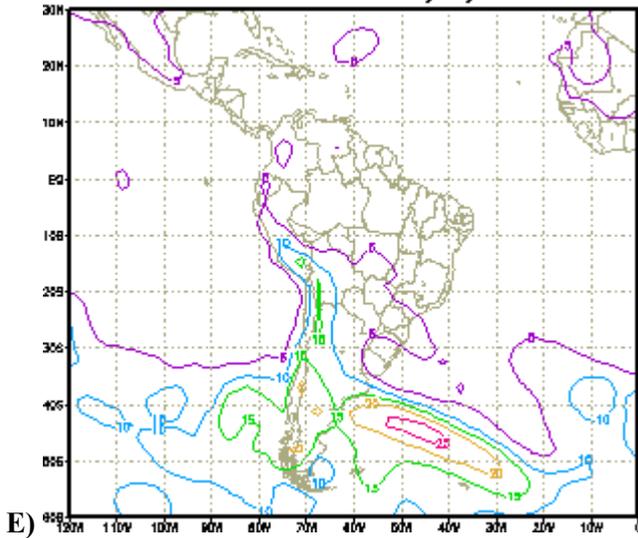
Porcentagem De Energia Modos 4 a 6 - Prev.
Análise NCEP T126L28 - 26/09/2001 00Z



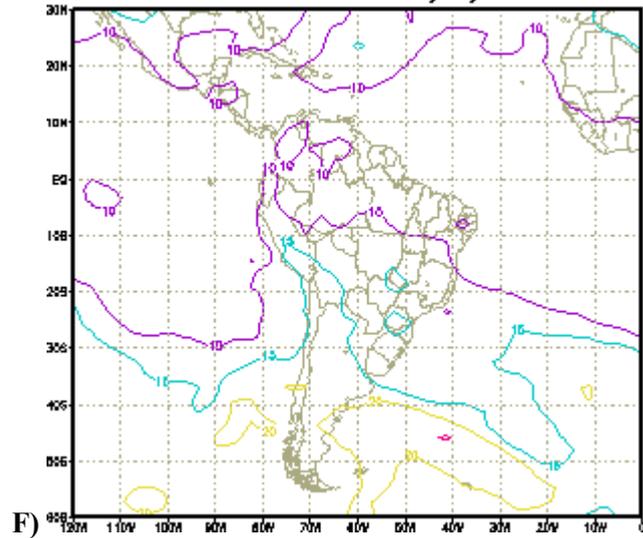
Porcentagem De Energia Modos 4 a 6 - Prev.
Análise NCEP T170L42 - 26/09/2001 00Z



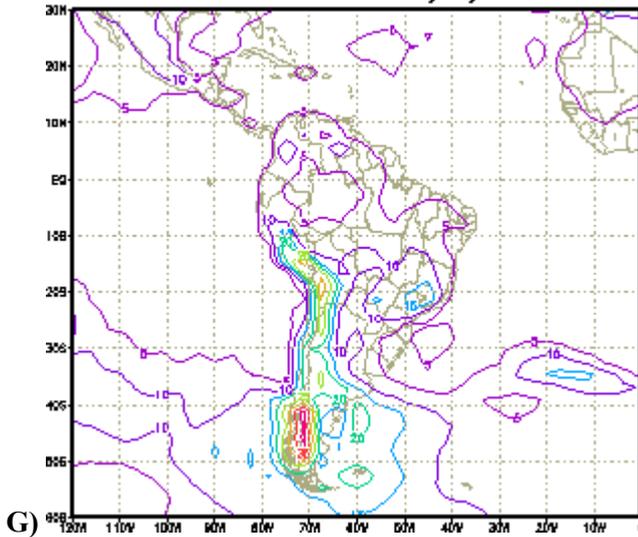
Porcentagem De Energia Modos 7 a 11 - Prev.
Análise NCEP T126L28 - 26/09/2001 00Z



Porcentagem De Energia Modos 7 a 13 - Prev.
Análise NCEP T170L42 - 26/09/2001 00Z



Porcentagem De Energia Modos 12 a 27 - Prev.
Análise NCEP T126L28 - 26/09/2001 00Z



Porcentagem De Energia Modos 14 a 41 - Prev.
Análise NCEP T170L42 - 26/09/2001 00Z

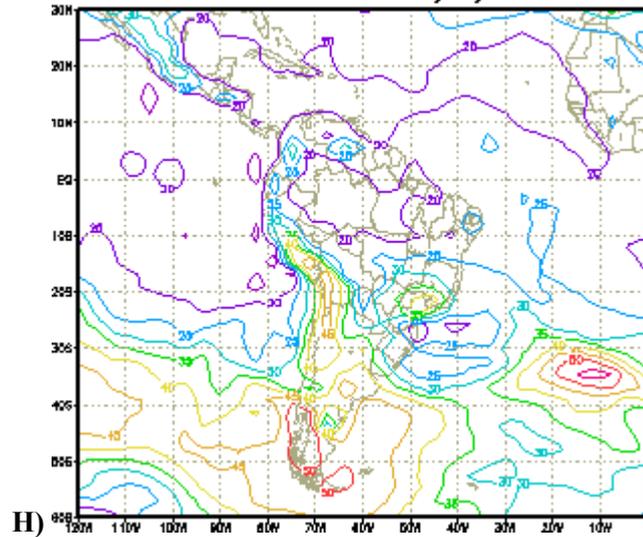


Figura 6 - Porcentagens de energia previstas para os modos verticais de 0 a 3 (A e C), de 4 a 6 (C e D), de 8 a 11 (13) e de 12 (14) a 27 (41) para 28 (42) camadas para as resoluções T062L28, T126L28 e T170L42, para 26/09, 00 UTC.

Comparando-se os resultados da figura 6 com os observacionais de Bonatti (2002), nota-se que o modelo consegue reproduzir muito bem as características encontradas para as análises. Isto é, as resoluções T062L28 e T126L28 apresentam resultados semelhantes para as quatro categorias definidas acima. Na primeira, a maior parte da energia encontra-se em latitudes médias chegando a mais de 80% na região oceânica da frente, enquanto que em latitudes tropicais o percentual é abaixo de 15%. Na segunda ocorre o inverso, sendo que na região tropical os percentuais chegam acima de 80% enquanto que na região de latitudes médias, principalmente sobre as altas de pressão, os percentuais são abaixo de 15%. Na terceira e quarta categorias, os percentuais maiores (15 a 25%) se concentram no Sul da América do Sul, parte dos Andes e oceanos adjacentes. Resultados estes consistentes com Silva Dias e Bonatti (1985). Quando se analisa a resolução T170L42, o quadro muda. Para a primeira e para a segunda categorias, embora qualitativamente semelhante aos casos T062L28 e T126L28, os valores máximos são diferentes. Na primeira categoria os valores máximos não passam de 50% em latitudes médias e na segunda categoria não passam de 65% nos trópicos; os mínimos são semelhantes. A terceira categoria é também semelhante, porém, na região tropical e na região da frente sobre o oceano os percentuais são bem maiores. Na quarta categoria as diferenças são bem maiores, embora as regiões onde nas resoluções T062L28 e T126L28 há máximos estes também são encontrados na resolução T170L42, os valores sobre o Sul da América do Sul chegam a mais de 50% e há um máximo em torno de 20% na Região Amazônica e outro na costa da África. Além disso, surge um máximo de mais de 50% na região oceânica da frente. Esses máximos significativos, principalmente aqueles próximos à regiões convectivas, sugerem que os modos mais internos podem ter um papel relevante na partição de energia e isto surgindo quanto a resolução vertical é maior pode ser interpretado em conformidade com os resultados de Andrade (1994), onde é mostrado que para se ter uma boa representatividade da interação entre modos verticais é necessário se ter uma resolução vertical mínima para um dado número de modos considerados.

CONCLUSÕES

Foram analisados o papel da resolução e a partição de energia em modos verticais através do uso do modelo global do CPTEC para um estudo de caso de passagem de frente fria sobre o Brasil. Uma maior resolução horizontal contribui em geral para um maior detalhamento dos campos, mostrando estruturas mais definidas na região da frente fria. Embora a resolução vertical também contribui para um melhor detalhamento nas estruturas verticais não parece relevante em campos como a água precipitável e pressão reduzida à superfície. A análise da previsão da função de corrente e do potencial de velocidade, mostra que o modelo obtém uma melhor previsão da parte rotacional que da parte divergente do escoamento, sendo que a resolução T170L42 apresenta os melhores resultados para a parte divergente. O modelo consegue simular muito bem a partição vertical de energia, refletindo resultados anteriores para as resoluções T062L28 e T126L28. Porém para a resolução T170L42, surgem máximos significativos próximos às regiões convectivas. Isto sugere que os modos mais internos podem ter um papel relevante na partição de energia e que pode ser interpretado como: utilizando uma maior resolução vertical as trocas entre os modos verticais são mais bem representadas, o que estaria em conformidade com os resultados teóricos de Andrade (1994), onde é mostrado que para se ter uma boa representatividade da interação entre os modos verticais é necessário se ter uma resolução vertical mínima para um dado número de modos considerados.

Esta é uma análise diagnóstica; mais estudos são necessários para se entender melhor as causas e conseqüências das características encontradas aqui.

AGRADECIMENTOS

O autor de beneficiou de discussões com o Dr. Pedro Leite da Silva Dias.

REFERÊNCIAS

Andrade, R.A. **Análise das trocas de energia entre modos verticais e horizontais, em resposta à fontes tropicais de calor de grande escala.** São José dos Campos, SP, 1994, 331p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE.

XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu-PR, 2002

- Bonatti, J.P. Modelo de circulação geral do CPTEC. [on line]. **Climanálise Especial 10 anos, 26**, 5p, outubro de 1996. (<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/bonatti.html>)
- Bonatti, J.P. Análise observacional da partição de energia em modos verticais: estudo de caso de passagem de frente fria sobre o Brasil. **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Sociedade Brasileira de Meteorologia, *Submetido*, 2002.
- Gan, M.A. **Ciclogênese e ciclones sobre a América do Sul**. São José dos Campos, SP, 1992. Tese (Doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE.
- Huffman, G.J.; Bolvin, D.T. GPCP one-degree daily precipitation data set documentation. [on line]. SSAI and Laboratory for Atmospheres, NASA, 13 February 2002. (ftp://precip.gfc.nasa.gov/pub/1dd/1DD_doc)
- Kasahara, A.; Puri, K. Spectral representation of three-dimensional global data by expansion in normal mode functions. **Monthly Weather Review**, **109** (1): 37-51, 1981.
- Kinter, J.L. et al **The COLA atmosphere-biosphere general circulation model Volume 1: Formulation**. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies. Calverton, MA, COLA Staff, Report N.o 51, October 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**. São José dos Campos, SP, 2002, no prelo. Tese (Doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE.
- Silva Dias, P.L.; Bonatti, J.P. A preliminary study of the observed vertical mode structure of the summer circulations over tropical South America **Tellus**, **37** (2): 185-195, 1985.
- Silva Dias, P.L.; Bonatti, J.P. Vertical mode decomposition and model resolution. **Tellus**, **38a** (3): 205-214, 1986.