

ANÁLISE OBSERVACIONAL DA PARTIÇÃO DE ENERGIA EM MODOS VERTICAIS: 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 NCEP analysis 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 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 ciclogênica. 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 as 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 observacional, para análises de diversas resoluções e a partição de energia entre modos verticais.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados são análises espectrais (harmônicos esféricos) provenientes do National Centers for Environmental Predictions (NCEP) 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).

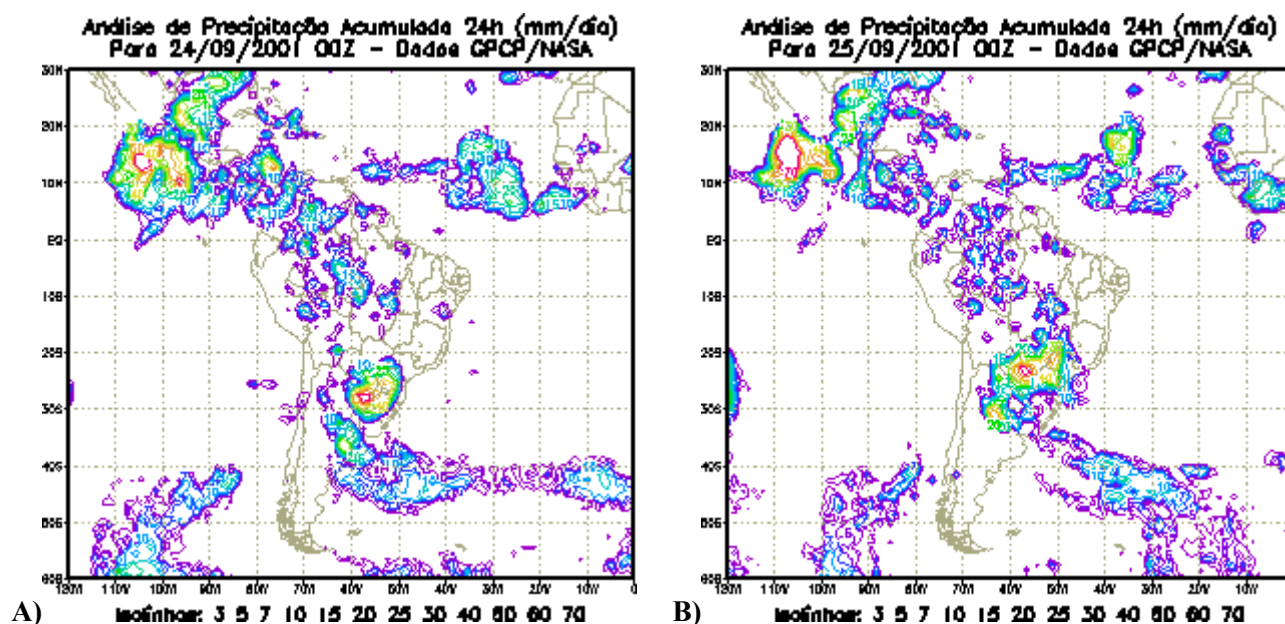
Para a análise da partição de energia em modos verticais, é feita a recomposição dos dados espectrais no espaço físico, calculado as variáveis vento zonal, vento meridional e geopotencial generalizado e é procedida a decomposição desses campos em modos verticais obtidos em coordenadas sigma, conforme 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. A figura 1 apresenta as análises de precipitação (GPCP) acumuladas em 24 horas e válidas para 00 UTC de cada dia.

Nota-se na figura 1 que a passagem da frente fria organiza a convecção na Região Amazônica e há precipitação intensa inicialmente no Sul do Brasil e depois sobre a região do Pantanal. A frente fica bem caracterizada no dia 26/09, porém há uma separação clara na precipitação sobre o continente e sobre o oceano com uma região de pouca ou nenhuma precipitação no litoral da região SE. Já no dia 27/09 a separação é maior com diminuição de intensidade da precipitação em geral.

Como os dados de análise do NCEP não contêm campos de precipitação, na figura 2 é mostrada a água precipitável para o dia 26/09 (figura 1-D), 00UTC. Há um maior detalhamento e uma melhor definição, principalmente na região da precipitação da frente sobre o oceano, à medida que a resolução aumenta. As diferenças são maiores de T062L28 para T126L28 do que de T126L28 para T170L42, o que mostra que este campo não é muito influenciado pela resolução vertical, dado que a umidade específica é mais confinada em baixos níveis.



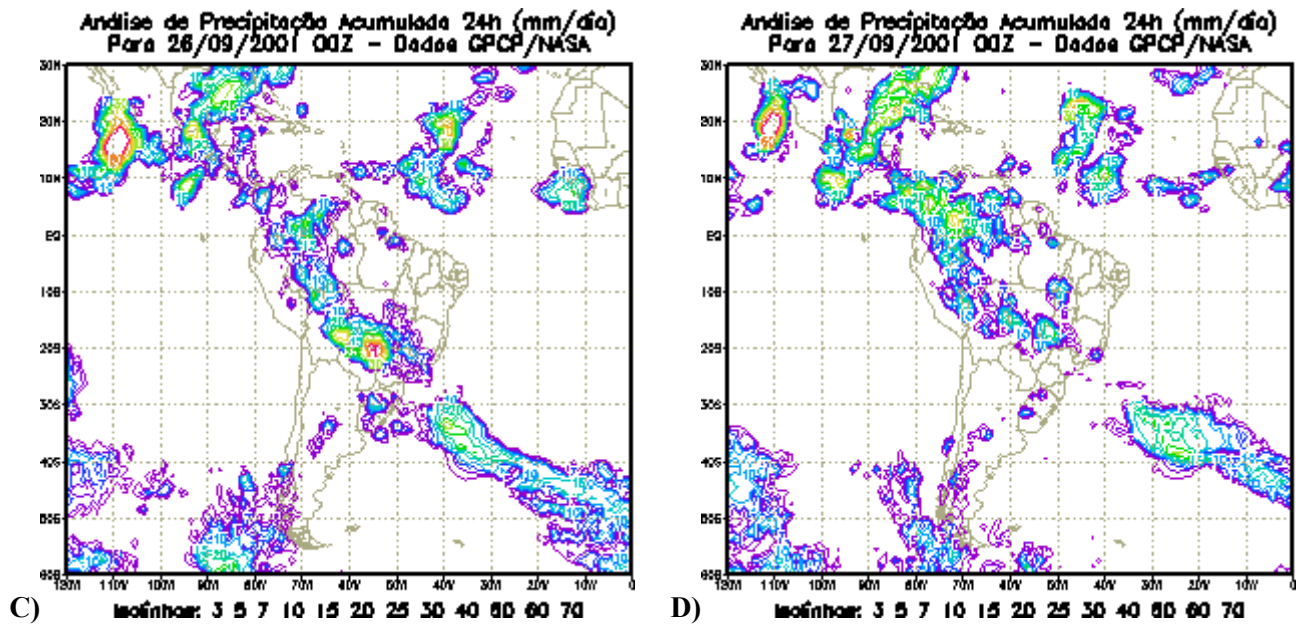
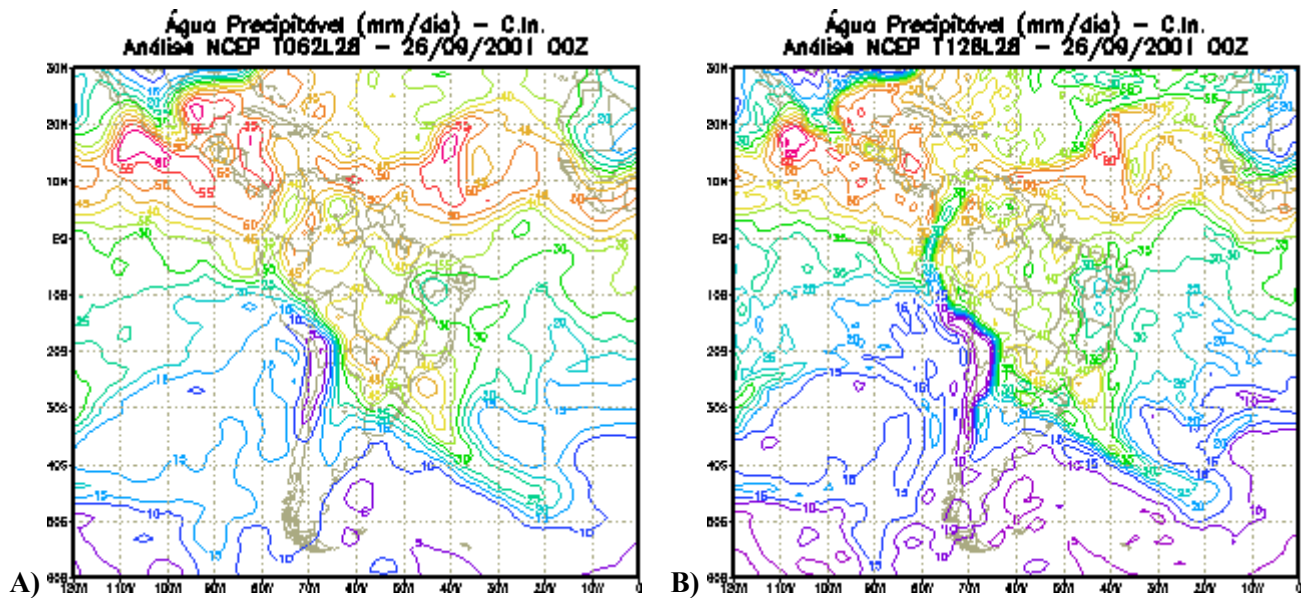
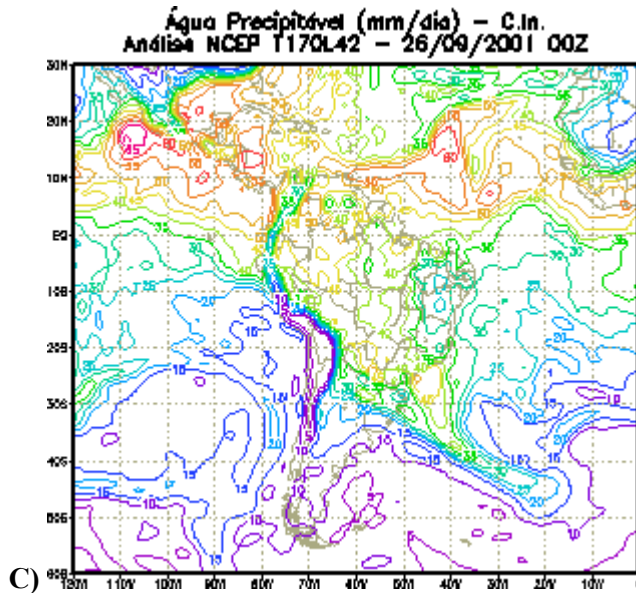
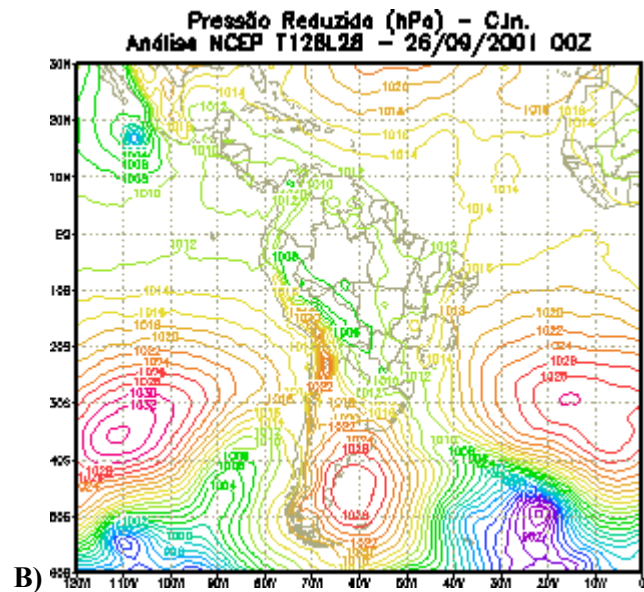
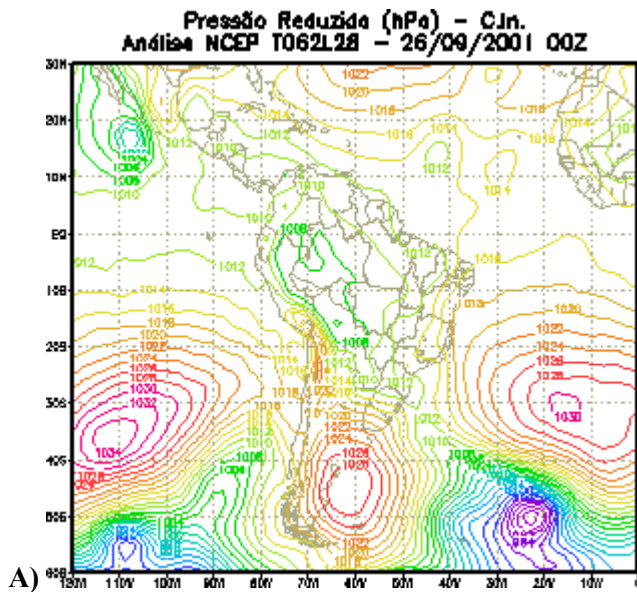


Figura 1 – Precipitação acumulada em 24 horas para os dias 24 a 27 de setembro de 2001, 000 UTC.





C) **Figura 2 – Água precipitável em 26/09/2001, 00 UTC, e resoluções T062L28 (A), T126L28(B) e T170L42 (C).** Os campos de pressão reduzida à superfície para o dia 26/09/2001, 00 UTC e resoluções T062L28, T126L28 e T170L42 são mostrados na figura 3. Não há diferenças significativas entre os três campos, a não ser pela presença de ondas curtas em algumas regiões em resolução mais alta. Nota-se as altas sobre os oceanos em latitudes médias e a frente no litoral do SE do Brasil, avançando sobre o oceano.



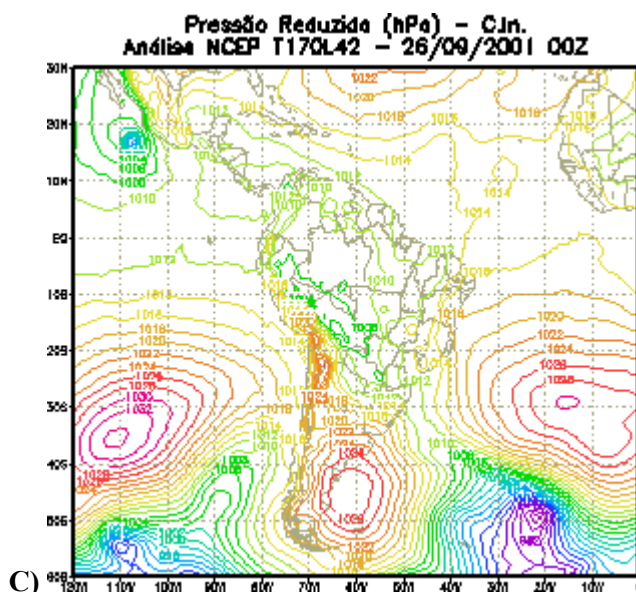
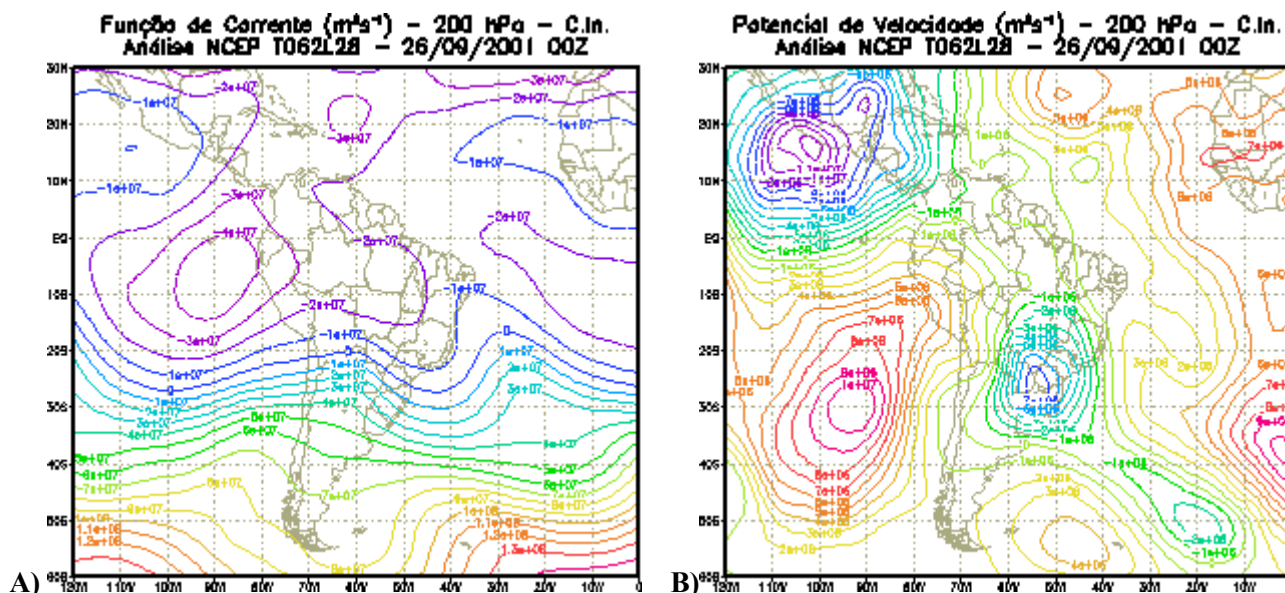


Figura 3 - Pressão reduzida em 26/09/2001, 00 UTC e resoluções T062L28 (A), T126L28 (B) e T170L42 (C)

Na figura 4 são apresentados os campos de função de corrente e de potencial de velocidade para os níveis 200 hPa para o dia 26/09, 00 UTC, para as resoluções de T062L28, T126L28 e T170L42. Nota-se que o cavado de altos níveis sobre o Atlântico Sul (ligeiramente a NE da região de precipitação da frente) tem uma ligeira intensificação com o aumento da resolução, enquanto que o setor de divergência (valores negativos do potencial de velocidade e sobre a região de precipitação da frente) tem uma intensificação mais forte.

A seguir será apresentada a análise da partição de energia em modos verticais. A figura 5 traz resultados da estrutura dos modos verticais principais (de $n=0$ a $n=9$) para 28 e 42 camadas.



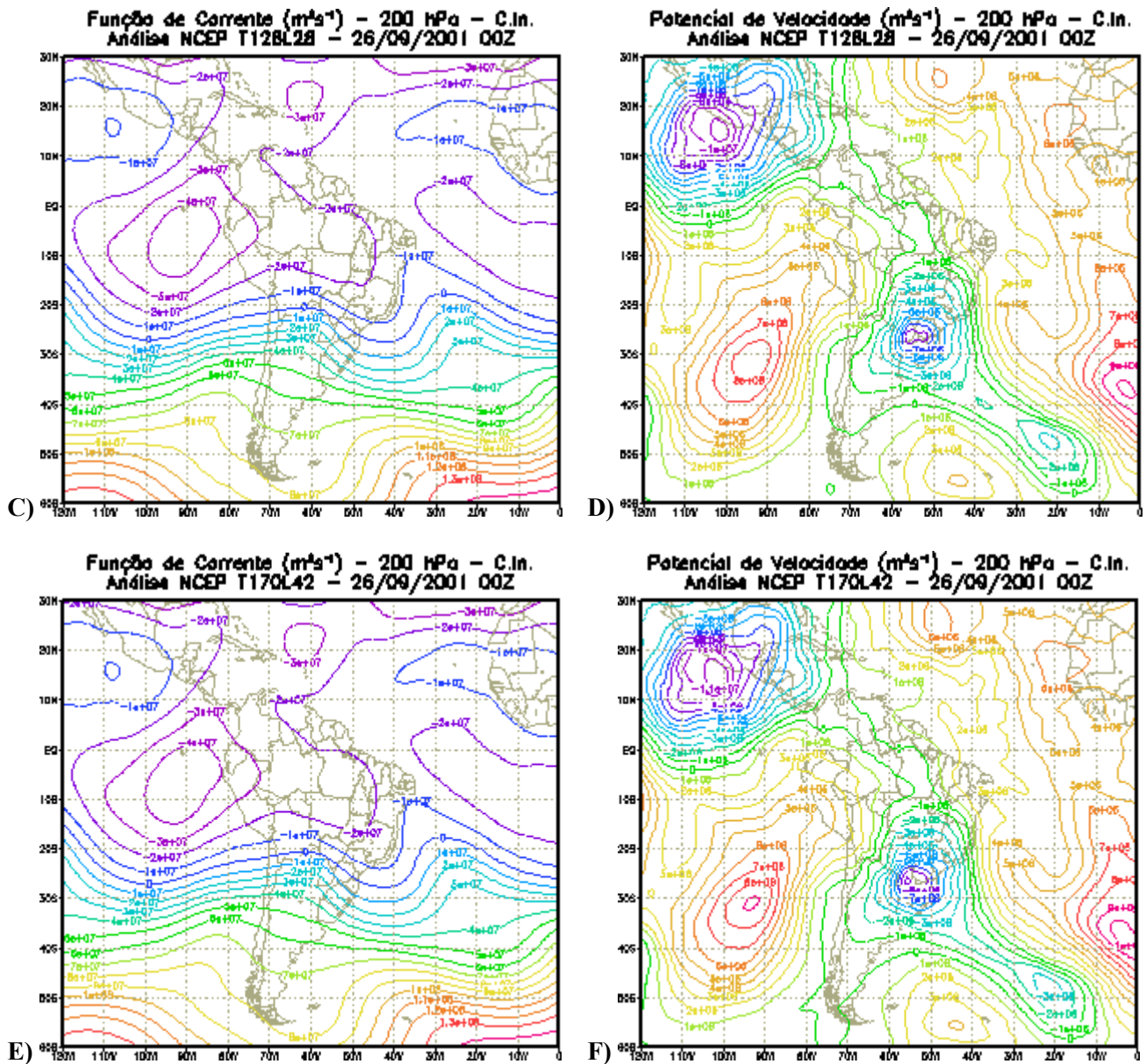


Figura 4 – Análises de função de corrente e potencial de velocidade em 26/09/2001, 00 UTC, para as resoluções T062L28 (A e B), T126L28 (C e D) e T170L42 (E e F).

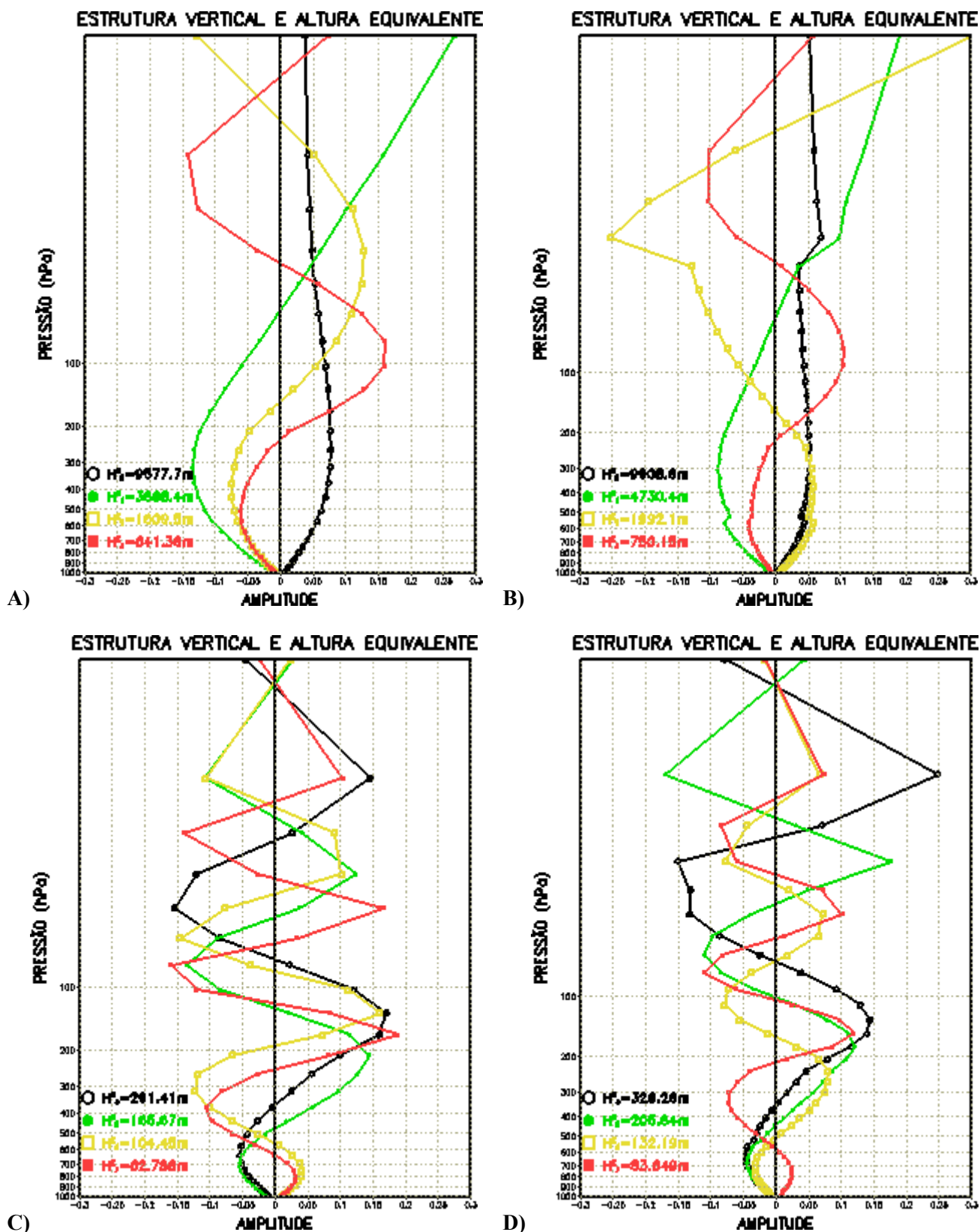


Figura 5 – Estrutura dos modos verticais 0 a 7 para 28 (A e C) e 42 (B e D) camadas.

Nota-se na figura 5 que o modo $n=0$ em ambos os casos não tem zeros, sendo por isso denominado de modo barotrópico divergente equivalente. Os demais têm o número de zeros correspondente ao índice vertical n e com estrutura cada vez mais complexa, sendo denominados de modos baroclínicos. Destaca-se o modo com altura equivalente em torno de 200 m que possui máximos em torno de 850 e 200 hPa e zero em torno de 500 hPa. Este modo é o que contém a maior parte da energia na região tropical, principalmente próximo à região de atividade

convectiva de grande escala intensa. Ressalta-se uma certa semelhança entre esses modos tanto para 28 como para 42 camadas, com valores de alturas equivalentes bem próximas. Devido às características dos níveis verticais dos máximos, mínimos e zeros, as projeções sobre os modos verticais podem ser divididas em três categorias: 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 6.

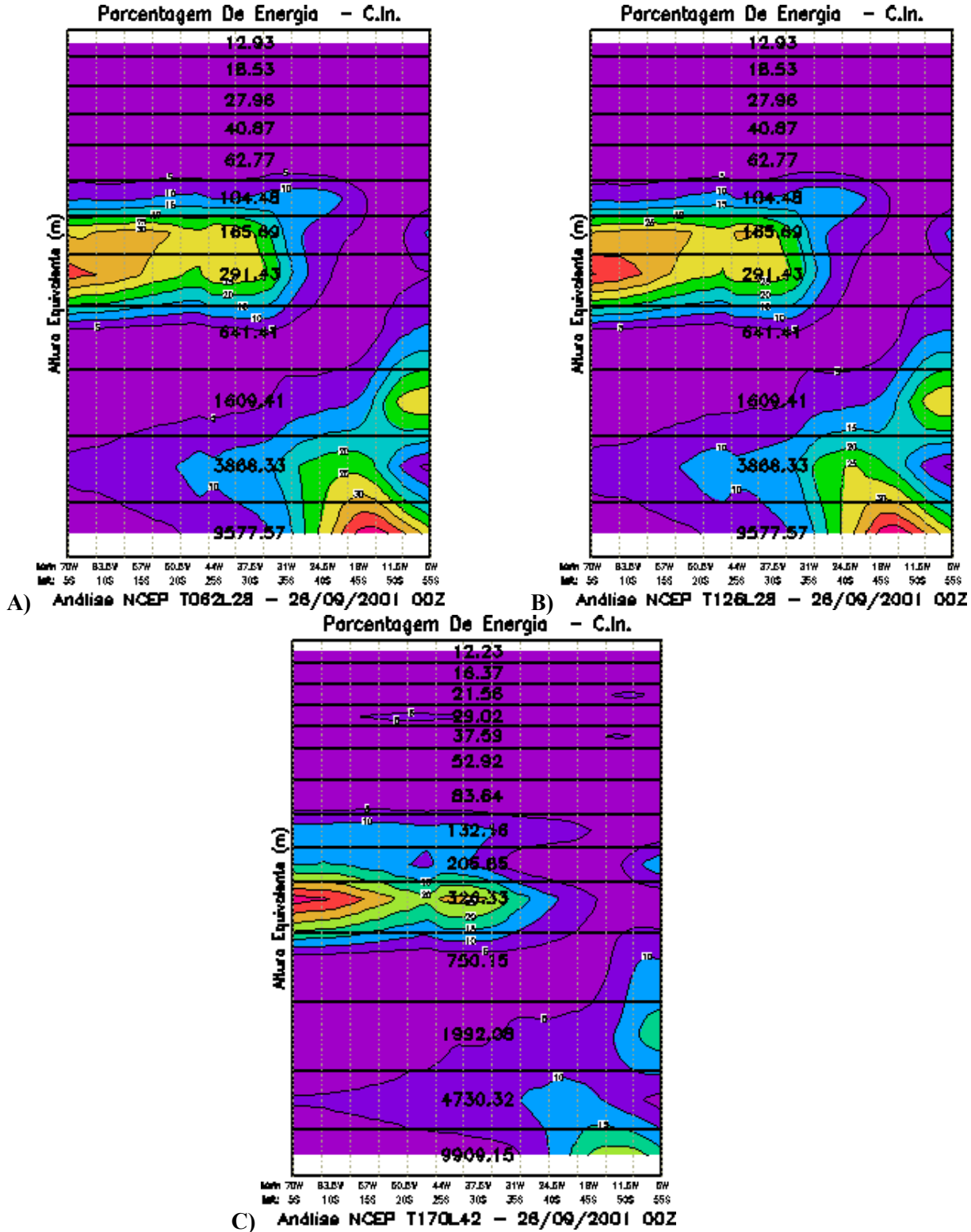
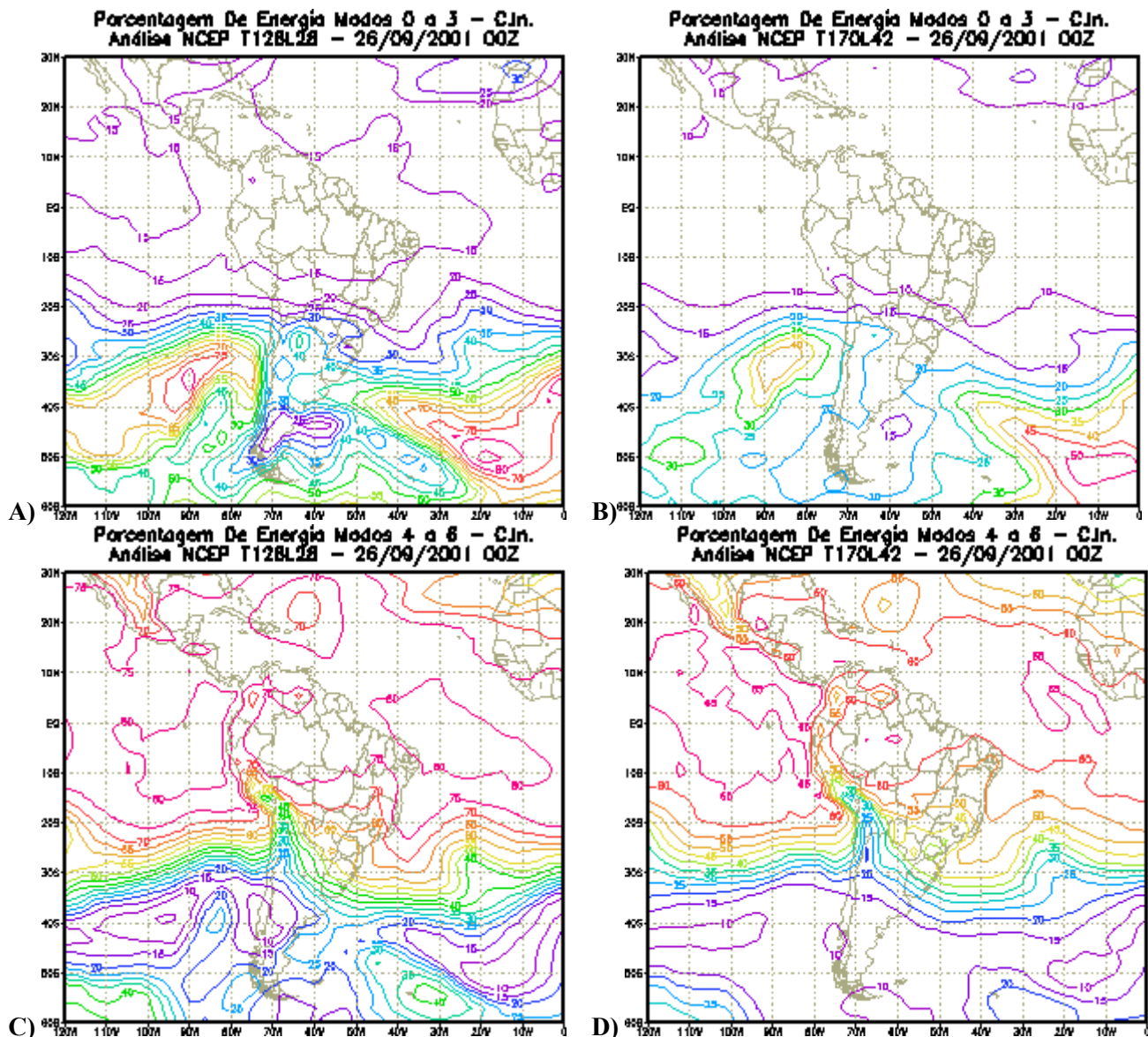


Figura 6 – Secção ao longo da frente fria no dia 26/09/2001 da porcentagem de energia para as resoluções T062L28 (A), T1126L28 (B) e T170L42 (C).

A figura 6 apresenta uma secção para o dia 26/09 ao longo da frente fria da porcentagem de energia em modos verticais entre (70°W,5°S) e (5°W,55°S). Nota-se que as três primeiras categorias estão bem definidas na figura, sendo que a primeira está localizada mais em latitudes médias sobre o oceano e a segunda mais na região tropical e sobre o continente.



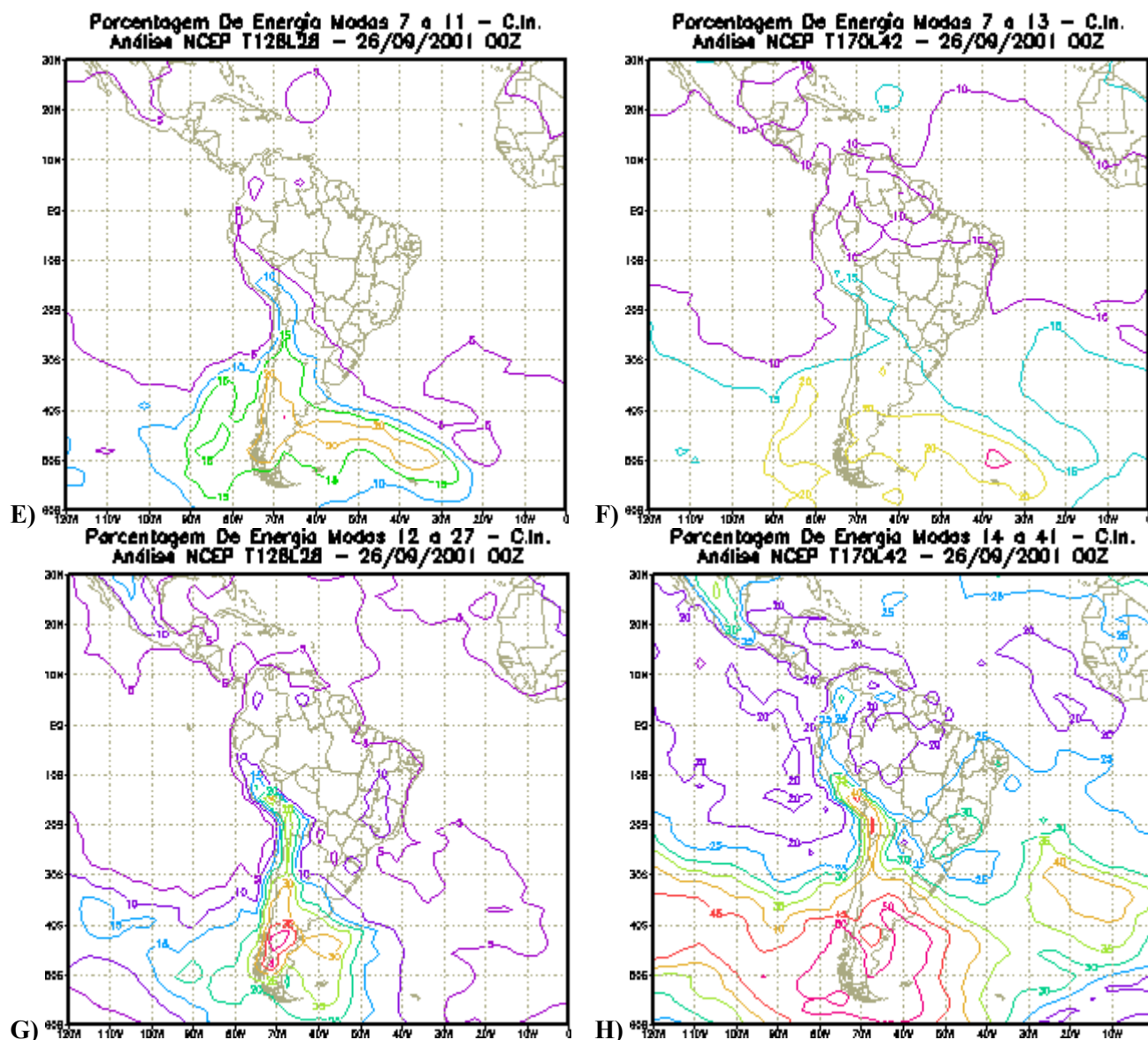


Figura 7 - Porcentagens de energia para os modos verticais de 0 a 3 (A e B), de 4 a 6 (C e D), de 8 a 11 (E e F) e de 12 (14) a 27 (41) (Ge H) para 28 (42) camadas para as resoluções T126L28 e T170L42, para 26/09, 00 UTC

Na figura 7 encontram-se as porcentagens de energia 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. Como as resoluções T062L28 e T126L28 apresentam resultados semelhantes para as quatro categorias definidas acima, a resolução T062L28 não foi apresentada. Pode-se notar pela figura 7 que na primeira categoria, 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 40% na região oceânica da frente. Esses máximos significativos, principalmente aqueles próximos a regiões convectivas, sugerem que os modos mais internos podem ter um papel relevante na partição de energia e isto surgindo quanto à 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 do ponto de vista observacional para um estudo de caso de passagem de frente fria sobre o Brasil. Uma maior resolução horizontal contribui em geral para uma análise mais detalhada 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. Para este caso, a partição de energia reflete 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 a fontes tropicais de calor de grande escala.** São José dos Campos, SP, 1994, 331p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE.
- 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.
- 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.