Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.3, 395-410, 2005

SISTEMAS CONVECTIVOS INTENSOS NO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO: O CONTROLE DA GRANDE ESCALA

TATIANE FELINTO BARBOSA[1] e MAGALY DE FÁTIMA CORREIA[2]

[1]Mestranda do Curso de Pós-graduação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE
Avenida dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja - CEP:12227-010 - São José dos Campos - SP - Fone: (12) 3945-6821
[2]Professora da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, DCA
Rua Aprígio Veloso, 882, Bodocongó Campina Grande - CEP: 58109-970 - PB - Fone: (83) 310-1379
E-mail: tatianefb@yahoo.com.br, magaly@dca.ufcg.edu.br

Recebido Julho 2004 - Aceito Março 2005

RESUMO

Neste trabalho são investigadas a natureza e distribuição dos Sistemas Convectivos responsáveis por altos índices pluviométricos e inundações no semi-árido brasileiro. Episódios extremos no período chuvoso da região e um evento incomum de intensa atividade convectiva registrado no mês de junho são analisados. Imagens de um radar meteorológico banda-C permitiram o monitoramento com alta resolução espacial e temporal dos sistemas convectivos de mesoescala (SCM) desenvolvidos na área. A importância relativa da energia potencial disponível (CAPE) e do cisalhamento vertical do vento na formação e organização dos sistemas precipitantes é avaliada. Os resultados mostram que o ambiente de sinótico foi determinante na evolução dos sistemas precipitantes observados. Convergência do fluxo de umidade nos baixos níveis foi fundamental para a ocorrência da convecção profunda. Os sistemas convectivos intensos observados no dia 05 de junho tiveram origem num sistema frontal que atingiu o sul do Nordeste.

Palavras-chave: sistema convectivo de mesoescala, radar meteorológico, semi-árido brasileiro.

ABSTRACT: INTENSE CONVECTIVE SYSTEM IN SEMI-ARID NORTHEAST BRAZIL: THE LARGE-SCALE CONTROL

The nature and distribution of convective systems, which caused high rainfall totals and flooding in the Brazilian semi-arid region, are investigated in this paper. Extreme episodes occurred during the rainy season and an uncommon event of intense convective activity registered in June is analyzed. The high spatial and temporal resolution of C-band meteorological radar images allowed monitoring the mesoscale convective systems (MCS) developed in the area. The relative importance of the convective available potential energy (CAPE) and the vertical wind shear in the formation and organization of the precipitating systems is evaluated. Results show that characteristics of the synoptic environment was determinant in the evolution of the observed systems; low-level moisture convergence on the large-scale was fundamental to the occurrence of deep convection. Intense convective systems observed on 05 June were originated by a frontal system that penetrated southern Northeast Brazil.

Keywords: mesoscale convective systems, meteorological radar, Brazilian semi-arid.

1. INTRODUÇÃO

A grande variabilidade no regime pluviométrico do Nordeste do Brasil (NEB) é em parte explicada em função dos diversos fenômenos que influenciam a Região. A intensidade da precipitação depende da atividade convectiva associada com pelo menos quatro sistemas meteorológicos importantes: a zona de convergência intertropical (ZCIT), responsável pelas precipitações que ocorrem no centro norte da região no período de fevereiro a maio; os sistemas frontais que provocam chuva no centro sul do NEB, nos meses de novembro a janeiro, os distúrbios de leste responsáveis pelas chuvas no leste do NEB entre maio e agosto e os vórtices ciclônicos da alta troposfera que ocorrem na primavera, verão e outono (setembro a abril), com máxima freqüência no mês de janeiro (Mello et al, 1996).

Eventos significativos no Nordeste brasileiro ocorrem com mais freqüência em anos em que a ZCIT atinge posições extremas ao sul do Equador. Vários estudos enfatizam a relação entre a intensidade e durabilidade da estação chuvosa e a posição da ZCIT (Xavier & Xavier, 1983; Correia, 1989, Uvo, 1989, Aragão et al, 2000). Poucos trabalhos, entretanto, tratam da estrutura, evolução e organização da convecção profunda e dos sistemas convectivos nesta região. Em parte, essa carência está relacionada com a escala espacial destes sistemas cujo monitoramento só é possível com resolução suficiente através do radar meteorológico. Neste sentido, a única série de dados coletados no semi-árido nordestino através do Radar de Petro-

lina (PE) em 1985, representa um arquivo de informações de extrema importância em estudos de mesoescala.

Resultados de pesquisas sobre a natureza, distribuição e organização da precipitação na região semi-árida do Nordeste, usando dados do radar de Petrolina - PE (Correia, 1989; Araújo, 1994; Silva Aragão et al., 2000), mostram que dependendo do período e do sistema de circulação atuante, os ecos se organizam em linhas, faixas ou bandas. No entanto, a grande predominância de ecos dispersos, com áreas menores ou iguais a 300 km^2, indica que a chuva é de natureza convectiva e que ocorre em áreas isoladas.

De acordo com Orlanski, (1975), sistemas convectivos de mesoescala (SCM) tropicais são fenômenos classificados entre as escalas meso-α e meso-β. A evolução destes sistemas está freqüentemente associada a convecção profunda, cujo desenvolvimento ocorre normalmente devido a aquecimento nos baixos níveis da atmosfera, umedecimento na camada limite ou movimento ascendente em grande escala. Kreighton et al, 1996, mostraram que a energia potencial convectiva disponível CAPE é um parâmetro importante na determinação da instabilidade potencial do ambiente e que valores entre 1000 e 2000 J/kg estão associados com atividade convectiva. Valores mais altos que 2000 J/kg estão associados com convecção forte.

O ambiente de grande escala tem grande controle sobre a localização e o grau de desenvolvimento dos SCM (Augustine e Caracema, 1994). Entretanto, essas forçantes variam bastante de local para local e com o tempo, influenciando principalmente a intensidade dos sistemas. Para entender melhor como a convecção tropical responde aos vários tipos de forçantes de grande escala estudos numéricos e teóricos foram realizados e os resultados mostram que não apenas a intensidade da forçante, mas também a estrutura vertical da atmosfera exerce uma influência importante no desenvolvimento da convecção (Weisman e Klemp, 1986).

Eventos significativos de chuva no semi-árido brasileiro tem sido foco de atenção em diversas investigações científicas (Ramos, 1975; Silva Aragão et al; 2000) não apenas devido ao impacto do tempo severo em terras áridas, mas também pela possibilidade de entender melhor as interações entre os processos de mesoescala e escala sinótica que ocorrem antes e durante o desenvolvimento de células convectivas profundas.

Episódios de chuvas intensas mesmo que de curta duração ou concentrados em alguns dias do mês são comuns no período chuvoso da região, entre novembro e abril (Araújo, 1996). Neste trabalho são analisados casos extremos que levaram a inundação em várias localidades do Nordeste do Brasil no início de abril de 1985 e o episódio de chuva forte registrado no início de junho do mesmo ano pela característica incomum da convecção profunda dentro do período seco de maio a outubro. As análises são concentradas nos dias 01 e 12 de abril e no dia 05 de junho de 1985. O conjunto de imagens do radar banda-C situado em Petrolina (PE) (09°24' S, 40°29' W) representa uma excelente oportunidade de observar estruturas de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) que se desenvolvem em ambientes de terrenos complexos, difíceis de serem investigados utilizando apenas modelos numéricos e dados provenientes de estações convencionais. Campos de precipitação obtidos através do radar são fundamentais no processo de validação numérica.

O objetivo principal deste estudo é avaliar a natureza de sistemas convectivos intensos detectados na região de alcance do radar de Petrolina - PE, considerando aspectos de grande e mesoescala. O efeito do cisalhamento vertical do vento e a CAPE na organização dos sistemas profundos é analisado. São examinadas as condições sinóticas responsáveis pelos eventos extremos tanto no período chuvoso quanto no período seco. Características ambientais associadas com a evolução de sistemas multicelulares de longa duração foram avaliadas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Com base em imagens de radar obtidas na primeira quinzena de abril e nos primeiros seis dias de junho, foram selecionados os episódios dos dias 01 e 12 de abril e o dia 05 de junho de 1985, como representativos de dias com atividade convectiva intensa e desenvolvimento de sistemas profundos.

O radar meteorológico banda-C, pertencente ao Instituto de Atividades Espaciais (IAE), cuja área de cobertura é ilustrada na Figura 1, foi instalado na região do Polígono das Secas com o objetivo de auxiliar nas pesquisas sobre a natureza das nuvens precipitantes. O seu período de operação foi limitado ao ano de 1985. Na avaliação dos campos de precipitação, considerou-se a região contida no raio de 200 km, com alcance quantitativo de aproximadamente 150 km. Na avaliação da formação, desenvolvimento e intensificação das células precipitantes foram utilizadas as imagens nos modos PPI (Plan Position Indicator) e RHI (Range Height Indicator). A análise dos ecos foi feita com base em dois critérios. O primeiro baseado no gradiente horizontal de refletividade permitiu identificar os tipos de ecos (convectivos e estratiformes). O segundo critério adotado tomou como base a organização aparente dos ecos nos PPI's observado apenas a distribuição das células precipitantes sem considerar características dinâmicas.

Além das imagens do radar, foram utilizadas informações de superfície, de ar superior, e dados do NCEP (National Center for Evironmental Prediction). Os dados das sondagens realizadas na sede do radar foram usados para descrever a estrutura vertical da atmosfera. Na avaliação do grau de instabilidade atmosférica e da atividade convectiva foi utilizada a energia potencial convectiva disponível (CAPE). Na obtenção desse parâmetro utilizou-se a metodologia desenvolvida por Zawadzki e Ro (1978) e modificada por Correia (1989), sendo denominada de $CAPE_{MAX}$ e determinada pela equação,

$$CAPE_{max} = \int_{NE}^{NCE} (T_{vp} - T_{va}) R_d \, d \ln P \qquad (1)$$

Em que, ***NE*** é o nível de equilíbrio ($T_{va}=T_{vp}$); ***NCE*** é o nível de convecção espontânea; $T_{va}=(T+0,61q)$ é a temperatura virtual do ambiente (°C); $T_{vp}=(T_p+0,61q)$ é a temperatura virtual da parcela (°C); T é temperatura do ambiente (°C); T_p é tempera-

tura da parcela (°C) obtida através do diagrama termodinâmico a partir do valor mais alto da temperatura potencial do bulbo úmido (θ_{wmax}), com base nos dados de superfície; q é a umidade específica do ar; R_d é a constante dos gases para o ar seco e P é a pressão atmosférica (Pa).

A necessidade de obter o valor máximo da CAPE surgiu em função do horário variável das sondagens, predominantemente realizada às 12 UTC, sendo que a máxima atividade convectiva normalmente ocorre no período da tarde. O procedimento gráfico utilizado na obtenção da temperatura da parcela é ilustrado na Figura 2. A área hachurada corresponde a $CAPE_{MAX}$.

Zawadzki et al. (1981) verificaram uma alta correlação entre a CAPE e taxas máximas de precipitação convectiva num período de 24 horas. Entretanto, encontraram também um número significativo de dias com valores altos de CAPE sem ocorrência de precipitação convectiva indicando que a forçante dinâmica exerceu um controle bem maior na formação e manutenção dos sistemas convectivos extratropicais.

Perfis verticais da temperatura potencial θ, temperatura potencial equivalente θ_e e temperatura potencial equivalente de saturação θ_{es} foram obtidos para avaliar o grau de estabilidade da atmosfera e verificar se as condições ambientes são favoráveis, ou não, ao desenvolvimento de sistemas intensos. Esses parâmetros termodinâmicos foram calculados segundo as equações obtidas por Bolton (1980).

Para quantificar os efeitos relativos da CAPE e do cisalhamento vertical do vento foi utilizado o parâmetro adimensional, R, conhecido como Número de Richardson Global, determinado através da equação 2, de acordo com Weisman e Klemp, (1986).

$$R = \frac{CAPE}{1/2\overline{U}^2} \qquad (2)$$

na qual o cisalhamento vertical do vento,

$$\overline{U} = \left(\bar{u}_6 - \bar{u}_{0,5}\right) \qquad (3)$$

é diferença entre o vento médio (ms^{-1}) próximo a superfície e na média troposfera, 0,5 e 6 km (~ 500 hPa) respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em abril de 1985 no trecho denominado Submédio da Bacia do Rio São Francisco, entre as usinas de Sobradinho e Paulo Afonso, foi registrada a ocorrência de chuvas intensas que culminaram com a formação de uma enchente de grandes proporções entre os dias 11 e 17. Situação similar tinha

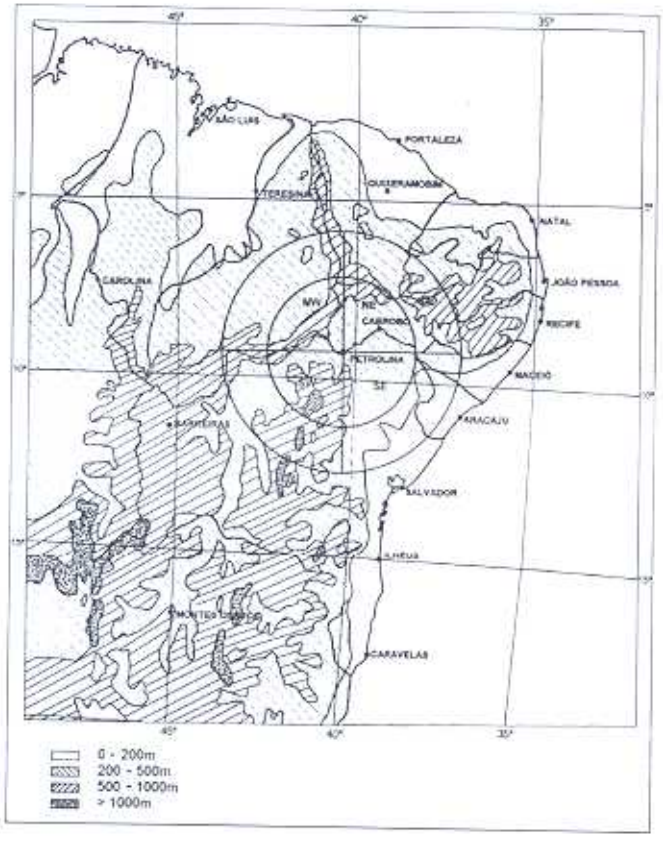


Figura 1: Mapa do relevo da Região Nordeste do Brasil, com a localização do Radar de Petrolina – PE (9°24'S, 40°29'W) e respectiva área de cobertura limitada pelo círculo externo cujo raio é de 400 Km. O círculo interno tem raio de 250 Km. (Fonte: Farah e Justo, 1979).

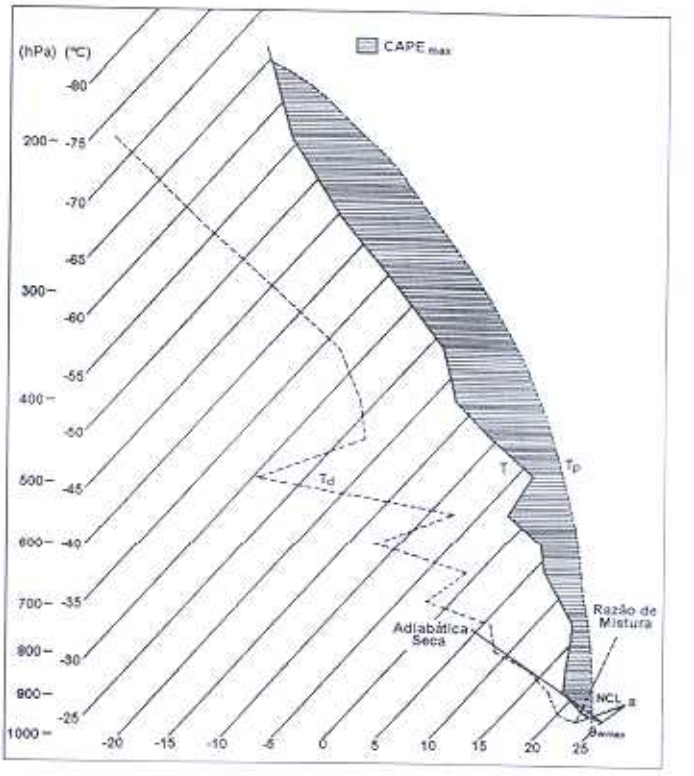


Figura 2: Sondagem de Petrolina (PE) do dia 01 de abril de 1985 às 11:38 UTC, plotada num diagrama termodinâmico. A temperatura do ar (T) e a temperatura do ponto de orvalho (Td) à superfície são indicadas pela letra (a). O valor máximo da temperatura potencial do bulbo úmido θ_{wmax} utilizado na determinação de $CAPE_{MAX}$ também é mostrado na figura. A área hachurada indica $CAPE_{MAX}$.

sido registrada apenas nos anos de 1936 e 1960 (CHESF, 1986). Por outro lado, apesar da enchente, neste setor da bacia, ser considerado pela CHESF como sendo um episódio de ocorrência rara, situação similar ocorreu no início do corrente ano em virtude das fortes chuvas registradas entre janeiro e fevereiro de 2004. Diversos municípios, fazendas com extensas áreas de cultivo, situadas na região e perímetros irrigados foram inundados levando o governo local a decretar estado de emergência (http: //www.vermelho.org.br/diario).

Eventos de chuvas intensas são, portanto, potencialmente capazes de produzir efeitos desastrosos com forte impacto sócio-econômico e mesmo não sendo classificados como severos, é necessário entender melhor o ambiente no qual se desenvolvem e principalmente determinar parâmetros capazes de identificar condições favoráveis à formação e evolução dos mesmos.

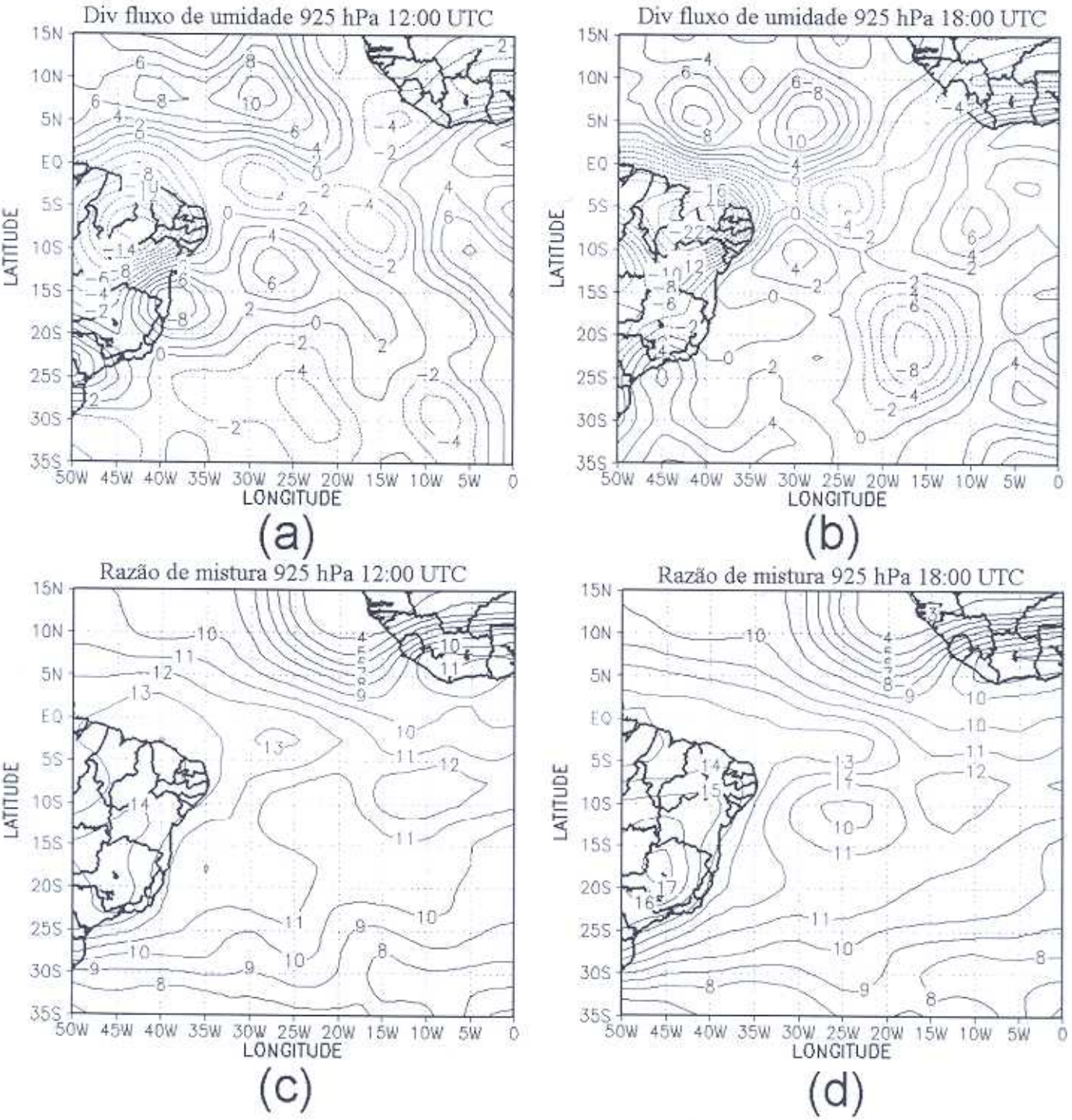


Figura 3: Divergência Horizontal do Fluxo de Umidade ($10^{-5}gkg^{-1}s^{-1}$) (a – b) e Razão de Mistura (g/kg) (c – d) para o dia 01 de abril de 1985 no nível de 925 hPa às 12 e 18 UTC.

3.1. Dia 01 de abril de 1985 - O Ambiente de Grande Escala

Campos da divergência do fluxo de umidade e da razão de mistura no nível de 925 hPa são mostrados na Figura 3. No horário das 12 UTC (Figura 3a) observa-se uma área de convergência sobre a região Nordeste compreendida entre as latitudes de 0° e 15°S com núcleo situado a oeste do estado de Pernambuco. No período da tarde, a convergência de umidade é mais intensa e se distribui por uma área maior como pode ser visto na Figura 3b. No campo da razão de mistura às 12 UTC (Figura 3c) nota-se que os maiores valores, cerca de 14 g/kg estão sobre a região Nordeste. Um aumento significativo destes valores é observado no período da tarde como pode ser visto no campo das 18 UTC na Figura 3d.

Campos do vetor velocidade do vento nos níveis de

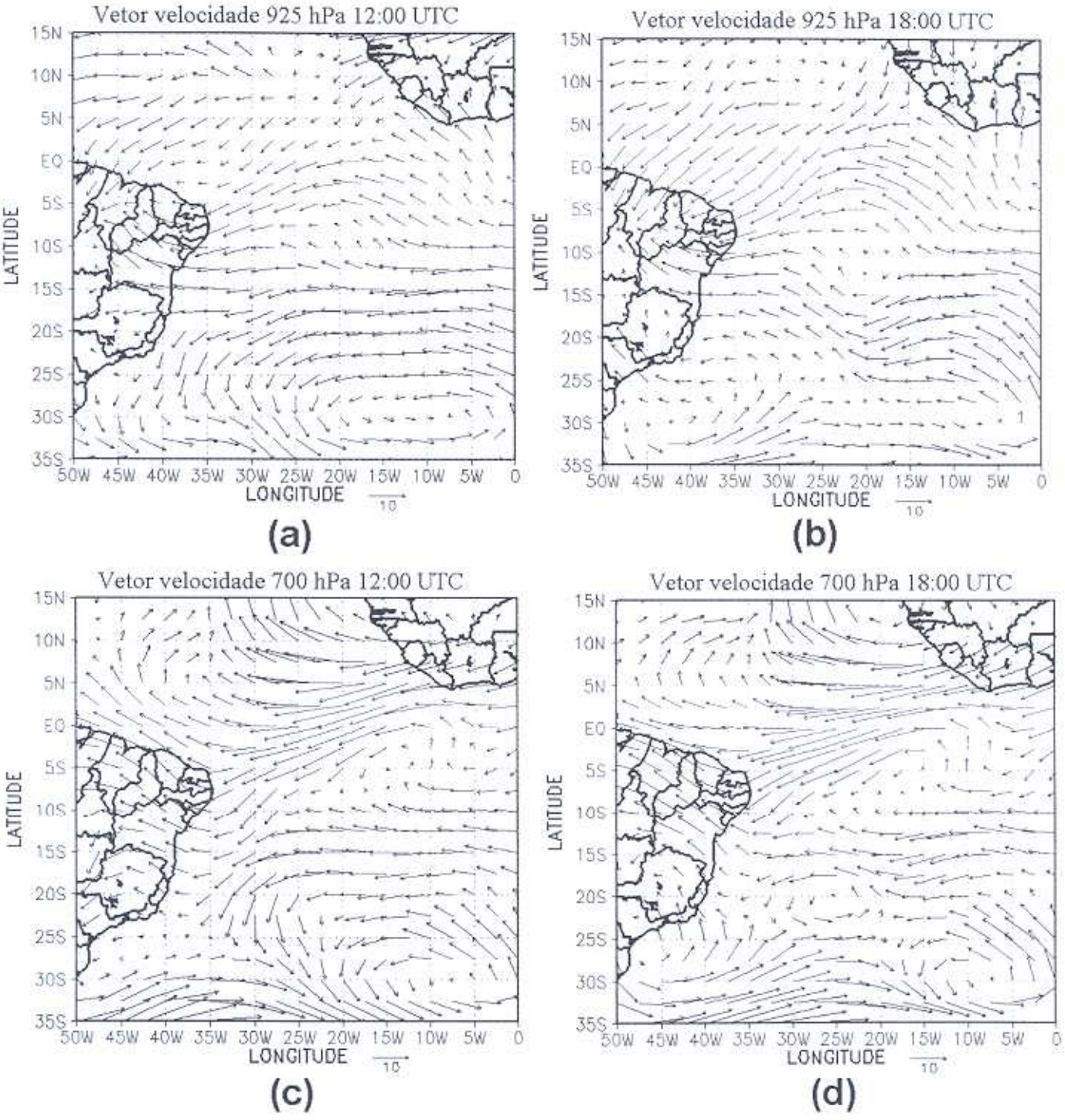


Figura 4: Vetor velocidade do vento (ms^{-1}) para o dia 01 de abril de 1985 nos níveis de 925 e 700 hPa às 12 e 18 UTC.

925 e 700 hPa nos horários das 12 e 18 UTC são mostrados na Figura 4. No nível de 925 hPa às 12 UTC, observa-se um forte escoamento de leste sobre o Nordeste. Uma região de confluência de ventos de nordeste e sudeste é evidente entre as latitudes de 5° e 10°S. No campo do vento das 18 UTC (Figura 4b), observa-se um escoamento mais intenso em relação ao observado às 12 UTC.

No nível de 700 hPa, o escoamento no horário das 12 UTC é relativamente mais intenso e predominantemente de sudeste, em quase toda a região do Nordeste, como pode ser visto na Figura. Essa configuração persiste no horário das 18 UTC e a existência de um cavado sobre a região é particularmente evidente na Figura 4d.

3.2. O Ambiente de Mesoescala

Os perfis verticais de θ, θ_e, θ_{es} do dia 01 de abril de 1985 às 11:30 UTC são apresentados na Figura 5a. No perfil de θ observa-se uma camada bem misturada abaixo de 900 hPa, caracterizada por $\partial\theta/\partial z=0$. O topo da camada de mistura coincide com a base da camada de inversão de subsidência caracterizado pelo afastamento entre as curvas de θ_e e θ_{es}. Esse comportamento reflete a ocorrência de uma secagem atmosférica acima da camada de mistura. Abaixo da base da camada de inversão, a atmosfera tem alto teor de umidade, evidenciado pela proximidade entre as curvas de θ_e e θ_{es}. A atmosfera também se encontra convectivamente instável ($\partial\theta_e/\partial z<0$) e condicionalmente instável ($\partial\theta_{es}/\partial z<0$) na camada entre a superfície e o nível de 900 hPa.

Os perfis verticais das componentes zonal e meridional do vento (Fig. 5b) apresentam um cisalhamento significativo na camada entre a superfície e o nível de 900 hPa. Essa variação brusca nos baixos níveis tem influência no desenvolvimento e organização das células precipitantes. Acima desse nível, a componente zonal permanece praticamente constante, enquanto que a componente meridional diminui até o nível de 650 hPa. O vento apresenta direção predominantemente no quadrante de sudeste até aproximadamente 400 hPa.

A $CAPE_{MAX}$ encontrada para esse dia de 3150 JKg^{-1} indica forte potencial para atividade convectiva. Esse valor é compatível com a distribuição e dimensão das células precipitantes observadas na área de alcance do radar de Petrolina (Figura 6). O valor do número de Richardson encontrado foi de 1550, indicando a possibilidade de formação de tempestades do tipo multicelular.

Nos PPI's obtidos no período da manhã foram observadas poucas células dispersas de curta duração e de baixa intensidade, com dimensão horizontal da ordem de 100 km^2. De maneira geral as células se concentram nos quadrantes NE e SE e a distribuição dos ecos não mostra qualquer organização do tipo linear. A concentração de células nos dois quadrantes sugere que fatores regionais tiveram papel importante no processo de formação e organização das células (Figuras 6a e 6b). No período da tarde observou-se um nítido aumento no número de células, bem como um maior grau de desenvolvimento resultando em ecos maiores e mais intensos. Esse comportamento reflete a contribuição do aquecimento radiativo no desenvolvimento dos sistemas convectivos. Pode-se observar células organizadas apresentando núcleos intensos alinhados, inseridos em áreas estratiformes (Figuras 6c e 6d). Ao contrário das células simples e de curta duração predominantes no período da manhã, estes sistemas multicelulares tiveram duração superior a 2 horas.

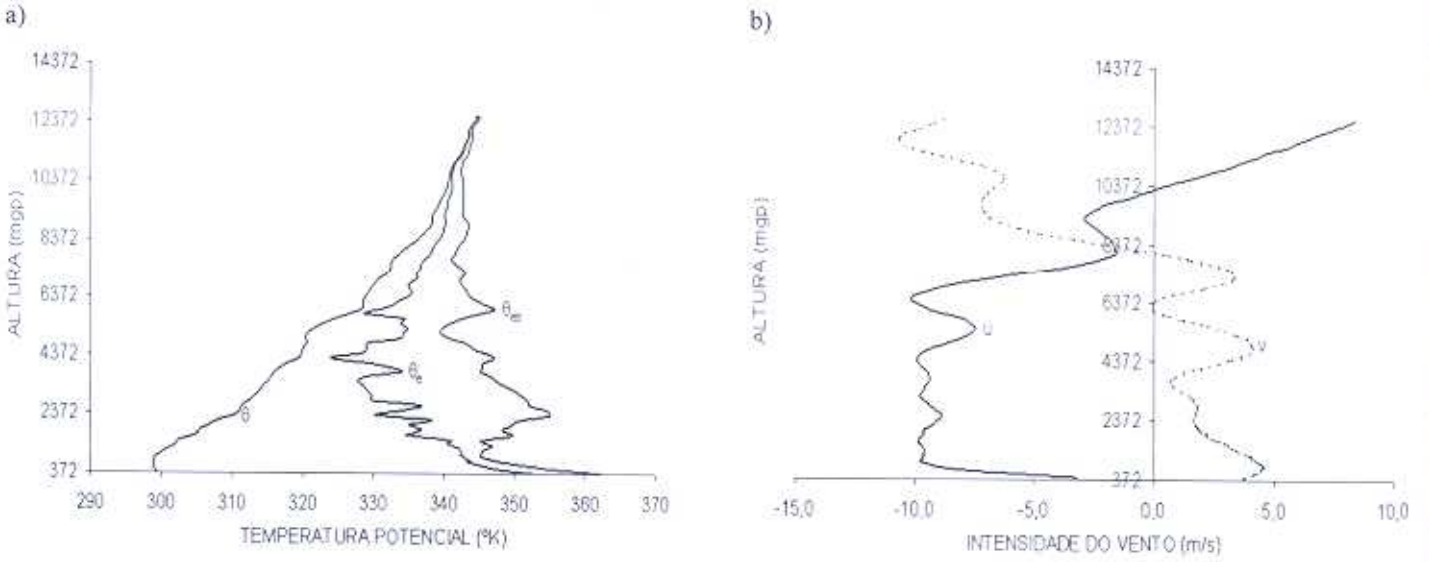


Figura 5: (a) Perfis verticais de θ, θ_e e θ_{es} obtidos da sondagem realizada em Petrolina no dia 01 de abril de 1985 às 11:33 UTC. (b) Perfis verticais das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento (ms^{-1}). Os valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte)

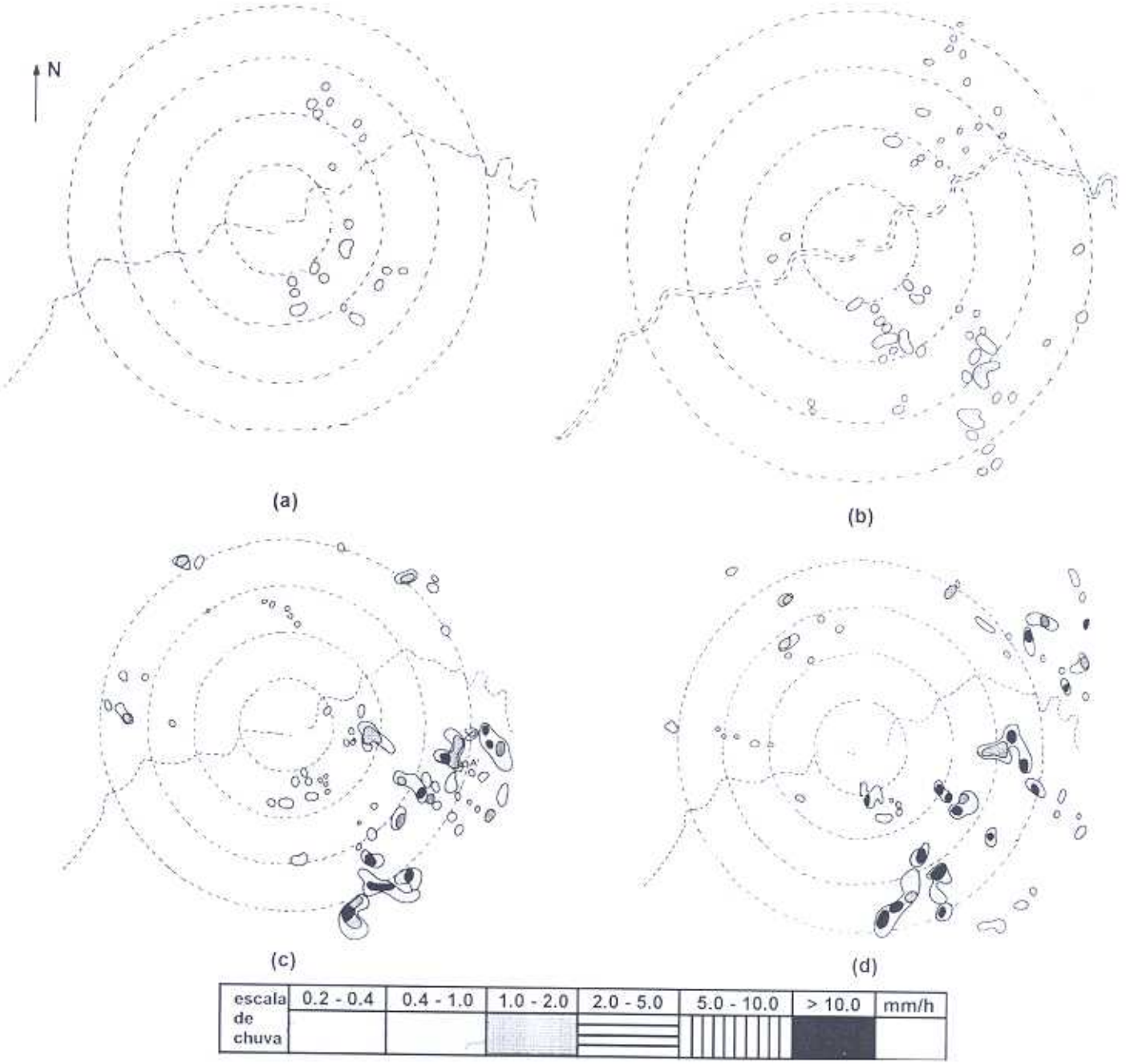


Figura 6: (a) Imagens obtidas pelo radar meteorológico de Petrolina – PE no dia 01 de abril de 1985. (a) PPI obtido às 09:31 HL, (b) PPI obtido às 11:23 H, (c) PPI obtido às 16:09 HL e (d) PPI obtido às 14:56 HL. A distância entre as circunferências concêntricas ao local do radar é de 50 km. A linha sinuosa situada nos quadrantes nordeste e sudoeste representa o curso do rio São Francisco. A seta no canto superior esquerdo indica o norte verdadeiro. (Fonte dos dados: IAE/CTA).

3.3. Dia 12 de abril de 1985 - O Ambiente de Grande Escala

O campo de divergência horizontal do fluxo de umidade no nível de 925 hPa às 12 UTC (Figura 7a) mostra uma área de divergência de umidade no setor leste do nordeste. A oeste da região Nordeste observa-se fraca convergência de umidade. Contudo, no campo das 18 UTC (Figura 7b), nota-se convergência de umidade em toda porção leste do Nordeste e convergência do fluxo de umidade mais intensa em relação ao horário anterior. No campo da razão de mistura para o nível de 925 hPa às 12 UTC (Figura 7c) observam-se os maiores valores sobre a região Nordeste e aumenta ainda mais, em toda a região, no período da tarde (Figura 7d).

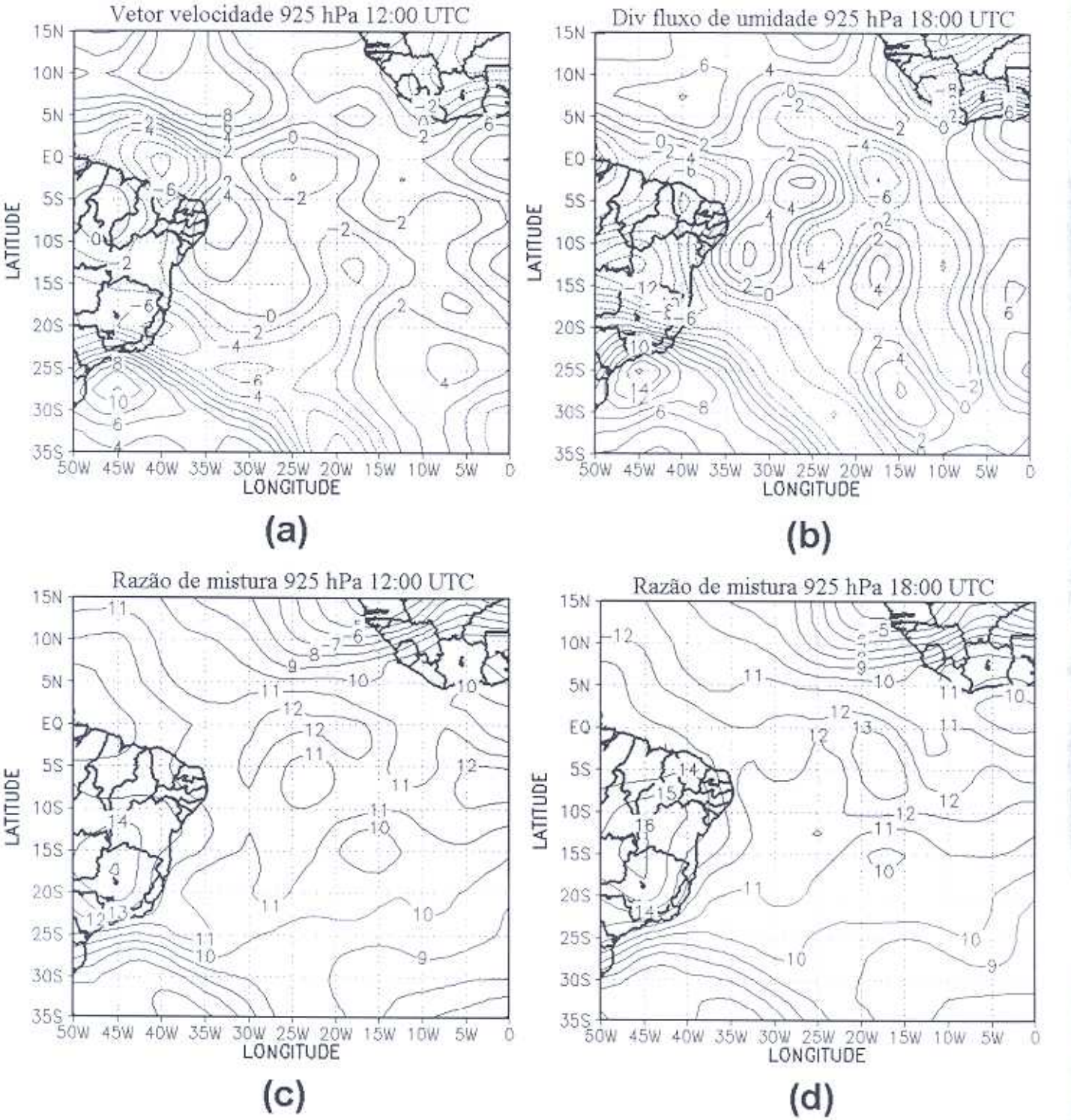


Figura 7: Divergência Horizontal do Fluxo de Umidade ($10^{-5}gkg^{-1}s^{-1}$) e Razão de Mistura (g/kg) para o dia 12 de abril de 1985 no nível de 925 hPa às 12 e 18 UTC.

O campo do vento no nível de 925 hPa às 12 UTC, ilustrado na Figura 8a, mostra uma configuração bastante diferente daquela observada no dia 01 de abril no mesmo horário. A área situada entre as latitudes de aproximadamente 2 e 11°S, destaca-se por apresentar um escoamento bastante fraco contrastando com os valores intensos no restante do Nordeste. No horário das 18 UTC (Figura 8b) o escoamento de sudeste é mais intenso, entretanto, a área acima de 11°S permanece com ventos fracos. No nível de 700 hPa às 12 UTC (Figura 8e) os ventos de nordeste predominam sobre a maior parte da área. No campo das 18 UTC (Figura 8f) ventos intensos de nordeste são encontrados a leste da região nordeste.

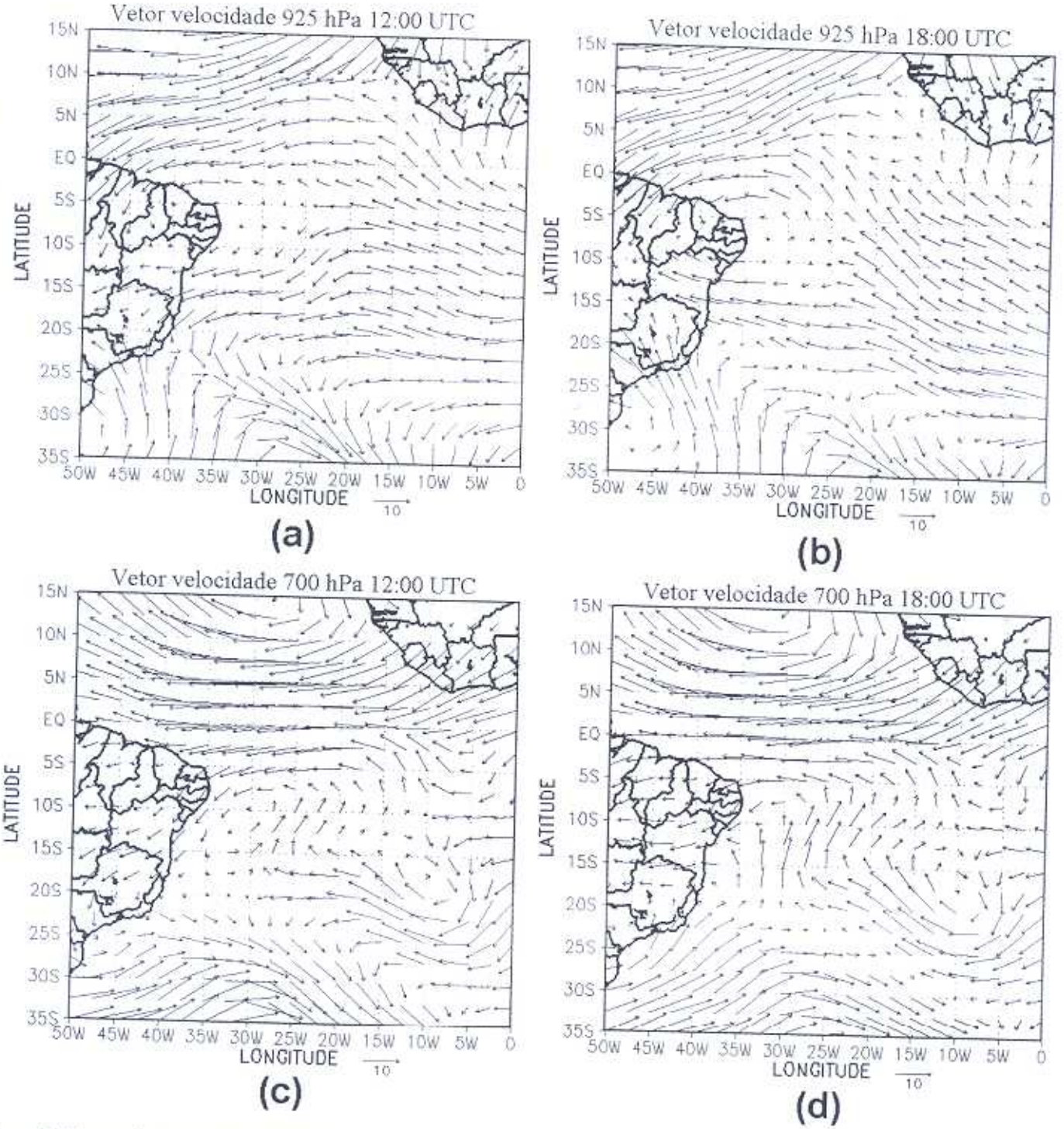


Figura 8: Vetor velocidade do vento (ms^{-1}) para o dia 12 de abril de 1985 nos níveis de 925 hPa e 700 hPa às 12 e 18 UTC.

3.4. O Ambiente de Mesoescala

A Figura 9a mostra perfis verticais θ, θ_e, θ_{es} para o dia 12 de abril de 1985 as 17:20 UTC. O perfil de θ apresenta uma camada de mistura profunda entre a superfície e o nível de aproximadamente 812 hPa, refletindo bem o efeito do aquecimento radiativo (14:20 HL). Abaixo de 850 hPa, a atmosfera encontra-se com teor de umidade relativamente baixo ao contrário do alto teor observado na média troposfera. A atmosfera encontra-se convectivamente e condicionalmente instável na camada entre a superfície e o nível de 715 hPa.

Através dos perfis verticais das componentes zonal e meridional do vento (Figura 9b), observa-se um forte cisalhamento na camada entre a superfície e o nível de 595 hPa, em que a intensidade da componente zonal passa de 0,3 ms^{-1} para 11,6 ms^{-1}, respectivamente. Ou seja, uma variação de quase 12 ms^{-1} A componente meridional aumenta de intensidade entre a superfície e o nível de 700 hPa. O vento apresenta direção predominante no quadrante sudeste.

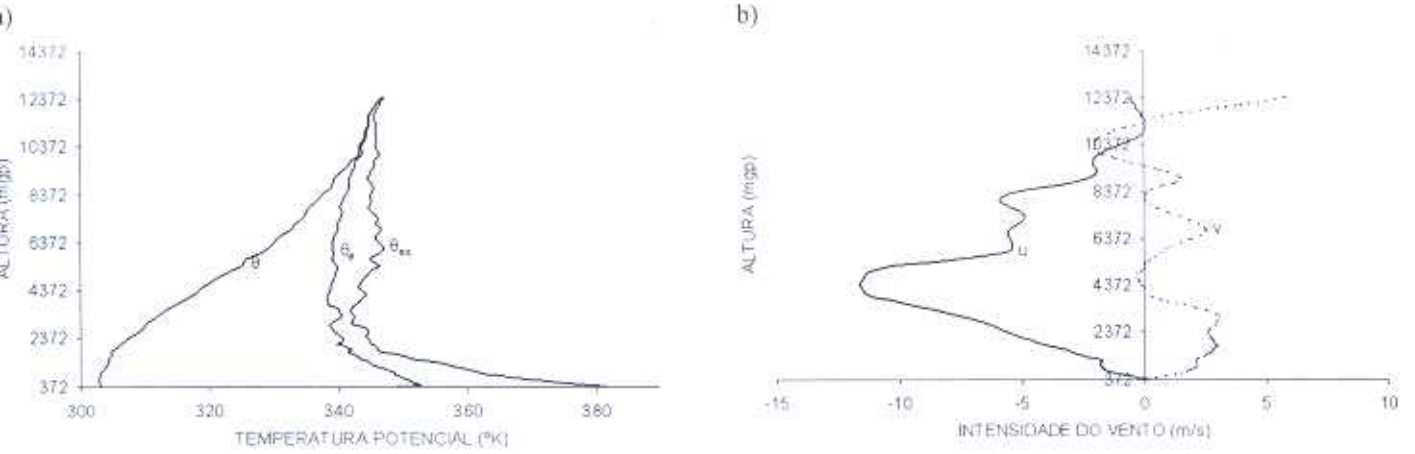


Figura 9: (a) Perfis verticais de θ, θ_e, θ_{es} obtidos da sondagem realizada em Petrolina no dia 12 de abril de 1985 às 17:20 UTC. (b) Perfis verticais das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento (ms^{-1}). Os valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte).

A $CAPE_{MAX}$ encontrada para esse dia de 2156 Jkg^{-1}, indica atividade convectiva de intensidade moderada. Entretanto, o campo de precipitação detectado pelo radar mostra a ocorrência de convecção intensa e profunda. O número de Richardson de 293 é um valor representativo de uma atmosfera favorável à ocorrência de tempestade multicelular. Nos ecos identificados através dos PPIs e RHIs observam-se células do tipo simples. Porém, é visível a predominância de sistemas multicelulares com dimensão horizontal considerável e ciclo de vida superior a 3 horas (Figura 10).

Os PPIs do período da manhã apresentam pequenas células com áreas menores que 100 km^2 e de intensidade fraca. A quantidade de células aumenta muito pouco pela manhã, enquanto que no período da tarde esse comportamento se inverte. Isso reflete a contribuição do aquecimento radiativo no processo de formação das células. No período da tarde é evidente o aumento no número de ecos, bem como o alto grau de desenvolvimento e intensificação dos sistemas.

Da mesma forma que no dia 01, a maioria dos ecos é constituída por células isoladas e distribuídas de forma aleatória em toda a área de alcance do radar. Alguns dos sistemas se desenvolveram a partir da fusão com outras células. Alguns sistemas organizados em linha são observados na área de alcance do radar, como por exemplo, o eco situado no quadrante sudeste ilustrado no PPI da 14:47 HL (Figura 10a). A linha AA' mostrada na imagem determina o azimute de 174,4°. A estrutura vertical das células situadas ao longo deste azimute pode ser vista no RHI (Figura 10b). As células atingem a profundidade de 10 km.

Como no caso anterior, a evolução dos ecos no intervalo analisado mostra que o processo de fusão entre as células é responsável pela intensificação e desenvolvimento dos ecos observados. No PPI das 17:15 (Figura 10c) pode-se observar um sistema mais intenso e desenvolvido localizado próximo ao azimute de 280° que se formou a partir desse processo. O RHI das 17:11 (Figura 10d) ao longo do azimute de 280° mostra que este sistema é profundo e atinge aproximadamente 17 km de extensão vertical. O aumento no número de células observado no período da tarde reforça a hipótese de que o aquecimento radiativo tem um papel fundamental no processo de formação dos sistemas observados.

Com relação à estrutura termodinâmica, algumas características são bem semelhantes àquelas observadas no dia 01 de abril. A presença de instabilidade convectiva, alto teor de umidade atmosférica e valor relativamente alto da CAPE indicam uma atmosfera propícia ao desenvolvimento de convecção intensa. Entretanto, a convergência significativa do fluxo de umidade detectada no dia 01 de abril considerada como mecanismo fundamental na liberação da instabilidade e desenvolvimento da convecção profunda, ocorre bem menos intensa no dia 12 de abril. Observa-se também vento extremamente fraco em toda a região situada entre 5° e 12°S.

Essas diferenças parecem influenciar na distribuição, estrutura e morfologia dos sistemas precipitantes. Enquanto o dia 01 caracterizou-se por apresentar células predominantemente do tipo ordinária ou simples, no dia 12 os ecos detectados na área do radar são tipicamente constituídos por sistemas multicelulares, com grande desenvolvimento horizontal e vertical e com maior durabilidade.

3.5. Dia 05 de junho de 1985 - O Ambiente de Grande Escala

Junho é um mês tipicamente seco na região semi-árida cuja normal climatológica é de 10,2 mm. Entretanto, entre os dias 04 e 10 de 1985, sistemas frontais provocaram aumento de nebulosidade e precipitação na região. Apenas no dia 05 de junho foi registrado o total mensal de 10,3 mm na estação de Petrolina. As imagens de satélite mostradas na Figura 11 evidenciam aumento da nebulosidade a partir do dia 05. No dia 06 de junho (Fig. 11c) a região encontra-se quase que totalmente coberta por nebulosidade.

A Figura (12) mostra o campo da divergência horizontal do fluxo de umidade no nível de 925 hPa às 12 UTC. Nota-se uma área de convergência de umidade sobre o setor centro-norte da região Nordeste. Às 18 UTC (Fig. 12b) percebe-se nitidamente uma intensificação e expansão dos núcleos

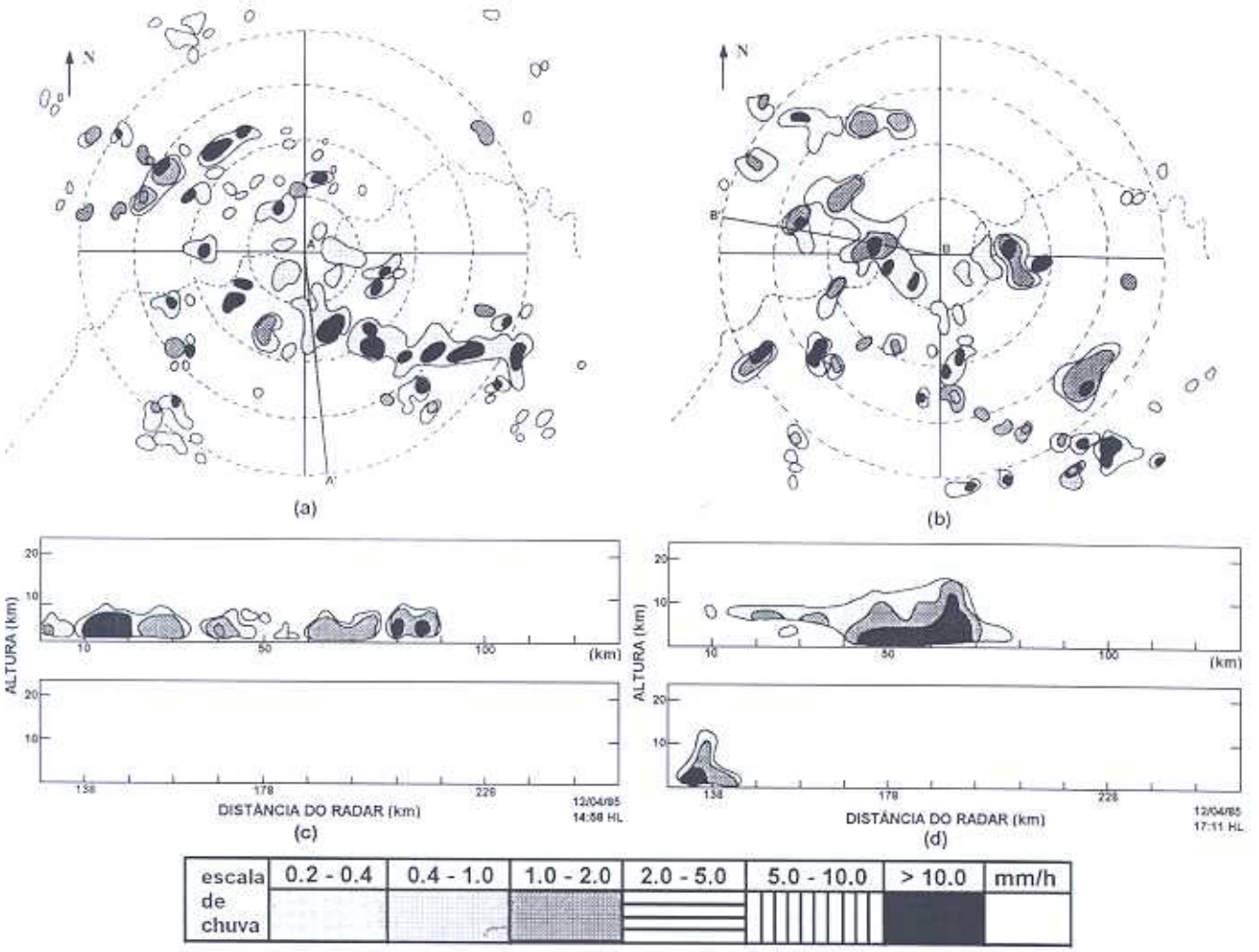


Figura 10: (a) Imagens obtidas pelo radar meteorológico de Petrolina – PE no dia 12 de abril de 1985. (a) PPI obtido às 14:47, (b) RHI obtido às 14:58 HL ao longo do azimute de 174,4°, representado pela linha AA', (c) PPI obtido às 17:15 HL e (d) RHI obtido às 17:11 HL ao longo do azimute de 280°, representado pela linha BB'. A distância entre as circunferências concêntricas ao local do radar é de 50 km. A linha sinuosa situada nos quadrantes nordeste e sudoeste representa o curso do rio São Francisco. A seta no canto superior esquerdo indica o norte verdadeiro. (Fonte dos dados: IAE/CTA).

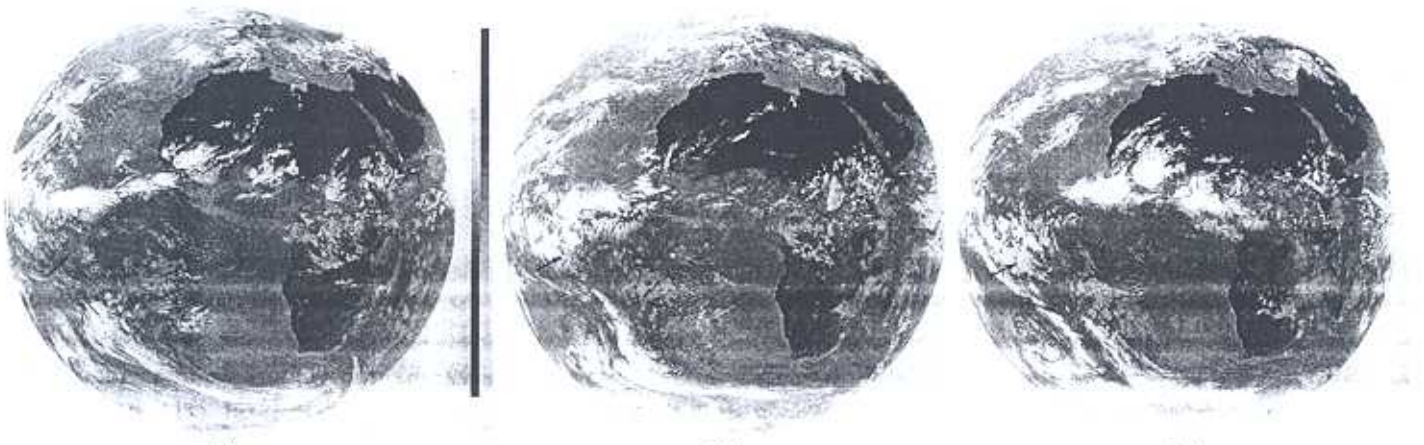
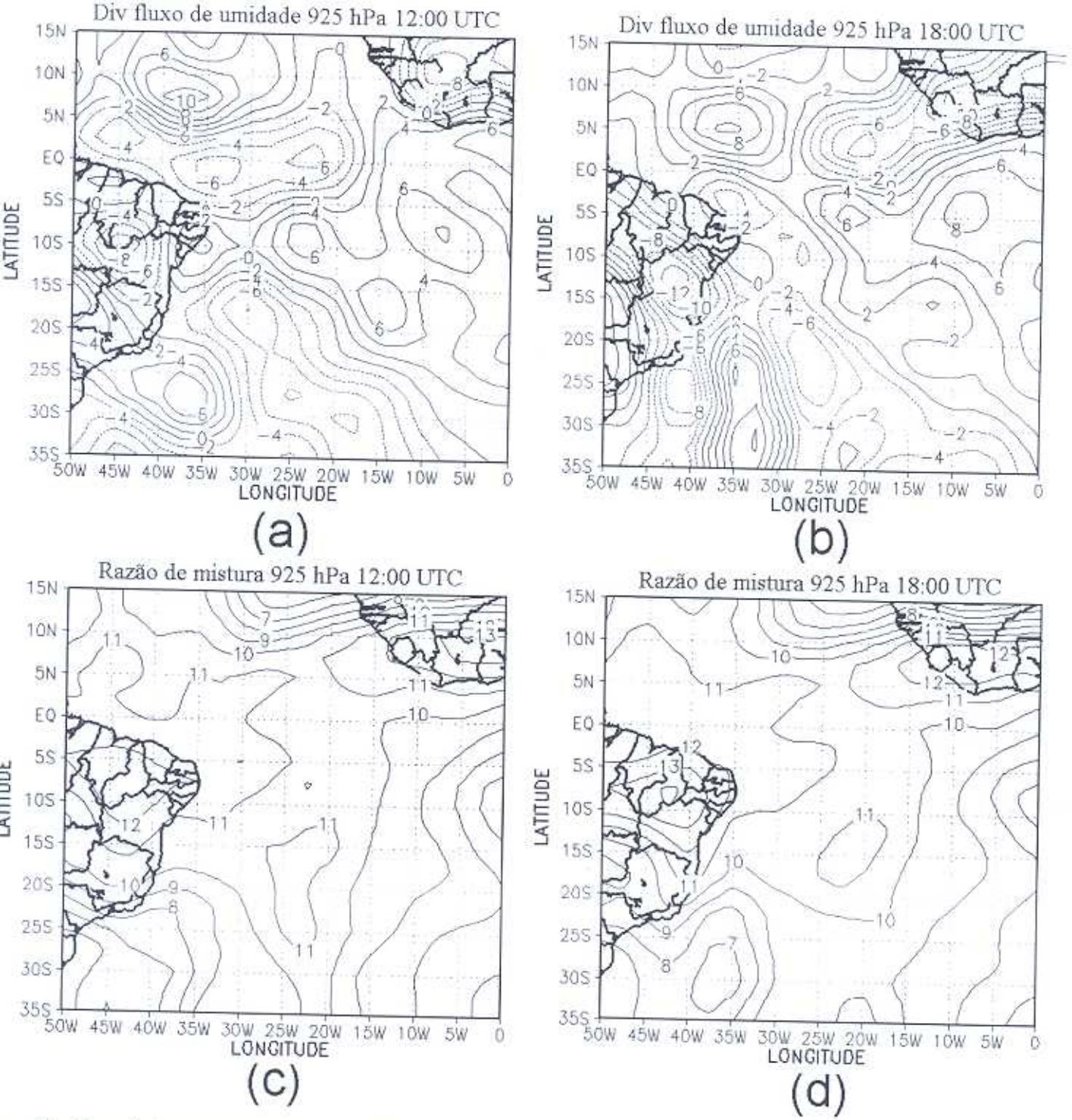


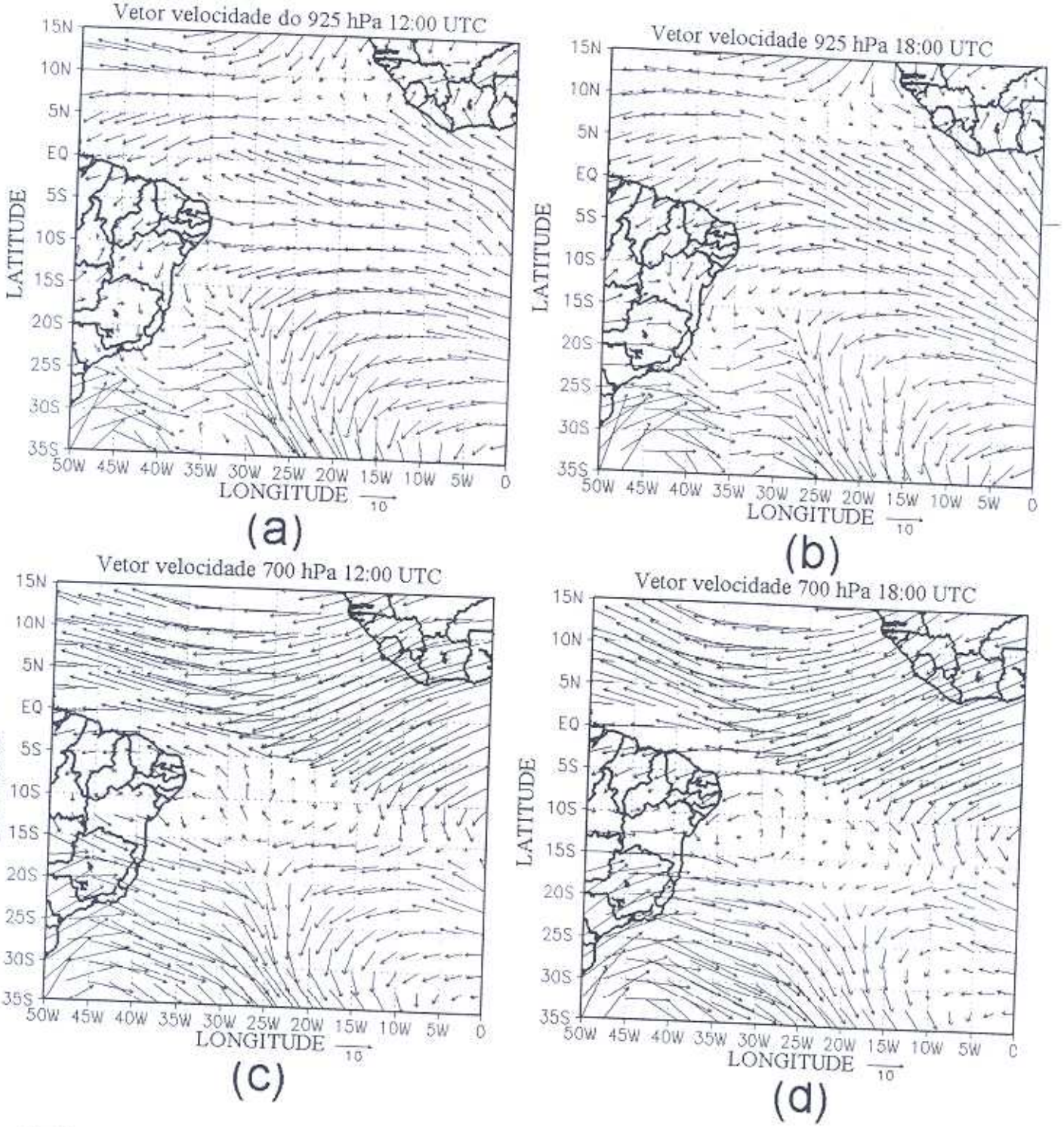
Figura 11: Imagens do satélite METEOSAT na banda do infravermelho obtidas nos dias 04, 05 e 06 de junho de 1985, ilustrando a nebulosidade provocada pelo sistema de origem frontal. A ponta da flecha situada no lado esquerdo da imagem assinala a localização aproximada de Petrolina-PE (9°24S', 40°29'W).



gura 12: Divergência horizontal do fluxo de umidade (10^{-5} gkg^{-1}s^{-1}) e razão de mistura (g/kg) para o dia 05 de junho de 1985 no vel de 925 hPa: (a) 12 UTC e (c) 18 UTC. As linhas contínuas (pontilhadas) correspondem a valores positivos (negativos).

convergência sobre a região Nordeste, com um deslocaento para leste. No campo da razão de mistura no nível de 5 hPa às 12 UTC (Fig 12c) têm-se valores relativamente is altos sobre a região Nordeste. Às 18 UTC (Fig. 12d) cleos com valores maiores que 13 g/kg evidenciam o auento no teor de umidade nos baixos níveis da atmosfera.

A Figura (13a) mostra o campo do vento às 12 UTC no nível de 925 hPa. O vento é de intensidade moderada a baixa sobre toda a região Nordeste. Às 18 UTC (Fig. 13b) os ventos encontram-se mais intensos com direção predominantemente de leste no norte da região. No nível de 700 hPa às 12 UTC (Fig. 13c) é evidente a circulação anticiclônica sobre a região. Às 18 UTC (Fig. 13d) essa circulação encontra-se deslocada para leste.



gura 13: Vetor velocidade do vento (ms^{-1}) para o dia 05 de abril de 1985 no nível de 925 e 700 hPa: (a)12 UTC e (b) 18 UTC. A cala do vento é representada pelo vetor abaixo de cada mapa.

5. Características de Mesoescala

A evolução da convecção entre os dias 04 e 06 de ho pode ser vista nos PPI's mostrados na Figura 14. Além aumento substancial no número de células pode-se notar também a intensificação e desenvolvimento significativo dos ecos. No dia 06 de junho tem-se a formação de duas bandas de ecos cuja dimensão horizontal corresponde a extensas áreas cobertas com precipitação. Os valores da $CAPE_{MAX}$ obtidos no período foram de 115, 1101 e 1532 J/kg, respectivamente.

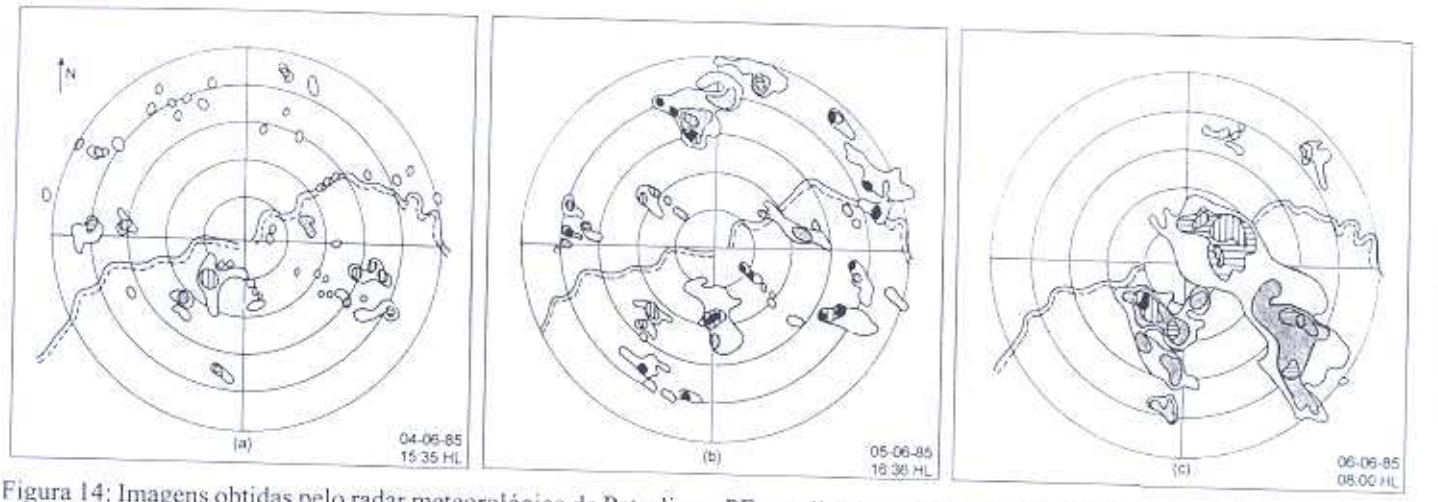


Figura 14: Imagens obtidas pelo radar meteorológico de Petrolina – PE nos dias 04, 05 e 06 de 1985 ilustrando a evolução da convecção decorrente da aproximação do sistema de origem frontal. A distância entre as circunferências concêntricas ao local do radar é de 50 km. A linha sinuosa situada nos quadrantes nordeste e sudoeste representa o curso do rio São Francisco. A seta no canto superior esquerdo indica o norte verdadeiro. (Fonte dos dados: IAE/CTA).

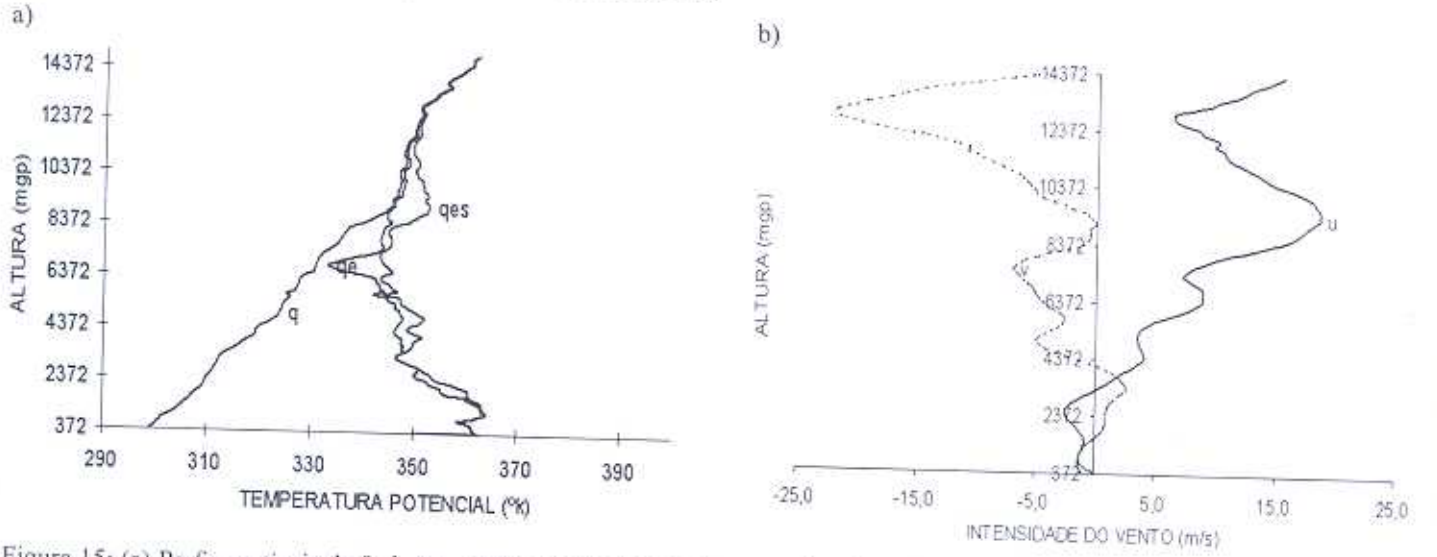


Figura 15: (a) Perfis verticais de θ, θ_e e θ_{es} obtidos da radiossondagem realizada em Petrolina no dia 05 de junho de 1985 às 12:02 UTC. (b) Perfis verticais das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento (ms^{-1}). Os valores positivos (negativos) de u representam componente de oeste (leste). Valores positivos (negativos) de v representam componente de sul (norte).

Perfis verticais de θ, θ_e e θ_{es} para o dia 05 de junho de 1985 as 12:02 UTC são mostrados na Figura 15. A grande proximidade das curvas de θ_e e θ_{es} evidencia o alto teor de umidade da atmosfera, desde a superfície até o nível de aproximadamente 500 hPa. Perfis verticais das componentes zonal e meridional do vento apresentados na Figura (15b) mostram ventos fracos entre a superfície e 500 hPa. Valores da ordem de 20 m/s da componente zonal são observados em torno de 300 hPa. A direção é bastante variável.

O valor de $CAPE_{MAX}$ de 1101 JKg^{-1} indica a possibilidade de atividade convectiva de natureza moderada. O número de Richardson de 413 é representativo de uma atmosfera favorável à ocorrência de tempestade multicelular. No período da manhã foram registrados poucos ecos com áreas da ordem de 100 km^2 e de intensidade fraca. Entretanto, no início da tarde tem-se o comportamento inverso. Os campos de precipitação mostram células intensas distribuídas em toda área de cobertura do radar. Os ecos identificados através dos PPIs e RHIs mostram a predominância de sistemas multicelulares. Algumas células atingiram profundidades superiores a 15 km.

O desenvolvimento e intensificação através da fusão entre células foram observados com freqüência no período da tarde. Na Figura 16a às 15:41 HL observa-se duas células situadas no azimute de 180° a 50 e 100 km do radar. Essas duas células se fundem formando um eco bem maior com núcleos intensos envolvidos por precipitação contínua (estratiforme) de intensidade moderada como pode ser visto no PPI das 16:20 HL (Fig. 16b). O RHI das 15:57 HL (Fig. 16c) mostra que as células deste sistema atingiram profundidades de 15 e 20 Km respectivamente. Outro sistema situado próximo ao azimute de 0° mais extenso e com maior intensidade exibe vários núcleos intensos.

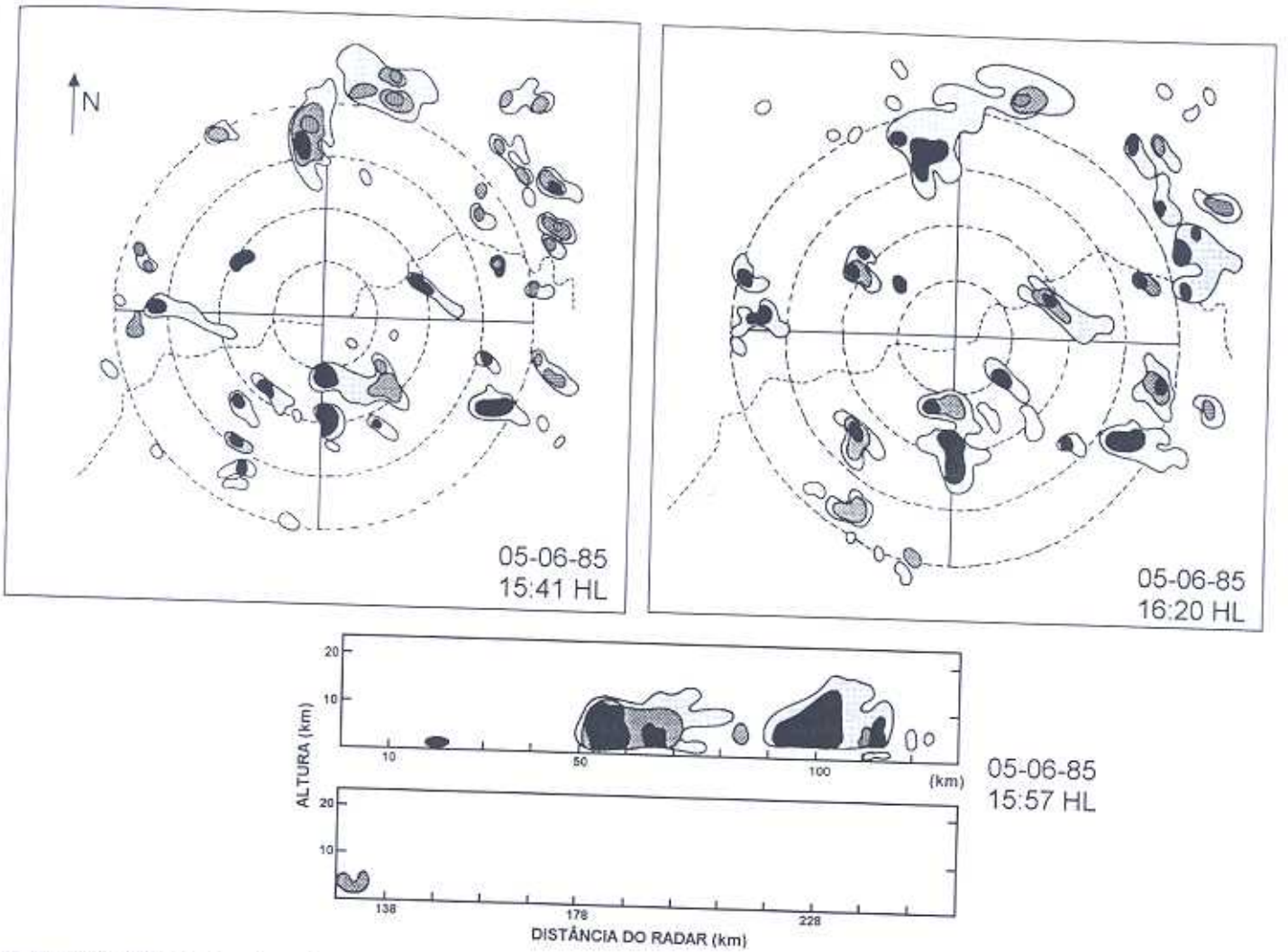


Figura 16: (a) PPI obtido pelo radar meteorológico banda-C de Petrolina – PE às 15:41 HL do dia 05 de junho de 1985. (b) PPI obtido às 16:20 HL. (c) RHI obtido às 15:57 HL do mesmo dia ao longo do azimute de 180°, representado pela linha BB' em (b). (Fonte dos dados: IAE/CTA).

4. SUMÁRIO E CONCLUSÕES

Nos casos analisados neste trabalho, apenas no dia 05 de junho o valor da CAPE foi inferior a 2000 J/kg. No entanto, convecção profunda e sistemas convectivos intensos foram detectados independentes desta condição termodinâmica. Este resultado indica que fatores dinâmicos foram também fundamentais nas situações avaliadas. Valores de CAPE pouco acima de 1000 J/kg pode ser um forte indicativo de atividade convectiva intensa e em situações semelhantes deve-se considerar fatores de grande escala na análise de tempo significativo.

A intensificação e desenvolvimento dos ecos observados ocorreram basicamente devido ao processo de fusão entre duas ou mais células. Os sistemas resultantes deste processo têm dimensões horizontais maiores que as células originais e perduraram por mais de duas horas.

O aquecimento radiativo representa um fator importante no processo de formação e intensificação dos sistemas analisados. Entretanto, os mecanismos dinâmicos parecem ser responsáveis pela manutenção destes sistemas;

A alta freqüência de células do tipo ordinária detectada no dia 01 é possivelmente uma decorrência do fraco cisalhamento do vento nos níveis médios da atmosfera observado neste dia. O alto teor de umidade nos baixos níveis, associado com uma estrutura termodinamicamente instável e convergência de umidade em grande escala explica a ocorrência de sistemas profundos na área do radar;

O cisalhamento de intensidade moderada (12 ms^{-1}) na camada entre a superfície e 550 hPa explica em parte os sistemas multicelulares com maior durabilidade observados no dia 12 de abril. Cisalhamento vertical do vento contribui com a formação de correntes ascendentes e descendentes e, portanto, com o desenvolvimento e a manutenção dos sistemas precipitantes;

A forte atividade convectiva e sistemas precipitantes profundos observados no dia 05 de junho tiveram origem num sistema frontal que atingiu o sul do Nordeste e modificou substancialmente as condições dinâmicas e termodinâmicas da região (Souza, 2003). O aumento do teor de umidade nos baixos níveis e o enfraquecimento dos alísios de leste-sudeste favoreceu a ocorrência de convecção profunda na região de estudo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, I. P; Estudo da variabilidade da precipitação na região de Petrolina. Relatório Técnico do ECA – 01/79, IAE-CTA. São José dos Campos. São Paulo. 1979

ARAÚJO, H. A., Padrões de ecos de radar meteorológico no semi-árido brasileiro e condições atmosféricas associadas. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, PB, 1996.

AUGUSTINE, J. A; CARACENA, F. Lower-tropospheric precursors to nocturnal MCS development over the central United States. Wea. Forecast, 9, 116-135, 1994.

BLUESTEIN, H. B. Synoptic Dynamic Meteorology in Midlatituds. New York: Oxford University Press, 1993. v2 Observations and Theory of Weather System, p. 426-455.

BOLTON, D. The computation of equivalent potential temperature. Mon. Wea. Rev. V. 108, pp.1046-1053, 1980.

CHESF – Companhia Hidrelétrica do São Francisco. Relatório da comissão interministerial de estudos para o controle das enchentes do rio São Francisco. 1986.

CORREIA, M. F., Diagnóstico via radar dos sistemas precipitantes do semi-árido brasileiro: O evento de 1985. 1989. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, USP São Paulo.

FARAH, C. e JUSTO, M.L.V., Estudo das Inversões Térmicas da Atmosfera em Petrolina e seus Efeitos na Quantidade de Chuva Caída. Relatório Técnico. ECA-05/79. IAE - CTA. São José dos Campos. São Paulo-SP, 58p. 1979.

KREIGHTON, 1996, (Disponível no endereço http://hpccsun.unl.edu/nebraska/airmass.html).

MELLO, N. G. S., SAKAMOTO, M. S., TORSANI, J. A., Estudo de Caso de um Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) Observado no Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Campos de Jordão - SP, v. 2, p. 887-890, novembro, 1996.

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospherics processes. Bull. Amer. Meteor. Soc. 56, p: 529-530, 1975.

RAMOS, R. P. L., Precipitation characteristics in the northeast Brazil dry region. J. Geophysics. Res. v. 80, pp. 1965-1978, 1975.

SILVA ARAGÃO, M. R., CORREIA, M. F, SOBRAL, Z. Vento à superfície e chuva em anos contrastantes no Submédio São Francisco. Boletim Climatológico. Presidente Prudente – SP, ano 2, n. 3, p. 213-217, julho 1997.

SILVA ARAGÃO, M. R; CORREIA, M. F.; ARAÚJO, H. A. Characteristic of C-Band meteorological radar echoes at Petrolina, Notheast Brazil. International Journal of Climatology, v.20, p. 279-298, 2000.

SOUZA, P. S. Estudo da Atuação de um Sistema de Latitudes Médias no Semi-árido do Nordeste do Brasil: Aspectos de Grande e Mesoescala. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. UFCG. Campina Grande-PB, 2003.

UVO, C.R.B. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a Precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. INPE. São Paulo-SP, 1989.

ZAWADZKI, I., RO, I. Correlation between maximum rate of precipitation and mesoscale parameters. Journal of Applied Meteorology, v.17, 1978.

ZAWADZKI, I., E., TORLARCHI, SARVAGEAN, R. The relationship between mesoscale thermodynamic variables and convective precipitation. J. Atmos. Sci., v. 38, p – 1535-1540, 1981.

WEISMAN, L., KLEMP, J. B. Characteristics of isolated convective storms. Mesoescale Meteorology and Forecasting. American Meteorology Society. p-331-358, 1986.