

### 3.1.4.3. Índices de Instabilidade

Para avaliar a capacidade potencial da atmosfera para o desenvolvimento de tempestades, foram avaliados a partir das radiossondagens os seguintes Índices de Instabilidade: CAPE, CINE, K, Showalter e Total-Totals. Os valores limites destes índices, utilizados neste trabalho, são aqueles estabelecidos para regiões de latitudes médias do Hemisfério Norte, porque não foram encontradas publicações com valores adaptados para as regiões tropicais. Uma vez que desenvolver uma metodologia capaz de quantificar estes índices para as regiões de latitudes baixas não era objetivo deste trabalho e, ao mesmo tempo, como os estudos realizados para estas regiões utilizam os valores existentes na literatura, optou-se por continuar as análises, tendo em mente que os resultados poderiam não ser muito coerentes com a estrutura de uma LIC.

#### 3.1.4.3.1. Índice CAPE

O valor de CAPE, também conhecido como energia de fluatibilidade, corresponde à área entre a curva de temperatura do ambiente (dada pela sondagem) e a curva da adiabática saturada, do Nível de Convecção Espontânea (NCE) até o Nível de Equilíbrio (NE), conforme ilustra a FIGURA 18. O NCE é o nível em que a temperatura da parcela torna-se maior que a do ambiente, o que induz movimentos ascendentes espontâneos da parcela. O NE é o nível, perto do topo da troposfera, em que a parcela tem a mesma temperatura que a do ambiente e, portanto, não continua em seu movimento ascendente (representa o nível do topo das nuvens).

Quanto maior o CAPE, maior é a diferença entre a taxa de variação vertical de temperatura do ambiente e da parcela, o que implica em um movimento de ascensão da parcela devido à sua fluatibilidade. O valor do CAPE é utilizado na verificação das condições de instabilidade da atmosfera provocada por processos convectivos.

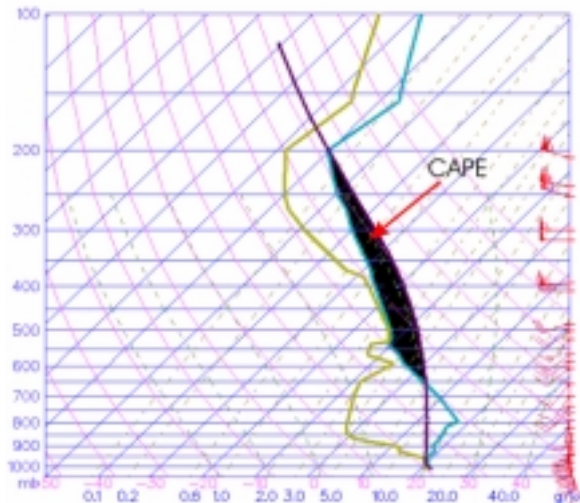


FIGURA 18 – Representação gráfica da área positiva (CAPE) de uma sondagem no Diagrama Skew T- Log P.

O valor do CAPE pode ser calculado a partir da equação:

$$CAPE = \int_{z|NCE}^{z|NE} g \frac{\div \chi_e}{\chi_{es}} dz \quad (1)$$

onde:

NE = nível de equilíbrio (térmico) [m];

NCE = nível de convecção espontânea [m];

$g$  | aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ];

$\div \chi_e$  | diferença entre a temperatura potencial equivalente da parcela em superfície e a temperatura potencial equivalente saturada do ambiente, em cada nível [ $^{\circ}C$ ], dado pela equação:

$$\div \chi_e = \chi_{ep} - \chi_{es}$$

$\chi_{ep}$  | temperatura potencial equivalente da parcela em superfície [ $^{\circ}C$ ],

$\chi_{es}$  | temperatura potencial equivalente saturada do ambiente, dada pela sondagem [ $^{\circ}C$ ].

A TABELA 3 apresenta os valores limites de CAPE, indicando o potencial para o desenvolvimento de tempestades.

TABELA 3 – Valores críticos de CAPE. (<http://twister.sbs.ohio-state.edu>).

Valores de CAPE [J/kg]	Interpretação
0	Estável
0 – 1000	Pouco Instável
1000 – 2500	Moderadamente Instável
2500 – 3500	Muito Instável
> 3500	Extremamente Instável

### 3.1.4.3.2. Índice CINE

O índice CINE é utilizado para estimar a capacidade da atmosfera em inibir o desenvolvimento de tempestades por processos convectivos podendo, então, ser considerado como uma medida de quão desfavoráveis estão as condições atmosféricas para o desenvolvimento de tempestades. O CINE representa a quantidade de energia necessária para levantar uma parcela, por meio de algum mecanismo, para iniciar o desenvolvimento de tempestades. Em um diagrama termodinâmico, o valor de CINE corresponde à área hachurada, como mostra a FIGURA 19.

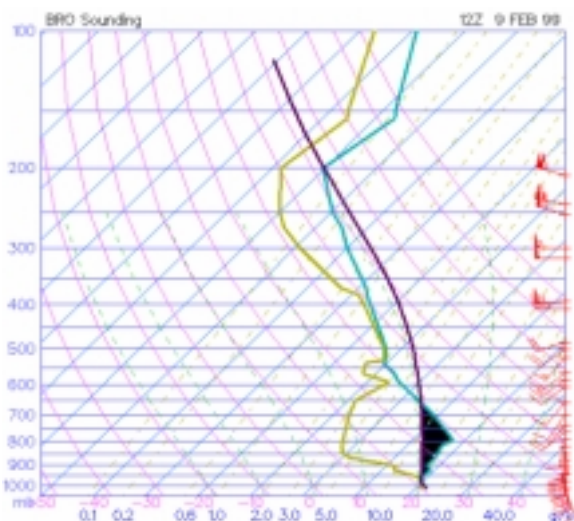


FIGURA 19 – Representação gráfica da área negativa (CINE) de uma sondagem no Diagrama Termodinâmico Skew T- Log P.

O CINE pode ser calculado pela equação:

$$CINE = g \int_{z=0}^{z=NCE} \left( \frac{T_{vp}}{T_{va}} - \frac{4}{3} \right) dz \quad (2)$$

onde:

$g$  | aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ];

$T_{vp}$  | temperatura virtual da parcela [ $^{\circ}C$ ];

$T_{va}$  | temperatura virtual do ambiente [ $^{\circ}C$ ];

NCE = nível de convecção espontânea [m].

A TABELA 4 apresenta os valores limites de CINE.

TABELA 4 – Valores críticos de CINE. (<http://twister.sbs.ohio-state.edu>).

Valores de CINE [J/kg]	Interpretação
< 15	Nuvens <i>Cumulus</i>
15 – 50	Possibilidade de tempestades fortes
50 – 150	Fortes tempestades
>200	Sem desenvolvimento de tempestades

Em condições favoráveis para o desenvolvimento de tempestades, o CINE não deve ser nem muito pequeno nem muito grande. Valores entre 50 e 150 J/kg são ideais. Se os valores do CINE forem muito elevados (> 200 J/kg), a energia requerida para elevar a parcela pode não ser atingida e nenhum desenvolvimento de tempestades pode ocorrer.

### 3.1.4.3.3. Índice K

Este é mais um índice utilizado para investigar a possibilidade de formação de tempestades na atmosfera. Apresenta considerações sobre os parâmetros abaixo, de acordo com a metodologia de Whiting:

$J$  | variação vertical da temperatura;

$J$  | conteúdo de umidade da camada mais baixa;

$J$  | extensão vertical da camada úmida;

- J convergência e divergência de massa;
- J vorticidade relativa.

No método de Whiting, a vorticidade relativa foi desprezada pela sua complexidade e porque este autor considerou a convergência suficiente para os propósitos analisados. Assim, Whiting utilizou os três primeiros parâmetros como índice de modificação do potencial de tempestades, através da seguinte equação:

$$K = \left[ \frac{T_{850} - T_{500}}{T_{d850} - T_{d700}} \right]^2 \left[ \frac{T_{700} - T_{d700}}{T_{d850} - T_{d700}} \right] \quad (3)$$

Onde:

$\left[ \frac{T_{850} - T_{500}}{T_{d850} - T_{d700}} \right]$  é a variação vertical da temperatura (T), obtida pela diferença de temperaturas entre os níveis 850 e 500hPa;

$T_{d850}$  é a temperatura do ponto de orvalho ( $T_d$ ) em 850hPa;

$\left[ \frac{T_{700} - T_{d700}}{T_{d850} - T_{d700}} \right]$  é a depressão de temperatura em 700hPa.

A TABELA 5 apresenta os valores críticos para o Índice K.

TABELA 5 – Valores críticos do Índice K. (<http://twister.sbs.ohio-state.edu>).

Índice K [°C]	Interpretação
20 – 25	Formação de Cb isolados
25 – 30	Formação de Cb muito esparsos
30 – 35	Formação de Cb esparsos
> 35	Formação de Cb numerosos

#### 3.1.4.3.4. Índice Showalter

O Índice Showalter é dado pela diferença entre a temperatura do ambiente em 500hPa ( $T_{500}$ ) e a temperatura que uma parcela teria se fosse elevada, por uma adiabática seca, do nível 850 hPa até o NCL e então trazida pela adiabática saturada até o nível de 500hPa ( $T_{500p}$ ).

Este índice é calculado pela equação:

$$SHOW = \left( \frac{T_{850}}{T_{500}} - 4 \right) \left( \frac{T_{d850}}{T_{500}} - 0 \right) \quad (4)$$

O índice Showalter é mais um importante índice para a avaliação das condições de instabilidade atmosférica, pois também denota a capacidade potencial para o desenvolvimento de tempestades. A TABELA 6 apresenta os valores críticos para este índice.

TABELA 6 – Valores críticos para o Índice Showalter. (<http://twister.sbs.ohio-state.edu/>).

Índice Showalter [°C]	Interpretação
> 4	Tempo estável
+3 a +1	Possibilidade de tempestade
+1 a -2	Grande possibilidade de tempestade
-2 a -3	Muita instabilidade / tempestade com trovoadas
< -5	Extremamente instável

### 3.1.4.3.5. Índice Total-Totals

Este índice de instabilidade também pode ser utilizado para determinar a possibilidade de ocorrência de tempestades em uma determinada região, utilizando os dados obtidos de radiossondagens. É obtido pela equação:

$$TOTL = \left( \frac{T_{850}}{T_{500}} - 4 \right) \left( \frac{T_{d850}}{T_{500}} - 0 \right) \quad (5)$$

Onde:

$T_{850}$  | temperatura do ar no nível de 850hPa [°C];

$T_{500}$  | temperatura do ar no nível de 500hPa [°C];

$T_{d850}$  | temperatura do ponto de orvalho no nível de 850hPa [°C].

A TABELA 7 apresenta os valores críticos do Índice Total-Totals.

TABELA 7 – Valores críticos do Índice Total-Totals. (<http://twister.sbs.ohio-state.edu/>).

Índice Total-Totals [°C]	Interpretação
< 43	Tempo estável
Ø44	Tempestades esparsas
Ø50	Tempestades esparsas e severas
Ø56	Tempestades numerosas severas

Os valores críticos de todos os índices de instabilidade descritos acima serão comparados com os valores calculados, com os dados das radiossondagens, para avaliar o potencial atmosférico para o desenvolvimento de atividade convectiva na região, associada à ocorrência da LIC.

#### 3.1.4.4. Perfis Termodinâmicos e Cinemáticos

Estes perfis verticais foram obtidos com o programa desenvolvido por Marcos Longo (DCA/IAG/USP) que interpola os dados das radiossondagens em níveis regulares de pressão (ou de altura) em linguagem FORTRAN. Neste trabalho, a interpolação foi feita de 5 em 5 hPa, para cada sondagem. Este programa cria arquivos binários, “.ctl” para cada radiossondagem (contém as informações disponíveis no arquivo de saída) e um “.ctl template” (binário, contém os campos gerados pelo programa), que podem ser visualizados no Programa GrADS, em plataforma LINUX.

O arquivo de saída deste programa possui os campos das seguintes variáveis meteorológicas:

- J geopotencial;
- J temperatura do ar;
- J temperatura do ponto de orvalho;
- J umidade relativa;
- J componente zonal do vento;
- J componente meridional do vento;
- J temperatura potencial;

- J temperatura potencial equivalente;
- J temperatura potencial equivalente saturada;
- J pressão de vapor;
- J pressão de vapor de saturação;
- J razão de mistura;
- J razão de mistura saturada;
- J temperatura do NCL (Nível de Condensação por Levantamento);
- J pressão do NCL.

A partir das informações geradas pelo programa, foram confeccionados perfis verticais termodinâmicos e cinemáticos.

### **3.2. Imagens de Satélite**

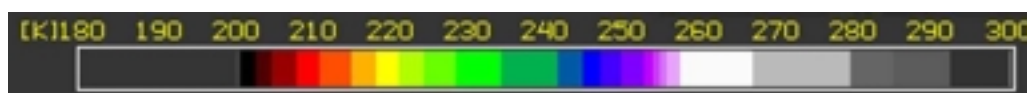
As imagens de satélite utilizadas neste trabalho, foram as do satélite geoestacionário GOES-8, realçadas no canal infravermelho, obtidas de duas fontes: do site <http://orbit35i.nesdis.noaa.gov/arad/ht/ff/gilberto.html> e do Laboratório MASTER/IAG/USP. Estas últimas são referentes a um tratamento diferenciado das imagens de satélite, especialmente desenvolvido para os Projetos DESMATA e MilênioLBA.

As duas fontes de imagens de satélite, citadas acima, disponibilizaram imagens a cada meia hora, aproximadamente. Entretanto, em ambas houve falhas na seqüência das imagens. Assim, optou-se por usar os dois sites para aumentar o número de imagens, principalmente em alguns horários que se mostraram ser de extrema importância para a avaliação da LIC selecionada, porque os horários das imagens destes dois sites nem sempre eram coincidentes. Tendo em vista o curto período de vida de uma LIC (em torno de 9 horas, Cohen 1989) é extremamente importante que a seqüência de imagens esteja completa para que o acompanhamento desta não seja prejudicado. Ainda, devido a dificuldades encontradas na imprecisão do horário final do ciclo de vida da LIC selecionada, foi utilizado o critério de Laing e Frisch (1997) que é o seguinte: o horário de término foi considerado como sendo aquele relativo



ao horário intermediário entre duas imagens consecutivas, onde a penúltima imagem ainda mostra a LIC e a última, não.

As imagens de satélite de ambas as fontes apresentam as temperaturas do topo das nuvens realçadas de forma diferenciada, de acordo com suas respectivas escalas de cores, que caracterizam a intensidade do sistema analisado. As escalas de cores das duas fontes são apresentadas na FIGURA 20, abaixo.



(a) <http://orbit35i.nesdis.noaa.gov/arad/ht/ff/gilberto.html>



(b) Laboratório MASTER/IAG/USP

FIGURA 20 – Escalas de cores relativas aos tratamentos das imagens de satélite pela (a) Agência NOAA/Nesdis e pelo (b) Laboratório MASTER/IAG/USP.

### 3.3. Modelo ETA

Para verificar as condições de instabilidade da atmosfera associada com a ocorrência da LIC selecionada, foi utilizado o campo da variável Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE) gerada pelo modelo de previsão numérica do tempo ETA, processado operacionalmente no CPTEC/INPE. Este modelo foi instalado no CPTEC em 1996 com a finalidade de complementar a previsão de tempo, usando modelagem, que vem sendo realizada desde o início de 1995, com o modelo de circulação geral da atmosfera. É um modelo hidrostático que cobre a maior parte da América do Sul e oceanos adjacentes (Black, 1994). O Modelo ETA apresenta uma resolução horizontal de 40km e resolução vertical de 38 camadas. Seu processamento é realizado duas vezes ao dia, uma com condição inicial às 00UTC e outra às 12UTC. As condições iniciais são provenientes da análise do modelo de grande escala do *National*

*Center for Environment Prediction* (NCEP) e as condições de contorno são provenientes das previsões do modelo global do CPTEC, com atualização a cada 6 horas. Neste trabalho, foi utilizada somente a variável CAPE pelo fato desta não fazer parte do elenco de variáveis disponibilizadas pelo modelo MM5. Além disso, as saídas de 6 em 6 horas não possibilitam uma análise precisa da LIC, tendo em vista a sua curta duração.

Os campos gerados pelo Modelo ETA nos horários das 00 e das 12 UTC correspondem a “análises”, enquanto que aqueles gerados nos horários das 06 e 18 UTC correspondem a “previsões”, obtidos a partir das “análises” das 00 e 12 UTC, respectivamente. Os termos “análise” e “previsão” estão entre aspas, porque na realidade, em se tratando de campos oriundos do processamento de um modelo físico atmosférico, todos os campos correspondem a simulações.

A grade horizontal utilizada envolveu as latitudes de 10°N a 10°S e as longitudes de 70°W a 30°W, mostrada na FIGURA 24.

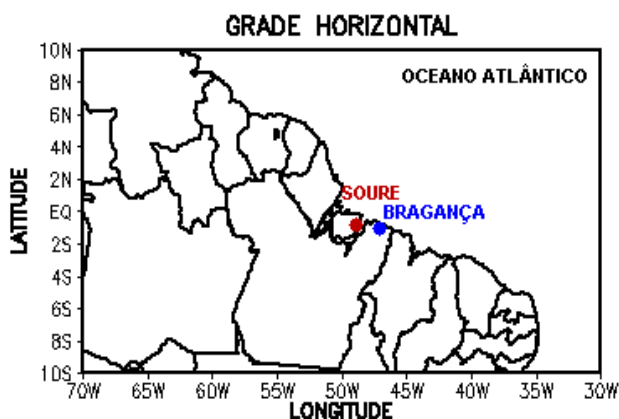


FIGURA 21 – Grade horizontal com resolução espacial de 40km.

### 3.4. Descrição do Modelo de Mesoescala MM5

#### 3.4.1. Generalidades

O modelo de mesoescala MM5 foi desenvolvido pela *Pennsylvania State University* (PSU) com o suporte do *National Center for Atmosphere Research* (NCAR). É um modelo de área limitada e destinado à realização de previsão de tempo a partir de simulações de circulações atmosféricas regional ou de mesoescala. Baseado no modelo originalmente desenvolvido por Anthes e Warner (1978), o modelo MM5 vem sendo continuamente modificado pela PSU e pelo NCAR.

Com as alterações implementadas na versão original do modelo, ele apresenta atualmente a versão 3.0 do MM5, NCAR – 2002, da quinta geração do modelo de mesoescala, disponível a domínio público no endereço <http://www.mmm.ucar.edu>.

As características fundamentais e as componentes que constituem o sistema de modelagem MM5 são:

- J o sistema de modelagem permite a re-locação global, ou seja, selecionar domínios de integração (áreas e sub-áreas) em qualquer região do globo terrestre;

- J possui a flexibilidade e a capacidade de pré-estabelecer múltiplos aninhamentos de domínios, possibilitando configurar o processamento desde a escala global até a escala das nuvens;

- J o modelo pode ser processado em dois modos de aninhamentos que são: um modelo de grade menor governado pela grade maior, e um outro que permite múltiplos aninhamentos e aninhamentos móveis;

- J o modelo permite a alimentação de dados em tempo real, utilizando rotinas de observações tanto de ar superior quanto de superfície;

- J o modelo permite também o acoplamento com modelos globais ou regionais, empregando o uso de dados como condições iniciais para as análises objetivas ou de contorno;

- J o MM5 é um modelo não hidrostático.

### 3.4.2. Dados de entrada

O modelo MM5 recebe, como dados de entrada, variáveis meteorológicas que podem ser de origens observacionais convencionais de superfície e de altitude, saídas de modelos numéricos e também produtos obtidos por meio de informações de satélites meteorológicos.

Para as simulações realizadas nesta pesquisa, foram utilizados dados do NCEP/NCAR REANALYSIS. Este conjunto de dados consiste em uma análise global que começa em 1948, utilizando um único sistema de análise para dados fixos. Os dados do NCEP/NCAR REANALYSIS apresentam uma resolução horizontal de 2,5° de latitude e 2,5° de longitude. As análises estão disponíveis a cada 6 horas a domínio público no endereço <http://www.cdc.noaa.gov>.

### 3.4.3. Parametrizações

O modelo MM5 permite a inclusão de variadas configurações físicas por meio de um processo relativamente simples de seleção, no preparo do programa a ser compilado e processado. A seguir, é dada uma explicação sucinta das parametrizações utilizadas neste trabalho.

Convecção profunda: a parametrização de nuvens do tipo *Cumulus* pode ser ou não incluída, e é determinada por meio de uma das opções de seleção na configuração inicial. Dentre os diversos esquemas, o MM5 possui o esquema de Grell (Grell et al., 1994). Este esquema é baseado na taxa de desestabilização (energia potencial disponível) ou de quase-equilíbrio. É um esquema simples de uma nuvem com fluxos ascendentes e descendentes (com movimentos compensatórios de subsidência nas vizinhanças da nuvem) que determina o perfil de aquecimento e de umidificação. Ele é adequado para grades com espaçamento de 10 a 30km entre os pontos. O modelo considera, também, os efeitos do cisalhamento do vento na eficiência da precipitação.

Convecção rasa: o estabelecimento desta opção no modelo MM5 permite considerar as nuvens que não precipitam (Seaman et al., 1996; Deng, 1999; Deng et al. 1999 e 2000). O processo é baseado nos esquemas de Grell e Arakawa-Schubbert e na suposição de equilíbrio entre a intensidade da chuva e a forçante de sub-grade da camada limite planetária. O raio da nuvem é considerado da profundidade da camada limite planetária e da espessura da nuvem.

Camada limite planetária: a opção utilizada foi a ETA PBL. Esta opção é baseada no esquema de Mellor-Yamada (Janjic, 1990 e 1994), que é o mesmo esquema que vem sendo utilizado no modelo ETA e no modelo RAMS Pielke et al. (1992). Mellor-Yamada é a denominação desta parametrização no modelo RAMS, enquanto que, no modelo MM5, esta é denominada “ETA PBL”.

Microfísica: a opção utilizada é baseada em Schultz (1995). O esquema de Schultz é altamente eficiente. Apresenta um processamento rápido e simples para sistemas de previsão de tempo real. Esta opção contém gelo e processos de flocos de neve/granizo.

Radiação: o esquema CCM2 considera faixas espectrais múltiplas em ondas longas e curtas. Este esquema fornece também fluxos de calor a superfície (Hack et al., 1993).

Solo: o esquema OSU/ETA Land-Surface Model é capaz de fazer a previsão de umidade e temperatura do solo em 4 camadas (10, 30, 60 e 100cm de profundidade). Ele faz uso da vegetação e do tipo de solo (Chen e Dundhia, 2001).

As parametrizações utilizadas no processamento do modelo MM5, descritas acima, são as que apresentaram os melhores resultados para a região em questão, conforme estudos realizados por Gandu et al. (2003), que as identificou utilizando o modelo RAMS. Para selecionar as opções de cada parametrização, o critério adotado consistiu em adaptar as opções

estabelecidas por este autor (para o modelo RAMS) para as opções correspondentes no modelo MM5, conforme mostra a TABELA 8.

TABELA 8 – Parametrizações equivalentes entre os modelos MM5 e RAMS.

Parametrizações	MM5	RAMS
Convecção profunda	Grell	Grell
Convecção rasa	Cumulus rasos	não possui
Camada limite planetária	ETA PBL	Mellor-Yamada
Microfísica	Schultz	Nível 3
Radiação	CCM2	Chen e Cotton
Solo	OSU/ETA LSM	Herogênea

Pode-se observar na TABELA 8 que o modelo RAMS não apresenta a parametrização de *Cumulus* rasos, que foi incluída nas simulações com modelo MM5. A inclusão desta parametrização é adequada para o caso da LIC analisada neste trabalho, pois trata-se de uma LIC que não apresentou quantidade significativa de chuva na região analisada.

Os resultados do modelo foram visualizados e analisados usando o pacote gráfico GrADS (*Grid Analysis and Display Systems*), desenvolvido por pesquisadores do *Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies* (COLA) da Universidade de Maryland (EUA). Este pacote é específico para a visualização e análise de dados em pontos de grade. Implementa um modelo de dados em 4 dimensões, que são: latitude, longitude, nível e tempo. A técnica de armazenamento possibilita a comparação de grupos de dados diferentes, pois permite o correto ajuste espacial na sobreposição dos mesmos. O GrADS pode ser utilizado em plataforma UNIX, LINUX ou Windows, sendo o mesmo de domínio público.

### 3.4.4. Descrição das Simulações

O modelo MM5 permite executar simulações com início à 00UTC e às 12UTC. As simulações deste trabalho foram realizadas conforme mostra a TABELA 9.

TABELA 9 - Simulações com o modelo MM5 para o estudo da LIC selecionada.

INICIO	
dia	hora
17 de abril de 2002	12UTC
18 de abril de 2002	00UTC

Os domínios utilizados com as respectivas resoluções horizontal e vertical, bem como o passo de tempo de integração, são apresentados abaixo na TABELA 10. Para a análise da LIC foram utilizadas duas grades, denominadas de domínio 1 ( $D_1$ ) e domínio 2 ( $D_2$ ).

TABELA 10 – Configurações do MM5 para a LIC selecionada.

DOMÍNIO DO MM5	$D_1$	$D_2$
LIC	17-18 de abril de 2002	17-18 de abril de 2002
Resolução Horizontal (km)	40km	10km
Pontos em x	111	278
Pontos em y	56	78
Pontos em z	23	23
Passo de Tempo (s)	110	25

A FIGURA 21, mostrada na seção 3.3., ilustrou o domínio 1 ( $D_1$ ) que é idêntico ao domínio utilizado para apresentar o CAPE (obtido com o modelo ETA, CPTEC/INPE). O domínio 1 corresponde à uma área maior, abrangendo toda a extensão da LIC selecionada e áreas adjacentes à ela. A FIGURA 22 mostra o domínio 2 ( $D_2$ ) que apresenta uma melhor resolução espacial, é restrito à região onde a LIC selecionada ocorreu.

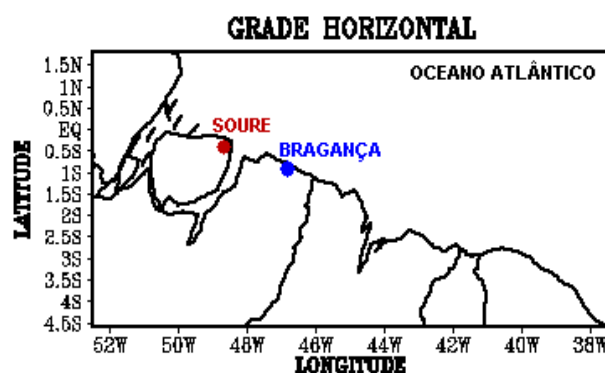


FIGURA 22 – Grade horizontal do domínio 2 ( $D_2$ ) para a LIC selecionada, com resolução espacial de 10km.

### 3.4.5. Variáveis Utilizadas

Neste trabalho foram utilizados os campos das variáveis apresentadas na TABELA 11.

TABELA 11 – Variáveis e níveis utilizados para o estudo da LIC, relativos aos domínios  $D_1$  e  $D_2$ .

$D_1$		$D_2$
níveis	variáveis	variáveis
Superfície	Vento horizontal (m/s)	Vento horizontal (m/s)
	Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )
	Razão de misturas (g/kg)	Razão de mistura (g/kg)
		Água Precipitável (mm)
		Precipitação convectiva acumulada (mm)
850hPa	Vento horizontal (m/s)	Vento horizontal (m/s)

A variável água precipitável foi utilizada por ser importante conhecer a quantidade de vapor d'água contida no ar atmosférico, no local de estudo. Chama-se água precipitável a quantidade (teórica) de precipitação que seria esperada se todo o vapor d'água contido em uma coluna atmosférica de área unitária em superfície condensasse e precipitasse.



## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Inicialmente será mostrado o levantamento completo das LI identificadas durante o período de realização do Experimento ECPC. Em seguida, o estudo abordará as condições meteorológicas observadas em superfície. A avaliação do ciclo de vida, das condições meteorológicas de altitude e dos campos de mesoescala será restrita à uma LIC selecionada.

### **4.1. Linhas de Instabilidade Durante o Experimento ECPC**

Durante a realização do Experimento ECPC, foram identificados diversos tipos de sistemas atmosféricos na região leste do Estado do Pará. Dentre eles, destacaram-se as LI tropicais formadas ao longo da costa norte da América do Sul. A maioria delas apresentou intensidade de fraca a moderada (Climanálise, 2002).

Na TABELA 12 estão listadas todas as LI tropicais, identificadas nas imagens de satélite, que passaram ou que se formaram sobre a região leste do Estado do Pará. Para cada LI tropical, são indicadas: data de ocorrência e local de formação.

TABELA 12 – Lista das LI tropicais que ocorreram durante a realização do Experimento ECPC (08 a 22 de abril de 2002) na região leste do Estado do Pará. (Fonte: Braga, 2002).

Caso Nº	Dia Início-fim	LI tropicais	Local de formação
1	09-10	LIC	nordeste dos Estados do Pará e Maranhão
2	10-11	LIP1	litoral do Estado do Pará
3	14-15	LIP2	Suriname/Estado do Pará
4	17-18	LIC	do Suriname até o Ceará
5	18-19	LIC	da Guiana até o Maranhão
6	19-20	LIC	Guiana Francesa até o Piauí
7	20-21	LIC	desde a Guiana até o Ceará
8	21-22	LIP2	Venezuela até o Piauí
9	22-23	LIP2	Venezuela até o Maranhão

Alguns aspectos importantes a serem notados nas informações dispostas na TABELA 12 são os seguintes:

J nota-se que nos 15 dias de duração do ECPC foi possível identificar, pelas imagens de satélite disponíveis, 9 casos de LI tropicais;

J pode-se observar que, dos 9 casos de LI tropicais identificados, 56% foram de LIC, 33% de LIP2 e apenas 11% foram de LIP1. Este resultado é semelhante ao encontrado por Cohen (1989). Esta pesquisadora encontrou valores de 62% para o caso das LIC, 27% para a LIP2 e 11% para a LIP1. Vale ressaltar que o período analisado na pesquisa desta autora foi bem maior (de março de 1979 a dezembro de 1986) quando foram encontrados 268 casos de LI tropicais.

J com relação à formação das LI tropicais, observa-se que elas têm origem na região da costa brasileira e na região de outros países, como Guiana Francesa e Suriname;

J a LIC identificada no dia 09 (caso 1) não será incluída nas análises deste trabalho, porque esta não ocorreu isoladamente;

J os casos de 4 a 7 estão realçados porque foram selecionados para análise detalhada, como será explicado abaixo.

#### **4.1.1. Seleção das LIC**

A seleção das LIC, para estudo das condições observadas em superfície, foi baseada nas informações contidas na TABELA 12 e na análise das imagens de satélite. O critério que influenciou definitivamente a seleção dos casos foi a continuidade das imagens de satélite. Este recurso é de fundamental importância porque, tendo em vista a duração de apenas algumas horas de cada LIC, a falta de imagens pode impossibilitar o acompanhamento de determinado sistema e inviabilizar o estudo. Ainda, cabe acrescentar que a ausência de imagens torna-se crítica quando o sistema passa por uma mudança. Neste sentido, a seqüência de imagens de satélite estava razoável para os casos 4 e 7, mas não para os casos 5 e 6. Para estes últimos dois casos citados, havia imagens somente para o período de formação das LIC. Assim, devido às dificuldades na determinação do tempo de vida para os casos 5 e 6 e, ao mesmo tempo para não excluí-los das análises, utilizou-se um tempo de vida médio de 9 horas para as LIC (Cohen, 1989). Com isto, o tempo médio de vida para os casos 5 e 6, foi calculado da seguinte forma:

$$\text{Tempo de vida} = \text{horário de formação} + 9 \text{ horas}$$

Para as LIC dos casos 4 e 7 foi possível avaliar todos os horários de desenvolvimento, do início ao fim, com as imagens de satélite. Assim, estes dois casos poderiam ser escolhidos para fazer parte do estudo detalhado, usando a modelagem atmosférica, como será visto mais adiante.

É apresentada na TABELA 13 a estimativa do horário de dissipação das LIC dos casos 4, 5, 6 e 7.

TABELA 13 – Estimativa do tempo de vida de quatro LIC que ocorreram no mês de abril de 2002.

Caso Nº	Horário de formação	Horário de dissipação
4	1739UTC	01UTC
5	1539UTC	0039UTC
6	1545UTC	0045UTC
7	1439UTC	2339UTC

Em função das falhas na sequência de imagens de satélite para todo o período de vida das LIC listadas na TABELA 13, a FIGURA 23 mostra uma imagem de satélite correspondente ao horário em que a respectiva LIC já podia ser visualizada ao longo da costa norte/nordeste do Brasil. A finalidade desta FIGURA é mostrar o aspecto visual da nebulosidade associada às LIC dos casos 4, 5, 6 e 7.

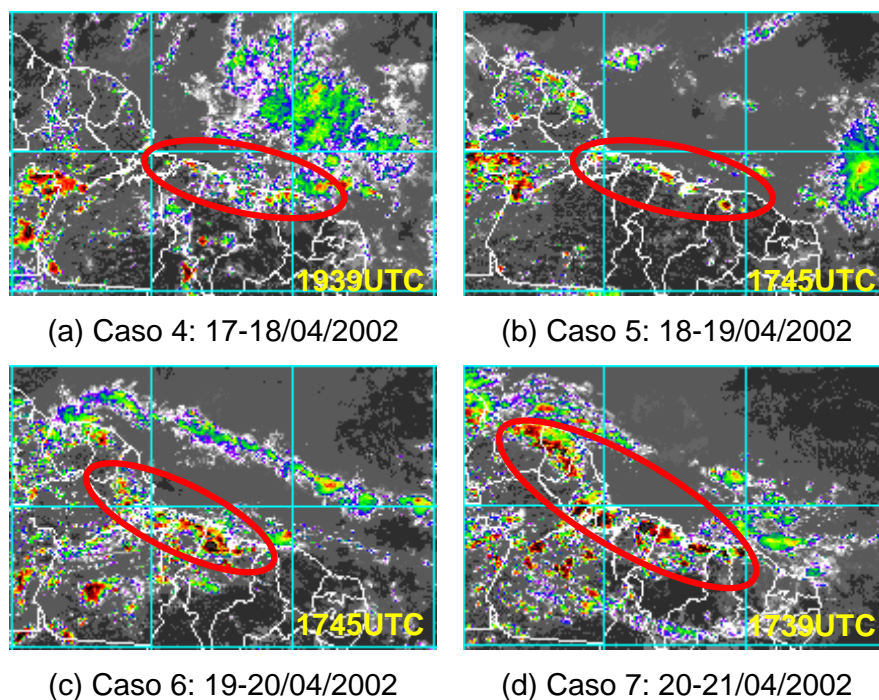


FIGURA 23 – Imagens do satélite geoestacionário GOES-8 mostrando: (a) Caso 4 - LIC dos dias 17-18 de abril de 2002, (b) Caso 5 - LIC dos dias 18-19 de abril de 2002, (c) Caso 6 - LIC dos dias 19-20 de abril de 2002 e (d) Caso 7 - LIC dos dias 20-21 de abril de 2002.

#### 4.1.2. Condições Meteorológicas de Superfície

Nesta seção serão apresentadas e comentadas as mudanças observadas em superfície das variáveis meteorológicas obtidas em coleta contínua (ver seção 3.1.3) associadas à ocorrência dos casos 4, 5, 6 e 7 de LIC no litoral leste do Estado do Pará, durante o ECPC.

Os horários mostrados nas FIGURAS desta seção estão apresentados em Z (Zulu), porque este foi o formato de criação dos arquivos de saída dos dados originais. A nomenclatura “Zulu” tem o mesmo significado de UTC (Coordenada de Tempo Universal).

As LIC, apesar de ocorrerem com frequência na região leste do Estado do Pará, apresentam atividade convectiva menos intensa se comparadas às outras categorias de LI tropicais, como as LIP1 e LIP2 (Cohen, 1989).

A distribuição temporal em superfície da precipitação pluviométrica para as localidades de Soure e Bragança, é mostrada na FIGURA 24. Analisando todos os casos apresentados na FIGURA 24, nota-se que a quantidade total de precipitação é insignificante (inferior a 1 mm), pelo menos nestas duas localidades. Uma vez que estas LIC apresentam extensão da ordem de 1000 km (FIGURA 23) e que os dados de superfície são representativos de regiões pontuais, é possível que tenha havido lugares com valores de precipitação mais expressivos. Para esclarecer esta questão, procurou-se dados de superfície de estações meteorológicas localizadas ao longo da costa, porém estes não estavam disponíveis para o período de realização do ECPC, infelizmente.

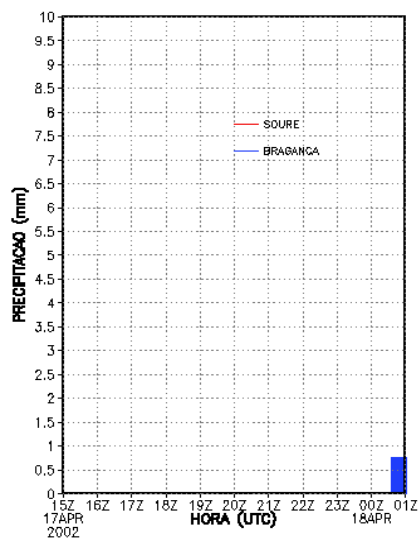
Na FIGURA 24a, relativa ao caso 4, vê-se que a precipitação ocorrida em Bragança foi de apenas 0,7 mm, sem chuva em Soure. Os centros ativos da LIC do caso 5, conforme mostra a FIGURA 24b, causaram uma precipitação de apenas 0,5 mm em Bragança, também sem chuva em Soure. As FIGURAS 23a e 23b mostraram que a estrutura da LIC do caso 4 é semelhante à do caso 5. Estas LIC são muito estreitas e alongadas, com nuvens convectivas esparsas.

As FIGURAS 24c e 24d mostram as precipitações associadas às LIC dos casos 6 e 7. Estas LIC apresentam uma atividade convectiva um pouco maior do que as LIC dos casos 4 e 5. Na FIGURA 24c, referente ao caso 6,

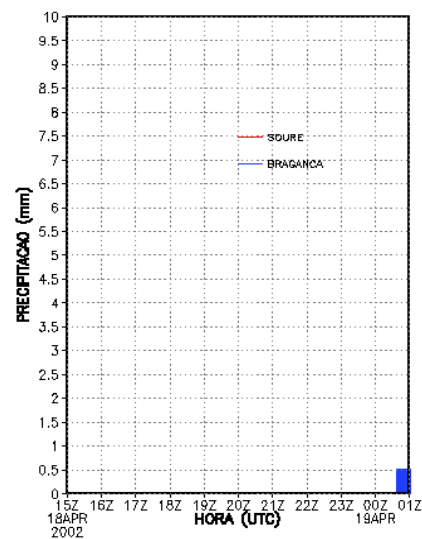
pode-se observar que em Soure houve uma precipitação total de 2,3 mm mas, em Bragança, ocorreu somente uma precipitação de 1 mm (às 21 UTC). Na FIGURA 24d, referente ao caso 7, nota-se que houve uma precipitação de 7,4 mm ocorrida em Soure. Nesta FIGURA observa-se que em Bragança houve apenas uma precipitação de 1mm às 21 UTC.

Concluindo as análises da FIGURA 24 pode-se dizer que, dentre todos os quatro casos de LIC, a que causou maior precipitação foi a do caso 7. De fato, analisando a nebulosidade desta LIC, mostrada na FIGURA 23d, é nítida a ação de núcleos bem ativos ao longo da costa.

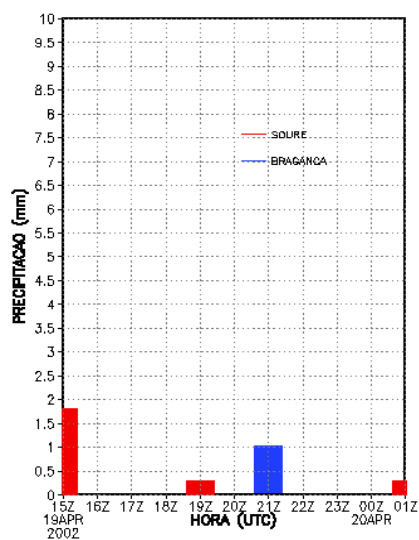
Infelizmente, não é possível associar o quanto precipitou em cada localidade com a fase da respectiva LIC, porque o número de imagens de satélite não foi suficiente para fazer tal verificação, e isto para todos os casos. Na realidade, o meio mais eficiente para se comparar esta precipitação em superfície com a localização/intensidade da nebulosidade seria por meio da cobertura espacial, usando dados de radar.



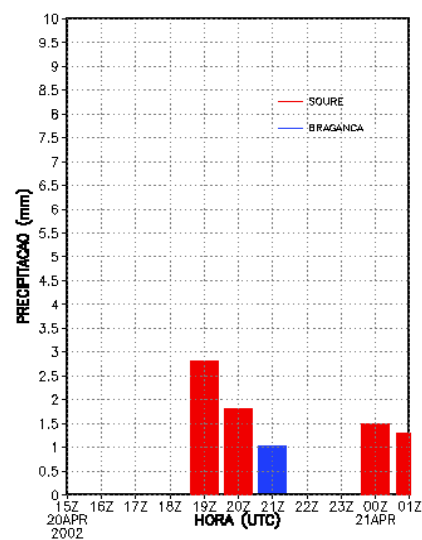
(a) Caso 4: 17-18 de abril de 2002



(b) Caso 5: 18-19 de abril de 2002



(c) Caso 6: 19-20 de abril de 2002

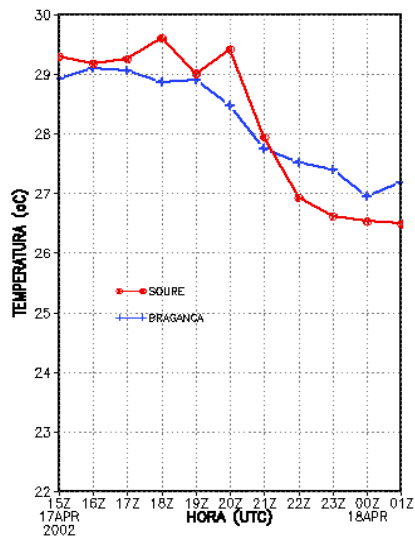


(d) Caso 7: 20-21 de abril de 2002

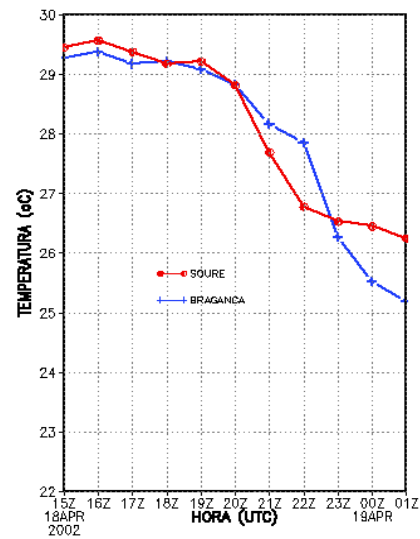
FIGURA 24 – Distribuição temporal em superfície da precipitação pluviométrica para: (a) Caso 4: LIC dos dias 17-18 de abril de 2002, (b) Caso 5: LIC dos dias 18-19 de abril de 2002, (c) Caso 6: LIC dos dias 19-20 de abril de 2002 e (d) Caso 7: LIC dos dias 20-21 de abril de 2002, para Bragança (em azul) e Soure (em vermelho).

A FIGURA 25 mostra a distribuição horária da temperatura do ar em superfície, para as localidades de Soure e de Bragança, associadas à ocorrência dos casos 4, 5, 6 e 7 de LIC, em abril de 2002. Nota-se nesta FIGURA que a temperatura apresenta uma queda de 2 a 5°C, aproximadamente, no horário próximo à maturação em todos os quatro casos de LIC. Portanto, devem existir fatores dinâmicos e físicos que expliquem esta variação. Esta queda pode ser associada a dois fatores, principalmente: aos movimentos subsidentes, que trazem ar frio dos níveis mais altos da atmosfera para a superfície e ao ciclo diurno que, neste horário, também é responsável pela queda de temperatura em função do pôr-do-sol. O caso 6, apresentado na FIGURA 25c, mostra um comportamento diferente em Soure (linha em vermelho), marcado pela grande oscilação nos valores de temperatura. Entretanto, com os dados que se tem à disposição, não é possível discutir sobre os motivos que ocasionaram esta variação.

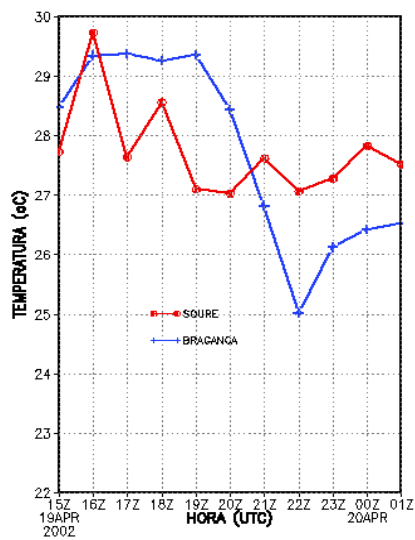




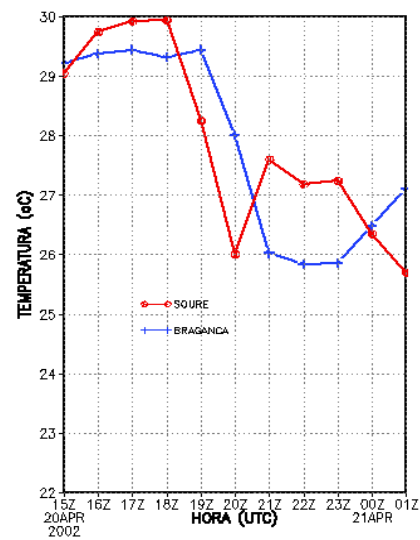
(a) Caso 4: 17-18 de abril de 2002



(b) Caso 5: 18-19 de abril de 2002



(c) Caso 6: 19-20 de abril de 2002



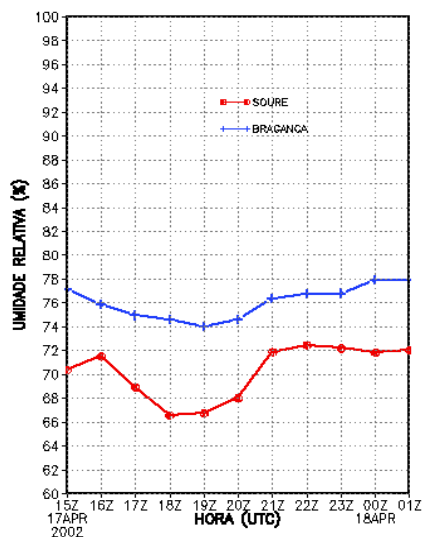
(d) Caso 7: 20-21 de abril de 2002

FIGURA 25 – Distribuição temporal em superfície da temperatura do ar para: (a) Caso 4: LIC dos dias 17-18 de abril de 2002, (b) Caso 5: LIC dos dias 18-19 de abril de 2002, (c) Caso 6: LIC dos dias 19-20 de abril de 2002 e (d) Caso 7: LIC dos dias 20-21 de abril de 2002, para Bragança (linha em azul) e Soure (linha em vermelho).

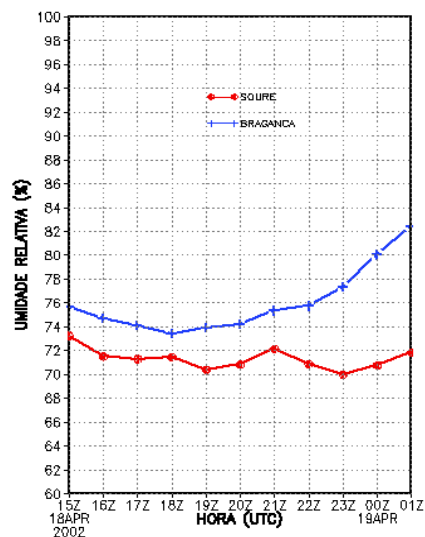
Na FIGURA 26 é mostrada a distribuição temporal da umidade relativa em superfície para as localidades de Soure e de Bragança, associadas à ocorrência dos 4 casos de LIC selecionados. Nesta FIGURA nota-se que, desde a formação até a maturação das LIC, há uma suave diminuição nos valores de umidade e, a partir da fase de maturação até a dissipação, observa-se um aumento, em todos os casos, com exceção do caso 6, para Soure (FIGURA 26c). Esta situação está associada, pelo menos em parte, ao ciclo diurno da umidade relativa. Sabe-se que a umidade relativa apresenta uma relação inversa com a temperatura do ar, que está embutido neste resultado. Observa-se também que os valores de umidade relativa em Soure, para os casos 4 e 5, são sempre inferiores aos valores desta variável em Bragança (FIGURAS 26a e 26b).

No caso 6, FIGURA 26c, a variação da umidade relativa é totalmente diferente dos outros casos, em Soure. A identificação dos motivos que desencadearam as modificações na umidade e na temperatura (vista anteriormente) observadas neste caso, especificamente, exigiria uma análise detalhada. Isto não foi feito porque, como dito anteriormente, as informações disponíveis para este caso não eram suficientes para a realização de uma investigação mais minuciosa.

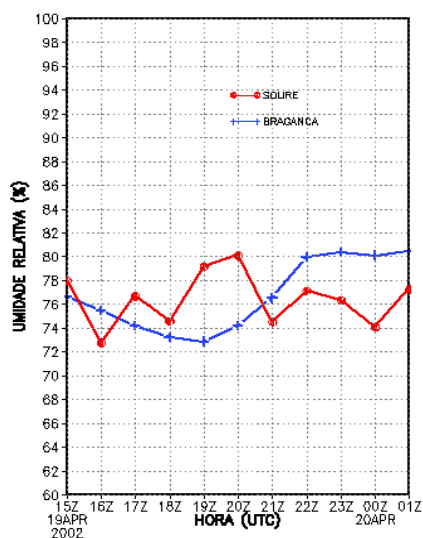
De forma geral, a FIGURA 26 mostra que os valores de umidade relativa em Bragança não ultrapassaram 80% em nenhum caso, apesar das LIC serem diferentes. Em Soure, os valores oscilam entre 70 e 90%. Assim, nas duas localidades, as LIC ocorreram em um ambiente de pouca umidade, o que certamente ajudou na inibição de formação de aglomerados de nuvens com grande desenvolvimento vertical, com elevado potencial precipitante.



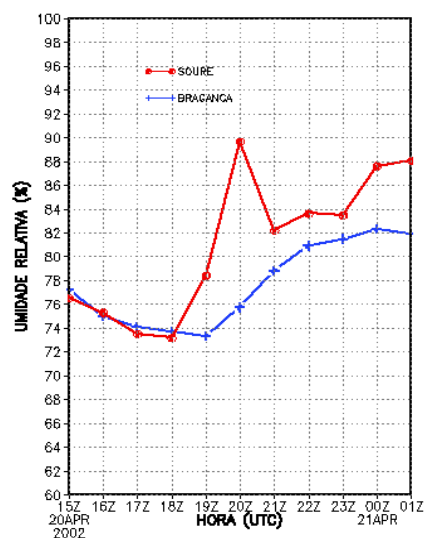
(a) Caso 4: 17-18 de abril de 2002



(b) Caso 5: 18-19 de abril de 2002



(c) Caso 6: 19-20 de abril de 2002

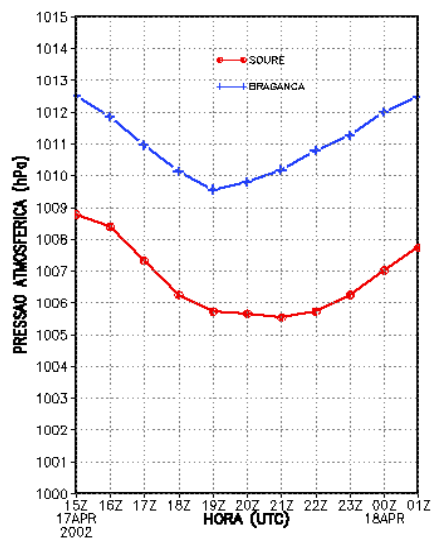


(d) Caso 7: 20-21 de abril de 2002

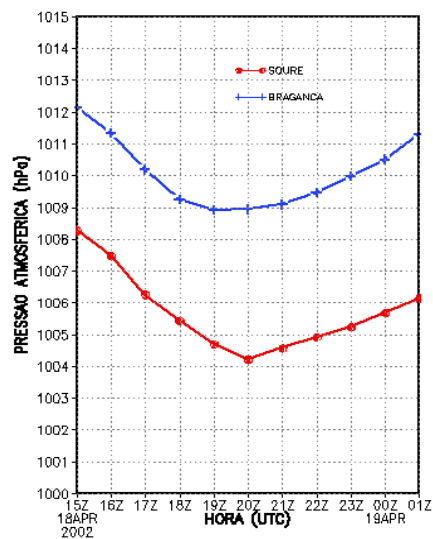
FIGURA 26 – Distribuição temporal em superfície da umidade relativa para: (a) Caso 4: LIC dos dias 17-18 de abril de 2002, (b) Caso 5: LIC dos dias 18-19 de abril de 2002, (c) Caso 6: LIC dos dias 19-20 de abril de 2002 e (d) Caso 7: LIC dos dias 20-21 de abril de 2002, para Bragança (linha em azul) e Soure (linha em vermelho).

A FIGURA 27 apresenta a distribuição temporal em superfície da pressão atmosférica para as localidades de Soure e Bragança, associadas à ocorrência dos casos 4, 5, 6 e 7 de LIC, em abril de 2002. Nota-se que o comportamento da pressão não apresentou nenhuma alteração marcante relacionada à ocorrência das LIC. Observa-se que os valores de pressão são mais baixos em Soure que em Bragança, em todos os casos.

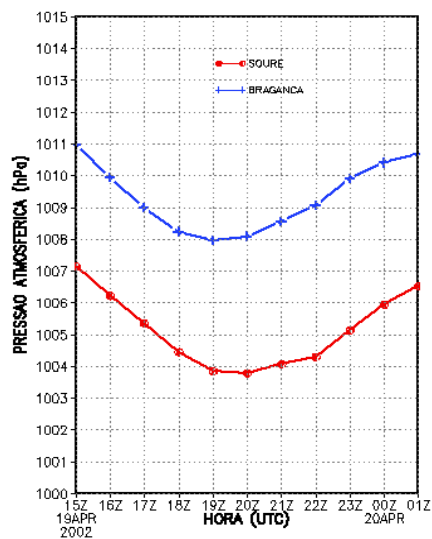
As curvas que descrevem as variações de pressão mostram valores mínimos em torno das 19 UTC em Bragança e das 20 UTC em Soure (no caso 7, isto foi visto às 18 UTC). Próximo destes horários, foi observada a queda marcante dos valores de temperatura, tanto em Soure quanto em Bragança, com exceção do caso 6 (FIGURA 25c, em Soure), que não apresentou queda de temperatura marcante e, sim, oscilações durante todo o dia. Apesar disto, no caso 6, os valores de pressão mais baixos são também encontrados às 20 UTC (FIGURA 27c).



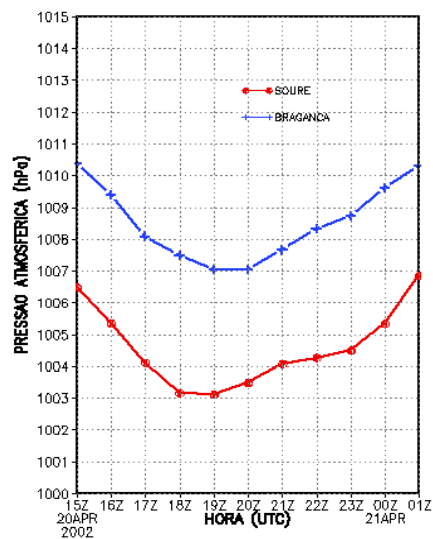
(a) Caso 4: 17-18 de abril de 2002



(b) Caso 5: 18-19 de abril de 2002



(c) Caso 6: 19-20 de abril de 2002



(d) Caso 7: 20-21 de abril de 2002

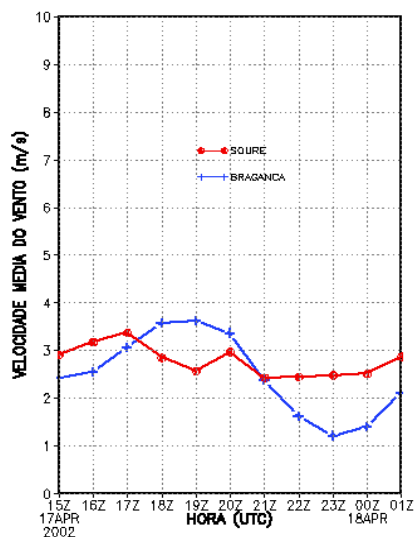
FIGURA 27 – Distribuição temporal em superfície da pressão atmosférica para: (a) Caso 4: LIC dos dias 17-18 de abril de 2002, (b) Caso 5: LIC dos dias 18-19 de abril de 2002, (c) Caso 6: LIC dos dias 19-20 de abril de 2002 e (d) Caso 7: LIC dos dias 20-21 de abril de 2002, para Bragança (linha em azul) e Souse (linha em vermelho).

AS FIGURAS 28 e 29 mostram a distribuição horária em superfície da direção e da velocidade média do vento, respectivamente, para as localidades de Soure e de Bragança, associadas à ocorrência dos casos selecionados de LIC durante o Experimento ECPC, em abril de 2002.

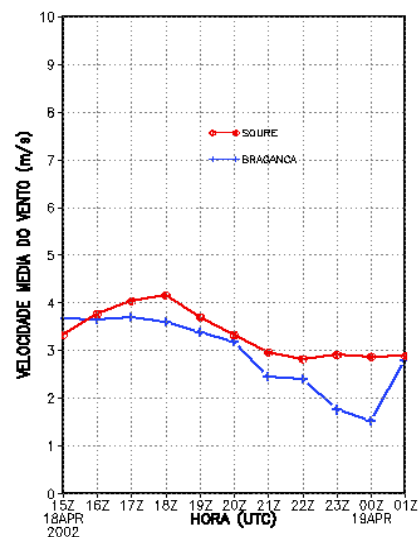
Na FIGURA 28 observam-se velocidades baixas, tanto em Soure quanto em Bragança, com oscilações entre 1 e 4m/s, aproximadamente. A velocidade média, observada em todos os casos, ficou em torno de 2,5 m/s. Em Bragança pode-se observar uma variação da velocidade do vento mais marcante, com uma diminuição de seus valores a partir da fase de maturação das LIC. Tal característica não é observada em Soure, pois as velocidades oscilam muito pouco, com exceção do caso 7, quando os processos convectivos foram mais intensos.

Na FIGURA 29 observa-se que a direção do vento, na localidade de Bragança, segue um padrão semelhante em todos os casos. Desde o momento da formação das LIC até às 22 UTC, a direção do vento é predominantemente de nordeste. A partir do horário das 22 UTC (entre a maturação e a dissipação das LIC), nota-se uma rotação dos ventos, pois estes passam a ser de sudeste. Comportamento análogo a este é observado em Soure, mas somente para o caso 7 (FIGURA 29d). Nos casos 4 e 5, a direção do vento em Soure manteve-se de nordeste durante todo o período de ocorrência das LIC. No caso 6 em Soure, observa-se uma oscilação da direção do vento até às 20 UTC, quando observada uma predominância dos ventos de nordeste.

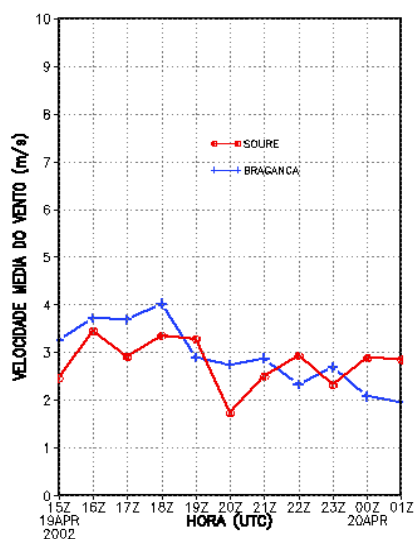
A avaliação desta FIGURA mostra que, em todos os casos de LIC, a direção e velocidade do vento não sofreram modificações significativas associadas à ocorrência das LIC. Os ventos nesta região foram fracos, com direção variando entre os quadrantes I e II.



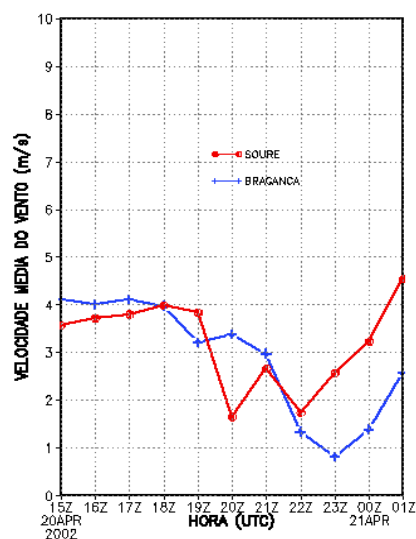
(a) Caso 4: 17-18 de abril de 2002



(b) Caso 5: 18-19 de abril de 2002

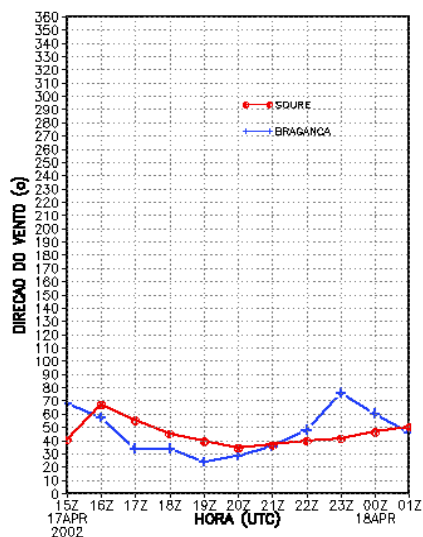


(c) Caso 6: 19-20 de abril de 2002

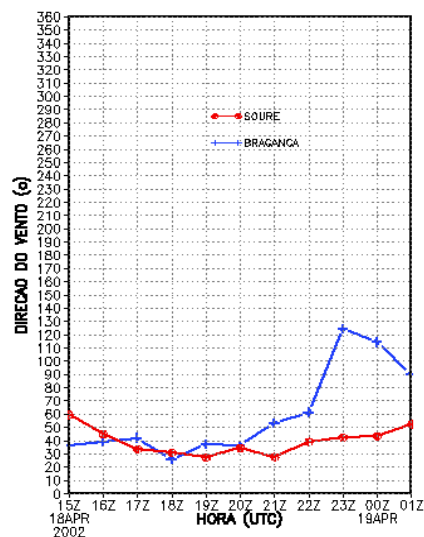


(d) Caso 7: 20-21 de abril de 2002

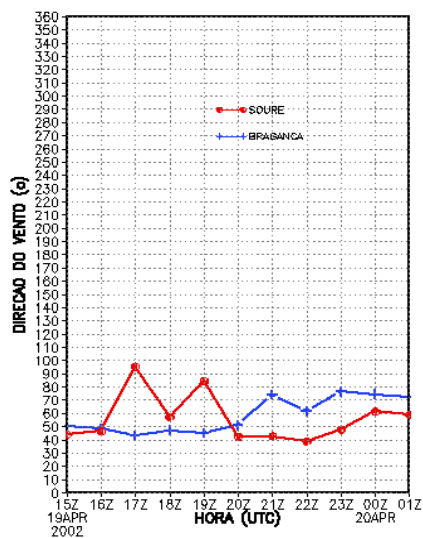
FIGURA 28 – Distribuição temporal em superfície da velocidade do vento para: (a) Caso 4 – LIC dos dias 17-18 de abril de 2002, (b) Caso 5 – LIC dos dias 18-19 de abril de 2002, (c) Caso 6 – LIC dos dias 19-20 de abril de 2002 e (d) Caso 7 – LIC dos dias 20-21 de abril de 2002, para Bragança (linha em azul) e Soure (linha em vermelho).



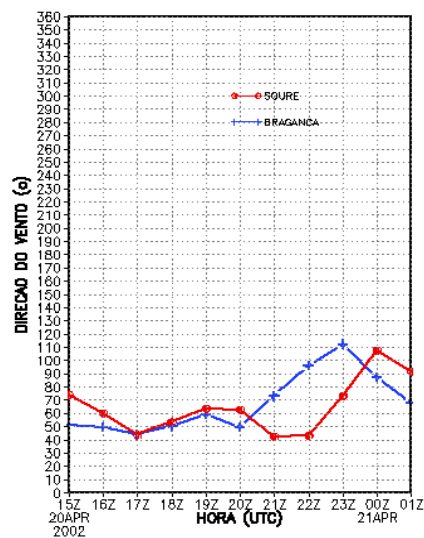
(a) Caso 4: 17-18 de abril de 2002



(b) Caso 5: 18-19 de abril de 2002



(c) Caso 6: 19-20 de abril de 2002



(d) Caso 7: 20-21 de abril de 2002

FIGURA 29 – Distribuição temporal em superfície da direção do vento para: (a) Caso 4: LIC dos dias 17-18 de abril de 2002, (b) Caso 5: LIC dos dias 18-19 de abril de 2002, (c) Caso 6: LIC dos dias 19-20 de abril de 2002 e (d) Caso 7: LIC dos dias 20-21 de abril de 2002, para Bragança (linha em azul) e Soure (linha em vermelho).



## 4.2. Estudo Detalhado de uma LIC

A seqüência das imagens de satélite para as LIC dos casos 4 e 7 (ver seção 4.1) permitiu uma avaliação muito boa de ambas, desde a fase de formação até a dissipação, requisito fundamental para que este estudo detalhado fosse realizado. Desta forma, foram obtidos todos os resultados para as duas LIC. Entretanto, tendo em vista as semelhanças encontradas, decidiu-se por apresentar os resultados de somente uma LIC: a LIC do caso 4, ocorrida nos dias 17-18 de abril de 2002.

Nesta seção será apresentado todo o desenvolvimento da LIC do caso 4: sua evolução, avaliação termodinâmica e das condições de grande e de mesoescala.

### 4.2.1. Formação e Desenvolvimento

A evolução desta LIC é mostrada na FIGURA 30. Os horários das imagens mostradas nesta FIGURA são aqueles mais próximos das fases de formação, maturação e dissipação da LIC.

A fase inicial, mostrada na FIGURA 30a, é marcada pelo aparecimento de nuvens *Cumulonimbus* (Cb) esparsas ao longo da costa, no início da tarde do dia 17 (1739 UTC). O horário inicial de formação desta LIC é comparável com o da LIC estudada em Cohen (1996) durante o Experimento GTE-ABLE-IIB, que teve seu início às 18 UTC. Entretanto, a maioria das LI tropicais sobre o Atlântico leste, são formadas entre 06 e 13 UTC (Aspliden et al., 1976). Apresenta uma extensão que inicia no Estado do Pará (na Ilha do Marajó) e termina no Estado do Rio Grande do Norte. Às 1845 UTC (FIGURA 30b), observa-se o surgimento de outras nuvens Cb alinhadas paralelamente à costa. Esta situação revela a marcante rapidez com que esta LIC se desenvolveu.

As imagens de satélite mostram que as células convectivas que constituíram esta LIC se formaram discretamente. Deste modo, sua parte ativa foi intermitente ao longo de toda a extensão horizontal. A intensidade máxima foi atingida aproximadamente 2 horas após o seu início (FIGURA 30c), quando

esta apresentou comprimento e largura de aproximadamente 1.400km e 190km, respectivamente. Na LIC analisada por Cohen (1996), o estágio de maturação só foi alcançado 3 horas após a sua formação.

A partir das 19 UTC aproximadamente, as células convectivas individuais que constituíram a LIC, entram em processo de enfraquecimento, como mostra a FIGURA 30d. No horário das 2115 UTC (FIGURA 30e) a LIC, apesar de apresentar descontinuidades, ainda apresenta um aspecto linear com regiões convectivas isoladas, sendo a mais importante a que está localizada nas proximidades de Soure e na praia de Ajuruteua (Bragança). Esta região convectiva foi utilizada como sinalizadora do término da LIC, porque as imagens de satélite dos horários seguintes apresentaram falhas importantes, dificultando a sua interpretação e, portanto, da evolução da LIC, como mostra a FIGURA 30f (às 2315 UTC). Focalizando a região convectiva, próxima da praia de Ajuruteua, esta vai ficando cada vez mais fraca, como mostram as temperaturas dos topos da nebulosidade. A próxima imagem de satélite, relativa ao horário das 0239 UTC do dia 18 de abril de 2002 (FIGURA 30g), mostra ainda alguma nebulosidade perto da praia de Ajuruteua. Portanto, o término da LIC foi estimado como sendo o horário intermediário entre 2115 e 0239 UTC (ver item 3.2 para detalhes). Desta forma, o término desta LIC ocorreu aproximadamente à 01 UTC, do dia 18 de abril.

A partir da análise realizada acima, esta LIC teve uma duração de aproximadamente 7 horas. Em comparação com as LIC estudadas por Cohen (1989), aquelas apresentaram um tempo de duração médio de 9 horas. Por outro lado, em Cohen (1996) a LIC estudada teve um tempo de vida de aproximadamente 12 horas. A LIC do caso 7 (ver TABELA 13) apresentou um tempo de vida de aproximadamente 9 horas. Levando em consideração as limitações de precisão dos horários inicial e final de cada LIC, estes resultados mostram que, em média, as LIC têm duração inferior a 10 horas.

Finalmente, como considerações finais sobre esta LIC, evidencia-se em todos os horários a presença de uma grande nebulosidade localizada sobre o Oceano Atlântico. Esta nebulosidade constitui um fragmento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), pois a mesma, neste período, apresenta-se próxima às costas norte e nordeste do Brasil. Ainda, segundo o Climanálise (2002), a maior atividade convectiva da ZCIT foi observada em torno do

Equador, aproximadamente entre 2°N e 2°S. Em vários dias, verificou-se que a ZCIT interagiu com as LIC ao longo da costa norte do Brasil.

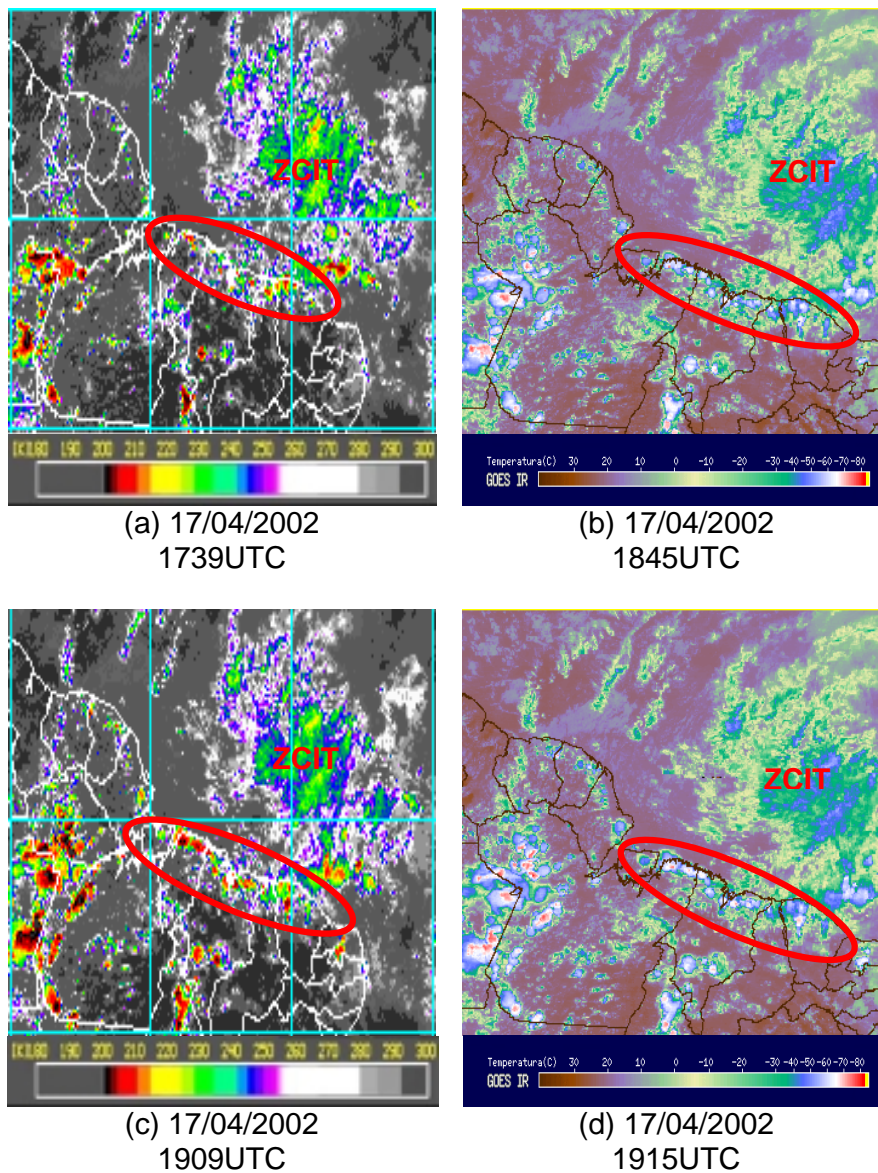


FIGURA 30 – Sequência de imagens do satélite geoestacionário GOES-8 mostrando o ciclo de vida da LIC do caso 4, ocorrida nos dias 17-18 de abril de 2002.

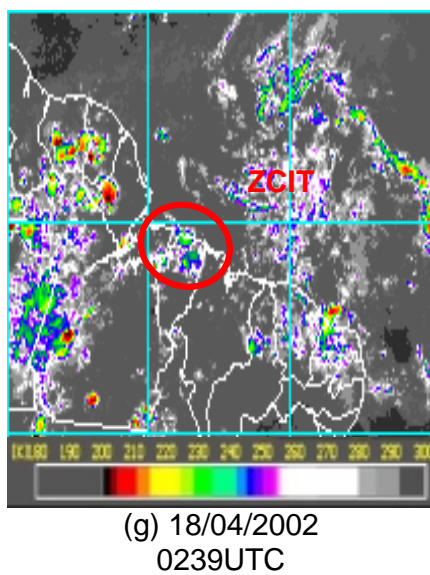
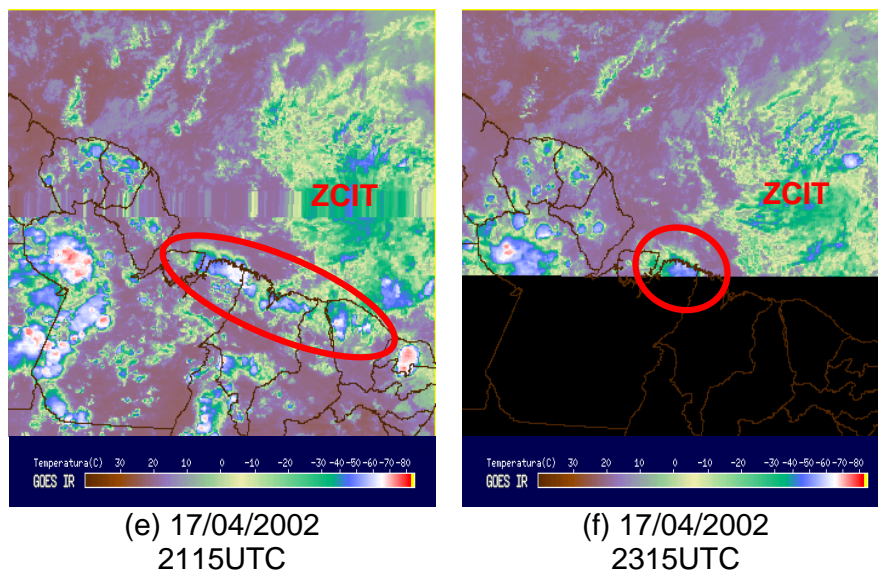


FIGURA 30 – Continuação.

#### 4.2.2. Análise Termodinâmica

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com os dados das radiossondagens lançadas na Praia de Ajuruteua (Bragança), durante a LIC do caso 4 (dias 17-18 de abril). Lembrando que esta LIC apresentou um comprimento da ordem de 1000 km, significa que os resultados apresentados aqui são representativos de uma região de aproximadamente 100 km nas proximidades da Praia de Ajuruteua. Para incluir mais pontos de amostragem nestas análises, procurou-se complementar com radiossondagens que tivessem ocorrido nos horários operacionais de lançamento (00 e 12 UTC) de estações localizadas nas costas norte e nordeste do Brasil. Na prática, somente a radiossonda lançada à 00 UTC seria utilizada, tendo em vista o período de ocorrência desta LIC. Mas, infelizmente, não houve êxito nesta tentativa, porque nos locais de interesse não haviam sido feitas radiossondagens à 00 UTC.

Considerando que o tempo de vida da LIC foi de aproximadamente 7 horas e que as radiossondagens foram lançadas a cada 6 horas durante o ECPC, o período de amostragem foi dividido em três fases: antes, durante e após a ocorrência da LIC, da seguinte forma:

- ≠ radiossondagem das 12UTC (dia 17): antes da ocorrência da LIC;
- ≠ radiossondagem das 18UTC (dia 17): durante a ocorrência da LIC;
- ≠ radiossondagem das 06UTC (dia 18): após a ocorrência da LIC.

A radiossondagem das 00UTC do dia 18 não foi incluída nesta análise, porque como visto anteriormente, neste momento a LIC estava em processo de “dissipação” não caracterizando, portanto, nenhuma das fases citadas acima.

#### 4.2.2.1. Diagrama Termodinâmico Skew T - Log P

Na FIGURA 31 são apresentados os perfis verticais de Temperatura do ar (T) e de Temperatura do Ponto de Orvalho ( $T_d$ ) para a LIC do caso 4.

A FIGURA 31a mostra a sondagem das 12 UTC, horário anterior à formação desta LIC. Neste horário, a atmosfera é caracterizada por estar relativamente seca na baixa e média troposfera, indicada pelo afastamento da ordem de  $10^\circ\text{C}$  das curvas de T e de  $T_d$ , inibindo a formação de nuvens profundas nesta região. Porém, nota-se que o Nível de Condensação por Levantamento (NCL, indicado no canto inferior, à direita dos diagramas) de uma parcela à superfície, se encontra a uma altura bem baixa (em torno de 900hPa), indicando uma certa facilidade para a parcela atingir a saturação por levantamento forçado. Entretanto, a partir do NCL até os níveis mais altos, a temperatura da parcela sempre esteve inferior à temperatura do ambiente, mais uma vez mostrando que não havia condições favoráveis para o desenvolvimento de atividade convectiva. Ainda, na FIGURA 31b pode-se observar que no horário “durante” a LIC, as curvas de T e de  $T_d$  permanecem afastadas, não somente nos baixos e médios níveis, mas sim durante toda a sondagem. Este comportamento, típico de atmosfera seca, também foi observado nas análises em superfície, no campo relativo à umidade do ar (ver seção 4.1.2.). O estado seco da atmosfera, observado tanto no diagrama quanto nos dados de superfície, difere dos resultados encontrados por Cohen (1989), pois a mesma observou uma atmosfera saturada associada à ocorrência daquela LIC. A temperatura da parcela é inferior à do ambiente até o nível de 700 hPa (em torno de 3 km de altitude) o que significa condição de estabilidade na camada mais próxima da superfície. Assim, a parcela não tem condições de subir espontaneamente, não havendo possibilidade de formação de nuvens com desenvolvimento vertical.

“Após” a ocorrência da LIC (FIGURA 31c) observa-se que, da superfície até o nível de 850 hPa aproximadamente, existe uma camada úmida, indicada pela proximidade das curvas de T e de  $T_d$ . Tendo em vista o horário deste perfil (06 UTC = 3 HL, hora local), esta situação não está relacionada à atuação da LIC, pois esta já havia se dissipado.

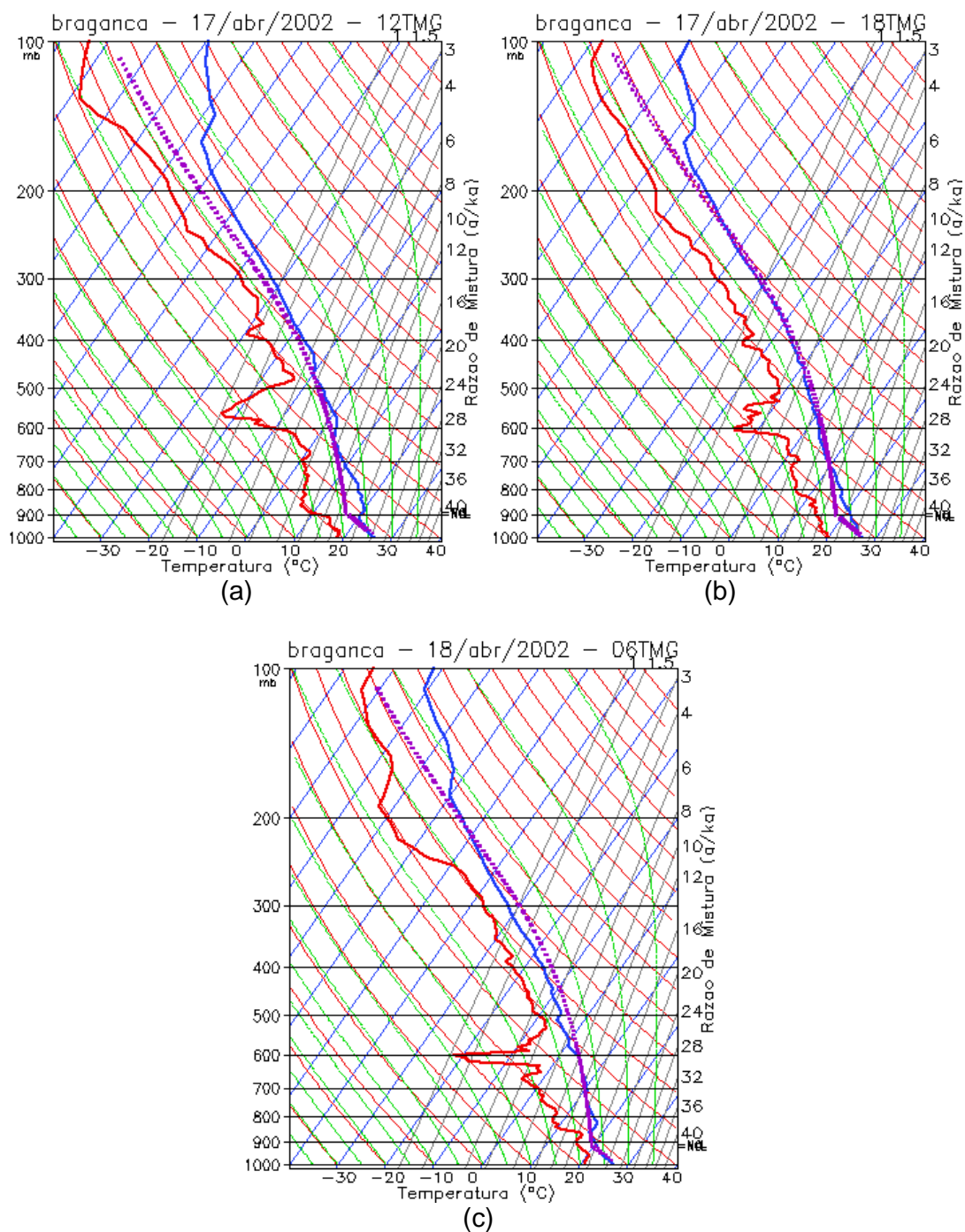


FIGURA 31 – Diagrama Skew-T Log P, observado (a) antes, (b) durante e (c) após a ocorrência da LIC nos dias 17-18 de abril de 2002. O perfil de T (linha contínua azul), o perfil de  $T_d$  (linha contínua vermelha) e a trajetória da parcela (linha pontilhada lilás). TMG = Tempo Médio de Greenwich é equivalente a UTC = Coordenada de Tempo Universal, usada no texto.

#### 4.2.2.2. Perfil Vertical de $\theta$ , $\theta_e$ e $\theta_{es}$

Dando continuidade ao estudo da estrutura termodinâmica da atmosfera, foram obtidos os perfis de  $\theta$  (temperatura potencial),  $\theta_e$  (temperatura potencial equivalente) e  $\theta_{es}$  (temperatura potencial equivalente saturada), mostrados na FIGURA 32.

Para a análise da estabilidade da atmosfera será utilizado o Método da Parcela, que considera um comportamento da atmosfera simplificado: a temperatura de uma parcela de ar não varia adiabaticamente e esta não se mistura com o ambiente que a envolve.

Tendo em vista as definições de  $\chi$  e de  $\theta_e$  (Bolton, 1980),  $\theta_e$  considera a quantidade de umidade no seu cálculo, motivo pelo qual ela caracteriza a temperatura da parcela em baixos e médios níveis. De outro modo, representa a temperatura de uma parcela sem umidade, o que é observado em altos níveis. Assim, as curvas de  $\theta$  e de  $\theta_e$  correspondem às temperaturas da parcela seca e úmida, respectivamente. A curva de  $\theta_{es}$  corresponde à temperatura do ambiente. Assim, ao analisar os perfis verticais destas temperaturas, pode-se verificar as condições de estabilidade da atmosfera e, conseqüentemente, a possibilidade de formação de nuvens. Com isso, temos que se a parcela estiver a uma temperatura mais elevada que a do ambiente, a atmosfera estará instável. Caso contrário, haverá estabilidade. Esta explicação é importante para um melhor entendimento da FIGURA 32.

A avaliação da FIGURA 32 abordará dois aspectos simultaneamente: condições de estabilidade convectiva da atmosfera e possibilidade de formação de tempestades (nuvens Cb) no local da sondagem. Camada com estabilidade convectiva é aquela que, tendo sido elevada até atingir a saturação, fica instável devido à liberação de calor latente de condensação que chega a provocar mudanças no gradiente de temperatura entre a base e o topo da camada (Iribarne e Godson, 1985).

Na FIGURA 32 são mostrados os perfis verticais de  $\theta$ ,  $\theta_e$  e  $\theta_{es}$  para os períodos “antes”, “durante” e “após” a ocorrência da LIC. A reta vertical foi traçada a partir do valor de  $\theta_e$  em superfície até os níveis mais altos. O primeiro ponto de interseção desta reta com a curva de  $\theta_{es}$  indica o nível do NCE (Nível de Convecção Espontânea) e o segundo ponto de interseção, o nível NE (Nível



de Equilíbrio). Este procedimento evidencia as áreas negativas (CINE) e positivas (CAPE), sendo que o tamanho das áreas é proporcional ao valor do índice de instabilidade (Mota, 2004).

Nota-se na FIGURA 32a, correspondente ao horário “antes” da ocorrência da LIC, uma camada potencialmente instável que vai desde a superfície até o nível de 900 hPa, determinada pelo critério de estabilidade convectiva. A condição de potencialmente instável deve-se ao fato do gradiente vertical de  $\theta_e$  ser inferior a zero nesta camada. Além disso, é possível notar que a área negativa (CINE) se estende por toda a sondagem. Esta situação indica que não há potencial da atmosfera para a atividade convectiva. Esta FIGURA apresenta, ainda, uma neutralidade na camada entre 900 e 540 hPa, aproximadamente, determinada pelo gradiente vertical de  $\theta_e$  ser próximo de zero. Na camada acima, localizada entre os níveis de 540 a 350 hPa, nota-se que a atmosfera encontra-se potencialmente estável, com gradiente vertical maior que zero.

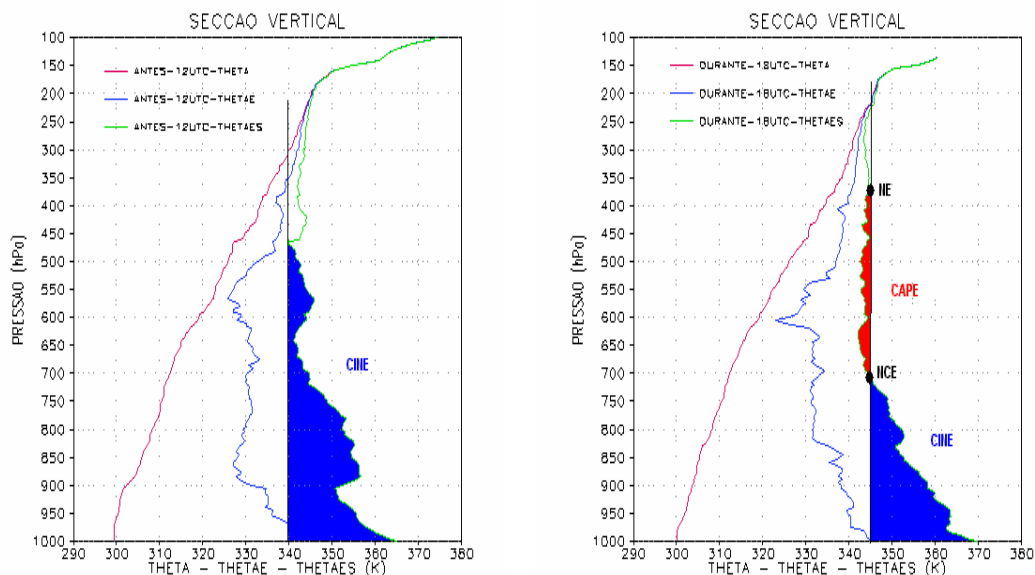
A camada potencialmente instável, observada na FIGURA 32b é mais profunda “durante” a ocorrência da LIC, ela estende-se desde a superfície até o nível de 850 hPa. Por outro lado, percebe-se que o CINE é muito elevado, da superfície até 700 hPa, o que indica não haver possibilidade de desenvolvimento de nuvens Cb na região de Bragança. Some-se a isto o fato da temperatura da parcela não ser significativamente elevada (FIGURA 31b) para gerar energia armazenada e provocar convecção profunda e precipitação. Este comentário condiz com o observado nesta FIGURA, pois ao contrário dos valores de CINE, os valores de CAPE são muito pequenos e, adicionalmente, localizados a partir de 3 km de altura.

Segundo Mota (2004), o CAPE é uma condição necessária para a formação da convecção, pois mede a instabilidade da atmosfera, mas não suficiente para formar convecção profunda precipitante. Isto porque o CINE representa uma barreira significativa para a liberação da instabilidade condicional nos trópicos (Willians e Renno, 1993).

No período “durante”, a sobreposição de camadas instável, neutra e estável é semelhante ao observado no período “antes” da ocorrência da LIC, com a diferença de que estas camadas são mais profundas “durante” a ocorrência da LIC. As alturas destas camadas são:

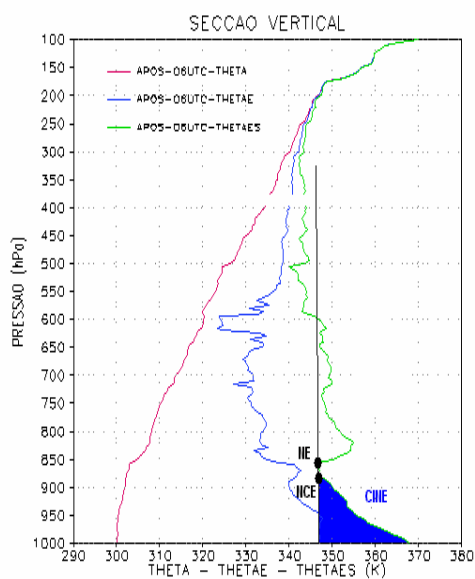
- ≠ camada potencialmente instável: da superfície até o nível de 850 hPa;
- ≠ camada neutra: do nível de 850 hPa até o nível de 640 hPa;
- ≠ camada estável: do nível de 640 hPa até o nível de 350 hPa.

“Após” a ocorrência da LIC, FIGURA 32c, observa-se que o gradiente vertical de  $\theta_e$  é aproximadamente igual a zero, indicando uma camada neutra, localizada desde a superfície até o nível de 950 hPa. Esta camada superficial neutra é seguida por uma camada potencialmente instável até o nível de 830 hPa. Nota-se que a altura desta camada potencialmente instável apresenta uma diminuição com relação ao período “durante” a ocorrência da LIC. Esta camada é seguida por outra, novamente neutra, situada na camada entre os níveis de 830 e 620 hPa, aproximadamente. A condição de estabilidade potencial só é verificada na camada acima, entre os níveis de 620 e 500 hPa, onde o gradiente vertical de  $\theta_e$  é positivo. Observa-se, ainda, que o NCE e o NE estão muito próximos, indicando não haver possibilidade de formação de nuvens Cb nestas condições.



(a)

(b)



(c)

FIGURA 32 - Perfis verticais da temperatura potencial, temperatura potencial equivalente  $\theta_e$  e temperatura potencial equivalente saturada  $\theta_{es}$ , observados (a) “antes”, (b) “durante” e (c) “após” a ocorrência da LIC nos dias 17-18 de abril de 2002.

#### 4.2.2.3. Perfil Vertical de u, v

Nesta seção serão comentadas as mudanças observadas nos perfis verticais das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento, obtidos “antes”, “durante” e “após” a ocorrência da LIC nos dias 17-18 de abril de 2002, mostradas na FIGURA 33.

A distribuição da componente zonal u “antes”, “durante” e “após” a ocorrência da LIC é mostrada na FIGURA 33a. Nesta FIGURA, observa-se que da superfície até o nível de 550 hPa, aproximadamente, o escoamento zonal foi de leste, como mostram os valores negativos. “Antes” e “durante” a ocorrência da LIC a intensidade da componente zonal foi pequena, com valores não superiores a 6 m/s. Somente “após” a ocorrência da LIC esta componente apresentou valores maiores (sempre superiores a 5m/s, da superfície até 700 hPa), com máximo de quase 11m/s no nível 850 hPa. Cohen (1989) observou que este jato é mais forte em dias sem a formação de LIC. Silva Dias et al. (1984) verificaram que o jato de baixos níveis é importante na determinação de instabilidade em mesoescala. Entretanto, no caso da LIC selecionada, a ocorrência deste jato não está relacionada com a LIC, porque neste horário, a LIC já havia se dissipado. É muito provável que este jato esteja relacionado com o seu próprio ciclo. Sousa (2005) mostrou a existência de jatos de leste no período noturno durante o período chuvoso do ECPC.

A FIGURA 33b mostra as variações da componente meridional v do vento. Nesta FIGURA são marcantes os baixos valores, sempre inferiores a 5 m/s, em todos os períodos (“antes”, “durante” e “após” a ocorrência da LIC) e da superfície até 200 hPa. Perto da superfície, a componente meridional é de norte, mas sofre uma rotação para ventos de sul em níveis diferentes de acordo com o ciclo de vida da LIC. O nível mais elevado (900 hPa) desta rotação foi observado “antes” e o mais baixo (950 hPa), “durante” a ocorrência da LIC. No período “após”, o nível de rotação foi intermediário aos dois já citados. A direção sul se mantém “durante” a LIC. No período “após”, observa-se um retorno à direção de norte, a partir de 700 hPa até 300 hPa. É interessante notar que a camada “após” a LIC, em que os ventos são de sul, coincide com a camada em que ocorreu o jato de baixos níveis (JBN), como mostrou a FIGURA 33a. Acima de 450 hPa a componente meridional, nos três

períodos, oscila bastante. Em contraste à componente zonal, “após” a ocorrência da LIC, a componente meridional diminuiu de intensidade, com valores oscilando entre 0 e 2 m/s, da superfície até aproximadamente 850 hPa, o que representa um valor inferior à metade do valor observado, em superfície, da componente zonal. Finalmente observa-se que, na camada entre os níveis de 900 e 800 hPa, “durante” a ocorrência desta LIC, a componente meridional atinge um valor máximo igual a 4 m/s. Estes resultados, juntamente com os ventos de superfície, deixam clara a marcante influência dos ventos Alísios na região de estudo.

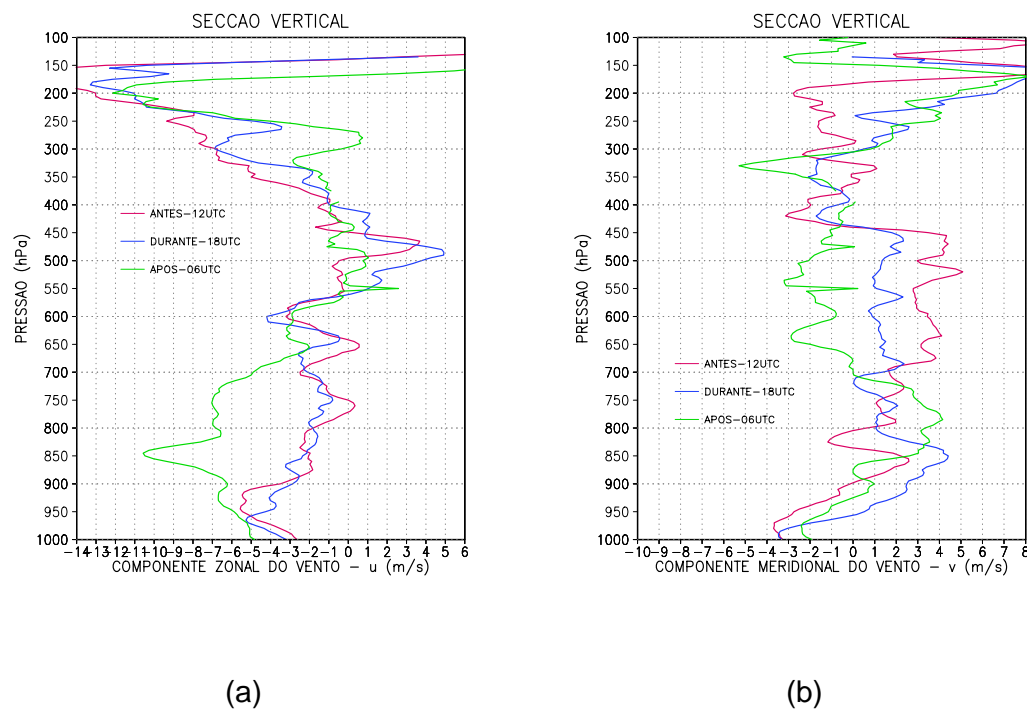


FIGURA 33 - (a) Componente zonal do vento, observada “antes”, “durante” e “após” a ocorrência da LIC nos dias 17-18 de abril de 2002 e (b) Componente meridional do vento, observada “antes”, “durante” e “após” a ocorrência da LIC nos dias 17-18 de abril de 2002.

#### 4.2.2.4. Índices de Instabilidade

Os índices de instabilidades mostram a capacidade potencial da atmosfera para o desenvolvimento de tempestades (ou formação de nuvens Cb). Para este trabalho, foram calculados os valores dos índices de instabilidade K, Showalter e Total-Totals, a partir dos dados das radiossondagens, cujos resultados são mostrados na TABELA 14. Os valores críticos relativos a cada índice foram apresentados anteriormente (ver item 3).

TABELA 14 – Valores calculados dos índices de instabilidade “antes”, “durante” e “após” a ocorrência da LIC, nos dias 17 e 18 de abril de 2002.

Ocorrência da LIC	Índice Showalter	Índice Total Totals	Índice K
“Antes”	7	37	23
“Durante”	2	42	31
“Após”	4	40	25

Comparando os valores apresentados na TABELA 14 com os valores críticos apresentados nas TABELAS correspondentes a cada índice, temos os seguintes resultados:

§ Índice Showalter: o valor apresentado no período “antes” da ocorrência da LIC denota condições de estabilidade atmosférica, seguida de possibilidade de ocorrência de tempestades. “Após”, o valor assumido por este índice encontra-se no limite entre a possibilidade de ocorrer tempestades e poucas chances de desenvolvimento de tempestades.

§ Índice Total-Totals: não indicou a possibilidade de ocorrência de tempestades na região em qualquer um dos momentos, pois os valores obtidos correspondem a uma atmosfera estável. Foi o índice que apresentou os resultados mais parecidos aos obtidos nos perfis verticais termodinâmicos, mostrados na seção anterior.

§ Índice K: este índice apresentou algumas discrepâncias. “Antes” da ocorrência da LIC, houve indicação de potencial para o desenvolvimento de

fenômenos convectivos. “Após” a ocorrência da LIC, este índice apresentou um valor correspondente a tempestades isoladas, o que não foi observado, tendo em vista a dissipação da LIC.

Os valores críticos (TABELAS 3, 4, 5, 6 e 7) dos índices de instabilidades utilizados neste trabalho foram obtidos para regiões de latitudes médias do Hemisfério Norte, mas são usados universalmente. O ideal seria o desenvolvimento de tabelas com valores críticos estabelecidos para o Hemisfério Sul e, melhor ainda, valores diferenciados para regiões tropicais e para regiões de latitudes médias. Entretanto, como dito anteriormente, não foram encontrados valores mais específicos, que pudessem ser utilizados neste trabalho. Sendo assim, os resultados mostrados nesta seção fornecem uma idéia apenas qualitativa do que realmente aconteceu.

#### **4.2.2.5. CAPE**

A FIGURA 34 mostra o campo da variável CAPE (Energia Potencial Disponível para Convecção), obtido com o Modelo ETA nos horários das 12 e 18UTC (dia 17) e das 06UTC (dia 18) referentes aos períodos “antes”, “durante” e “após” a ocorrência da LIC. A FIGURA 34a mostra uma região sobre o Oceano Atlântico com valores máximos de  $2100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Este valor, de acordo com a TABELA 3, representa uma condição moderadamente instável da atmosfera. Entretanto, fazendo a comparação do CAPE com a imagem de satélite no horário das 12 UTC (imagem não mostrada), verifica-se a existência de uma nebulosidade localizada sobre o Oceano Atlântico. Esta nebulosidade corresponde a um fragmento da ZCIT que, neste período, apresenta-se bem configurada na região (Hastenrath e Lamb, 1977; Uvo e Nobre, 1989). Analisando esta nebulosidade para os horários seguintes, nota-se que o Modelo ETA continuou restituindo bem as regiões convectivas da ZCIT (FIGURAS 34b e 34c), pois nas imagens de satélite das 18 UTC (do dia 17) e das 00UTC (do dia 18) a intensidade da ZCIT, presente sobre o Oceano, está associada com valores decrescentes de CAPE, o que condiz com a diminuição da intensidade da nebulosidade, vistas nas imagens de satélite. A LIC,

analogamente ao observado em relação à ZCIT, também teve uma evolução bem retratada pelos campos do CAPE. Às 12 UTC (FIGURA 34a), período “antes” da ocorrência da LIC, a instabilidade predominante está localizada sobre o Oceano, em associação à ZCIT, como dito anteriormente. Posteriormente, no período “durante” a ocorrência da LIC (FIGURA 34b) percebe-se nitidamente que os maiores valores de CAPE estão localizados paralelamente à costa, próximos de onde a LIC estava posicionada. Tais valores estão de acordo com a fase de vida da LIC, pois esta encontra-se em fase de desenvolvimento e sua maior atividade convectiva é alcançada uma hora e trinta minutos mais tarde. O campo relativo ao horário das 06 UTC (do dia 18, FIGURA 34c), mostra o CAPE no período “após” a ocorrência da LIC, com valores inferiores a  $1000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , na região onde esta havia se formado, indicando fraca convecção. Nota-se que o Modelo ETA representou bem as regiões propícias à atividade convectiva tanto desta LIC quanto da ZCIT.



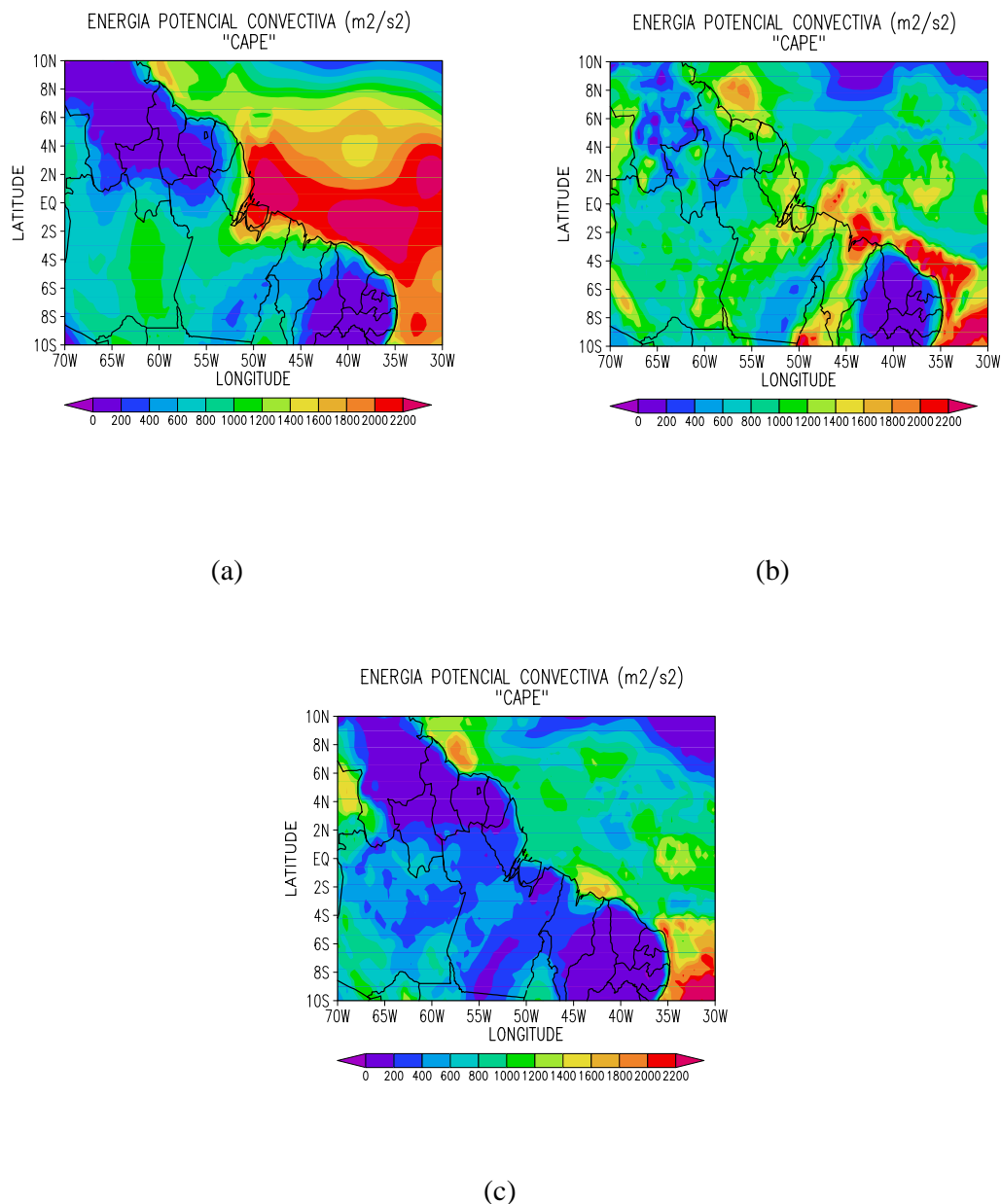


FIGURA 34 – Energia Potencial Disponível para Convecção – CAPE ( $m^2/s^2$ ) no nível 1000 hPa, obtido com o modelo ETA. (a) “antes”, (b) “durante” e (c) “após” a ocorrência da LIC nos dias 17-18 de abril de 2002.

#### 4.2.2.6. Condições de Grande Escala

As FIGURAS 35, 36, 37 e 38 mostram os campos da temperatura do ar, razão de mistura, vento horizontal em superfície e em 850 hPa, respectivamente, obtidos a partir das simulações com o modelo MM5, para o domínio 1. Este domínio permite analisar o ambiente de grande escala no qual a LIC selecionada se formou e evoluiu. Para haver compatibilidade entre a análise termodinâmica com as condições sinóticas associadas com esta LIC, os campos serão analisados nos horários: 12 UTC (dia 17), 18 UTC (dia 17) e 06 UTC (dia 18).

A FIGURA 35 mostra o campo de temperatura em superfície. Na FIGURA 35a, nota-se que “antes” da ocorrência da LIC, a temperatura é homogênea ao longo da costa, com valores entre 24°C a 26°C. Esta homogeneidade é característica de regiões tropicais, onde as temperaturas variam muito pouco no tempo e no espaço, considerando a grande escala. A FIGURA 35b mostra que na fase de maior atividade convectiva da LIC, o campo de temperatura apresentou valores superiores a 28°C. Este aumento também ocorreu sobre o oceano, mantendo a homogeneidade. Por outro lado, na FIGURA 35c pode-se notar um declínio nos valores de temperatura em Soure e em Bragança condicionado, pelo menos em parte, à dissipação da LIC. As temperaturas mais no interior do continente apresentaram um declínio enquanto que, sobre o oceano, as temperaturas permaneceram praticamente inalteradas, com valores superiores a 26°C.

Verifica-se que as maiores oscilações de temperatura ocorreram sobre o continente, onde os valores estavam elevados. Entretanto, não ficou evidente um gradiente horizontal de temperatura significativo que justificasse a presença de uma brisa marítima, caracterizada pelo aquecimento diferenciado entre o continente e o oceano com gradientes de temperatura em torno de 1°C/20km (Atkinson, 1981). A brisa marítima ocorre em resposta a um aquecimento diferencial, à superfície, entre o continente e o oceano. Numa região costeira, pode haver um gradiente de temperatura da ordem dos 10°C em poucas dezenas de quilômetros. Mesmo que a FIGURA 35b tenha mostrado um aquecimento sobre o continente maior do que sobre o oceano, isto não implica em um gradiente significativo, pois a variação foi de poucos graus em muitos