



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

Nº de ordem: MET-UFAL-MS-090

MAICON EIROLICO VEBER

**DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES CONVECTIVAS SOBRE A REGIÃO
NORDESTE DO BRASIL, ORGANIZADA PELA EXTREMIDADE FRONTAL**

**Maceió
2011**

MAICON EIROLICO VEBER

Nº de ordem: MET-UFAL-MS-090

**DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES CONVECTIVAS SOBRE A REGIÃO
NORDESTE DO BRASIL, ORGANIZADA PELA EXTREMIDADE FRONTAL**

Dissertação submetida ao colegiado do curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Meteorologia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Natalia Fedorova
Co-orientador : Prof. Dr. Vladimir Levit

Maceió
2011

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

V395 d Veber, Maicon Eirolico.
Desenvolvimento das atividades convectivas sobre a região nordeste do Brasil,
organizada pela extremidade frontal / Maicon Eirolico Veber. – 2011.
129 f. : il., tabs.

Orientador: Natalia Fedorova.

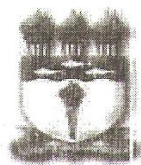
Co-Orientador: Vladimir Levit.

Dissertação (mestrado em Meteorologia : Processos de Superfície Terrestre) –
Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió,
2011.

Bibliografia: f. 124-129.

1. Meteorologia sinótica – Zona frontal – Brasil, Nordeste. 2. Sistemas frontais.
3. Processos conectivos. I. Título.

CDU: 551.5(812/813)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-090.

**“DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES CONVECTIVAS SOBRE A
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL, ORGANIZADA PELA EXTREMIDADE
FRONTAL.”**

Maicon Eirolico Veber

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Prof. Dra. Natália Fedorova
(Orientador)

Prof. Dra. Maria Luciene Dias de Melo
(Membro interno)

Prof. Dr. Manoel Alonso Gan
(Membro externo – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)

Junho / 2011

Dedico este trabalho a meus pais Vanderlei (*in memoriam*) e Vera, irmãos, Priscila e Igor, e minha esposa Marlise.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e sabedoria.

À minha família que sempre incentivou a seguir adiante.

À minha esposa, pelo companheirismo.

À Prof.^a Dr.^a Natalia Fedorova e ao Prof. Dr. Vladimir Levit pela orientação dada de forma tão competente e profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES- pela bolsa concedida por dois anos.

Aos professores do Instituto de Ciências Atmosféricas da UFAL.

Aos amigos Vinícius, Ana Carla, Henrique e Cíntia.

Os agradecimentos são extensivos a todos que de uma forma ou de outra colaboraram para a finalização deste trabalho.

*Quero gaita de oito baixos pra ver o ronco que sai
Botas feitio do Alegrete e esporas do Ibirocai
Lenço vermelho e guaiaca compradas lá no Uruguai
Pra que digam quando eu passe saiu igualzito ao pai*

João Batista Machado

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar as influências frontais sobre a Região Nordeste do Brasil. Procurando-se encontrar quais fatores são responsáveis pela formação de processos convectivos sobre esta Região, organizados pela extremidade frontal sobre o Atlântico Tropical Sul (ATS). Buscando-se, dessa forma, estabelecer um padrão de circulação para esses casos, o que poderá facilitar a previsão desses eventos. Assim, foi realizada a análise de 103 eventos de sistemas frontais, que influenciaram as condições de tempo sobre a Região Nordeste do Brasil, para o período de dez anos (2000-2009). Os casos foram divididos em dois grupos (G), de acordo com desenvolvimento ou não da convecção. *G1*- atividades convectivas sobre a região Nordeste do Brasil, organizadas pela extremidade frontal sobre o Atlântico Tropical Sul (ATS); *G2* - banda de nebulosidade pouco ativa sobre a Região Nordeste do Brasil, organizada pela extremidade frontal, sobre o ATS. As frentes foram identificadas, utilizando-se métodos sinóticos clássicos e imagens de satélite. Foram utilizados dados de reanálise do modelo global do NCEP/NCAR, imagens de satélite do canal infravermelho e dados de radiossondagens. Após uma comparação entre os dois grupos foram definidos oito fatores dinâmicos (F) que influenciaram na formação de atividades convectivas associadas à extremidade frontal. Sendo esses fatores em baixos níveis: *F1* – Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); *F2* – fluxo bifurcado sobre o Atlântico e convergência sobre o Nordeste; *F3* – borda oeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Em níveis médios: *F4* – convergência e cavado sobre o NEB; *F5* – cavado com eixo NW-SE; *F6* – cavado ciclone do HN. Em altos níveis: *F7* – cavado em 200 hPa; *F8* – Interação entre a AB e o VCAN. Foram analisados perfis termodinâmicos SkewT-LogP e os índices de instabilidade CAPE, K, TT e LI para avaliar o potencial de desenvolvimento convectivo sobre o NEB, para os eventos do G1 e G2. Durante o período de estudo foram verificados 68 casos do G1 e 35 casos do G2. Os casos do G1 foram encontrados durante todas as estações do ano, porém de forma muito mais frequente durante o verão austral e, muito raro durante o inverno, com apenas um caso. Em 11 oportunidades, esses casos estiveram relacionados com eventos de ZCAS. Os eventos do G2 foram mais frequentes durante o inverno austral e não foram observados durante o verão austral. Os fatores (F) para níveis inferiores foram encontrados com frequências semelhantes sendo que *F1*, *F2* e *F3* estiveram presentes respectivamente em 45, 50 e 43% dos casos estudados. Para níveis médios, o fator mais frequente foi o *F4*, presente em cerca de 60% dos casos. Para altos níveis, em 75% dos casos foi encontrada a interação entre a AB e o VCAN (*F8*). Com isso temos como padrões de circulação em maior frequência as interações *F1/F4/F8*; *F2/F4/F8* e *F3/F4/F8*, em 25, 22 e 25%, respectivamente. A análise termodinâmica mostrou padrões semelhantes para os casos do G1 e do G2. Os índices de instabilidade CAPE e LI mostraram um forte potencial convectivo (com valores de CAPE acima de 1500 J/Kg) em 88% dos casos do G1 e 63% dos casos do G2, para 12 horas anteriores a atuação da zona frontal sobre o nordeste. Os índices K e TT não mostraram potencial convectivo para a quase totalidade dos casos do G1 e G2. Portanto, os processos convectivos organizados pela extremidade frontal ocorrem preferencialmente quando se tem confluência em níveis médios, e forte difluência em altos níveis. Tendo em níveis baixos convergência no escoamento e/ou atuação conjunta ao sistema frontal da ZCIT. A avaliação somente de índices de instabilidade não se mostrou eficiente para determinar os processos convectivos associados à zona frontal. Sendo os mecanismos dinâmicos preponderantes para o desenvolvimento desses processos.

Palavras Chave: Meteorologia Sinótica, Sistemas Frontais, Processos Convectivos, Nordeste do Brasil.

ABSTRACT

This work aims to study the influences on the frontal region northeast Brazil. To find which factors are responsible for the formation of convective processes over this region, organized by the front edge of the Tropical South Atlantic. Searching to establish a circulation pattern for these cases, which may facilitate the forecasting of these events. This, analysis was performed of 103 events of frontal systems, which influences the weather over the Northeast of Brazil for the period of ten years (2000-2009). The cases were divided into two groups (G), according to development or convection. G1-convective activities over the Northeast region of Brazil, organized by frontal extremity, G2 - band of cloudiness less active on the Northeast of Brazil, organized by frontal extremity. The fronts were identified, using methods classical synoptic and satellite images. We used data from global model reanalysis of NCEP / NCAR reanalysis, satellite imagery infrared channel and data from radiosondes. After a comparison between the two groups were defined eight dynamic factors (F) that influences the formation of convective activities associated with the frontal extremity. Being these factors at low levels: F1 - the Intertropical Convergence Zone (ITCZ); F2 - bifurcated flow over the Atlantic and convergence on the northeast; F3 - western border of the High of the South Atlantic. On average levels: F4 - convergence and dug over NEB; F5 - dug with NW-SE axis; F6 - trough associated with North Hemisphere cyclone. At high levels: F7 - trough at 200 hPa; F8 - Interaction between the Cyclonic Vortex over Northern Atlantic and Bolovian High (F8). Thermodynamic profiles SkewT-LogP were analyzed SkewT-LogP and the indices of instability CAPE, K, TT and LI to assess the potential for convective development over the NEB, for events in G1 and G2. During the study period were recorded 68 cases of G1 and G2 in 35 cases. The cases of G1 were found during all seasons, but much more frequent during the austral summer, and very rare in winter, with only one case. In 11 circumstances, these cases were related to events SACZ. The events of group 2 were more frequent during the austral winter and were not observed during the austral summer. The factors (F) in low levels were found with similar frequencies being F1, F2 and F3 were present in respectively 45, 50 and 43% of cases. To average levels, the most frequent was the F4, present in about 60% of cases. For high levels, in 75% of cases showed the interaction between Cyclonic Vortex over Northern Atlantic and Bolovian High (F8). Thus we have the circulation patterns in greater frequency interactions F1/F4/F8; F2/F4/F8 and F3/F4/F8, 25, 22 and 25% respectively. The thermodynamic analysis showed similar patterns for the cases of G1 and G2. The indices of instability CAPE and LI showed a strong convective potential (with values of CAPE above 1500 J / kg) in 88% of cases of G1 and 63% of cases of G2 for 12 hours prior acting of the frontal zone on the northeast. The indices K and TT didn't show potential for convective for almost all cases of G1 and G2. Therefore, the convective processes organized by frontal extremity occur preferentially when has confluence in medium levels, and strong diffluence at high levels. Having low levels convergence in or frontal system acting together with the ITCZ. The only evaluation of instability index was not efficient to determine the convective processes associated with the frontal zone. Being the dynamic mechanisms preponderant for the development of these processes.

Key words: Synoptic Meteorology, Frontal Systems, Convective Processes, Northeastern Brazil.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS	19
2.1	Considerações sobre Sistemas Frontais	19
2.2	Ciclones Frontais ou Baroclínicos	20
2.3	Ciclone Térmico ou Barotrópico	23
2.4	Métodos para determinação de frentes	24
2.5	Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)	25
2.6	Alta da Bolívia (AB)	27
2.8	Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)	29
2.9	Sistemas Frontais e Convecção Tropical sobre a América do Sul	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	A Região Nordeste do Brasil	40
3.2	Dados	41
3.2.1	Dados de Reanálise	41
3.2.2	Imagens de Satélite	42
3.2.3	Radiossondagens para algumas estações do NEB	42
3.3	Metodologia	42
3.3.1	Escolha e agrupamento dos casos	42
3.3.2	Variáveis Utilizadas	44
3.3.3	Métodos Usados a Identificação das Zonas Frontais	49
3.3.5	Interação com os restos da onda anterior e ou posterior	58
3.3.6	Comparação entre o Grupo 1 (G1) e o Grupo 2 (G2)	58
3.3.7	Análise Termodinâmica dos Eventos	59
3.3.8	Determinação de episódios da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)	60
4	RESULTDOS E DISCUSSÕES	61
4.1	Atuação dos Sistemas Frontais na Região Nordeste do Brasil	62
4.2	Frequência das zonas frontais com atividade convectiva sobre NEB	65
4.3	Fatores Dinâmicos de desenvolvimento da atividade convectiva sobre NEB nas zonas frontais	67
4.4	Interação entre os Fatores Dinâmicos	77
4.4.1	Para dois níveis atmosféricos.	78
4.4.2	Para três níveis atmosféricos.	81
4.5	Fatores dinâmicos das zonas frontais fracas sem desenvolvimento de nebulosidade convectiva sobre NEB (G2).	83
4.6	Padrões típicos encontrados para os casos sem convecção na extremidade frontal.	84
4.7	Comparação entre os padrões encontrados para os eventos com convecção e sem convecção na extremidade da zona frontal.	92
4.7.1	Baixos Níveis	92

4.7.2 Níveis médios:	93
4.7.3 Altos Níveis:	96
4.8 Modelo Conceitual para Formação Convectiva sobre o NEB, Organizada pela extremidade frontal.	98
4.9 Fatores Termodinâmicos	101
4.9.1 Para os eventos com convecção	101
4.9.2 Para os eventos sem convecção	104
4.10 Considerações sobre os fatores dinâmicos e termodinâmicos para formação dos processos convectivos.	107
4.11 Estudo de Caso: Atividades Convectivas sobre o NEB, Organizadas pela extremidade frontal.	108
5 CONCLUSÕES	121
REFERÊNCIAS	124

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1** - Sistema Frontal em evolução no Hemisfério Sul, centro de baixa pressão (B), frentes fria e quente, isóbaras (linhas inteiras), regiões de precipitação (área hachurada). 20
- FIGURA 2** – Modelo conceitual da evolução de um ciclone mostrado na baixa troposfera, altura geopotencial e frentes (acima) e temperatura potencial (abaixo). (a) modelo ciclônico norueguês: (I) perturbação na onda, (II) e (III) estreitamento do setor quente, (IV) oclusão; (b) modelo de Shapiro-Keyser: (I) perturbação de onda. (II) fratura frontal, (III) frente em forma de T e frente curvada atrás, (IV) frente em de T e exclusão quente. 23
- FIGURA 3** - Esquema de formação para o VCAN do tipo Palmer clássico sobre o Oceano Atlântico Tropical Sul. 29
- FIGURA 4** - Frequência de frentes em superfície durante: a) Janeiro, Fevereiro e Março, 1958 (Verão, HS) e b) Julho, Agosto e Setembro, 1957 (Inverno, HS). Os valores representam o número de vezes em 100 dias que parte de uma frente estava situada dentro da área de 4×10^5 km². 32
- FIGURA 5** - Isóbaras com intervalo de 3 hPa, os símbolos são usuais. (a) e (b) para o verão, 26 e 27 de fevereiro de 2000 e (c) e (d) para o inverno, 05 e 06 de julho de 2000. 34
- FIGURA 6** - Esquema típico de formação de nebulosidade convectiva (I), distribuição mensal de sistemas frontais que penetram nas bandas de latitude (II) e distribuição mensal do número de sistemas frontais que organizaram convecção tropical (III) nas bandas de latitude a,b,c e d. 36
- FIGURA 7** - Mapa da Região Nordeste do Brasil. 40
- FIGURA 8** - Imagens de satélite com a caracterização dos grupos G, grupo 1(G1), eventos com convecção na extremidade frontal (a) e grupo 2 (G2), eventos sem convecção na extremidade frontal (b). 43
- FIGURA 9** - Representação gráfica da área positiva (CAPE) em um diagrama Skew T – Log P 46
- FIGURA 10** - ZCIT e área de atuação desta em conjunto com o sistema frontal, linhas de corrente em 925 hPa (a) , banda dupla de nebulosidade para ZCIT, imagem do canal infravermelho do satélite METEOSAT (b), atuação conjunta da zona frontal e da ZCIT, imagem do canal infravermelho do satélite METEOSAT (c), FATOR 1 (F1). 51

FIGURA 11 - Divisão no fluxo de leste, com cavado (tracejado) e crista (contínua), convergência sobre NEB (circulo), ASAS, Anticiclone pós-frontal e ciclone, linhas de corrente em 925 hPa, FATOR 2 (F2).....	52
FIGURA 12 - Borda oeste do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (A), ciclone (B), linhas de corrente em 925 hPa, FATOR 3 (F3).....	53
FIGURA 13 - Confluência no escoamento sobre a Região Nordeste do Brasil, Alta sobre o Atlântico (A), Vórtice Ciclônico (VC), Alta da Bolívia (AB) e cavado ao norte de 25°S (tracejado), linhas de corrente em 500 hPa,.....	54
FIGURA 14 - Cavado NW-SE (tracejado) no nível de 500 hPa, atuando sobre a Região Nordeste do Brasil, Alta da Bolívia (AB) e ASAS (A), FATOR 5 (F5).	55
FIGURA 15 - Cavado ligado ao anticiclone do hemisfério norte (tracejado), Alta da Bolívia (AB) e ASAS (A), linhas de corrente no nível de 500 hPa, FATOR 6 (F6).	56
FIGURA 16 - Cavado estendendo-se meridionalmente (tracejado), área de difluência sobre a Região Nordeste do Brasil (retângulo), Alta da Bolívia (AB), linhas de corrente em 200 hPa, FATOR 7 (F7).	57
FIGURA 17 - Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), Alta da Bolívia (AB), área de difluência na circulação sobre a Região Nordeste (circulo), área de posicionamento do VCAN (retângulo), linhas de corrente em 200 hPa, FATOR 8.....	58
FIGURA 18 - Linhas de corrente em 925 hPa e Omega em 850hPa para o fator 1, com posição da ZCIT.....	68
FIGURA 19 - Imagens de satélite para o dia 29/04/2007 as 12:00 UTC com duas bandas de nebulosidade para ZCIT	69
FIGURA 20 - Linhas de corrente em 925 hPa e Omega em 850hPa para o fator 2.....	70
FIGURA 21 - Linhas de corrente em 925 hPa e Omega em 850hPa para o fator 3.....	71
FIGURA 22 – Linhas de corrente em 500hPa e Omega em 500hPa para o fator 4.....	72
FIGURA 23 – Linhas de corrente em 500hPa e Omega em 500hPa para o fator 5.....	73

FIGURA 24 – Linhas de corrente em 500hPa e Omega em 500hPa para o fator 6	74
FIGURA 25 – Linhas de corrente em 200hPa e Omega em 200hPa para o fator 7	75
FIGURA 26 - Linhas de corrente em 200hPa e Omega em 200hPa para o fator 8.....	76
FIGURA 27 - Padrão 1 em baixos níveis para casos sem convecção, ciclone (B), anticiclone pós-frontal (A), conforme linhas de corrente em 925 hPa	85
FIGURA 28 - Padrão 2 em baixos níveis para casos sem convecção, ciclone (B), anticiclone pós-frontal (A), conforme linhas de corrente em 925 hPa	86
FIGURA 29 – Padrão 1 em médios níveis para casos sem convecção, Alta sobre o continente (A), cavado (tracejado), conforme linhas de corrente em 500 hPa.....	87
FIGURA 30 - Padrão 2 em médios níveis para casos sem convecção, sistema de alta pressão sobre o continente (A), conforme linhas de corrente em 500 hPa	88
FIGURA 31 - Padrão 3 em médios níveis para casos sem convecção, cavado (tracejado), Alta sobre o continente (A), Alta sobre o Atlântico (A), conforme linhas de corrente em 500 hPa.	89
FIGURA 32 - Padrão 1 em altos níveis para casos sem convecção, cavado meridional (tracejado), Alta sobre o continente (A), área de difluência (circulo), conforme linhas de corrente em 200 hPa..	90
FIGURA 33 - Padrão 2 em altos níveis para casos sem convecção, conforme linhas de corrente em 200 hPa.....	91
FIGURA 34 - Padrão 3 em altos níveis para casos sem convecção, cavado (tracejado), Alta sobre o nordeste (A), conforme linhas de corrente em 200 hPa	92
FIGURA 35 - Padrões em baixos níveis atmosféricos para os eventos em que se observou atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, linhas de corrente em 925 hPa.	93

FIGURA 36 - Padrões em baixos níveis atmosféricos para os eventos em que não se observou atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, linhas de corrente em 925 hPa.	93
FIGURA 37 - Padrões em médios níveis atmosféricos para os eventos em que se observou atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, linhas de corrente em 500 hPa.	94
FIGURA 38 - Padrões em médios níveis atmosféricos para os eventos em que não se observou atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, linhas de corrente em 500 hPa.	95
FIGURA 39 - Padrões em altos níveis atmosféricos para os eventos em que se observou atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, linhas de corrente em 500 hPa.	97
FIGURA 40 - Padrões em altos níveis atmosféricos para os eventos em que não se observou atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, linhas de corrente em 500 hPa.	97
FIGURA 41 – Modelo para circulação em 200 hPa, para os casos com convecção na extremidade frontal.	98
FIGURA 42 - Modelo para circulação em 500 hPa, para os casos com convecção na extremidade frontal.	99
FIGURA 43 - Modelos para circulação em 925 hPa, para os casos com convecção na extremidade frontal, a) tipo 1; b) tipo 2; c) tipos 3 e 4.	100
FIGURA 44 - Diagrama Skew T – Log P, representativo do padrão médio da atmosfera, para os eventos com convecção na extremidade frontal (G1), curva de temperatura (continua vermelha), curva de temperatura do ponto de orvalho (tracejada azul), e trajetória da parcela (continua verde).....	102
FIGURA 45 - Diagrama Skew T – Log P, representativo do padrão médio da atmosfera, para os eventos sem convecção na extremidade frontal (G2), curva de temperatura (continua vermelha), curva de temperatura do ponto de orvalho (tracejada azul), e trajetória da parcela (continua verde).....	105
FIGURA 46 - Imagens de Satélite do canal infravermelho para: a) o dia 26 de fevereiro de 2008 às 00 UTC; b) para o dia 27 de fevereiro de 2008 às 00 UTC; c) para o dia 28 de fevereiro de 2008 às 00 UTC; d) para o dia 28 de fevereiro de 2008 às 00 UTC.	109

FIGURA 47 - Campo de PNM, com a demarcação dos sistemas atuantes sobre o Brasil, para: a) dia 26 de fevereiro de 2008 às 18Z ; b) dia 27 de fevereiro de 2008 às 18Z; c) dia 28 de fevereiro de 2008 às 18Z ; d) dia 29 de fevereiro de 2008 às 18Z. 111

FIGURA 48 - Campo de espessura entre os níveis de 500 e 1000 hPa, para: a) dia 26 de fevereiro de 2008 às 18Z; b) dia 27 de fevereiro de 2008 às 18Z; c) dia 28 de fevereiro de 2008 às 18Z; a) dia 29 de fevereiro de 2008 às 18Z. 112

FIGURA 49 - Campo de linhas de corrente e magnitude do vento em 925 hPa, para: a) dia 26 de fevereiro de 2008 às 18Z ; b) dia 27 de fevereiro de 2008 às 18Z ; c) dia 28 de fevereiro de 2008 às 18Z; d) dia 29 de fevereiro de 2008 às 18Z 114

FIGURA 50 - Campo de advecção de temperatura em 925 hPa, área de posicionamento da zona frontal entre as regiões de advecção fria e quente, para: a) dia 26 de fevereiro de 2008 às 18Z ; b) dia 27 de fevereiro de 2008 às 18Z ; c) dia 28 de fevereiro de 2008 às 18Z; d) dia 29 de fevereiro de 2008 às 18Z 115

FIGURA 51 - Campo de linhas de corrente e magnitude do vento em 500 hPa, para: a) dia 26 de fevereiro de 2008 às 18Z ; b) dia 27 de fevereiro de 2008 às 18Z ; c) dia 28 de fevereiro de 2008 às 18Z; d) dia 29 de fevereiro de 2008 às 18Z. 117

FIGURA 52 - Campo de linhas de corrente e magnitude do vento em 200 hPa, para: a) dia 26 de fevereiro de 2008 às 18Z ; b) dia 27 de fevereiro de 2008 às 18Z ; c) dia 28 de fevereiro de 2008 às 18Z; d) dia 29 de fevereiro de 2008 às 18Z. 119

FIGURA 53 - Precipitação acumulada para o período de 26 a 29 de fevereiro de 2008. 120

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Valores críticos de CAPE	47
TABELA 2 - Valores críticos do índice K.....	47
TABELA 3 - Valores críticos do Índice Total-Totals (TT).....	48
TABELA 4 - Valores críticos do Índice de Levantamento (LI)	48
TABELA 5 - Quantidade dos casos de zonas frontais sobre o NEB, para o G1 e o G2 durante o período de estudo (2000-2009) e para as estações de transição, verão e inverno austral.....	64
TABELA 6 - Frequência de eventos para anos de El Niño e La Niña.	64
TABELA 7 - Quantidade dos casos de zonas frontais sobre o NEB, para o G1 durante o período de estudo (2000-2009) e para as estações de transição, verão e inverno austral.....	66
TABELA 8 - Relação dos episódios de ZCAS, encontrados para, casos com convecção na extremidade frontal.....	67
TABELA 9 - Distribuição temporal e frequência de ocorrência dos fatores que influenciam o desenvolvimento de atividades convectiva sobre o NEB, organizadas pela extremidade frontal.	77
TABELA 10 - Interações entre os Fatores dinâmicos para dois níveis atmosféricos, e distribuição temporal dessas interações.....	79
TABELA 11 - Frequência de ocorrência das interações em dois níveis atmosféricos.....	81
TABELA 12 - Interações entre os Fatores dinâmicos para três níveis atmosféricos, e distribuição temporal dessas interações.....	82
TABELA 13 - Frequência de ocorrência das interações em dois níveis atmosféricos.	83

TABELA 14 – Distribuição mensal, sazonal e anual dos eventos pertencente ao G2, selecionados para o estudo. 84

TABELA 15 - Percentuais, de casos em que os índices denotaram valores compatíveis com a instabilidade observada, a partir de valores críticos estipulados, para as 12 h anteriores e 12 h posteriores aos processos convectivos máximos para o eventos do G1. 104

TABELA 16 - Percentuais, de casos em que os índices denotaram valores compatíveis com a instabilidade observada, a partir de valores críticos estipulados, para as 12 h anteriores e 12 h posteriores a atuação da zona frontal sobre o NEB, para os eventos do G2. 107

LISTA DE ABREVIATURAS

AB	Alta da Bolívia
AS	América do Sul
ATS	Atlântico Tropical Sul
CJ	Corrente de Jato
CJS	Corrente de Jato Subtropical
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
F	Fator
G	Grupo
GrADS	Grid Analysis and Display
GOES	Satélite Meteorológico Geostacionário
HS	Hemisfério Sul
HN	Hemisfério Norte
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
METEOSAT	Satélite Meteorológico Geostacionário da Agência Espacial Europeia
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NE	Nordeste
NW	Noroeste
NEB	Nordeste do Brasil
AO	Onda Anterior
OP	Onda Posterior
PNM	Pressão ao Nível do Mar
SE	Sudeste
SW	Sudoeste
UR	Umidade Relativa
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência Intertropical
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas frontais afetam o tempo sobre a América do Sul durante todo ano. Eles são facilmente identificados em imagens de satélites e geralmente se deslocam de sudeste para nordeste sobre o continente e oceano Atlântico adjacente. Durante o inverno, esses sistemas são acompanhados de massas de ar de latitudes altas que, muitas vezes, causam geadas e friagens em áreas agrícolas no Sudeste e Sul do Brasil. Algumas vezes, as frentes alcançam latitudes muito baixas sobre o oeste da Amazônia e também ao longo da costa nordeste do Brasil. A máxima precipitação de novembro a março no Nordeste do Brasil é ocasionada pela incursão de sistemas frontais que interagem com a convecção tropical (CAVALCANTI e KOUSKY, 2009).

Ao adentrarem a América do Sul, as frentes frias podem adquirir deslocamento para leste, modificando o tempo no sul do continente, ou para norte (nordeste), modificando as condições de tempo em todo o continente sul americano (GEMIACK, 2005). Quando esses sistemas se deslocam para norte (nordeste), chegam frequentemente, até latitudes tropicais com intensidade considerável (LEMOS e CALBETE, 1996).

Kalnay (1996), Justi e Silva Dias (2002) e Cavalcanti e Kousky (2003), dentre outros mostraram que a frequência de frentes frias diminui com o decréscimo da latitude e que suas passagens estão ligadas às mudanças de tempo nas regiões afetadas. Em latitudes mais altas, essas mudanças no tempo estão associadas com precipitação, queda de temperatura e mudança na direção e intensidade do vento. Em latitudes mais baixas os efeitos das frentes estão relacionados principalmente com o aumento da precipitação.

As frentes interagem com o ciclone térmico, ciclone barotrópico, que tem origem no aquecimento da superfície continental. Essa atuação conjunta provoca intensificação da extremidade frontal no sul do Brasil (SIGNORINI, 2001). Ao atingirem latitudes tropicais os sistemas frontais podem interagir com a ZCIT e também com o VCAN na costa do NEB, aumentando os processos convectivos (CAVALCANTI e KOUSKY, 2009).

Oliveira (1986) realizou uma climatologia das frentes para o período de 1975 a 1984 e constatou que os sistemas frontais podem interagir com convecção local, especialmente durante a primavera e verão do hemisfério sul, quando os sistemas frontais apresentam ampla penetração continental, uma condição necessária para essa interação. Dando continuidade ao

trabalho de Oliveira, Lemos e Calbete (1996), fizeram uma climatologia dos sistemas frontais para o período de 1987 a 1995, utilizando análises de cartas sinóticas.

Cruz (2008) realizou a determinação sinótica dos fatores que favorecem as influências frontais sobre o estado de Alagoas (AL). Nesse estudo também constatou que as influências frontais sobre AL podem ser divididas em três grupos distintos que são: Grupo 1 em que observou a passagem da extremidade frontal sobre o estado. Grupo 2 em que verificou a extremidade frontal sobre o Atlântico Tropical Sul, influenciando as condições do tempo sobre AL. Grupo 3 no qual a extremidade frontal sobre o Atlântico organizou atividades convectivas sobre AL.

Esse trabalho teve como objetivos estudar a influência dos sistemas frontais sobre a Região Nordeste do Brasil, analisando o desenvolvimento de processos convectivos sobre a Região Nordeste do Brasil organizados pela extremidade frontal, sobre o oceano Atlântico Tropical Sul. Também identificar os fatores dinâmicos responsáveis pela formação desses processos convectivos, procurando estabelecer os padrões de circulação existentes para este tipo de evento. Outro objetivo foi avaliar a contribuição dos fatores termodinâmicos em relação os fatores dinâmicos na formação dos processos convectivos. Tendo como objetivo final tentar melhorar a previsão desses eventos sobre a Região Nordeste do Brasil.

2 REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS

Serão apresentadas e discutidas nesse capítulo algumas definições e trabalhos relativos a estudos sobre sistemas frontais e também outros sistemas que atuam sobre a América do Sul e o Brasil.

2.1 Considerações sobre Sistemas Frontais

Os conceitos de frentes foram introduzidos na literatura meteorológica durante a década 1920/1930 por Bergeron, Bjerknes e Solberg. Desde então, esses conceitos têm sido amplamente adotados e ainda figuram como base importante na análise do tempo.

Uma superfície frontal pode ser definida como o limite entre duas massas de ar de diferentes características, possuindo normalmente vários quilômetros de espessura, com a mistura das massas de ar. A interseção da superfície frontal com qualquer outra superfície de referência constitui uma faixa chamada frente. A espessura e a inclinação da superfície frontal condicionam a largura da frente, que normalmente varia entre 25 e 50 km quando a transição é bem nítida, mas atingindo de 100 a 300 km no caso de transições difusas (Varejão-Silva, 2005).

Holton (1979) define as zonas frontais por regiões com alta assimetria na forma, com fortes ventos e grandes gradientes de temperatura. Outras definições bem difundidas na literatura indicam que esses sistemas são altamente baroclínicos e apresentam perturbações na velocidade dos ventos com a altura (SAUCIER, 1955; PETTERSEN, 1956; PALMEN e NEWTON, 1969; MEDINA, 1976 e DEFANT e MORTH, 1978). No entanto Newton *et al.* (1972), através de um estudo climatológico explicaram que na prática, essas estipulações são restritivas, apresentando uma definição mais ampla, pois definem a zona frontal como uma zona hiperbaroclínica separando duas massas relativamente barotrópicas.

Os sistemas frontais são constituídos de uma frente fria, uma frente quente e um centro de baixa pressão em superfície denominado ciclone ou vórtice frontal (FIGURA 1). Quando o ar frio avança substituindo o ar quente, a zona frontal é chamada de frente fria. Ao contrário, quando o ar quente se desloca e substitui o ar frio, é definida uma frente quente. Quando não há deslocamento de nenhuma massa de ar sobre outra, a frente é denominada estacionária (FEDOROVA, 1999).

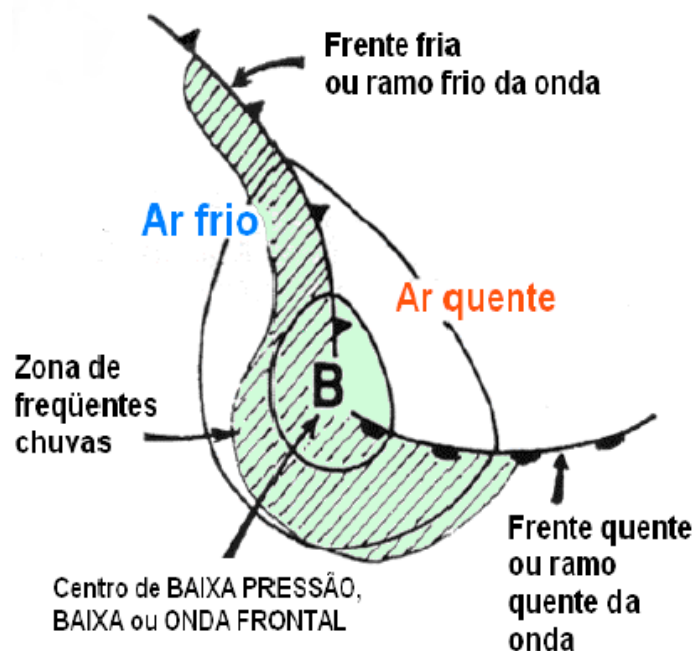
Segundo Fedorova (1999), o processo de oclusão, ou frente oclusa se dá quando há uma alternância sucessiva entre as frentes quentes e frias, formando chuvas leves e contínuas

por um período longo em um mesmo local. Atuando nesse caso três massas de ar, com o ar mais quente estando entre duas massas de ar mais frio, podendo dessa forma a frente oclusa ser quente ou fria.

Assim sendo, frente é uma zona de forte gradiente de temperatura e relativa alta estabilidade estática. Ela é uma fronteira entre duas massas de ar, massa de ar quente e massa de ar frio, de fato é uma região entre duas massas de densidades diferentes. Os valores aproximados encontrados são: gradiente de temperatura maior que $10 \text{ K}/1000 \text{ km}$, gradiente de umidade maior que $10 \text{ gm.Kg}^{-1}/100 \text{ Km}$, vento maior que 30 m.s^{-1} e cisalhamento maior que $5 \text{ m.s}^{-1}/\text{Km}$ (SATYAMURTY, 2004).

Bowditch (1977) utilizou a expressão “onda frontal” ao referir-se ao sistema frontal, pois duas massas de ar distintas se movimentam de forma independente uma da outra, e cada uma delas altera a outra, de modo que essa interação gera uma formação característica de uma onda. Dessa forma, segundo Oliveira *et al.*(2001), onda frontal é a deformação horizontal do tipo ondular em baixos níveis, que está comumente associada a um máximo de circulação ciclônica no escoamento próximo, que pode evoluir para um ciclone ou uma frente.

FIGURA 1 - Sistema Frontal em evolução no Hemisfério Sul, centro de baixa pressão (B), frentes fria e quente, isóbaras (linhas inteiras), regiões de precipitação (área hachurada).



Fonte: Varejão-Silva, 2001

2.2 Ciclones Frontais ou Baroclínicos

A formação e o desenvolvimento de ciclones na atmosfera, denominados de ciclogênese, são estudados desde o século XIX, em razão da grande importância que tais sistemas assumem no transporte de calor, na umidade e na quantidade de movimento, além de mudanças no tempo nas regiões em que atuam. Segundo Petterssen (1956), os primeiros modelos de ciclones extratropicais foram propostos por Fitz – Roy em 1863 e por Shaw 1911, mas seus conceitos, por seus contemporâneos (GAN e SELUCHI, 2009).

O primeiro modelo conceitual ciclônico mais realístico foi descrito por Bjerknes (1919), e possuía duas regiões de convergência de massa: uma chamada de *squall line* e a outra *steering line*. Essas linhas foram posteriormente chamadas de frente fria e frente quente no trabalho aprimorado por Bjerknes e Solberg (1922). Esse Modelo Ciclônico introduziu o conceito de *Teoria da Frente Polar*, pois indica que os ciclones extratropicais são formados em uma onda de pequena amplitude, resultante da instabilidade na frente polar, intensificando-se até atingir o estágio maduro, chegando ao estágio de oclusão, onde torna-se um vórtice embebido dentro do ar frio. De forma resumida, o modelo consiste em uma massa de ar frio e outra de ar quente, o ar frio forma uma rampa e eleva o ar quente. Sendo que a distribuição das nuvens e da precipitação podem, ser explicadas como resultado do resfriamento adiabático do ar quente ascendente sobre as frentes quente e fria (FEDOROVA, 2001).

Muitas pesquisas apresentaram a possibilidade de várias estruturas e evoluções de ciclones frontais (BROWNING, 1990; SHAPIRO e KEYSER, 1990; EVANS *et al.*, 1994; SMIGIELSKI e MOGIL, 1995; BOSART, 1998, citados por SHULTZ *et al.*, 1998), a FIGURA 2.2 mostra a evolução do ciclone frontal pelo modelo Norueguês e pelo modelo de Shapiro-Keyser.

O modelo indicando que os principais mecanismos para desenvolvimento de ciclogênese em superfície são advecção de vorticidade negativa no nível de não-divergência (HS) e o aquecimento entre a superfície e o nível de não-divergência, foi proposto por Sutcliffe (1947).

Petterssen e Smabye (1971) concluíram que nem sempre as ciclogêneses estão associadas à advecção de vorticidade ciclônica. Eles concluíram que os ciclones poderiam ser classificados em dois grupos, chamados A e B de acordo com o tipo de desenvolvimento. As principais características dos dois tipos de ciclone são:

a) Ciclones do tipo A:

- O desenvolvimento começa sob uma corrente de ar não muito intensa, numa zona de máxima baroclinia;
- Não é observada, inicialmente, a presença de um cavado em altos níveis, porém este se desenvolve quando o ciclone em baixos níveis se intensifica;
- A advecção de vorticidade em altos níveis é pequena no início e durante o desenvolvimento dos sistemas, sendo a contribuição principal para a intensificação do ciclone a advecção térmica;
- A baroclinia na troposfera inferior é grande no início e decresce com a oclusão da onda;
- Resultado final do desenvolvimento é uma oclusão clássica (Bjerkenes e Solberg, 1922).

b) Ciclones do tipo B:

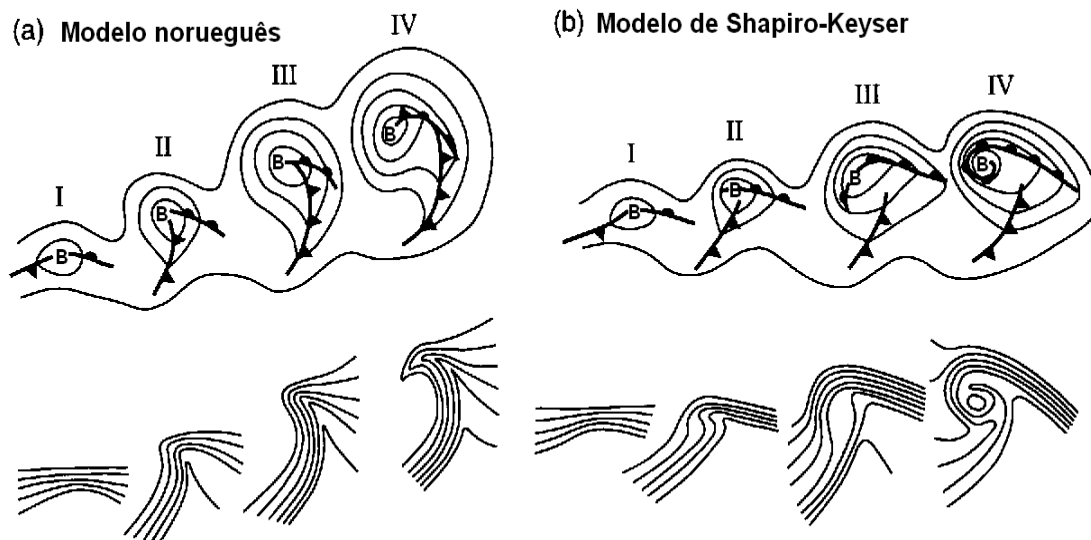
- O desenvolvimento é iniciado quando há a preexistência de um cavado no ar superior, com forte advecção de vorticidade penetra sobre uma região de advecção de ar quente em baixos níveis, na qual pode ou não estar presente uma frente fria;
- A distância de separação entre o cavado em altos níveis e o sistema em níveis inferiores decresce rapidamente enquanto há intensificação do ciclone, e o eixo tende a se posicionar na vertical quando o ciclone atinge a intensidade máxima;
- A advecção de vorticidade nos altos níveis é grande na fase inicial, diminuindo conforme a intensidade máxima do ciclone é atingida. A advecção térmica é pequena inicialmente crescendo com a intensificação do ciclone em baixos níveis;
- A baroclinia em níveis baixos é relativamente pequena na fase inicial e cresce com a intensificação do sistema;
- Resultado final do desenvolvimento é uma oclusão clássica (Bjerkenes e Solberg, 1922).

Um terceiro tipo de ciclone foi proposto por Radinovic (1985), esse tipo foi chamado por ele de tipo C, e está associado a efeitos orográficos, também conhecidos como ciclones a sotavento das montanhas. Esses ciclones apresentam diferenças estruturais consideráveis quando comparados aos tipos A e B.

Na América do Sul, as ciclogêneses são influenciadas pela Cordilheira dos Andes. Durante o inverno, as ciclogêneses devem-se principalmente pelos efeitos baroclínicos, porém a Cordilheira do Andes exerce influência no deslocamento do ciclone que inicialmente se desloca para nordeste e posteriormente gira para sudeste. No verão, o

efeito orográfico tornou-se marcante tanto na formação quanto no deslocamento inicial do ciclone, sendo o efeito baroclínico mais importante durante a fase de desenvolvimento do ciclone (GAN, 1992).

FIGURA 2 – Modelo conceitual da evolução de um ciclone mostrado na baixa troposfera, altura geopotencial e frentes (acima) e temperatura potencial (abaixo). (a) modelo ciclônico norueguês: (I) perturbação na onda, (II) e (III) estreitamento do setor quente, (IV) oclusão; (b) modelo de Shapiro-Keyser: (I) perturbação de onda, (II) fratura frontal, (III) frente em forma de T e frente curvada atrás, (IV) frente em de T e exclusão quente.



Fonte: SCHULTZ et al. (1998).

2.3 Ciclone Térmico ou Barotrópico

Uma baixa ao nível do mar, com núcleo quente irá enfraquecer com a altura, podendo passar a ser uma alta pressão nos níveis superiores. Esse tipo de ciclone é observado somente nos baixos níveis, quando o aquecimento próximo da superfície é maior que em outras regiões, podendo ser chamado de ciclone quente, ciclone térmico, ciclone local ou ciclone de baixos níveis (FEDOROVA, 2001).

A Baixa do Chaco é um sistema de baixa pressão termo-orográfico localizado entre o Paraguai e a Bolívia. Esse sistema tem papel importante na circulação em baixos níveis, sendo bem definido durante o verão (LICHTENSTEIN, 1989). Hoffmann (1975), citado por Seluchi *et al.* (2003), analisou detalhadamente os mapas de superfície e mostrou a existência de dois centros de baixa pressão separados, o primeiro se localiza na região do Chaco e o segundo fica no noroeste da Argentina.

Signorini (2001) estudou a intensificação da extremidade da frente, associada ao ciclone térmico. Ela percebeu que a passagem da extremidade frontal no sul do Brasil é intensificada pela presença de um ciclone térmico no norte da Argentina.

2.4 Métodos para determinação de frentes

A determinação objetiva de uma frente seja ela, fria, quente ou oclusa nem sempre é fácil de ser realizada. Os principais métodos utilizados atualmente para determinação das frentes utilizam informações como imagens de satélites, e de diferentes campos, como pressão, linhas de corrente, temperatura, espessura, laplaciano da pressão, umidade relativa e outros, conforme Fedorova e Carvalho (2000).

Na literatura são encontrados diferentes critérios, utilizados por diferentes autores para determinação das frentes, como por exemplo:

- Petterssen (1956) detreminou que, no campo de pressão as frentes encontram-se em um cavado associado ao ciclone baroclínico extratropical, e apresentando fortes gradientes de temperatura e/ou espessura;
- Parmenter (1976) analisou frentes baseando-se somente em imagens de satélite;
- Kousky (1979) determinou a passagem frontal através da mudança na direção do vento para sul e uma variação na média diária da temperatura do bulbo úmido de 2 graus;
- Oliveira (1986) identificou as frentes através de imagens de satélites, pela formação de uma banda de nebulosidade que se estendia desde a costa do continente até a região amazônica, para avaliar a interação do sistema frontal com a convecção tropical;
- Smith *et al.* (1995) definiram um eixo de máxima vorticidade relativa para a identificação das frentes;
- Fedorova e Carvalho (2000) identificaram a zona frontal em diversos campos. A linha de frente coincide com o eixo do cavado bórico no campo de pressão, com forte gradiente de temperatura, convergência próxima à zona frontal no campo de vento e alta umidade nas proximidades da frente fria;
- Koch e Mitchem (2003) utilizaram imagens de satélites, análise isentrópica, perfis verticais e imagens de radar para estudar uma frente quebrada ou “split”;

- Andrade e Cavalcanti (2004) avaliaram a passagem frontal, considerando a queda de temperatura em 925 hPa, mudança na componente meridional do vento em 925 hPa e aumento da pressão ao nível médio do mar (PNM), no intervalo de dois dias;
- Souza e Nechet (2004) utilizaram o critério de mudança na direção do vento e queda na temperatura para estudar a influência de um sistema frontal na Amazônia Oriental.
- Da Cruz *et al.* (2008) identificaram uma frente através de imagens de satélites e dos campos horizontais de temperatura potencial equivalente e advecção de temperatura potencial equivalente, indicando que o posicionamento da frente é encontrado entre as áreas de advecção negativa e positiva, apresentando forte gradiente de temperatura potencial equivalente;
- Calvalcanti e Kousky (2009) indicaram como métodos objetivos para determinação da passagem de uma frente fria a variação de Pressão ao Nível do Mar (PNM), variação de temperatura em 925 hPa e a força e sentido do vento em 925 hPa. Sendo os critérios aplicados: 1) uma diminuição de temperatura em 925 hPa de, pelo menos 2°C; 2) um aumento da PNM de pelo menos 2 hPa; e 3) existência de ventos de sul de, pelo menos, 2 ms⁻¹.

2.5 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é a uma faixa que corresponde à convergência dos ventos tropicais (alísios) dos hemisférios norte e sul, os quais sopram em média das direções nordeste e sudeste, respectivamente. Trata-se de uma zona de alta instabilidade, pois os ventos que ali convergem ascendem às camadas superiores da atmosfera, dando origem a um cinturão de nuvens identificável através das imagens de satélite. Sobre o Atlântico intertropical, o cinturão de nuvens da ZCIT acha-se usualmente bem organizado, o que não costuma necessariamente ocorrer sobre o Pacífico, em parte devido à maior extensão deste na direção de leste para oeste. Por outro lado, a posição da ZCIT ao longo dos doze meses do ano flutua bastante de um lado e de outro da linha do equador. No Atlântico, ela incursiona bem mais ao norte do equador (entre junho e dezembro) do que ao sul dessa linha (entre janeiro e maio). Sobre o Pacífico, dá-se o mesmo, porém com uma flutuação de maior amplitude (XAVIER *et al.*, 2004).

O sistema nebuloso associado à ZCIT a torna facilmente identificável, sobre as áreas oceânicas, em imagens geradas por satélites. Sobre os continentes, porém, dada a intensa

atividade convectiva (que se desenvolve devido ao aquecimento do solo), a presença da ZCIT é normalmente difícil de detectar. A posição média da ZCIT situa-se em torno de 5°N, o que se justifica por haver no Hemisfério Norte uma maior área continental e, portanto, maior transferência de calor para atmosfera (VAREJÃO-SILVA, 2005).

Considerando-se a região do Atlântico Equatorial, a ZCIT migra sazonalmente em anos considerados normais, de sua posição mais ao norte (em torno de 14°N), durante agosto-setembro, para sua posição mais ao sul (em torno de 2°S), durante março-abril. Essa migração sazonal da ZCIT, associada aos fatores que causam o fortalecimento ou enfraquecimento dos alísios de nordeste e sudeste, tem papel importante na determinação da estação chuvosa do norte da Região Nordeste. A atuação de outros sistemas em associação com a ZCIT pode intensificar a precipitação sobre o Nordeste (MELO, CAVALCANTI e SOUZA, 2009).

Segundo Citeau et al. (1985, 1988a, 1988b) e Uvo (1989), a permanência por mais tempo da ZCIT em suas posições mais ao norte ou mais ao sul determina a qualidade da estação chuvosa de regiões como Sahel, a costa noroeste da África e o norte do Nordeste do Brasil (NEB). As chuvas no norte da região Nordeste provavelmente serão abundantes se a ZCIT começar a sua migração para o norte somente no final do mês de abril e início de maio.

Waliser e Gautir (1993) destacaram que a posição da ZCIT ao norte do equador, na maior parte do ano, está relacionada à existência de águas mais frias na região equatorial leste dos oceanos Pacífico e Atlântico. Nessas áreas, as assimetrias no escoamento do vento à superfície estão associadas às características geográficas próximas à costa oeste da África e América do Sul. Esse autores destacaram também que nas regiões dos oceanos Pacífico Leste e Atlântico, o ciclo anual da ZCIT é similar, principalmente durante o outono do Hemisfério Norte (HN), quando atinge sua posição mais ao norte. Observando-se em ambos os oceanos a banda de nebulosidade principal no HN e o surgimento em alguns dias de uma segunda banda de nebulosidade no HS.

De acordo com Uvo (1989), a formação de uma banda dupla da ZCIT pode estar relacionada com anos chuvosos no NEB. Os meses de março e abril são quando a ZCIT atinge sua máxima inclinação SW-NE e influencia com o aumento da precipitação, principalmente na parte norte do Nordeste do Brasil, e o surgimento de uma segunda banda de nebulosidade convectiva ao sul da banda principal, nesse período, eleva ainda mais a quantidade de chuvas. Coelho (2002) estudando o comportamento da ZCIT durante os anos de 1998 e 1999 que correspondem a anos de El Niño e La Niña respectivamente, também observou a formação de uma banda secundária tanto ao norte quanto ao sul da ZCIT.

2.6 Alta da Bolívia (AB)

Na primavera, verão e outono, surge uma circulação anticiclônica em altos níveis, chamada de Alta da Bolívia (AB) (SIGNORINI, 2001 e SELUCHI *et al.*, 2003), que tem origem devido à liberação de calor latente (FIGUEROA *et al.*, 1995). Estando essa alta em níveis superiores associada ao ciclone barotrópico em superfície.

A AB é uma circulação anticiclônica de grande escala que ocorre na troposfera superior, centrada em média, no platô boliviano. No período de verão, a Alta da Bolívia contribui para as chuvas que ocorrem principalmente nas regiões Norte, parte do Nordeste e Centro-Oeste do Brasil (FERREIRA, RAMÍREZ e GAN, 2009).

Segundo Gan (1993), a formação da AB ocorre devido ao prévio aquecimento do continente e, por conta disso, também o aquecimento da troposfera o que provoca queda na pressão local. Dessa forma, surgem os movimentos convectivos devido à instabilidade atmosférica, que favorecem a formação de nuvens, as quais liberam calor latente, o que aquece e expande o ar, e forma a Alta da Bolívia, em níveis superiores. Estudos como os de Gutman e Schwerdtfeger (1965) e Virji (1981), que analisaram os aspectos observacionais e dinâmicos dessa circulação, mostraram que a AB atinge intensidade máxima no meses de dezembro a fevereiro, enfraquecendo nos meses de abril a maio, estando a manutenção da AB associada ao aquecimento continental e ao escoamento em baixos níveis.

Ferreira (1995) chegou à conclusão que a Alta da Bolívia estava ligada com processos térmicos e dinâmicos como: forte aquecimento da superfície (calor sensível), convergência de umidade vinda da Amazônia (em baixos níveis), movimentos verticais ascendentes, formação de nuvens convectivas, precipitação e consequente liberação de calor latente que gera intensificação da AB.

De acordo com Kousky e Kayano (1994), a AB, posiciona-se sobre a Bolívia no verão, sobre o oeste da Amazônia em outubro e se desloca para região central da Amazônia em abril. Carvalho (1989), procurando uma possível conexão entre a circulação em altos níveis e a AB, verificou que existe um conexão direta entre a intensidade da AB e o cavado em seu flanco nordeste. Quando há intensificação desse cavado, forma-se um vórtice ciclônico em altos níveis. Estando a intensidade da convecção diretamente ligada à Alta da Bolívia.

Segundo Silva Dias *et al.* (1983), a formação da AB deve-se à dispersão das ondas de Rossby e das mistas Rossby-gravidade, como consequência da liberação de calor latente nas

áreas de convecção profunda sobre a Amazônia. O cavado a leste da AB estaria associado às ondas mistas Rossby-gravidade e com as ondas de Rossby de comprimento de onda curta que propagam sua energia para leste.

2.7 Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN)

Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) são sistemas meteorológicos caracterizados por centros de pressão relativamente baixa que se originam na alta troposfera e se estendem até níveis médios, dependendo da instabilidade atmosférica. Eles se desprendem do escoamento atmosférico associado. São quase estacionários, mas podem deslocar-se tanto para leste quanto para oeste e também se caracterizam por um tempo de vida de vários dias. Os VCAN's apresentam um centro relativamente frio, convergência de massa, movimentos verticais subsidentes no seu centro e ascendentes na periferia, e nebulosidade mais intensa principalmente na direção de seu deslocamento (FERREIRA, RAMÍREZ e GAN, 2009).

Destacam-se dois tipos de vórtices, conforme sua origem de formação: do tipo Palmén e do tipo Palmer (FRANK, 1970).

- VCAN de Palmén: forma-se quando “bolsões” de ar frio, associados com extensos cavados no ar superior, se desprendem e são confinados do lado da corrente média dos ventos de oeste (PALMÉN, 1949). Tem sua origem nas latitudes subtropicais, surgindo mais comumente no outono, inverno e primavera, raramente ocorrendo no verão.
- VCAN de Palmer: forma-se em latitudes tropicais, principalmente durante os meses de verão e raramente durante o inverno (PALMER, 1951). Não é originado pelo mesmo processo do vórtice do tipo Palmén, pois aparece principalmente em latitudes tropicais e não envolvem ar polar em nenhum de seus estágios. (PALMÉN e NEWTON, 1969).

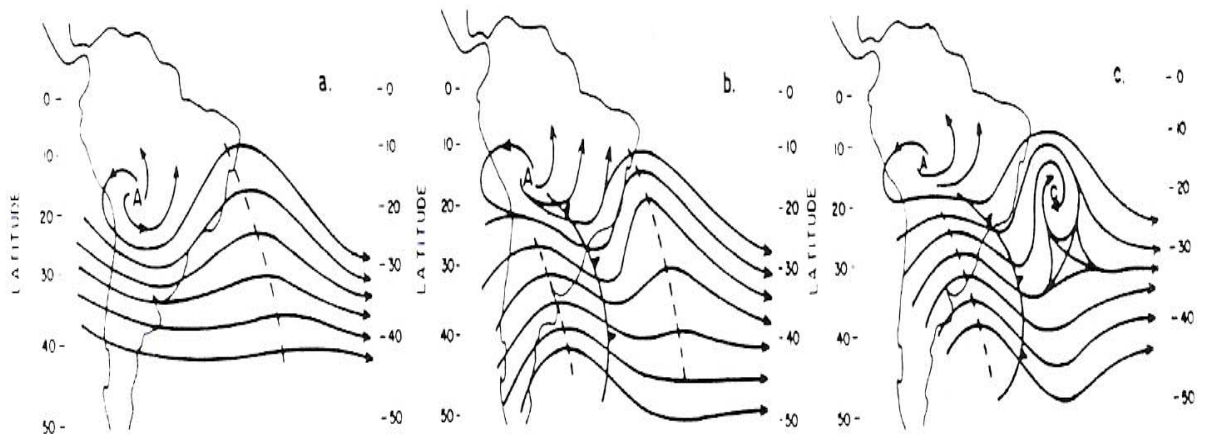
Estudos realizados para VCAN's sobre o Atlântico Sul e regiões adjacentes ao Nordeste do Brasil, por Kousky e Gan (1981), Gan (1982), Valverde Ramírez (1996) e Valverde Ramírez, Kayano e Ferreira (1999), mostraram que a maior frequência de formação de VCAN's ocorre durante o verão entre os meses de dezembro e fevereiro e tem um tempo de vida de 4 a 11 dias. Sendo os efeitos desse sistema sobre a precipitação no Norte e nordeste do Brasil são bastante evidentes.

Segundo Ferreira, Valverde Ramírez e Gan (2009), para uma melhor compreensão do papel dos VCAN's no regime pluviométrico do Nordeste e de parte do Norte do Brasil é importante levar em consideração a sua interação com outros dois sistemas meteorológicos

que atuam na América do Sul: a alta da Bolívia (AB) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). O monitoramento desses três sistemas de tempo é de extrema importância, pois modula o ciclo hidrológico, o balanço de energia e o clima em grande parte do continente.

De acordo com Kousky e Gan (1981) a penetração de sistemas frontais induz a formação de VCAN's, especialmente nas baixas e médias latitudes. Ocorre nessas situações da crista da AB e com isso também a amplificação do cavado corrente abaixo, o que irá formar em última instância um vórtice sobre o Atlântico. Quando o sistema frontal avança sobre regiões subtropicais, ocorre advecção de ar quente em sua vanguarda nos baixos níveis, podendo amplificar a crista no escoamento superior e conseqüentemente, o cavado pré-existente. Esse processo pode ser verificado através da FIGURA 3.

FIGURA 3 - Esquema de formação para o VCAN do tipo Palmer clássico sobre o Oceano Atlântico Tropical Sul.



Fonte: KOUSKY e GAN (1981)

2.8 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

A Zona de Convergência do Atlântico Sul é definida como uma banda de nebulosidade e chuvas com orientação noroeste-sudeste, que se estende desde a Amazônia até o Sudeste do Brasil e, frequentemente, sobre o oceano Atlântico Subtropical, associada a um escoamento convergente de umidade na baixa troposfera (CARVALHO e JONES, 2009).

Há uma relação distinta entre a ocorrência de Jatos de Baixos Níveis (JBN) e ZCAS e o transporte de umidade a partir da Amazônia. Segundo Peagle (2000), o JBN ocorre frequentemente a leste dos Andes e em todas as estações do ano. Este escoamento transporta grandes quantidades de vapor d'água da região tropical para os subtrópicos da

AS. Quando o fluxo de umidade dirigido para o sul da AS, via escoamento de baixos níveis, é forte; a atividade convectiva na região da ZCAS é fraca. Quando este fluxo é dirigido para sudeste a atividade convectiva na região da ZCAS é intensificada (LIEBMANN et al. 1999).

Kodama (1993) caracterizou a ZCAS como uma forte convergência de umidade, frontogênese nos campos de temperatura potencial equivalente e a geração de instabilidade convectiva, associadas a um jato subtropical em altos níveis. Segundo Rivero (1991), os Andes possuem um importante papel para a formação da ZCAS, favorecendo a formação da faixa de nebulosidade convectiva, em conjunto com a convecção sobre a Amazônia e o Brasil Central.

Figuerola, Satyamuty e Silva Dias (1995) através da utilização de modelos mostraram que é o aquecimento adiabático sobre a bacia Amazônica, e não da presença os Andes, o fator indispensável para a formação das ZCAS. Kodama (1999), utilizando-se de um modelo global sem continentes (*Aqua-Planet*), mostrou que as zonas de convergência foram simuladas quando uma intensa fonte de calor localizada zonalmente foi deslocada para fora da região equatorial em direção aos trópicos. Gandu e Silva Dias (1998) simularam com um modelo numérico de equações primitivas, o papel da assimetria das fontes de calor sobre a subsidência de grande escala. Os autores encontraram que a assimetria das ZCAS é fundamental para o ramo de subsidência observado sobre o Sul do Brasil e Argentina quando essa zona de convergência está ativa.

Apesar da influência da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nas ZCAS não ser muito conhecida, Barros *et al.* e Teixeira (2002) mostraram que a configuração da TSM pode ser importante para o seu posicionamento e intensidade, embora não seja fundamental para sua formação.

Os mecanismos de formação, intensificação, manutenção e dissipação da ZCAS ainda são pouco conhecidos. Diversos autores tentaram explicar a formação da ZCAS. Kalnay et al. (1986) usaram um modelo de circulação geral sobre a América do Sul para os meses de janeiro e fevereiro de 1979. Encontraram importantes resultados para que houvesse a geração de uma onda quase estacionária. São eles:

- A Cordilheira dos Andes não foi responsável pela formação da onda estacionária
- quando foi diminuída a convecção tropical, não se formou mais a onda estacionária
- quando foi diminuída a convecção no Oceano Pacífico, foi fraca a formação da onda estacionária.

Estes resultados sugerem a importância da convecção tropical na formação da ZCAS.

Quadro (1994) realizou um estudo de episódios de ZCAS para a região sudeste, analisando 10 anos (1980 a 1989) de dados. Verificou que as características mais marcantes foram:

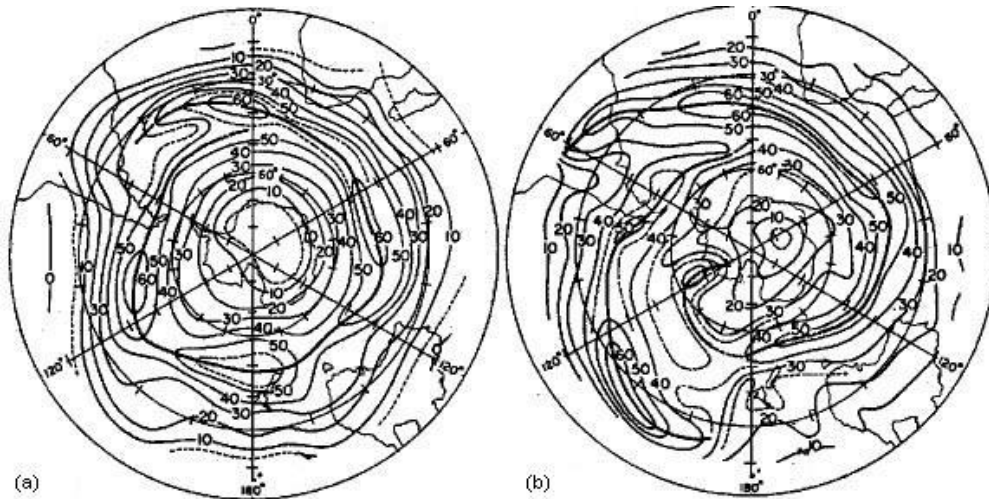
- convergência de umidade em baixos e médios níveis na região de estabelecimento da ZCAS;
- em níveis médios existe um cavado sobre a costa leste da América do Sul e uma faixa de movimento vertical ascendente, ambos orientados na direção da ZCAS e um gradiente intenso de temperatura ao sul da faixa;
- vorticidade relativa anticiclônica em altos níveis na região do Chaco, caracterizando as regiões típicas para a manifestação do fenômeno.

2.9 Sistemas Frontais e Convecção Tropical sobre a América do Sul

Um dos sistemas sinóticos mais importantes sobre a América do Sul é o sistema frontal. Tais sistemas são ativos durante o ano todo, e podem penetrar até latitudes tropicais e sem dúvida são partes fundamentais dos regimes de precipitação e temperatura em quase todo o continente (LEMOS e CALBETE,1996; QUADRO *et al.*,1996).

Taljaard (1972) apresentou a distribuição das frentes em superfície para o Hemisfério Sul durante o International Geophysical Year (IGY). Para a identificação das frentes, foram utilizados mapas diários referentes ao período de verão e inverno de 1958 e o critério usado nessa identificação foi a baroclinia média da atmosfera, ou seja, a zona de máximo gradiente horizontal de temperatura. Taljaard (1972) calculou o número de frentes em diferentes latitudes para um período de 100 dias em uma área de $4 \times 10^5 \text{ km}^2$. Os resultados estão sumarizados na FIGURA 2.4. Observa-se que durante todo o ano, nesse período, as frentes em superfície se distribuíram no sul e sudeste da América do Sul, sobre os oceanos e sul da Austrália e África.

FIGURA 4 - Frequência de frentes em superfície durante: a) Janeiro, Fevereiro e Março, 1958 (Verão, HS) e b) Julho, Agosto e Setembro, 1957 (Inverno, HS). Os valores representam o número de vezes em 100 dias que parte de uma frente estava situada dentro da área de $4 \times 10^5 \text{ km}^2$.



Fonte: Taljaard (1972).

As ondas baroclínicas de latitudes médias modificam-se ao atravessar os Andes e interagem com a circulação atmosférica sobre a América do Sul. Conseqüentemente os sistemas frontais que se deslocavam de oeste para leste, sobre o Pacífico, agora ganham uma componente em direção ao Equador, propagando-se de sudoeste para nordeste ao longo da costa leste da América do Sul, chegando a atingir latitudes tropicais. Adicionalmente, eles podem se acoplar com mecanismos típicos de convecção, intensificando-se e permanecendo ativos durante vários dias (CAVALCANTI, 1985; REEDER e SMITH, 1998; SATYAMURTY *et al.*, 1998; SELUCHI ET AL., 1998). Durante a primavera e verão, os sistemas frontais organizam-se com a convecção tropical e intensa atividade convectiva ocorre sobre a Argentina, Brasil, Bolívia e leste do Peru (SATYAMURTY *et al.*, 1998).

Cavalcanti e Kousky (2003) mostraram a média anual de passagem de frentes frias para o período de 1979-2000, usando também os dados da reanálise do NCEP/NCAR. No entanto, o critério usado para esse trabalho levou em conta a temperatura, pressão e vento. Foi encontrado que os sistemas seguem duas trajetórias principais, uma pela costa brasileira e outra pelo interior. A variabilidade sazonal concorda com todos os trabalhos mencionados anteriormente, com a maior frequência ocorrendo na estação de inverno.

Em termos de variabilidade interanual, Cavalcanti (1996) verificou que durante o El Niño estendido de 1990 a 1994, os sistemas frontais tiveram comportamento anômalo, sendo que a maioria deles não se deslocou de sul para norte e foi intensificado na Região Sul pelo

jato subtropical, o que causou enchentes em algumas cidades. Fedorova e Carvalho (2000) apresentaram outro estudo observacional sobre a frequência de zonas frontais durante um ano em que ocorreu La Niña (julho de 1996 até março de 1997) e El Niño (julho de 1997 até março de 1998), e os resultados mostraram que a ocorrência de frentes frias na faixa latitudinal de 20°S e 40°S foi maior em anos de El Niño do que de La Niña, quando estes fenômenos estavam em suas fases mais ativas. Para os dois anos analisados, as frentes frias foram observadas mais ao sul da América do Sul, mas em anos de El Niño, as frentes tiveram maior frequência sobre o Rio Grande do Sul e Uruguai. Em anos de El Niño, o jato subtropical intensificou-se devido ao aumento do gradiente de temperatura norte-sul, bloqueando o avanço das frentes para as latitudes mais baixas (CAVALCANTI,1996).

No inverno, as massas de ar frio penetram sobre o continente na retaguarda das frentes frias, podendo causar geadas fortes ao sul de 30°S e moderada nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso do Sul, São Paulo e sul de Minas Gerais, às vezes, com prejuízos para a agricultura (MARENGO et al., 1997). Algarve (1994) observou que antes da ocorrência de geadas os sistemas frontais se deslocavam rapidamente favorecendo a entrada mais rápida das massas frias e o predomínio de altas pressões na região. Naquele estudo, também se observou que o deslocamento rápido de outros sistemas frontais, em seguida, favorecia a realimentação das altas pressões na região.

Na estação de verão, a entrada de ar frio não provoca quedas tão bruscas na temperatura, no entanto organiza atividade convectiva e chuva em áreas onde normalmente há pouca precipitação (GARREAUD, 2000). A circulação de grande escala nos níveis médios para o verão e inverno é caracterizada por uma onda longa com uma crista a oeste dos Andes e um cavado a leste da América do Sul e Atlântico sudoeste (FORTUNE e KOUSKY, 1983; GARREAUD, 2000). Resultados de Cavalcanti e Kousky (2003) mostraram que a amplificação de um padrão de onda com uma crista sobre o Pacífico leste e um cavado sobre a América do Sul fornecem um sinal favorável para esses eventos e podem ser detectados com 4 dias de antecedência.

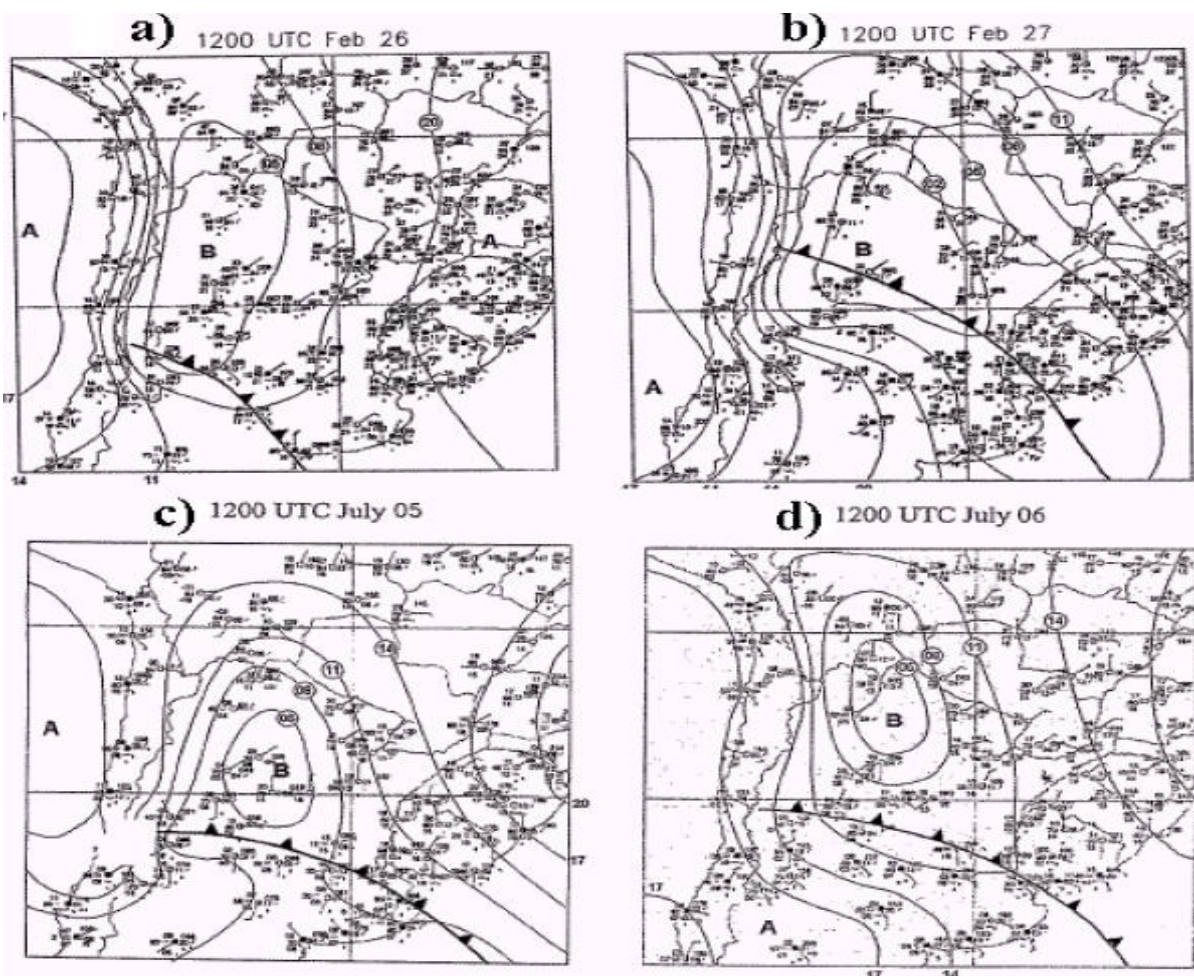
Signorini (2001) estudou a intensificação da extremidade frontal no sul do Brasil, sendo a extremidade da frente a parte mais próxima ou que se encontra sobre o continente. Ela mostrou que, em muitas passagens frontais, somente a periferia da frente se desloca sobre o sul do Brasil. Nessa situação, ela causa apenas um aumento da nebulosidade, com chuva fraca ou pouca chuva ou, sem ocorrência de ventos fortes, ou gradientes intensos de temperatura e pressão. No entanto, foi observado um ciclone térmico que se localiza aproximadamente no norte da Argentina. Esse ciclone térmico interage com a extremidade da frente, provocando

fortes atividades convectivas, que geram chuvas intensas, ventos fortes e granizo. Concluiu-se nesse estudo que a intensificação da extremidade frontal provoca precipitações intensas e fenômenos adversos mais intensos do que na zona frontal.

Seluchi *et al.*, (2003) estudaram dois casos de baixas no norte da Argentina, um para o verão e outro para o inverno. No verão, mudanças de pressão foram claramente dominadas por uma variação na espessura da camada 600-900 hPa. No inverno, esse sistema foi bem identificado pela altura geopotencial no nível de 600 hPa. Uma forte variabilidade na espessura define a característica térmica desse sistema.

Seluchi *et al.*,(2003) notaram também uma interação entre a baixa térmica e um sistema frontal, tanto no verão quanto no inverno. Através da FIGURA 5, veem-se os dois casos de interação entre a baixa no noroeste da Argentina e frentes frias associadas a um cavado baroclínico associado a um ciclone no Atlântico sul.

FIGURA 5 - Isóbaras com intervalo de 3 hPa, os símbolos são usuais. (a) e (b) para o verão, 26 e 27 de fevereiro de 2000 e (c) e (d) para o inverno, 05 e 06 de julho de 2000.



Fonte: adaptada de SELUCHI *et al.* (2003).

Quando as frentes frias avançam para o norte (em direção ao equador), durante a estação de verão, algumas vezes elas interagem com o ar úmido e quente tropical, produzindo convecção profunda e organizada, e chuvas fortes sobre o continente. Além de causar excessiva precipitação e inundações, deslizamentos de encostas, ventos fortes e granizo. Durante o verão, as frentes frias frequentemente se posicionam ao longo da costa do Brasil, entre São Paulo e Bahia, na região da posição climatológica da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), originando períodos prolongados de chuva forte, algumas vezes com ocorrência de inundações e prejuízos materiais e humanos na região (CAVALCANTI e KOUSKY, 2009).

Utilizando imagens de satélites, Kousky e Ferreira (1981) observaram o aumento da atividade convectiva associado a sistemas de latitudes médias que penetram em latitudes baixas sobre o Brasil. Concluíram que distúrbios associados com flutuações de pressão, geralmente, se propagam em direção a leste e nordeste.

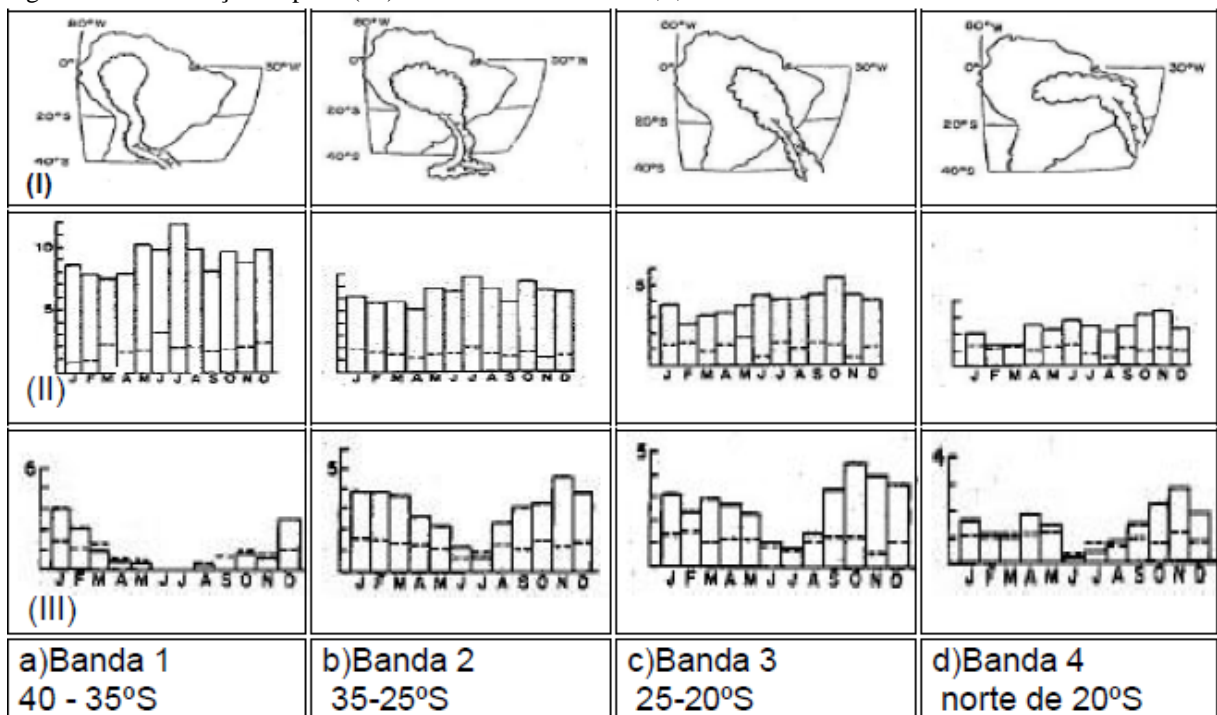
De acordo com Kousky e Virji (1982) a existência de uma forte frente fria parece ser importante e pode contribuir para aumentar a convergência nos baixos níveis, tendo o mesmo efeito que a divergência em altos níveis, o que intensifica a convecção.

Oliveira (1986) realizou um estudo climatológico sobre a interação entre os sistemas frontais e a convecção tropical, utilizando uma série de dados de 1974-1984. Foram utilizadas imagens do satélite GOES-EAST a fim de identificar os sistemas em quatro bandas latitudinais (40°-35°S, 35°-25° S, 25°-20°S e ao norte de 20°), para a modulação da convecção tropical, conforme FIGURA 6. A forma de faixas de nebulosidade convectiva é organizada pela interação entre os sistemas frontais e a convecção tropical.

No verão, alguns sistemas podem permanecer semi-estacionários sobre a Região Sudeste, configurando assim a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Algumas frentes frias, porém, atingem o Nordeste e deslocam-se para o Oceano onde posteriormente ocorre uma frontólise. Na faixa latitudinal de 35°S-25°S há uma redução do número de eventos, mas o máximo ainda ocorre em julho (7,7). No entanto, a máxima interação entre sistemas frontais e a convecção tropical é no mês de novembro. Para os sistemas que atingem as latitudes de 25°S-20°S, o máximo se dá em outubro (5 casos). As frentes que ultrapassam 20°S rumo ao nordeste são menos frequentes, no entanto, na maior parte das vezes estão associadas com a convecção tropical na Amazônia, com o máximo ocorrendo em novembro. Notou-se também que a trajetória dos sistemas frontais, quando se encontravam ao sul de 40°S, era mais zonal. Entre 35°S e 40°S, algumas frentes ganham trajetória mais meridional e atingem as latitudes mais baixas, enquanto outras seguem zonalmente.

Os sistemas frontais, que organizam extensas faixas de nebulosidade convectiva com intensa precipitação, possuem penetração meridional no continente. Estão associados a cavados de ar superior (200 hPa) e em baixos níveis, com inclinação horizontal para noroeste, os quais produzem forte advecção de ar frio para o interior do continente e subsidência atrás da frente em toda coluna atmosférica, resultando em uma região de céu claro. Por outro lado, forma-se uma zona de confluência em baixos níveis (850 hPa), onde se verifica advecção de ar quente e convergência em baixos níveis na extremidade da frente. A faixa de nebulosidade convectiva está ligada com divergência nos altos níveis e movimentos verticais ascendentes em 500 hPa. O deslocamento do sistema frontal pra latitudes mais baixas é acompanhado pela formação de movimentos ascendentes no cavado, com orientação preferencial noroeste-sudeste (OLIVEIRA, 1986).

FIGURA 6 - Esquema típico de formação de nebulosidade convectiva (I), distribuição mensal de sistemas frontais que penetram nas bandas de latitude (II) e distribuição mensal do número de sistemas frontais que organizaram convecção tropical (III) nas bandas de latitude a,b,c e d.



Fonte: Adaptada de Oliveira (1986).

Kousky (1979) também identificou uma maior frequência de ocorrência de sistemas frontais no sul da Bahia nos meses de março a dezembro para o período de 1961 a 1970. Notou que há uma tendência de anos com maiores totais de precipitações corresponderem a anos com maior número de passagem de frentes. Às vezes, as frentes frias afetam também o estado do Ceará, contribuindo para o total pluviométrico mensal, como verificado por Alves

(1992). Sobre o Nordeste, as frentes não apresentam grande contraste de temperatura, entretanto, ficam ativas devido ao grande contraste de umidade.

Lemos e Calbete (1996), dando continuidade ao trabalho de Oliveira (1986), fizeram uma climatologia das frentes que ocorreram entre 1987 a 1995 nas bandas de latitude: 35°S-25°S, 25°S-20°S e ao norte de 20°S. Nesse período, a média anual foi de 6, 5 e 4 sistemas para as latitudes de 35°S-25°S, 25°S-20°S e ao norte de 20°S, respectivamente. Nesse estudo Lemos e Calbete (1996) usaram, além das imagens de satélite, as cartas sinóticas das 12 e 00 GMT, enquanto Oliveira apenas analisou imagens de satélite.

Justi da Silva e Silva Dias (2002) fizeram a partir de dados da reanálise do NCEP do período de 1981-1999 uma climatologia dos sistemas frontais usando um critério diferente de Oliveira (1986) e Lemos e Calbete (1996). Nesse estudo foi usada apenas a mudança no sinal da componente meridional do vento. Nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil, o vento em baixos níveis tem direção de nordeste, devido à influência da alta subtropical do Atlântico Sul, e então numa situação pré-frontal o vento é tipicamente de noroeste depois gira de sudoeste e de sudeste à medida em que a frente se desloca.

Ferreira *et al.* (2004) notaram uma significativa interação envolvendo sistemas frontais e atividades convectivas no sudoeste da Amazônia. A influência frontal na Amazônia Oriental foi estudada por Souza e Nechet (2004). O sistema frontal influenciou o tempo nessa região juntamente com a Zona de Convergência Intertropical e sistemas locais.

Um estudo sobre a propagação meridional da convecção sobre a América do Sul (AS) foi realizado por Siqueira (2003). Nesse estudo o autor definiu três tipos:

Tipo 1 – ocorre com mais frequência durante a primavera austral e o verão, e contribui para pelo menos 37% e 32% da variabilidade total interdiurna da convecção durante essas estações do ano, respectivamente. Concluiu que a passagem de uma frente fria sobre o sudeste da América do Sul, avançando para o norte com a convecção até o centro da AS, o sul do Nordeste da AS e a região Amazônica, é o principal padrão espacial de variabilidade convectiva expresso pelas imagens médias e pelas análises por Componentes Principais Complexas aplicadas aos campos de nuvem para o tipo 1.

Tipo 2 – Para esse tipo a maior frequência de ocorrência foi durante o verão austral e contribui em pelo menos 16% da variabilidade total interdiurna da convecção nessa estação. Mostrou que a passagem de uma frente fria sobre o sudeste da AS, nos primeiros dias de ocorrência dos eventos, acompanhada de uma banda de nebulosidade convectiva quase-estacionária estendendo-se da região Amazônica até o Oceano Atlântico sul, para períodos

maiores que três dias, é o principal padrão espacial de variabilidade encontrado, estando associado com a formação da ZCAS.

Tipo 3 – É mais frequente durante o inverno austral e contribui para, no mínimo, de 50% da variabilidade total interdiurna da convecção sobre a AS durante essa estação. Os sistemas frontais que pouco interagem com a convecção tropical na AS e exibem propagação quase-estacionária (em relação à direção meridional) com a convecção sobre os subtrópicos e/ou latitudes médias, caracterizam o terceiro tipo de propagação meridional da convecção identificado sobre o continente.

Gemiacki (2005) estudou a passagem de dois sistemas frontais sobre a AS, durante a estação seca do NEB. No primeiro evento, a frente influenciou as condições de tempo em toda AS, chegando até Alagoas (AL). No segundo, a frente teve um deslocamento zonal, modificando o tempo apenas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Os principais resultados obtidos para a chegada do sistema frontal em AL foram:

- O ciclone frontal, associado à frente fria, estava ao sul de 60°S quando a onda frontal começou a atuar na AS;
- Houve uma interação entre o cavado frontal e um ciclone térmico no norte da Argentina;
- Ocorreu o surgimento de duas frentes secundárias, seguidas por duas oclusões instantâneas;
- Nova ciclogênese na frente principal que estava sobre o Atlântico, próxima a 30°S, intensificando a frente principal;
- Presença de interação entre a corrente de jato subtropical (CJS) e a corrente de jato polar (CJP), com eixo em torno de 25°S e 55°S, respectivamente;
- Deslocamento da AB para leste, chegando até o oeste da região NEB;
- O ciclone, que surgiu no Atlântico, se deslocou para o sudeste.

Cruz (2008) utilizou uma série de três anos de dados (2004-2006), para realizar a determinação sinótica dos fatores que favorecem as influências frontais sobre o estado de Alagoas (AL). Nesse estudo as influências frontais sobre o estado de AL foram divididas em três grupos distintos:

Grupo 1 – Sistemas frontais, cuja extremidade passou sobre o estado de AL. Durante o deslocamento da onda frontal até o NEB, observou uma perturbação ciclônica no centro-norte da Argentina se deslocando para NE, em baixos níveis, e interagindo com a extremidade frontal na região central da AS. Em 300 hPa, uma segunda perturbação ciclônica se deslocou para E-SE na região dos Andes, favorecendo o desenvolvimento da extremidade frontal. A

AB se deslocou para E durante o deslocamento da frente para AL. Verificou também constantes regenerações frontais ou processos frontogênicos durante o deslocamento da frente até AL. Também ocorreu o acoplamento das Correntes de Jato Subtropical e Polar.

Grupo 2 – Para episódios em que uma banda de nebulosidade associada à extremidade da frente foi observada sobre AL. Nesses episódios a extremidade da frente não interagiu com perturbações sobre o continente. A leste dos Andes, o estabelecimento do anticiclone pós-frontal ocorreu no centro-norte da Argentina seguindo um deslocamento para E. Verificaram-se regenerações frontais e acoplamento das Correntes de Jato Subtropical e Polar.

Grupo 3 – As ondas frontais que organizaram atividades convectivas sobre AL. Na região central da AS, observou perturbações ciclônicas, tanto barotrópicas (verão e início da estação de transição fria) como baroclínicas (final da transição fria e início da transição quente), que interagiram com a extremidade frontal. Não foram observadas grandes advecções de ar frio sobre o continente. Como nos grupos 1 e 2 também verificou regenerações na frente principal e acoplamento das CJS e CJP.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

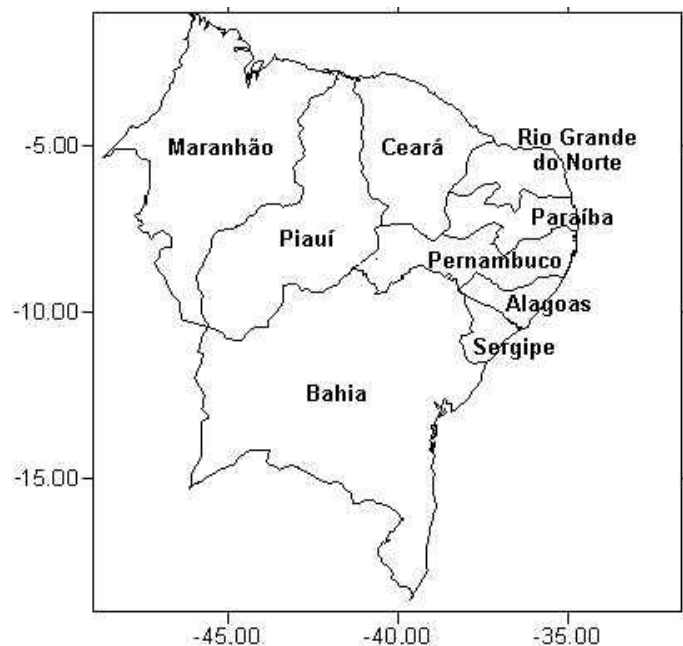
3.1 A Região Nordeste do Brasil

A área de estudo compreende a Região Nordeste do Brasil, que está situada entre os paralelos de $01^{\circ} 02' 30''$ de latitude norte e $18^{\circ} 20' 07''$ de latitude sul e entre os meridianos de $34^{\circ} 47' 30''$ e $48^{\circ} 45' 24''$ a oeste do meridiano de Greenwich. Limita-se a norte e a leste com o oceano Atlântico, ao sul com os estados de Minas Gerais e Espírito Santo e a oeste com os estados do Pará, Tocantins e Goiás (FIGURA 7).

Segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), possui uma extensão territorial de 1.558.196 Km² e uma população de 53.591.197 habitantes. Sendo constituída pelos Estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí e Maranhão.

A Região Nordeste possui um clima tropical com três períodos chuvosos bem definidos, no leste da região a estação chuvosa estende-se de abril a agosto, a região do semi-árido possui a quadra chuvosa entre fevereiro e maio, e na parte sul dos Estados da Bahia e Piauí e extremo sul do Maranhão, o período chuvoso compreende os meses de outubro a março.

FIGURA 7 - Mapa da Região Nordeste do Brasil.



Fonte: IBGE.

3.2 Dados

Para a realização deste trabalho, foram utilizados os seguintes dados:

- Dados derivados dos produtos de Reanálise dos modelos globais NCEP/NCAR;
- Imagens de satélite do espectro infravermelho;
- Radiossondagens para algumas estações da Região Nordeste do Brasil.

3.2.1 Dados de Reanálise

Para a elaboração dos campos meteorológicos utilizados neste estudo, foram utilizados dados do modelo de reanálise do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) / *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), obtidos através do site <http://www.cdc.noaa.gov>. Os dados desse modelo têm basicamente a seguinte forma:

- uma resolução horizontal de aproximadamente 270 Km²;
- 28 níveis verticais;
- uma grade global com espaçamento de 2,5°x2,5° de latitude/longitude;
- nos horários padrões de 00:00, 06:00, 12:00 e 18:00 UTC.

Pode-se encontrar uma descrição mais detalhada desse modelo em Kalnay et al, (1996).

Para este trabalho, utilizou-se um conjunto de dados para os quatro horários sinótico padrões (00, 06, 12 e 18 UTC), para o período de 01 de janeiro de 2000 a 31 de dezembro de 2009. As variáveis utilizadas foram:

- pressão ao nível médio do mar (PMN, hPa);
- umidade relativa (UR, em %) para 925, 850, 700, 500 hPa;
- geopotencial (Φ , em mgp) para 925, 850, 700, 500 e 200 hPa;
- temperatura (T, em °C) para superfície, 850, 700, 500 e 200 hPa;
- omega para 925, 850, 700, 500 e 200 hPa;
- componentes zonal e meridional do vento (u e v, em ms⁻¹) para superfície, 925, 850, 700, 500 e 200 hPa.

3.2.2 Imagens de Satélite

Foram utilizadas imagens dos satélites GOES e METEOSAT, no canal espectral infravermelho (canal 4 entre 10,2 e 11,2 μm e 10,8 μm , respectivamente). A utilização das imagens conjuntas dos satélites GOES e METEOSAT permite uma maior abrangência do território da América do Sul e do oceano Atlântico adjacente.

As imagens obtidas em todos os horários disponíveis para o período entre janeiro de 2000 a dezembro de 2009 foram retiradas do site do *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, através do endereço eletrônico <http://www.ncdc.noaa.gov/gibbs>.

3.2.3 Radiossondagens para algumas estações do NEB

Foram empregadas radiossondagens para estações situadas na Região Nordeste do Brasil, para o ponto mais próximo possível da localização da extremidade frontal e dos processos convectivos, sendo essas estações as seguintes: Caravelas – BA, Salvador – BA, Petrolina – PE, Recife – PE e Natal – RN.

Essas radiossondagens foram obtidas do banco de dados do Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do site <http://bancodedados.cptec.inpe.br>, já plotadas em diagramas Skew T - Log P, de acordo com os casos selecionados, dentro do período de estudo (2000-2009).

3.3 Metodologia

3.3.1 Escolha e agrupamento dos casos

Inicialmente, foi realizada a identificação de todos os sistemas frontais que influenciaram de alguma maneira as condições de tempo sobre a Região nordeste do Brasil (NEB), no período de 1º de janeiro de 2000 a 31 de dezembro de 2009. A identificação teve como base a análise subjetiva das imagens de satélites para o período de estudo e, posteriormente, a confirmação através dos campos meteorológicos.

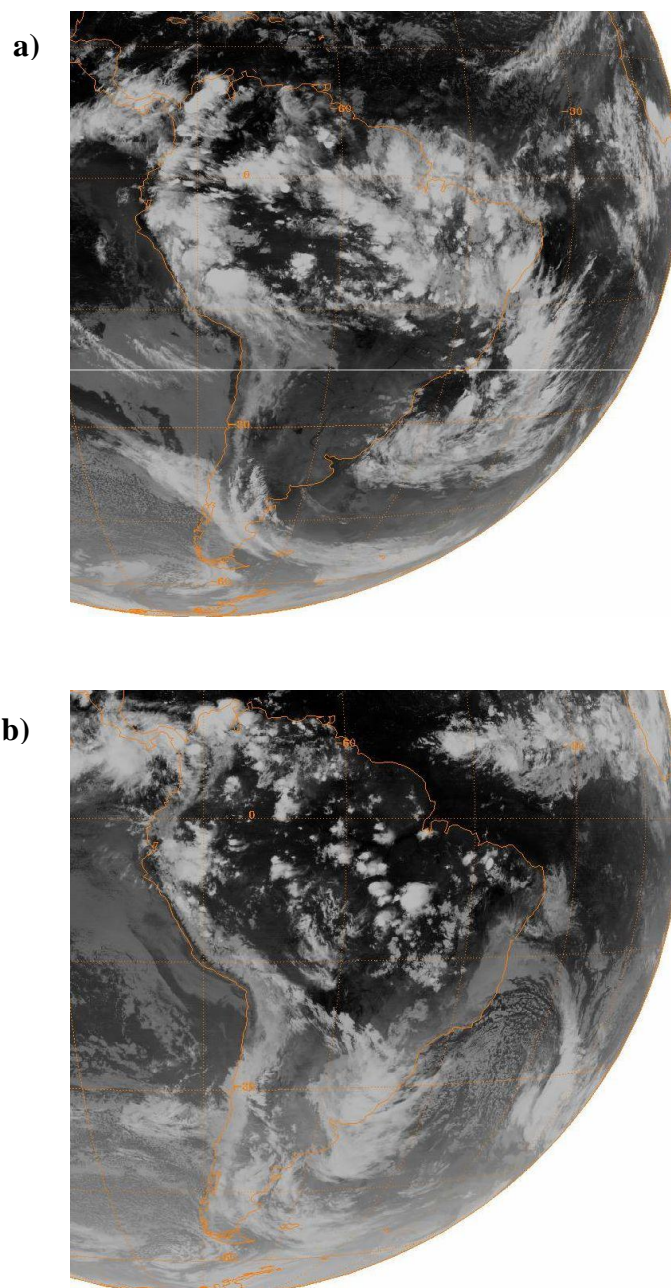
Os eventos selecionados foram separados e agrupados de acordo com as características de nebulosidade encontradas, tendo como critério para tal agrupamento o mesmo utilizado

para a seleção dos eventos. De acordo com essas características, os eventos foram separados em grupos G:

Grupo 1 (G1): Atividades convectivas sobre a Região Nordeste do Brasil, organizadas pela extremidade frontal, localizada sobre o Atlântico Tropical Sul, conforme Figura 8a.

Grupo 2 (G2): Banda de nebulosidade pouco ativa sobre a Região Nordeste do Brasil, organizada pela extremidade frontal, localizada sobre o oceano Atlântico Tropical Sul, conforme Figura 8b.

FIGURA 8 - Imagens de satélite com a caracterização dos grupos G, grupo 1(G1), eventos com convecção na extremidade frontal (a) e grupo 2 (G2), eventos sem convecção na extremidade frontal (b).



Uma divisão sazonal dos eventos foi realizada para ambos os grupos citados acima, essa divisão se justifica devido ao escoamento de grande escala ter enormes diferenças de acordo com a época do ano, a diferença de circulação pode determinar as condições necessárias para a ocorrência de eventos do grupo 1 (G1) ou do grupo 2 (G2).

A divisão sazonal agrupou os eventos que tiveram a ocorrência nas seguintes estações:

- Verão Austral - dezembro, janeiro e fevereiro;
- Inverno Austral - junho, julho e agosto;
- Estação de transição fria ou outono austral - março, abril e maio;
- Estação de transição quente ou primavera austral - setembro, outubro e novembro.

Após o agrupamento dos eventos, de acordo com suas características, e a divisão sazonal desses, realizou-se uma comparação entre os casos do grupo (G1) e do grupo 2 (G2), podendo-se, dessa forma, determinar os possíveis fatores que favorecem o desenvolvimento de atividades convectivas associadas à extremidade frontal, localizada sobre o Atlântico Tropical Sul.

3.3.2 Variáveis Utilizadas

As seguintes variáveis meteorológicas foram utilizadas para se analisar as características dos sistemas frontais:

3.3.2.1 Advecção horizontal de temperatura, dada pela fórmula:

$$AT = u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}$$

onde:

AT – advecção de temperatura [K/s];

u – componente zonal do vetor vento [m/s];

v – componente meridional do vetor vento [m/s].

3.3.2.2 Espessura pela fórmula:

$$\delta\Phi \equiv \Phi_1 - \Phi_0 = R \ln \left[\frac{p_0}{p_1} \right] \bar{T}$$

onde:

$\delta\Phi$ - é a espessura da camada [mgp];

Φ_1 - é a geopotencial no nível 1 [mgp];

Φ_0 - é a geopotencial no nível 0 [mgp];

R - é a constante dos gases para o ar seco [J/Kg*K];

p_0 - é a pressão no nível 0 [Pa];

p_1 - é a pressão no nível 1 [Pa].

3.3.2.3 -Vorticidade relativa, pela fórmula:

$$\zeta = K. (\nabla \times V) = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

onde:

ζ - é a vorticidade relativa [10^{-4} s^{-1}];

u - é a componente zonal do vetor vento [m/s];

v - é a componente meridional do vetor vento [m/s].

O software utilizado para visualização dos dados foi o Grid Analysis and Display System (GrADS) versão 1.8 SL11.

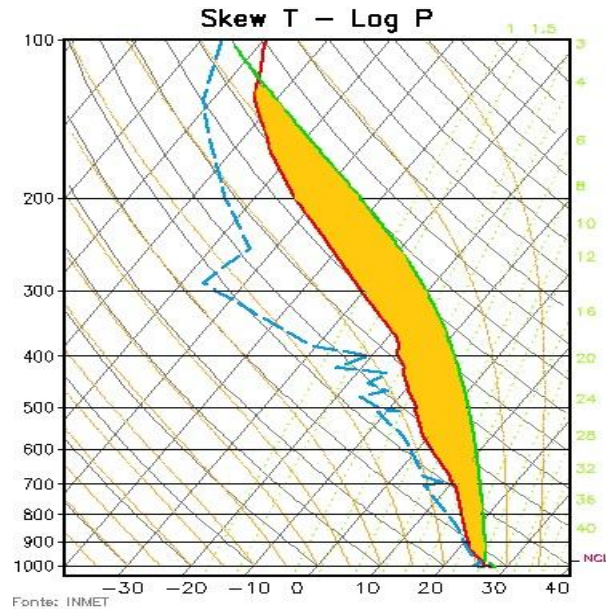
Para a análise dos dados de sondagens foram utilizados os seguintes índices:

3.3.2.4 Índice CAPE

O valor de CAPE também conhecido como energia de fluuabilidade, corresponde à área entre a curva de temperatura do ambiente (dada pela sondagem) e a curva da adiabática

saturada, do Nível de Condensação Espontânea (NCE) até o Nível de Equilíbrio (NE), conforme ilustra a FIGURA 9.

FIGURA 9 - Representação gráfica da área positiva (CAPE) em um diagrama Skew T – Log P



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

$$CAPE = \int_{z=NCE}^{z=NE} g \frac{\Delta\theta_e}{\theta_{es}} dz$$

onde:

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

NCE – nível de condensação espontânea [m];

g – aceleração da gravidade [m/s^2];

$\Delta\theta_e$ - é a diferença entre a temperatura potencial equivalente da parcela em superfície e a temperatura potencial equivalente saturada do ambiente, em cada nível [$^{\circ}C$], dados pela equação: $\Delta\theta_e = \theta_{ep} - \theta_{es}$.

θ_{ep} - temperatura potencial equivalente da parcela em superfície [$^{\circ}C$];

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

A TABELA 1 apresenta os valores limites de CAPE, indicando o potencial para o desenvolvimento de tempestades.

TABELA 1 - Valores críticos de CAPE

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

Fonte: <http://twister.sbs.ohio-state.edu>

3.3.2.5 Índice K, definido pela equação:

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700})$$

onde:

T_{850} - temperatura [°C], no nível de 850 hPa;

T_{500} - temperatura [°C], no nível de 500 hPa;

T_{d850} - temperatura do ponto de orvalho [°C], no nível de 850 hPa;

T_{700} - temperatura [°C], no nível de 700 hPa;

T_{d700} - temperatura do ponto de orvalho [°C], no nível de 700 hPa;

A TABELA 2 apresenta os valores críticos para o índice K.

TABELA 2 - Valore críticos do Índice K

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

Fonte: <http://twister.sbs.ohio-state.edu>

3.3.2.6 Índice Total-Totals (TT), definido pela equação:

$$TOTL = (T_{850} - T_{500}) + (T_{d850} - T_{500})$$

onde:

T_{850} - temperatura [°C], no nível de 850 hPa;

T_{500} - temperatura [°C], no nível de 500 hPa;

T_{d850} - temperatura do ponto de orvalho [°C], no nível de 850 hPa;

A TABELA 3 apresenta os valores críticos do Índice Total-Totals.

TABELA 3 - Valore críticos do Índice Total-Totals (TT).

Índice Total-Totals [°C]	Interpretação
< 43	Tempo estável
≥ 44	Tempestades esparsas
≥ 50	Tempestades esparsas e severas
≥ 56	Tempestades numerosas e severas

Fonte: <http://twister.sbs.ohio-state.edu>

3.3.2.7 Índice de Levantamento (LI), definido pela equação:

$$LI = T_{500} - T_{parc.}$$

onde:

T_{500} - temperatura [°C], no nível de 500 hPa;

$T_{parc.}$ - temperatura da parcela levantada adiabaticamente até o nível de 500 hPa.

A TABELA 4 apresenta os valores críticos para o Índice de Levantamento (LI).

TABELA 4 - Valore críticos do Índice de Levantamento (LI)

Valores de LI [°C]	Interpretação
Valores positivos	Improvável
0 até -2	Possível com uma forçante
-3 até -5	Provável
< -5	Grande possibilidade

Fonte: <http://twister.sbs.ohio-state.edu>

3.3.3 Métodos Usados a Identificação das Zonas Frontais

As zonas frontais não podem ser identificadas por um campo meteorológico isolado, é necessária uma verificação simultânea da sua existência através de vários campos. Dessa forma, a interpretação do meteorologista é de fundamental importância para identificar a região de atuação das frentes e seus efeitos sobre as condições de tempo presente.

Neste trabalho, foram utilizados métodos clássicos e já difundidos na literatura, para identificação das frentes. Métodos estes que foram apresentados por Petterssen (1940,1956), Bluestein (1983), Smith *et al* (1995) e Fedorova e Carvalho (2000). Para os campos utilizados foram verificadas as seguintes características:

- Pressão —→ cavado do ciclone baroclínico;
- Espessura —→ região com forte gradiente;
- Linhas de corrente —→ confluência em baixos níveis;
- Advecção de Temperatura —→ região entre advecção quente e a advecção fria;
- Vorticidade relativa —→ eixo de máxima vorticidade ciclônica.

Foram criadas figuras compostas de um campo bórico e de campos térmicos, de umidade e de circulação, que foram de extrema utilidade para analisar o comportamento e a estrutura dos sistemas frontais. A maioria dos campos foi analisada para o nível de 925 hPa, com exceção do campo de PNM, sendo esse nível escolhido por sofrer menos influência do aquecimento superficial e do atrito da superfície continental.

Dessa maneira, pode-se complementar melhor a definição dos grupos G1 e G2 caracterizando os mesmos da seguinte forma:

G1 —→ Não há, nos campos meteorológicos, a existência de uma zona frontal sobre a Região Nordeste do Brasil. Porém, pela imagem de satélite, é possível observar atividades convectivas sobre esta Região, organizadas pela extremidade frontal situada sobre o oceano Atlântico Tropical Sul.

G2 —→ Não há, nos campos meteorológicos, a existência de uma zona frontal sobre a Região Nordeste do Brasil. Pela imagem de satélite, é possível observar uma banda de nebulosidade pouco ativa, organizada pela extremidade frontal situada sobre o oceano Atlântico Tropical Sul.

3.3.4 Determinação dos Fatores Dinâmicos

A partir da comparação entre os casos do G1 e do G2, definiram-se como fatores (F), os sistemas ou mecanismos dinâmicos encontrados nos eventos pertencentes ao Grupo 1 (G1) somente. As configurações típicas de circulação para os eventos do Grupo 2 (G2) serão apresentadas posteriormente.

O período analisado para cada evento teve início a partir do momento em que se observou alguma influência do sistema frontal sobre a Região Nordeste do Brasil. A análise estendeu-se até os efeitos relacionados com este não serem mais percebidos sobre esta região.

Foram consideradas as distribuições das variáveis presentes em baixos, médios e altos níveis da atmosfera, tentando-se identificar, qual, ou quais fatores influenciaram o desenvolvimento de atividades convectivas sobre a Região Nordeste do Brasil, organizada pela extremidade frontal.

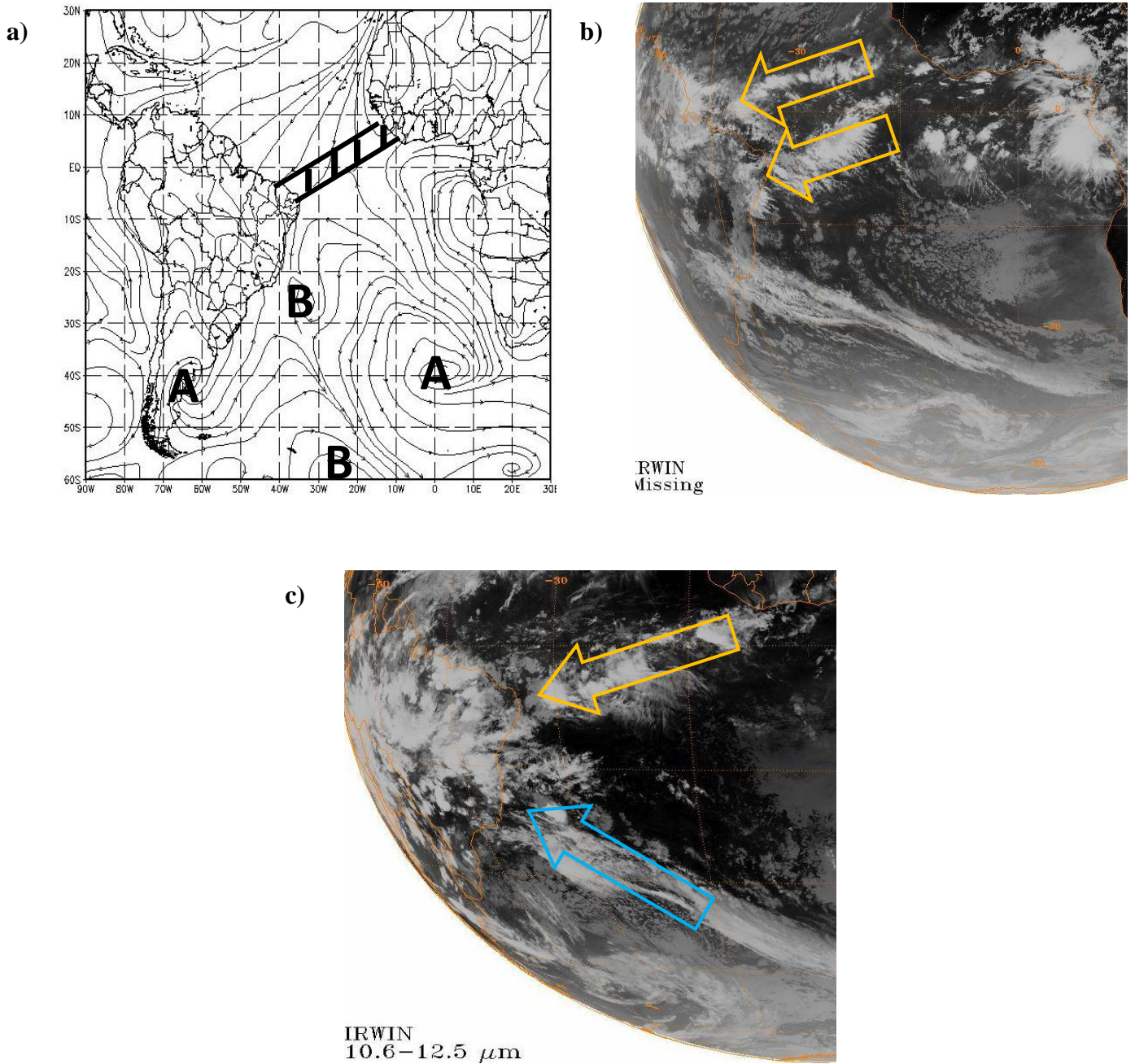
Posteriormente, a fim de definir os padrões de escoamento para os eventos estudados, analisou-se quais desses fatores atuavam conjuntamente para cada um dos casos. Essa análise foi realizada através da elaboração de tabelas que mostram a associação dos fatores em dois e três níveis atmosféricos diferentes.

Para identificação, bem como para a determinação da importância de cada fator, foram analisadas imagens com campos béricos e térmicos conjuntamente com imagens de satélites para cada período analisado. A seguir serão apresentados os fatores (F) definidos conforme descrito acima:

Baixos Níveis

Fator 1 (F1) – Para a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), com inclinação SW-NE sobre o norte-nordeste da Região Nordeste conforme apresentado na FIGURA 10a. E para a formação de uma segunda banda de nebulosidade ao sul da banda da principal da ZCIT, FIGURA 10b. Considerou-se a influência da ZCIT em conjunto com a aproximação do sistema frontal, no período em que a zona frontal modifica as condições do tempo sobre o Nordeste do Brasil, conforme FIGURA 10c. Foram utilizadas imagens de satélite, e o campo de linhas de corrente em 925 e 850 hPa.

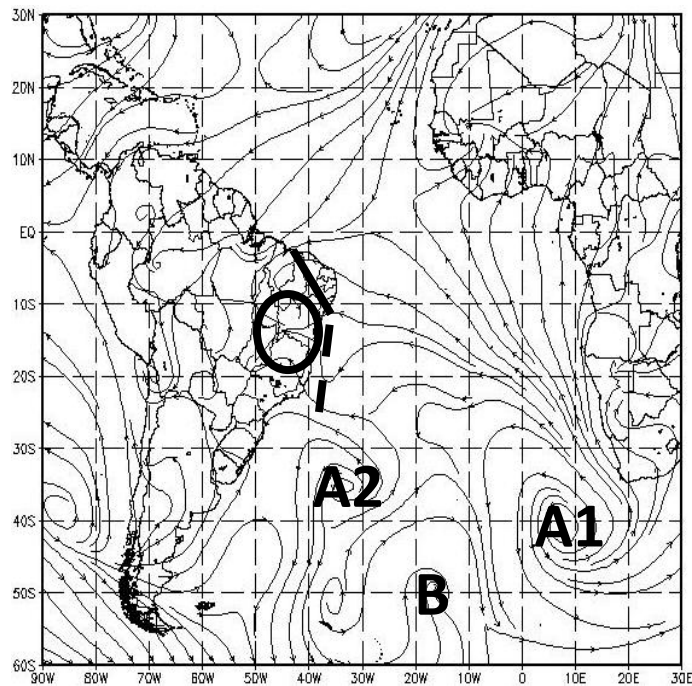
FIGURA 10 - ZCIT e área de atuação desta em conjunto com o sistema frontal, linhas de corrente em 925 hPa (a) , banda dupla de nebulosidade para ZCIT, imagem do canal infravermelho do satélite METEOSAT (b), atuação conjunta da zona frontal e da ZCIT, imagem do canal infravermelho do satélite METEOSAT (c), FATOR 1 (F1).



Fonte: a) Autor, 2011; b) e c) satélite GOES NCDC/NOAA

Fator 2 (F2) – Refere-se à bifurcação do escoamento de leste sobre o oceano Atlântico, gerada pela interação entre a circulação da Alta Subtropical do Atlântico anticiclone Sul (ASAS) (A1) e o anticiclone pós-frontal (A2). Observa-se também devido à interação desses sistemas de convergência sobre o nordeste do Brasil, conforme mostram as linhas de corrente no nível de 925 hPa. Uma parte do fluxo apresenta curvatura anticiclônica sobre o centro norte da Região Nordeste e, outra parte, com curvatura ciclônica ao longo da costa nordestina. A FIGURA 11 mostra essa divisão do fluxo e a convergência sobre o NEB decorrente da mesma.

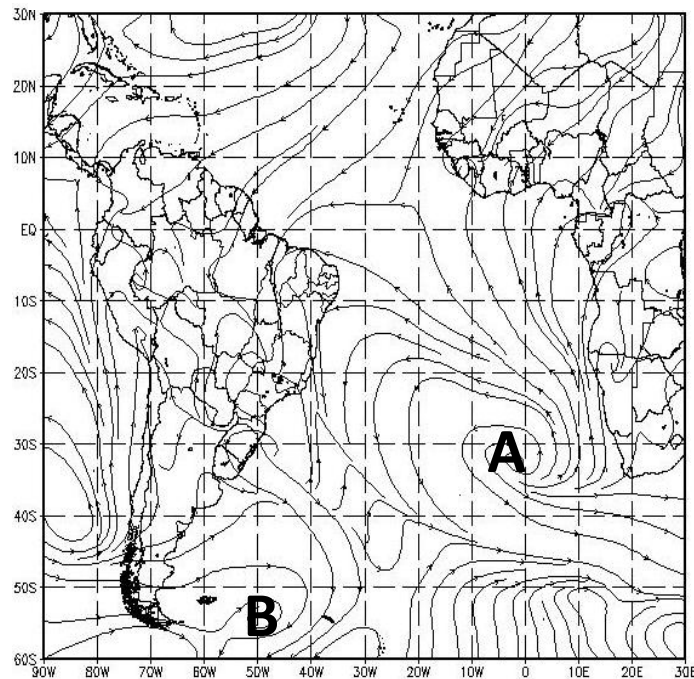
FIGURA 11 - Divisão no fluxo de leste, com cavado (tracejado) e crista (contínua), convergência sobre NEB (círculo), ASAS, Anticiclone pós-frontal e ciclone, linhas de corrente em 925 hPa, FATOR 2 (F2).



Fonte: Autor, 2011

Fator 3 (F3) - Refere-se à borda oeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (A) atuando sobre a Região Nordeste do Brasil, posicionada em média a 30°S e entre 10°E e 10°W. Conforme verificado na FIGURA 12, linhas de corrente em 925 hPa.

FIGURA 12 - Borda oeste do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (A), ciclone (B), linhas de corrente em 925 hPa, FATOR 3 (F3).

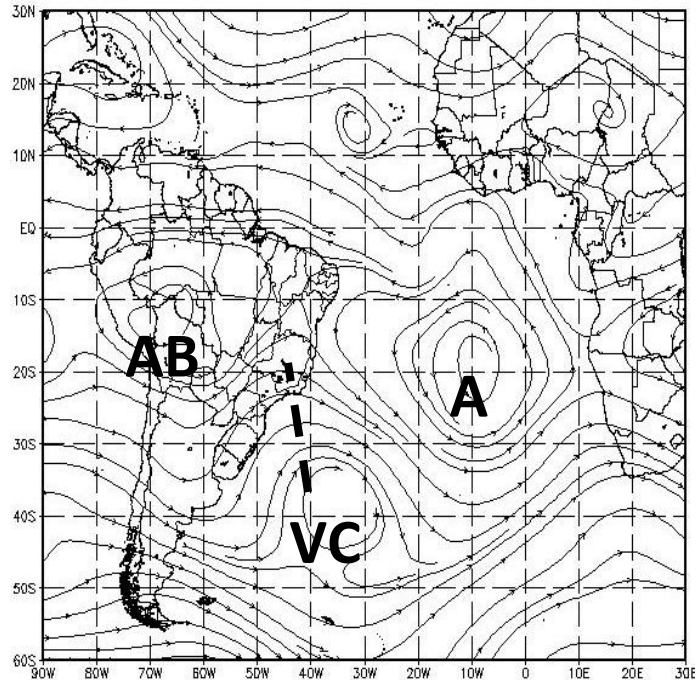


Fonte: Autor, 2011

Médios Níveis:

Fator 4 (F4) – Para confluência sobre a Região Nordeste gerada pela interação da circulação da ASAS (A), e do vórtice ciclônico (VC), localizado nas latitudes médias sobre o oceano Atlântico. E para a presença de um cavado (tracejado) atuando ao norte de 25°S resultado da interação entre o VC e a Alta da Bolívia (AB). Conforme mostrado na FIGURA 13, linhas de corrente em 500 hpa.

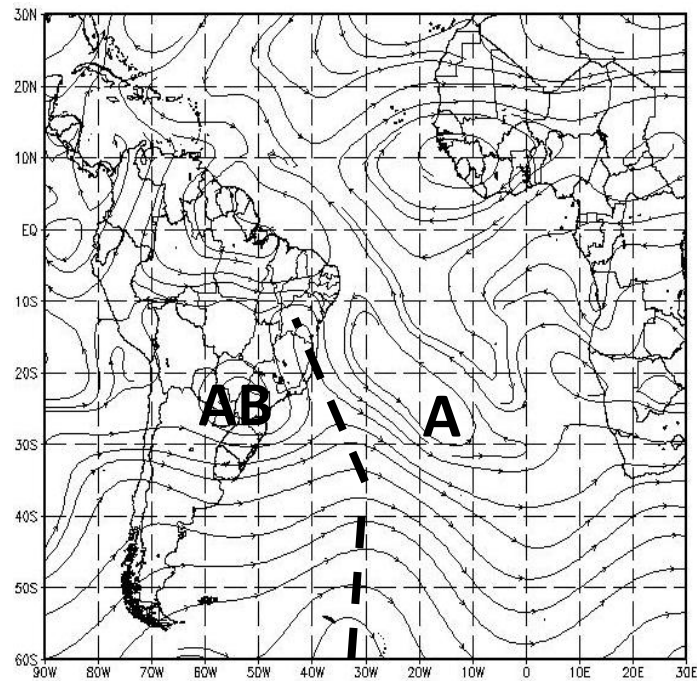
FIGURA 13 - Confluência no escoamento sobre a Região Nordeste do Brasil, Alta sobre o Atlântico (A), Vórtice Ciclônico (VC), Alta da Bolívia (AB) e cavado ao norte de 25°S (tracejado), linhas de corrente em 500 hPa.,



Fonte: Autor, 2011

Fator 5 (F5) – Referente ao cavado com eixo NW-SE em 500hPa entre a circulações da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que se encontra alongada em direção ao continente, e a Alta da Bolívia (AB) que se encontra deslocada ao sul de sua posição climatológica. Também se observa convergência entre a circulação do cavado e da ASAS, conforme a FIGURA 14.

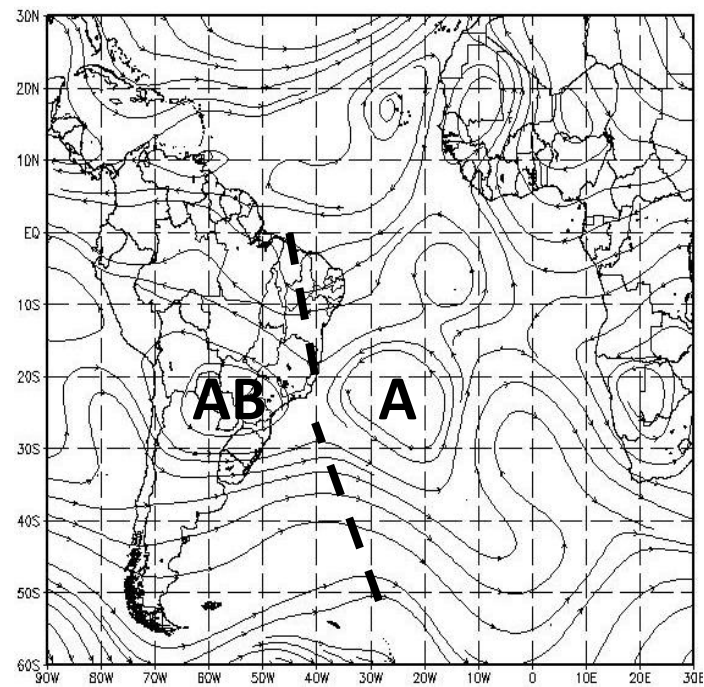
FIGURA 14 - Cavado NW-SE (tracejado) no nível de 500 hPa, atuando sobre a Região Nordeste do Brasil, Alta da Bolívia (AB) e ASAS (A), FATOR 5 (F5).



Fonte: Autor, 2011

Fator 6 (F6) - Para o cavado no nível de 500 hPa que se estende desde o ciclone posicionado próximo à costa africana, no hemisfério norte, até o interior da Região Nordeste, consoante a FIGURA 15. A penetração desse cavado ocorre devido ao posicionamento da AB a sul da sua posição climatológica, que interage com a ASAS.

FIGURA 15 - Cavado ligado ao anticiclone do hemisfério norte (tracejado), Alta da Bolívia (AB) e ASAS (A), linhas de corrente no nível de 500 hPa, FATOR 6 (F6).

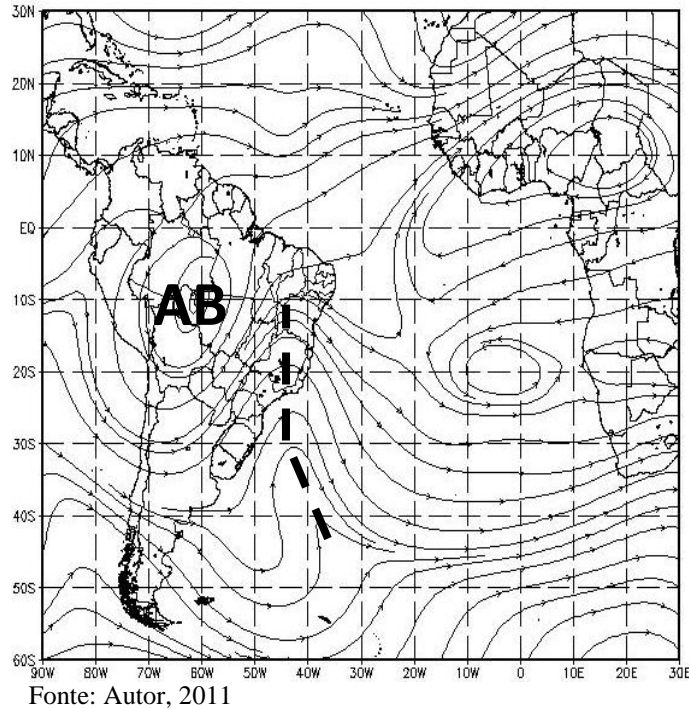


Fonte: Autor, 2011

Altos Níveis:

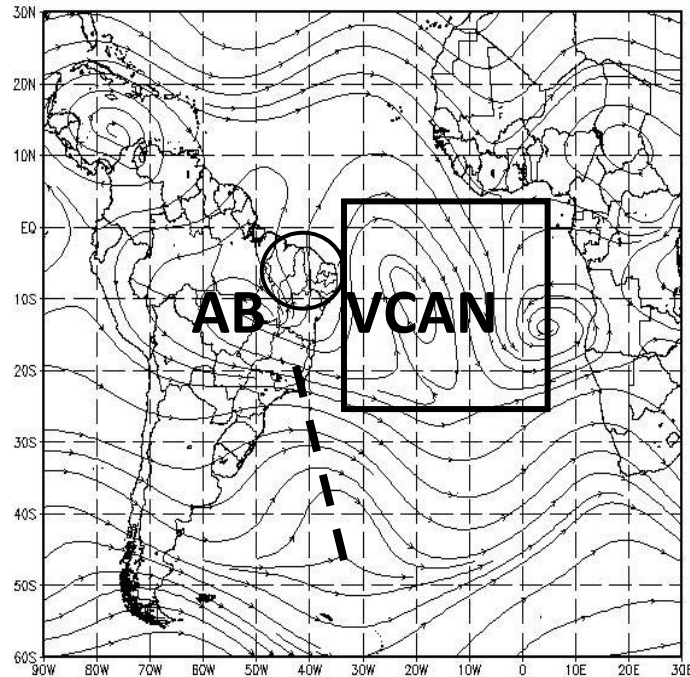
Fator 7 (F7) – Para um amplo cavado no nível de 200 hPa, que se estende meridionalmente desde o oceano Atlântico ao sul da América do Sul, e área de difluência no escoamento sobre a Região Nordeste do Brasil, devido a interação com a Alta da Bolívia (AB). Consoante ao apresentado na FIGURA 16, através das linhas de Corrente em 200hPa.

FIGURA 16 - Cavado estendendo-se meridionalmente (tracejado), área de difluência sobre a Região Nordeste do Brasil (retângulo), Alta da Bolívia (AB), linhas de corrente em 200 hPa, FATOR 7 (F7).



Fator 8 (F8) – Refere-se à interação entre a circulação do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) ou de um Cavado de Altos em Níveis (CAN) (não apresentado na Figura), e a Alta da Bolívia (AB), gerando uma área de forte difluência. Conforme é mostrado pela FIGURA 17. O VCAN para este fator esteve em média posicionado do seu eixo em torno de 10°S/20°W, estando sempre dentro da área delimitada na FIGURA 17, pelas linhas de corrente em 200hPa.

FIGURA 17 - Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), Alta da Bolívia (AB), área de difluência na circulação sobre a Região Nordeste (círculo), área de posicionamento do VCAN (retângulo), linhas de corrente em 200 hPa, FATOR 8.



Fonte: Autor, 2011

3.3.5 – Interação com os restos da onda anterior e ou posterior

Foi analisada para ambos os grupos a interação da frente em estudo com restos frontais deixados por ondas anteriores e também interações com ondas à sua retaguarda (CRUZ 2008). Essas interações reforçam a zona frontal, sendo um fator responsável para o deslocamento dos sistemas frontais até a Região Nordeste do Brasil. Para esta análise utilizaram-se imagens de satélites, campos de PNM, espessura da camada 700 – 1000 hPa, linhas de corrente e advecção de temperatura em 925 hPa.

3.3.6 Comparação entre o Grupo 1 (G1) e o Grupo 2 (G2)

Para realizar uma comparação entre os dois Grupos G1 e G2, foram confeccionadas figuras, para que fosse possível a visualização dos principais mecanismos e sistemas atuantes nos diferentes níveis atmosféricos para os dois grupos.

Essa comparação foi necessária, primeiramente, para definirem-se os fatores dinâmicos possivelmente responsáveis pelo desenvolvimento dos processos convectivos. Posteriormente a comparação foi realizada para esclarecer a diferença ente a circulação encontrada para os grupos G1 e G2, expondo dessa forma, como a atuação dos fatores definidos foi responsável para formação das atividades convectivas.

Em baixos níveis, foi analisado o posicionamento da zona frontal à posição do ciclone da frente principal, do anticiclone pós-frontal e da Alta Subtropical do Atlântico Sul para os casos em que esta estava presente, e quando se encontrava bem configurada. A análise foi realizada utilizando-se imagens de satélite, espessura da camada 500 – 1000 hPa, linhas de corrente e vorticidade relativa em 925 e 850 hPa.

Nos níveis médios, foram analisados o posicionamento e a presença ou não de alguns sistemas tais como: Alta da Bolívia, Alta Subtropical do Atlântico Sul e outros sistemas sobre o continente ou sobre o oceano que favorecem ou inibem os processos convectivos. Para esta análise, foram observados campos de linhas de corrente, vorticidade relativa e altura geopotencial para o nível de 500 hpa.

Em níveis altos, foram analisados a presença e o posicionamento da Alta da Bolívia (AB) e do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), e de outros sistemas no nível de 200 hPa, utilizando-se o campo de linhas de corrente em 200 hPa. O posicionamento desses sistemas foi considerado como o centro da circulação anticiclônica para a AB e da circulação ciclônica para o VCAN.

3.3.7 Análise Termodinâmica dos Eventos

Analisaram-se os perfis atmosféricos para os casos pertencentes aos grupos G1 e G2, os perfis foram obtidos através das radiossondagens e plotados em diagramas Skew-T. Através dos diagramas, foram analisadas as condições de instabilidades das camadas atmosféricas, deslocamento da parcela, camadas úmidas e inversões térmicas existentes. Foram utilizadas radiossondagens para a estação mais próxima possível da região onde se observaram as atividades convectivas para os casos do G1. E para a estação mais próxima possível de onde se observou a atuação da extremidade frontal para os casos do G2.

Analisaram-se as radiossondagens para as doze horas anteriores à formação dos processos convectivos, a fim de identificar se as condições termodinâmicas da atmosfera que antecedem a chegada da zona frontal são propícias para o desenvolvimento convectivo.

E também as sondagens para as doze horas posteriores ao desenvolvimento convectivo máximo observado, para os casos do G1. Já que tanto para os casos do G1 quanto para os do G2, nesse período, ainda se observava a influência da extremidade frontal sobre as condições do tempo no NEB.

Dessa forma, analisando o perfil atmosférico para um período de vinte quatro horas, em que se observou a influência da zona frontal sobre o Nordeste do Brasil, pôde-se verificar se houve uma grande variação no potencial convectivo durante esse período. Não foram analisados os perfis para o período no qual se verificou o maior desenvolvimento convectivo, pois este ocorreu geralmente no período noturno e as radiossondagem para o horário das 00 UTC na grande maioria das vezes não estavam disponíveis.

Também foram calculados e analisados os índices de instabilidade, CAPE, K, TT e LI, que sintetizam as características termodinâmicas para típicas situações convectivas, servindo, dessa maneira, para determinar o possível potencial convectivo da área em estudo.

Após a análise das condições gerais de instabilidades da atmosfera para ambos os grupos em separado, foi realizada uma comparação entre os grupos G1 e G2 para a determinação da real importância das condições termodinâmicas para o desenvolvimento dos processos convectivos associados à extremidade frontal.

3.3.8 Determinação de episódios da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

Durante o final da estação de transição quente e o verão austral em alguns eventos em que se observaram atividades convectivas organizadas pela extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, também se notou pelas imagens de satélite uma banda de nebulosidade convectiva com orientação noroeste-sudeste. Ela estendeu-se do sul da Região Amazônica até o oceano Atlântico Subtropical, que segundo Kousky (1988) e Figueroa (1997), são característicos da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Para determinar se essa configuração realmente caracterizava um episódio de ZCAS foram analisados alguns fatores que são:

- persistência de no mínimo quatro dias (Quadros, 1994);
- confluência entre ar da ASAS e ar de latitudes mais altas, acompanhada de convergência de umidade e nebulosidade;
- no ar superior, existência de um cavado a leste dos Andes, e divergência em altitude.

Os episódios de ZCAS identificados através da análise dos fatores acima foram posteriormente confirmados através de consulta à Revista Climanálise. Disponível no site <http://www.cptec.inpe.br/climanalise> (CPTEC/INPE), a revista mensal descreve os episódios de ZCAS que aconteceram sobre o Brasil naquele determinado período.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Atuação dos Sistemas Frontais na Região Nordeste do Brasil

Do número total de sistemas frontais que atuaram sobre o litoral brasileiro durante o período de estudo, foram selecionados 103 eventos em que sistemas frontais se deslocaram para a região tropical influenciando as condições de tempo sobre a Região Nordeste do Brasil.

Dos eventos selecionados pela análise das imagens de satélite foram identificados 68 eventos pertencentes ao G1, ou seja, onde foram observadas atividades convectivas sobre a Região Nordeste do Brasil, organizadas pela extremidade frontal, posicionada sobre o Oceano Atlântico Tropical Sul. Outros 35 eventos foram caracterizados como pertencentes ao G2, onde não se observou processos convectivos, sobre o Nordeste do Brasil, organizados pela extremidade frontal sobre o Atlântico.

Analisando a distribuição sazonal dos eventos através da TABELA 5, constata-se que a Região Nordeste sofre influência de sistemas frontais durante todo ano. Porém, notou-se durante o período de estudo (2000-2009) que há uma significativa variação no número de sistemas frontais que atuaram no Nordeste brasileiro de um ano para outro. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Kousky (1979), que após analisar dez anos de dados (1961-1970), chegou a conclusão de que as frentes atuam no sul da Bahia durante todo ano, com uma frequência maior de março a dezembro. E também estão em concordância com as pesquisas realizadas por Oliveira (1986), Justi e Silva Dias (2002) e Cavalcanti e Kousky (2003), que mostraram que o número de frentes sofre uma redução conforme se avança para latitudes menores.

A TABELA 5 também mostra de forma clara a variação na quantidade de eventos de um ano para outro e também a variação sazonal na distribuição dos casos. Nota-se que o ano de 2000 foi o com o maior número de ocorrências com um total de 19 casos, em 2001 e 2008 ocorreram sete eventos, 2002 apresentou um total de quatorze sistemas frontais que atuaram sobre a Região Nordeste do Brasil, sendo o segundo ano com maior número de eventos.

Em 2003 e 2009, foram registradas 11 influências frontais sobre o nordeste do Brasil. O ano com menor frequência de ocorrências foi o de 2004 com apenas cinco eventos observados, 2005 foi o segundo ano com menor frequência de ocorrências com apenas seis. Em 2006, dez sistemas frontais interferiram nas condições de tempo sobre o nordeste do Brasil. No ano de 2007, verificaram-se 13 influências frontais sobre essa Região.

A variabilidade interanual no número de casos de sistemas frontais que influenciam as condições de tempo no Nordeste brasileiro pode estar relacionada com ocorrências de eventos de El Niño e La Niña. Observou-se que o ano (2000) em que se notou um número maior de ocorrências de influências frontais na Região Nordeste do Brasil foi um ano em que ocorreu um La Niña. Da mesma forma, o ano com uma frequência menor no número de casos foi um ano (2004) de El Niño, conforme pode ser visualizado através da TABELA 6. Dos dez anos do período de estudo quatro foram anos de La Niña e seis de El Niño e, em média, verificou-se 11,5 influências frontais no Nordeste do Brasil em anos de La Niña e 9,5 casos em anos de El Niño. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Cavalcanti (1996), que verificou que em anos de El Niño os sistemas frontais em sua maioria não se deslocam de sul para norte e são intensificados na Região Sul. E também com os resultados encontrados por Fedorova e Carvalho (2000) que verificaram que em anos de El Niño as frentes atuaram mais sobre o Rio grande do Sul e Uruguai.

O maior número de eventos, em que sistemas frontais influenciaram direta ou indiretamente as condições do tempo na Região Nordeste, ocorreu durante o verão do hemisfério sul com 33 ocorrências, para as demais estações não houve uma variação muito significativa. Durante a estação de transição fria notou-se 26 casos, no inverno austral foram registrados 23 e a estação de transição quente registrou 21 eventos. Com exceção do inverno austral, dos 23 casos 22, pertencem ao G2, nas outras estações do ano o número de eventos do G1 foi sempre superior aos do G2.

Foram observados eventos do G1 em todas as estações do ano, porém durante o inverno austral foi verificado apenas um caso pertencente a esse grupo. A frequência maior de ocorrências do GRUPO 1 ocorreu durante o verão austral. Para o GRUPO 2, a estação na qual se registrou uma frequência maior de eventos foi o inverno austral, não foram verificados casos do G2 durante o verão austral. Este fato está diretamente ligado à variação sazonal na dinâmica da circulação de grande escala, entre o final da estação de transição fria e o início da transição quente há um resfriamento da superfície continental, devido à declinação do sol para o Hemisfério Norte, fazendo com que a Alta Subtropical do Atlântico Sul se aproxime da América do Sul, inibindo a convecção sobre o continente.

Já entre o final da estação de transição quente e o início da transição fria a superfície continental é aquecida, o que gera áreas de baixa pressão sobre em superfície e divergência em altos níveis da atmosfera o que favorece o desenvolvimento de atividades convectivas.

TABELA 5 - Quantidade dos casos de zonas frontais sobre o NEB, para o G1 e o G2 durante o período de estudo (2000-2009) e para as estações de transição, verão e inverno austral.

Estações Ano/Grupos	Verão Austral		Transição Fria		Inverno Austral		Transição Quente		Total Anual
	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	
2000	5		3	2		6	2	1	19
2001	4			1		1	1		7
2002	7		1			2	2	2	14
2003	3		3	1		2	1	1	11
2004	1					2	1	1	5
2005	2					2	1	1	6
2006	1		6			2	1		10
2007	3		2	3		2	3		13
2008	4				1	1		1	7
2009	3		4			2	2		11
Total por Grupo	33		19	7	1	22	14	7	103
Total por Estação	33		26		23		21		

Foi constatado tanto para os eventos pertencentes ao G1 como para os do G2, comunicação entre a frontal analisada e restos frontais de uma onda anterior, ou interações com a onda frontal na sua retaguarda. Essas ligações entre o sistema em análise e as ondas na sua vanguarda e na sua retaguarda intensificam a frente, sendo importante para que esta exerça influência sobre a Região Nordeste. Este resultado está em concordância com o encontrado nos estudos realizados por Cruz (2008), pois após analisar três anos de dados (2004-2006), concluiu que as interações entre uma onda frontal e restos deixados por uma onda anterior e/ou posterior eram importantes para a influência de sistemas frontais em Alagoas.

TABELA 6 - Frequência de eventos para anos de El Niño e La Niña.

Ano	El Niño	La Niña
2000	-	19
2001	-	7
2002	14	-
2003	11	-
2004	5	-
2005	6	-
2006	10	-
2007	-	13
2008	-	7
2009	11	-
Total	57	46

Devido ao fato de os eventos dos grupos G1 e G2 acontecerem preferencialmente em estações do ano diferentes, o que leva a uma dinâmica do escoamento de grande escala completamente distinta. Foi realizada uma comparação entre os casos dos dois grupos, a fim de se definirem os fatores responsáveis pela formação dos processos convectivos organizados pela extremidade frontal, conforme foi descrito na metodologia. Dessa forma, os resultados do G1 e do G2 serão apresentados separadamente e de maneiras diferentes nas próximas seções.

Como o objetivo do estudo é determinar os prováveis fatores responsáveis pelo desenvolvimento da convecção associada à zona frontal, e dessa forma estabelecer os padrões de escoamento para esses casos, na próxima seção serão discutidos de forma detalhada os fatores encontrados para G1 e descritos no item 3.3.4.

Para o G2 não foram definidos fatores, serão apresentados para esses eventos, resultados gerais e os padrões mais frequentes de escoamentos encontrados, apenas com intuito de se fazer uma comparação entre os dois grupos.

4.2 Frequência das zonas frontais com atividade convectiva sobre NEB

Dos 68 eventos em que se notaram atividades convectivas sobre a Região Nordeste do Brasil (NEB), organizadas pela extremidade frontal sobre o Oceano Atlântico Tropical Sul (G1): Observaram-se dez ocorrências em 2000 e 2002, sendo esses os anos com um maior número de casos do G1, cinco casos foram registrados em 2001.

Para o ano de 2003 verificaram-se sete ocorrências. O ano de 2004 foi o que se observou a menor quantidade de casos do G1 com apenas dois registros, em 2005 verificaram-se três eventos, 2006 teve oito eventos, assim como o ano de 2007, em 2008 foram identificados setes casos, e em 2009 a análise mostrou a ocorrência de sete casos, conforme mostrado na TABELA 7.

A distribuição sazonal dos eventos mostra que cerca de 48% dos casos ocorreram durante o verão austral, a estação de transição fria apresentou 29% dos casos estudados, com uma tendência maior para o mês de abril. Durante a estação de transição quente registraram-se 22% dos casos, com uma tendência de ocorrência para o final desta estação principalmente para o mês de novembro e, apenas um evento ocorreu durante o inverno do hemisfério sul, sendo este registrado no mês de julho do ano 2008.

Este resultado está de acordo com o encontrado por CRUZ (2008), o qual observou que eventos com essa característica tendem a ocorrer na estação quente, no início da estação

de transição fria e no final da estação de transição quente, devido à dinâmica do escoamento de grande escala e o aquecimento sobre o continente favorecerem o desenvolvimento convectivo.

TABELA 7 - Quantidade dos casos de zonas frontais sobre o NEB, para o G1 durante o período de estudo (2000-2009) e para as estações de transição, verão e inverno austral.

ESTAÇÃO	MÊS	ANO										TOTAL	
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009		
VERÃO AUSTRAL	DEZ	3	3	3				1			2	12	33
	JAN	1		2	3		1		1	2	1	11	
	FEV	1	1	2		1	1		2	2		10	
TRANSIÇÃO FRIA	MAR	2			1			2				5	19
	ABR	1						3	1		3	8	
	MAI			1	2			1	1		1	6	
INVERNO AUSTRAL	JUN											0	1
	JUL									1		1	
	AGO											0	
TRANSIÇÃO QUENTE	SET			1								1	14
	OUT							1	1		2	4	
	NOV	2	1	1	1	1	1		2			9	
TOTAL		10	5	10	7	2	3	8	8	5	7	68	

De fato, como foi mencionado anteriormente, o verão foi a estação mais favorável para o desenvolvimento de processos convectivos sobre o continente associados à extremidade frontal, posicionada sobre o Atlântico Tropical Sul.

Também se notou que em 11 casos analisados nessa estação, apresentava-se configurada a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o que corresponde a cerca de 17% dos casos em que observaram atividades convectivas organizadas pela extremidade frontal sobre o NEB. A TABELA 8 apresenta os eventos de ZCAS mencionados. Estes resultados estão em conformidade com os apresentados por Cavalcanti e Kousky (2009), os quais mencionaram que quando as frentes se deslocam em direção ao equador, durante a estação de verão, algumas vezes interagem com o ar úmido e quente tropical, produzindo convecção profunda e organizada além de chuvas fortes sobre o continente. E que durante o verão, as frentes frequentemente se posicionam ao longo da costa do Brasil, entre São Paulo e Bahia na região da posição climatológica das ZCAS.

TABELA 8 - Relação dos episódios de ZCAS, encontrados para, casos com convecção na extremidade frontal

INÍCIO	FINAL	DURAÇÃO
21/01/2000	25/01/2000	5 dias
01/12/2000	08/12/2000	8 dias
03/02/2002	07/02/2002	5 dias
05/11/2002	08/11/2002	4 dias
13/01/2003	19/01/2003	7 dias
20/11/2004	25/11/2004	6 dias
12/02/2005	16/02/2005	5 dias
24/11/2005	28/11/2005	5 dias
07/03/2006	11/03/2006	5 dias
30/01/2007	08/02/2007	10 dias
02/12/2008	07/12/2008	6 dias

4.3 Fatores Dinâmicos de desenvolvimento da atividade convectiva sobre NEB nas zonas frontais

Nesta seção, apresentar-se-ão os principais resultados encontrados para cada fator analisado e também uma breve discussão sobre esses. Através da TABELA 9, pode-se visualizar a distribuição sazonal, a frequência de ocorrência anual e a variação na ocorrência de cada fator de um ano para outro ou entre uma estação e outra, para os casos do G1.

Baixos níveis

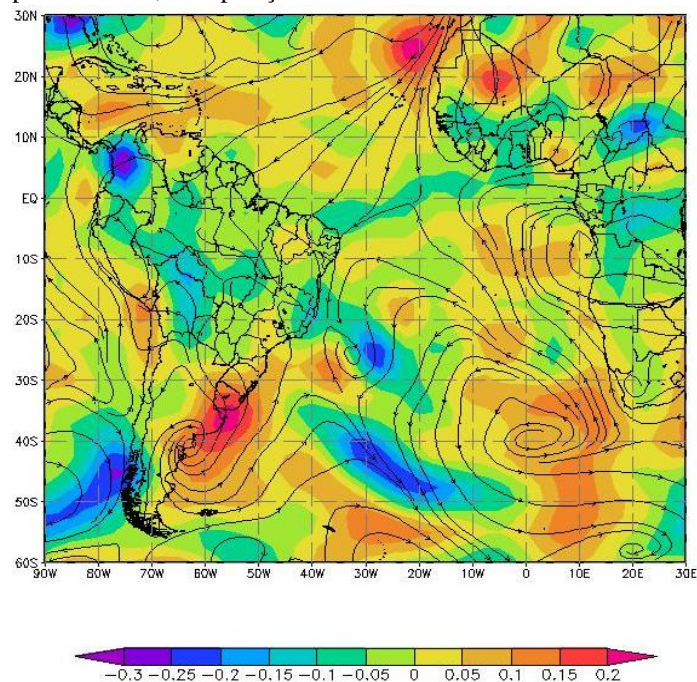
Fator 1 (F1): Zona de Convergência Intertropical – ZCIT.

Verificou-se em 31 eventos a influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sobre o norte-nordeste da região nordeste com uma inclinação SW-NE, atuando de forma conjunta com a aproximação do sistema frontal, e no período em que a extremidade frontal sobre o oceano influencia as condições do tempo sobre o NEB. Resultado este, que está em concordância com o citado por Melo et al. (2009), que menciona que a atuação de outro sistema em conjunto com a ZCIT pode intensificar a precipitação sobre o NEB.

Outra característica verificada durante o estudo com relação à ZCIT, foi a presença em 6 eventos de uma banda secundária de convecção ao sul da banda principal sobre o Atlântico, conforme FIGURA 19. Este resultado está de acordo com o descrito por Uvo (1989), segundo ela a formação de uma banda dupla da ZCIT mostrou-se relacionada com anos chuvosos no NEB, principalmente nos meses de março e abril, quando a ZCIT atinge sua máxima inclinação SW-NE.

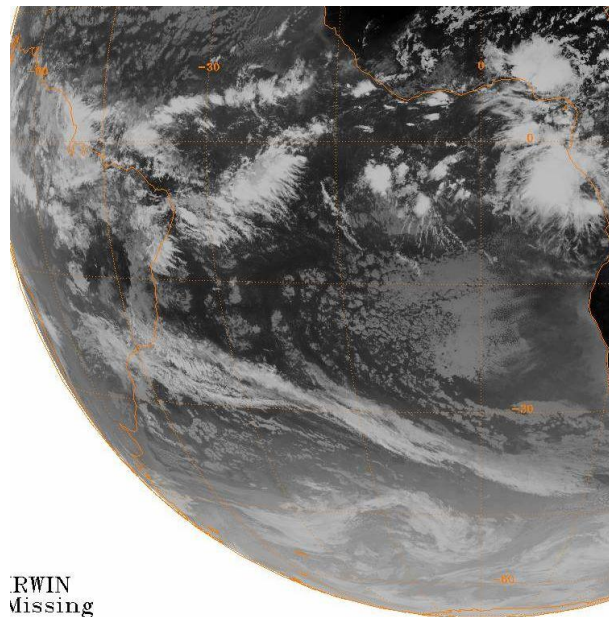
Devido à interação entre a ZCIT e a zona frontal, observam-se através da FIGURA 18 movimentos verticais ascendentes sobre praticamente toda Região Nordeste, tendo esse fator um papel importante na intensificação da extremidade frontal sobre esta Região. A ZCIT, em conjunto com o sistema frontal, influenciou as condições do tempo sobre o NEB em 45% dos eventos analisados. Sendo que sua ocorrência foi verificada com maior frequência de janeiro a abril. A influência conjunta da ZCIT com um sistema frontal também foi percebida nos estudos realizados por Souza e Nechet (2004), ao estudarem a influência de sistemas frontais na Amazônia Oriental.

FIGURA 18 - Linhas de corrente em 925 hPa e Omega em 850hPa para o fator 1, com posição da ZCIT.



Fonte: Autor, 2011

FIGURA 19 - Imagens de satélite para o dia 29/04/2007 as 12:00 UTC com duas bandas de nebulosidade para ZCIT



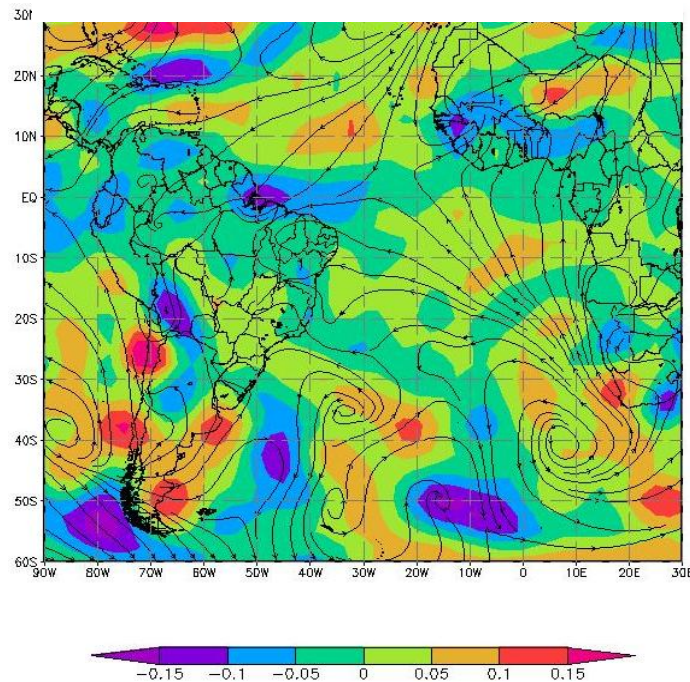
Fonte: Satellite GOES – NCDC/NOAA

Fator 2 (F2) : Fluxo Bifurcado sobre o Atlântico e Convergência o sobre o NEB.

Foi observada uma bifurcação no escoamento de leste sobre o Atlântico, com uma parte do fluxo adquirindo curvatura ciclônica ao longo da costa nordestina estendendo-se do Atlântico ao centro sul do NEB e outra parte com curvatura anticiclônica sobre o centro norte da Região Nordeste. O cavado formado ao longo do litoral do nordeste aparece acoplado à extremidade frontal sobre o Atlântico, alinhando a convecção em direção ao nordeste. Essa divisão no fluxo sobre o Atlântico, também gera confluência sobre a Região Nordeste do Brasil. Gemiacki (2005), em seu estudo sobre a atuação de sistemas frontais sobre o Nordeste do Brasil, observou a interação entre um cavado no norte desta região e o sistema frontal, e a presença de convergência sobre o NEB.

A confluência sobre o continente, aliada às altas temperaturas e o canal de umidade formado pelo sistema frontal, induzem o levantamento do ar, conforme pode ser verificado pela FIGURA 20. Esse fato contribui para o desenvolvimento de atividades convectivas organizadas pela extremidade frontal, foi verificado em 50% dos casos, e sua ocorrência esteve distribuída de forma semelhante durante o período em que se observaram os eventos do G1.

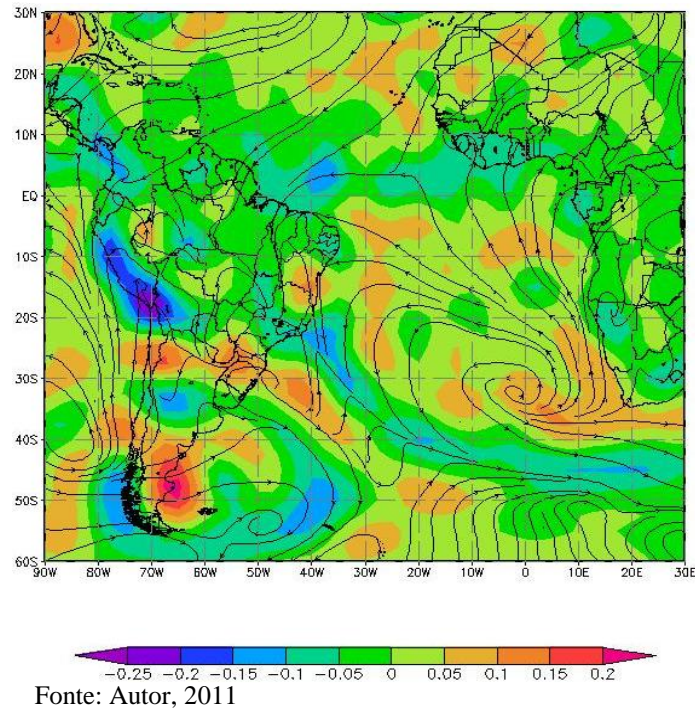
FIGURA 20 - Linhas de corrente em 925 hPa e Omega em 850hPa para o fator 2.



Fator 3 (F3) : Borda oeste do Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

Observou-se a presença sobre a Região Nordeste do Brasil da borda oeste do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, consoante a FIGURA 21. Devido à atuação desse sistema a circulação sobre o NEB, adquire uma componente de norte, sendo que na região litorânea do nordeste a direção do escoamento é de NE, enquanto que no interior dessa região o fluxo é de N. Figueiredo (2009) em seu estudo observou convergência entre a circulação da ASAS e do anticiclone pós-frontal, gerando convecção sobre o continente e conseqüentemente ventos fortes. No presente estudo, verificaram-se da mesma forma as interações entre esses dois sistemas de alta pressão. Também se observou confluência sobre o NEB, quando da presença do fator 3 (F3) e do posicionamento do ciclone associado à zona frontal próximo à costa das Regiões Sul e Sudeste. Este fator foi observado em 43% dos casos analisados, ocorrendo preferencialmente durante os meses de verão do hemisfério Sul, quando se verificou que a ASAS esteve mais bem configurada.

FIGURA 21 - Linhas de corrente em 925 hPa e Omega em 850hPa para o fator 3



Ligação entre os Fatores em Baixos Níveis

Em algumas ocasiões, foi constatada a ocorrência de mais de um fator (F) em um mesmo evento. Os fatores F1 e F2 foram encontrados atuando conjuntamente em 17% dos casos estudados; F1 e F3, em 26% dos casos foram observados atuando em um mesmo evento. Os fatores F2 e F3 não foram verificados concomitantemente em nenhum dos eventos estudados, isso pode ser explicado, pelas características da circulação. Para a ocorrência do F2, o escoamento em direção ao NEB é preferencialmente de leste, sofrendo uma divisão, com uma parte do fluxo sofre desvio em direção ao anticiclone pós-frontal e outra em direção à região de convergência dos alísios. Quando há a presença do fator F3, o escoamento sobre NEB adquire uma componente de norte, com fluxo de nordeste sobre a costa leste do nordeste.

Médios níveis

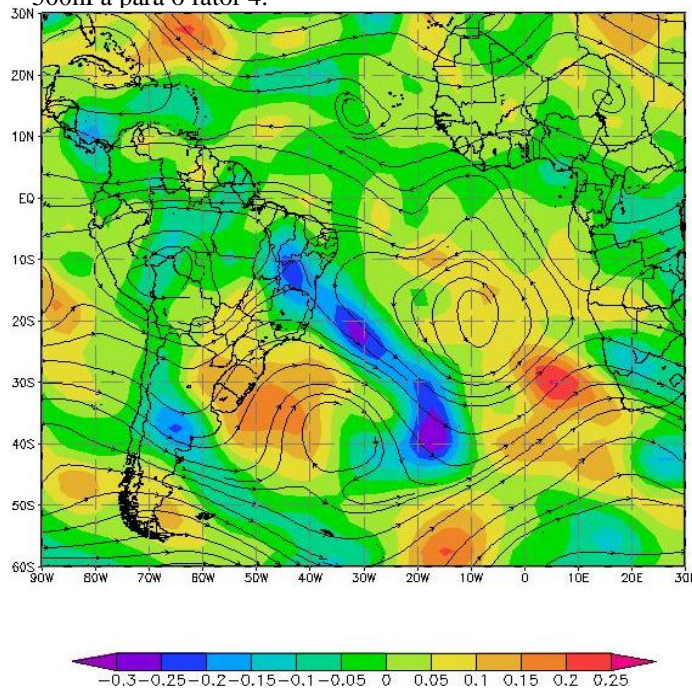
Fator 4 (F4) : Convergência e Cavado sobre a Região Nordeste em 500hPa

Constatou-se, sobre a Região Nordeste, confluência do escoamento da circulação da Alta Subtropical do Atlântico Sul, centrada a uma posição média de 20°S/10°W, com a do vórtice ciclônico (VC), com centro médio em torno de 40°S/35°W. O cavado ligado ao vórtice ciclônico alonga-se em direção ao NEB, atuando a norte de 20°S. A amplificação desse cavado se dá devido à interação com a Alta da Bolívia.

A convergência sobre o NEB, a presença da alta pressão sobre o oceano que reforça o transporte de umidade em direção ao continente, e a penetração de ar mais frio na camada média da atmosfera sobre o continente, devido à presença do cavado, favorecem os movimentos ascendentes e o desenvolvimento de sistemas convectivos. Através da FIGURA 22, podem-se constatar os movimentos verticais ascendentes na região de confluência e também sobre o eixo do cavado.

Este fator foi o mais predominante tendo sido verificado em 63% dos eventos analisados, e sendo sua ocorrência distribuída de forma homogênea durante o período de estudo e as estações do ano em que foram verificados os eventos.

FIGURA 22 – Linhas de corrente em 500hPa e Omega em 500hPa para o fator 4.

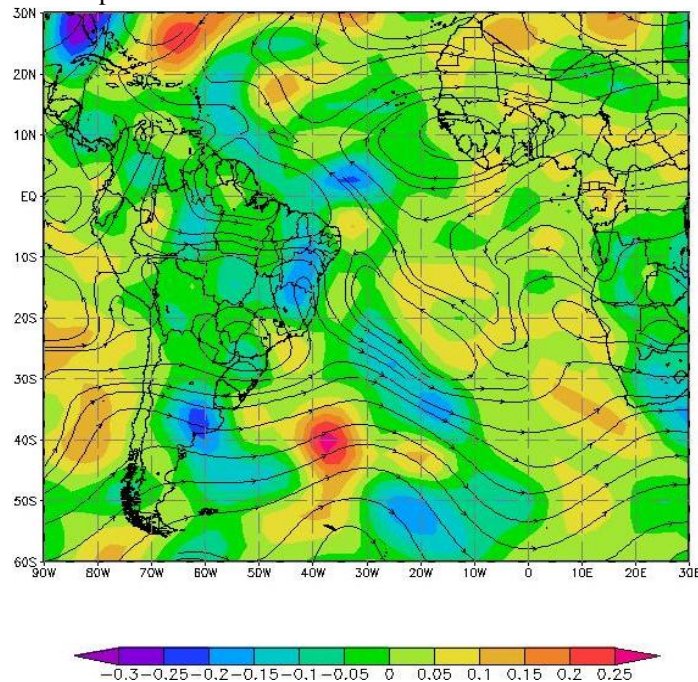


Fonte: Autor, 2011

Fator 5 (F5) : Cavado com eixo NW-SE em 500hPa.

Observou-se um cavado estendendo-se da costa da Região Sudeste até o interior do NEB. A presença desse cavado conjuntamente com a Alta Subtropical do Atlântico Sul, que se encontra alongada em direção a Região Nordeste, gera convergência sobre esta Região e reforça o transporte de umidade do oceano para o continente, favorecendo a formação de sistemas convectivos. Os movimentos verticais ascendentes foram verificados sobre o eixo do cavado e na vanguarda deste na região de convergência, conforme pode ser observado na FIGURA 23. Este fator foi menos frequente sendo observado em 17% dos casos, tendo uma leve tendência para ocorrer durante a estação de transição quente e início do verão austral.

FIGURA 23 – Linhas de corrente em 500hPa e Omega em 500hPa para o fator 5.



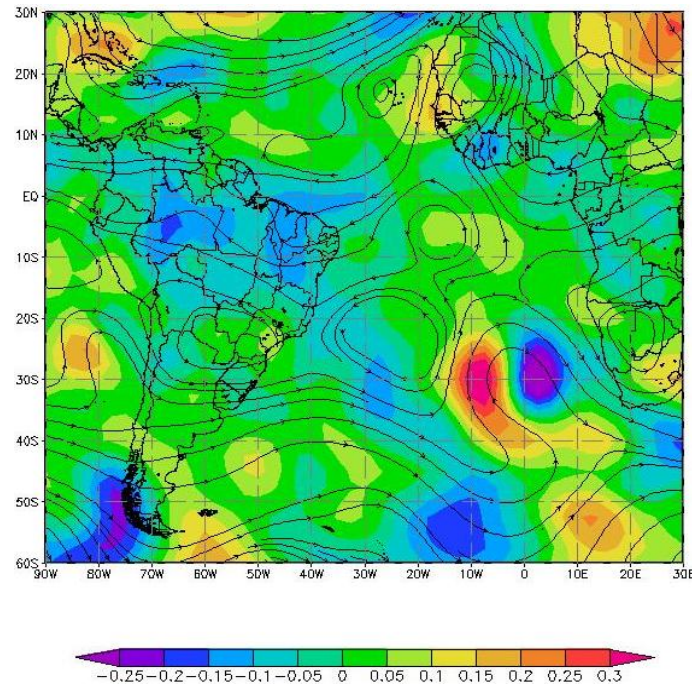
Fonte: Autor, 2011

Fator 6 (F6) : Cavado no nível de 500hPa ligado ao ciclone com centro no HN, com posicionamento médio a sul de 20°N.

Verificou-se um cavado em 500hPa que se estende desde o ciclone, próximo à costa africana, no hemisfério norte até interior da Região Nordeste. Observa-se também sobre o nordeste convergência entre a circulação do sistema do HN e a alta pressão sobre o Atlântico. A Alta da Bolívia encontra-se deslocada a sul de sua posição climatológica e com sua circulação acoplada a ASAS, o que favorece a atuação do cavado sobre o NEB. A presença do

cavado e da convergência em níveis médios contribui para formação de convecção sobre o continente, mais especificamente sobre o nordeste do Brasil. Os movimentos ascendentes foram observados na área de confluência principalmente sobre o eixo do cavado, consoante a FIGURA 24. Este fator foi encontrado em 26% dos eventos, ocorrendo preferencialmente durante o verão Austral e início da estação de transição fria.

FIGURA 24 – Linhas de corrente em 500hPa e Omega em 500hPa para o fator 6



Fonte: Autor, 2011

Ligação entre os Fatores em Médios Níveis

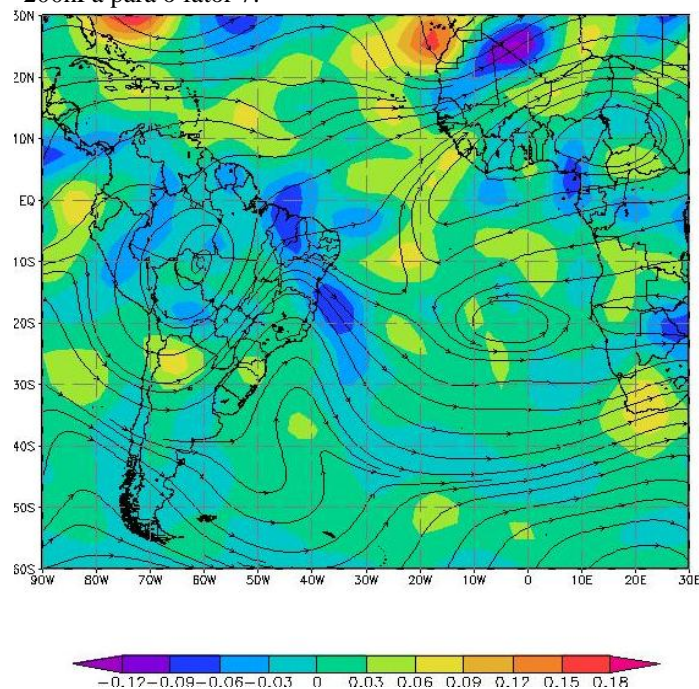
Os fatores F4 e F5 possuem características de circulação semelhantes, com ambos apresentando convergência e influência de um cavado sobre o NEB, mas F5 possui processos mais fracos. Nota-se que no fator 5 a alta pressão sobre o continente está posicionada ao sul da sua posição climatológica, e o cavado forma-se entre essa alta pressão e o anticiclone sobre o Atlântico. Os fatores 4 e 6 foram observados atuando conjuntamente em 11% dos casos, e em apenas um evento foi observado os fatores 5 e 6 atuando de forma conjunta. Para 6% dos eventos não foi encontrado um padrão semelhante aos mencionados acima.

Altos níveis

Fator 7 (F7): Amplo cavado em 200hPa estendendo-se meridionalmente e difluência nas correntes em altos níveis sobre o NEB.

Foi constatado um amplo cavado com eixo quase meridional que se estende desde o sul do continente, sobre o Atlântico, até o interior da região nordeste, semelhante ao encontrado por Oliveira (1986). A pesquisadora verificou em seu estudo a presença de um cavado em 200hPa com inclinação NW. Cruz (2008) investigou a influência desse fator para as situações em que o cavado atua até 20°S e ao norte, concluindo que este fator favorece a incursão de sistemas frontais em latitudes mais baixas. Neste estudo, foi exposta a atuação desse fator tanto até 20°S quanto a norte dessa latitude e em algumas ocasiões chegando a 10°S. Observou-se para os casos do G1 a ligação desse cavado com a Alta da Bolívia (AB), favorecendo dessa forma o desenvolvimento de sistemas convectivos. Conforme pode ser observado na FIGURA 25, os movimentos verticais entendem-se da região de difluência gerada pela interação entre os sistemas, até a vanguarda do cavado. A difluência em altos níveis provoca uma queda de pressão em níveis inferiores, que geram uma corrente de ar ascendente, favorecendo o desenvolvimento dos processos convectivos. Esse fator foi observado em 18% dos eventos analisados, ocorrendo preferencialmente nas estações de transição fria e quente.

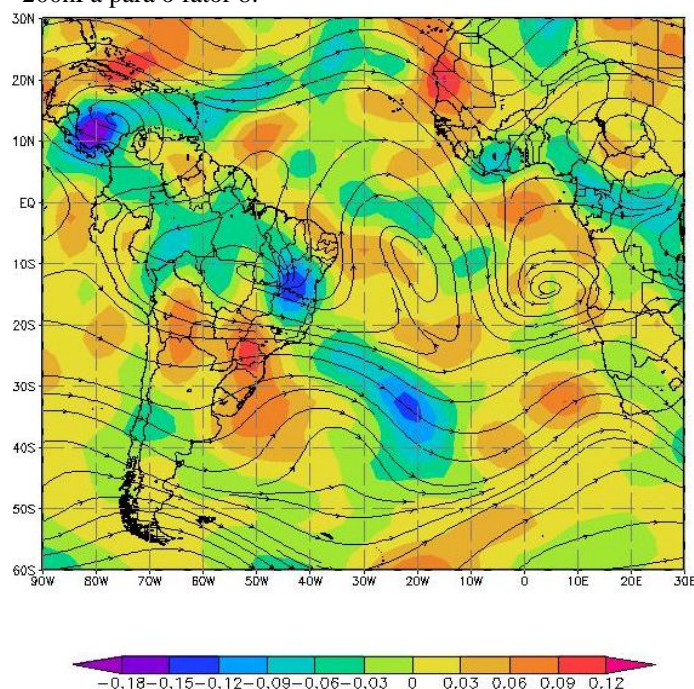
FIGURA 25 – Linhas de corrente em 200hPa e Omega em 200hPa para o fator 7.



Fator 8 (F8): Interação entre a Alta da Bolívia (AB) e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) ou Cavado de Altos Níveis (CAN) na costa do Nordeste.

Notou-se a presença do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) ou do Cavado de Altos Níveis (CAN) na costa do nordeste brasileiro. Conjuntamente encontrava-se atuando sobre o continente no nível de 200 hPa a Alta da Bolívia (AB). A interação desses sistemas gera uma região de divergência em altos níveis que está relacionada com fortes movimentos verticais ascendentes e, conseqüentemente, com desenvolvimento de células convectivas, consoante a FIGURA 26. Ferreira et al. (2009) relataram que as localizações das principais células de movimentos verticais sugerem que as atividades convectivas sobre o continente parecem dinamicamente relacionadas (divergência em altos níveis) com a configuração do escoamento em larga escala dos sistemas AB/cavado. Também constatou que os movimentos verticais ascendentes ocorrem de forma acentuada, exatamente onde o escoamento associado ao sistema AB/VCAN sofre maior difluência. É importante salientar que para os eventos em que se observou desenvolvimento convectivo sobre o NEB, associado com a presença do sistema frontal, o VCAN esteve sempre posicionado com eixo em torno de 10°S/20°W sobre o Atlântico, o que propiciou que a região de difluência estivesse sobre o Nordeste brasileiro. Em um total de 79% dos casos analisados, encontrou-se a interação desses fatores. Para cerca de 70% dos casos verificou-se a presença do VCAN, e para os demais casos a difluência foi causada pela circulação somente da AB e pelo cavado do nordeste.

FIGURA 26 - Linhas de corrente em 200hPa e Omega em 200hPa para o fator 8.



Ligação entre os Fatores em Altos Níveis

Não foi encontrada a presença conjunta dos fatores 7 e 8. Para os casos em que se observou o VCAN ou CAN associado à AB, notou-se um padrão zonal em latitudes mais altas ou o cavado frontal atuando ao sul de 30°S sem penetrar sobre o continente como o encontrado para o F7.

TABELA 9 - Distribuição temporal e frequência de ocorrência dos fatores que influenciam o desenvolvimento de atividades convectiva sobre o NEB, organizadas pela extremidade frontal.

FATORES	MÊS												TOTAL
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
<i>Baixos Níveis</i>													
F1	8	8	5	7	2							1	31
F2	3	2	3	5	5		1		1	4	5	5	34
F3	6	8	4	2							4	5	29
<i>Médios Níveis</i>													
F4	5	8	5	5	4		1		1	2	7	3	41
F5	1			1	2					2	2	3	11
F6	3	3	3	2							2	4	17
<i>Altos níveis</i>													
F7		4	2		2					1	3		12
F8	10	6	5	7	1				1	2	8	10	51

4.4 Interação entre os Fatores Dinâmicos

O desenvolvimento de atividades convectivas sobre o NEB, organizadas pela extremidade da zona frontal, não depende da existência de um fator isolado, na grande maioria dos casos é resultado de uma combinação de fatores. Em vista disso neste item mostrar-se-á como cada fator aparece combinado com outro em um nível atmosférico diferente, quais interações mais frequentes e também a distribuição temporal dessas associações. Através da análise dessas combinações será possível determinar padrões típicos de circulação para os eventos em que se notam convecção sobre o nordeste do Brasil, associada com a frente, e para qual época do ano determinadas associações são mais comuns.

Inicialmente, serão mostradas as associações dos fatores em pares, ou seja, foram combinados os fatores em dois níveis diferentes, apresentando-se também qual a frequência mensal e total de ocorrência para cada combinação ao longo do período de estudo, esses resultados são encontrados nas TABELAS 10 e 11. Posteriormente, através das TABELAS 12

e 13, poderão ser visualizadas as associações para três níveis diferentes da troposfera, e da mesma forma das TABELAS 10 e 11 as frequências mensais e totais para essas combinações.

4.4.1 Para dois níveis atmosféricos.

Baixos e Médios Níveis

Considerando-se somente as interações entre fatores encontrados em baixos e médios níveis, constatou-se, através das TABELAS 10 e 11, uma frequência maior dos fatores em baixos níveis associados com o F4.

Dessa forma, observou-se interação da ZCIT (F1) com a convergência, em 500 hPa, sobre o nordeste (F4) em 22 oportunidades ou seja em 34% dos eventos em que se observaram atividades convectivas organizadas pela sistema frontal (G1), sendo as interações entre esses dois fatores mais comuns entre fevereiro e abril.

Para a divisão no fluxo de leste sobre o Atlântico (F2), foram verificadas associações com o F4 em 21 ocasiões, correspondendo a 32% dos eventos do G1. Esses fatores se correlacionaram de forma semelhante durante todos os meses em que se encontraram eventos do G1.

A borda oeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (F3), esteve relacionada com o fator 4 em 19 casos, totalizando um percentual de 29% de ocorrência, tendo uma preferência de ocorrência entre novembro e março com uma frequência maior para o mês de fevereiro, ou seja, todos os fatores encontrados em baixos níveis (F1, F2 e F3) com F4 em médios níveis foram as interações que mais se repetiram e foram mais frequentes do que todas as combinações por dois fatores.

As associações do cavado ligado ao ciclone do HN (F6) com os fatores 1,2 e 3 foram menos frequentes, porém em 12 oportunidades, que correspondem a 18% dos eventos, esse fator esteve ligado ao fator 2 (bifurcação no escoamento sobre o Atlântico e confluência sobre o NEB), ocorrendo preferencialmente entre novembro e fevereiro. Em 12 e 11% dos eventos F6 esteve associado com F1 e F3, respectivamente, com preferência para o período entre janeiro e abril.

O fator 5, que diz respeito ao cavado NW-SE em 500hPa entre a circulação da ASAS e do Vórtice Ciclônico, interagiu com F2, F3 e F1 em 9, 5 e 3 % dos eventos respectivamente, sendo que a interação F2/F6 ocorreu durante as estações de transição com um número maior

de ocorrências para a estação de transição quente. As associações F3/F6 e F1/F6 foram constatadas somente nos meses de dezembro e janeiro (TABELA 10).

TABELA 10 - Interações entre os Fatores dinâmicos para dois níveis atmosféricos, e distribuição temporal dessas interações.

FATORES	MESES												TOTAL
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
<i>Níveis Baixos e Médios</i>													
F1/F4	3	8	4	5	2								22
F2/F4	2	1	2	3	4		1		1	2	3	2	21
F3/F4	3	7	3	1							4	1	19
F2/F6	3	2		1							3	3	12
F1/F6	3	1	2	2									8
F3/F6	1	1	3	1								1	7
F2/F5				1	1					2	2		6
F3/F5	1											2	3
F1/F5	1											1	2
<i>Níveis Baixos e Altos</i>													
F3/F8	6	6	3	2							4	5	26
F1/F8	8	5	3	6	1							1	24
F2/F8	3		2		1		1		1	2	4	5	19
F2/F7		2	1		2					2	1		8
F1/F7		2	2										4
F3/F7		1	1								1		3
<i>Níveis Médios e Altos</i>													
F4/F8	5	5	4	4	1				1	1	6	3	30
F6/F8	3	1	2	2							1	4	13
F5/F8	1			1						2	2	3	9
F4/F7		2	1							1	2		6
F6/F7		2	1										3
F5/F7					2								2

Baixos e Altos Níveis

Para as combinações entre os fatores de baixos e altos níveis da atmosfera, o F 8, ou seja, a interação entre VCAN (CAN)/AB, foi o que teve sua presença mais frequente, associado com os fatores 1, 2 e 3. As interações F3/F8, F1/F8 e F2/F8 foram constatadas em 40, 37 e 29% dos eventos respectivamente. A associação entre F3/F8 foi mais frequente durante o final da estação de transição quente, verão austral e início da estação fria, enquanto que a interação entre F1/F8 foi encontrada principalmente entre os meses de janeiro e abril, já a combinação F2/F8 esteve bem distribuída durante os meses em que foram verificados os eventos pertencentes ao G1.

O cavado, em 200hPa sobre o continente, estendendo-se meridionalmente até a Região Nordeste (F7), foi encontrado com menos frequência interagindo com os fatores de baixos níveis. A associação F2/F7 foi encontrada em 12% dos eventos, tendo sua frequência de

ocorrência principalmente nas estações de transição. A interação entre F1/F7 foi verificada em 6% dos eventos e ocorreu somente nos meses de fevereiro e março. Foram constatados somente três casos em que se observou a interação F3/F7, o que corresponde a 5% dos eventos. Essa combinação foi verificada nos meses de fevereiro, março e novembro.

Médios e Altos Níveis

A interação mais frequente entre os fatores de níveis médios e altos foi F4/F8, ou seja, uma região de confluência em médios níveis (F4), conjuntamente com uma região de forte difluência em altos níveis (F8), estando presente em 48% dos eventos. As combinações F6/F8 e F5/F8 foram constatadas respectivamente em 20% e 14% dos eventos do G1 analisados. Essas combinações foram observadas durante as estações de transição fria, quente e o verão austral.

O F7 (cavado meridional e difluência em altos níveis sobre o NEB) esteve combinado com fatores 4, 6 e 5 em 9, 5 e 3% dos casos estudados, sendo a interação F4/F7 encontrada preferencialmente nas estações de transição, F6/F7 foi observada somente nos meses de fevereiro e março, e F5/F7 foi verificado somente no mês de outubro.

TABELA 11 - Frequência de ocorrência das interações entre fatores em dois níveis atmosféricos.

Fatores	Nº de Ocorrências	Percentual (%)
<i>Baixos e Médios Níveis</i>		
F1/F4	22	34%
F2/F4	21	32%
F3/F4	19	29%
F2/F6	12	18%
F1/F6	8	12%
F3/F6	7	11%
F2/F5	6	9%
F3/F5	3	5%
F1 F5	2	3%
<i>Baixos e Altos Níveis</i>		
F3/F8	26	40%
F1/F8	24	37%
F2/F8	19	29%
F2/F7	8	12%
F1/F7	4	6%
F3/F7	3	5%
<i>Médios e Altos Níveis</i>		
F4/F8	30	48%
F6/F8	13	20%
F5/F8	9	14%
F4/F7	6	9%
F6/F7	3	5%
F5/F7	2	3%

4.4.2 Para três níveis atmosféricos.

Baixos, Médios e Altos Níveis

Através da análise das Tabelas 12 e 13, pode-se verificar as associações mais frequentes encontradas, levando-se em consideração três níveis atmosféricos. Também pôde-se determinar quais meses do ano essas associações tendem mais a acontecer.

Nota-se que as associações mais frequentes são F1/F4/F8 e F3/F4/F8, sendo que ambas ocorrem em 16 eventos em que foram observados processos convectivos sobre a Região Nordeste do Brasil, associados à zona frontal. Outra associação bastante frequente para esses eventos é F3/F4/F8, encontrada em 13 casos estudados.

Com isso podemos notar que em 72% dos casos estudados tem-se, em médios níveis, uma forte convergência, estendendo-se desde o Atlântico até a Região Nordeste do Brasil

TABELA 13 - Frequência de ocorrência das interações em três níveis atmosféricos.

Fatores	Nº de Ocorrências	Percentual (%)
<i>Baixos, Médios e Altos Níveis</i>		
F1/F4/F8	16	25%
F3/F4/F8	16	25%
F2/F4/F8	14	22%
F2/F6/F8	7	11%
F1/F6/F8	6	9%
F3/F6/F8	6	9%
F2/F5/F8	5	8%
F3/F5/F8	4	6%
F1/F4/F7	3	5%
F1/F5/F8	2	3%
F1/F6/F7	2	3%
F2/F4/F7	2	3%
F2/F6/F7	2	3%
F3/F4/F7	2	3%
F2/F5/F7	1	1%
F3/F6/F7	1	1%

4.5 Fatores dinâmicos das zonas frontais fracas sem desenvolvimento de nebulosidade convectiva sobre NEB (G2).

A partir da TABELA 14 nota-se que dos 35 eventos selecionados em que não se observaram atividades convectivas na extremidade frontal no NEB, verificaram-se nove ocorrências durante o ano de 2000, sendo este o ano com o maior número de eventos, para os anos de 2001, 2005, 2006, 2008 e 2009 foram observados dois eventos, notou-se nos anos de 2002 e 2003 um total de quatro casos. O ano de 2007 foi o ano com o segundo maior número de ocorrências, tendo um total de cinco casos.

A distribuição sazonal dos eventos mostra que 20% dos casos ocorreram durante a estação de transição fria, sendo que todos os verificados ocorreram no mês de maio, 60% foram verificados durante o inverno do hemisfério sul e 20% ocorreram no período de transição quente, principalmente no início desse período.

TABELA 14 – Distribuição mensal, sazonal e anual dos eventos pertencente ao G2, selecionados para o estudo.

ESTAÇÃO	MÊS	ANO										TOTAL	
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009		
VERÃO AUSTRAL	DEZ												0
	JAN												
	FEV												
TRANSIÇÃO FRIA	MAR												7
	ABR												
	MAI	2	1		1				3			7	
INVERNO AUSTRAL	JUN	2				1		1	1	1	2	8	21
	JUL	2	1	2	1		1		1			8	
	AGO	2			1	1		1				5	
TRANSIÇÃO QUENTE	SET	1		1			1			1		4	7
	OUT			1	1	1						3	
	NOV												
TOTAL		9	2	4	4	3	2	2	5	2	2	35	

4.6 Padrões típicos encontrados para os casos sem convecção na extremidade frontal.

Baixos níveis:

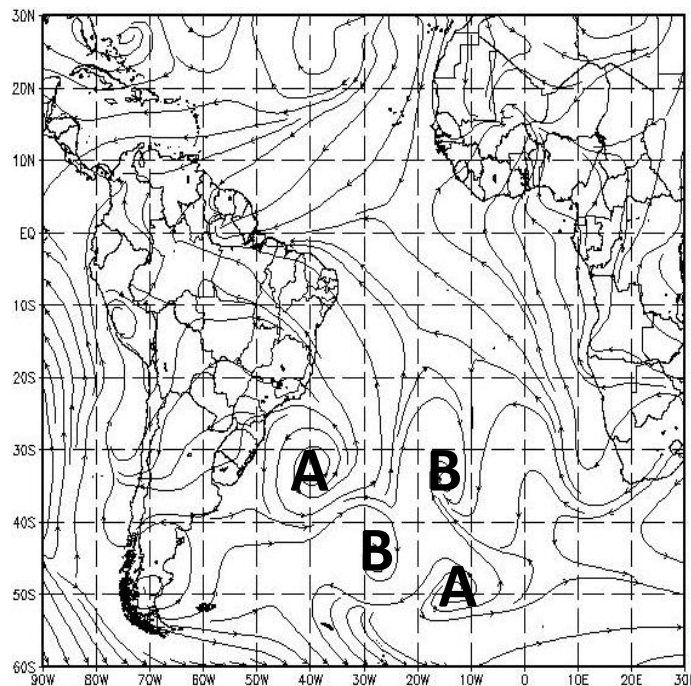
Foram encontrados em média dois padrões diferentes em baixos níveis para os casos em que não se observou atividades convectivas sobre a Região Nordeste do Brasil associadas com o sistema frontal sobre o Atlântico Tropical Sul.

Padrão 1:

A FIGURA 27 mostra o padrão 1 nos níveis baixos, para os casos em que não se observa convecção na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil. Observa-se através da FIGURA 27 que a circulação nesta Região, para esses casos, é tipicamente de sudeste, sendo o escoamento ligado ao anticiclone pós-frontal, posicionado em média a leste da Região Sul do Brasil, e a ASSAS. Lima (1985) mostrou que a circulação na costa leste do NEB, em média é de sudeste entre maio e agosto e de nordeste entre janeiro e abril e entre setembro e outubro. O ciclone ligado à zona frontal encontra-se em média sobre o Atlântico entre 30 e 40S e 10 e 20W.

Observa-se também que para os casos sem convecção na extremidade frontal sobre o nordeste, a Alta Subtropical do Atlântico Sul encontra-se fraca e não se apresenta bem configurada.

FIGURA 27 - Padrão 1 em baixos níveis para casos sem convecção, ciclone (B), anticiclone pós-frontal (A), conforme linhas de corrente em 925 hPa



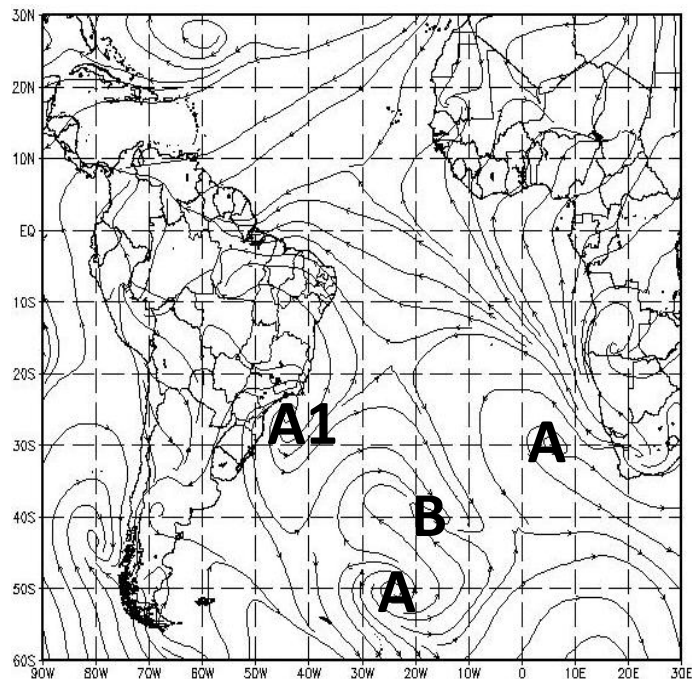
Fonte: Autor, 2011

Padrão 2:

Através da FIGURA 28 observa-se que o padrão 2 para níveis baixos, nos casos em que não se verifica convecção na extremidade da zona frontal, possui uma configuração semelhante ao encontrado no padrão 1, com escoamento de SE sobre o nordeste brasileiro.

Porém, com o anticiclone pós-frontal atuando mais ao norte, em relação ao padrão 1, mais próximo à costa das Regiões Sul e Sudeste. O ciclone da zona frontal encontra-se deslocado ao sul, e a Alta Subtropical do Atlântico Sul encontra-se melhor configurada em relação ao encontrado no primeiro padrão descrito.

FIGURA 28 - Padrão 2 em baixos níveis para casos sem convecção, ciclone (B), anticiclone pós-frontal (A1), conforme linhas de corrente em 925 hPa



Fonte: Autor, 2011

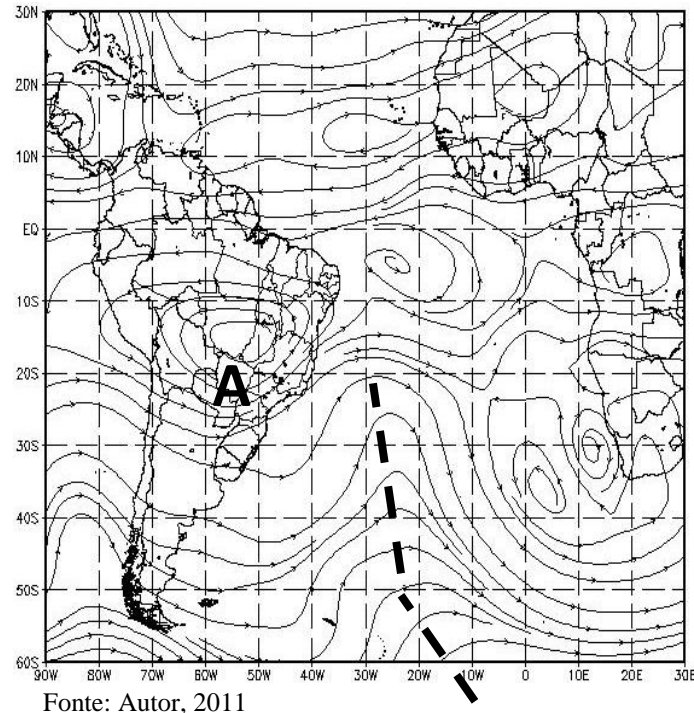
Médios Níveis:

Em níveis médios, foram encontrados em média três padrões distintos para os casos sem convecção na extremidade frontal sobre o nordeste do Brasil.

Padrão 1:

A FIGURA 29 representa o padrão 1 em níveis médios para casos sem convecção na extremidade frontal. É possível observar a presença do cavado frontal atuando até aproximadamente 15°S sobre o Atlântico. Sobre o continente, nota-se a atuação da Alta da Bolívia, deslocada a sudeste da sua posição climatológica. A circulação entre esses dois sistemas principalmente, gera uma região de difluência sobre o nordeste do Brasil, o que inibe os processos convectivos sobre a Região Nordeste do Brasil associados com a zona frontal sobre o Atlântico Tropical.

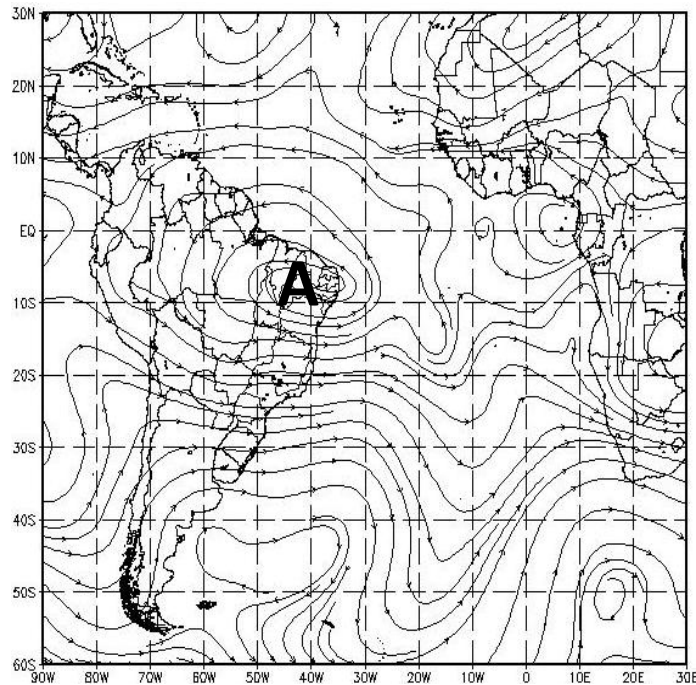
FIGURA 29 – Padrão 1 em médios níveis para casos sem convecção, Alta sobre o continente (A), cavado (tracejado), conforme linhas de corrente em 500 hPa.



Padrão 2:

No padrão 2, conforme mostrado na FIGURA 30, observa-se a presença do sistema de alta pressão com centro sobre parte da Região Nordeste do Brasil, o que gera movimentos descendentes sobre esta Região, inibindo o desenvolvimento de processos convectivos associados com a extremidade da zona frontal. A parte sul da Região Nordeste que não está sob o centro da alta pressão, e apresenta uma área de difluência associada com a circulação conjunta da alta e do cavado frontal.

FIGURA 30 - Padrão 2 em médios níveis para casos sem convecção, sistema de alta pressão sobre o continente (A), conforme linhas de corrente em 500 hPa

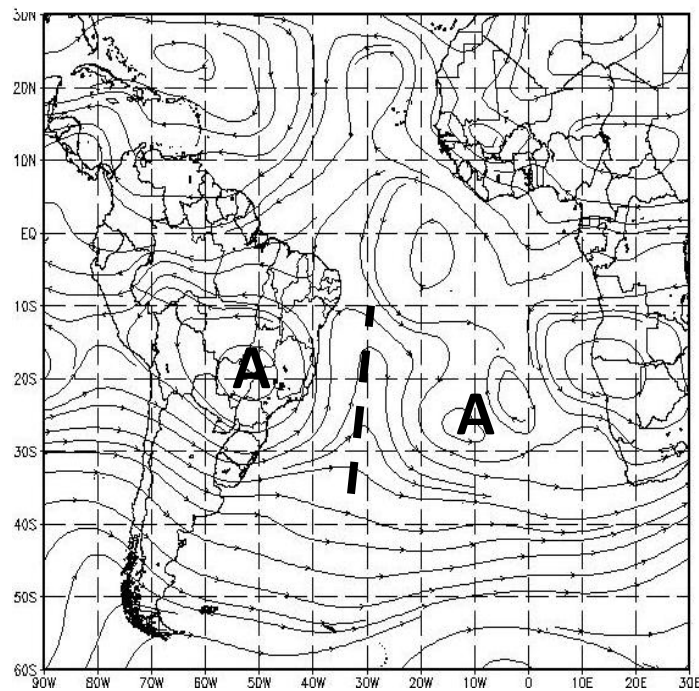


Fonte: Autor, 2011

Padrão 3

Através da FIGURA 31 pode-se observar o padrão 3 para níveis médios em casos sem a presença de processos convectivos na extremidade frontal. Verifica-se a presença de um amplo cavado com eixo meridional entre a Alta da Bolívia e Alta Subtropical do Atlântico Sul, este cavado atua até 10°S. A circulação do cavado juntamente com a circulação da Alta da Bolívia gera sobre a Região Nordeste do Brasil uma área de difluência, que faz com que haja inibição dos processos convectivos sobre a mesma.

FIGURA 31 - Padrão 3 em médios níveis para casos sem convecção, cavado (tracejado), Alta sobre o continente (A), Alta sobre o Atlântico (A), conforme linhas de corrente em 500 hPa.



Fonte: Autor, 2011

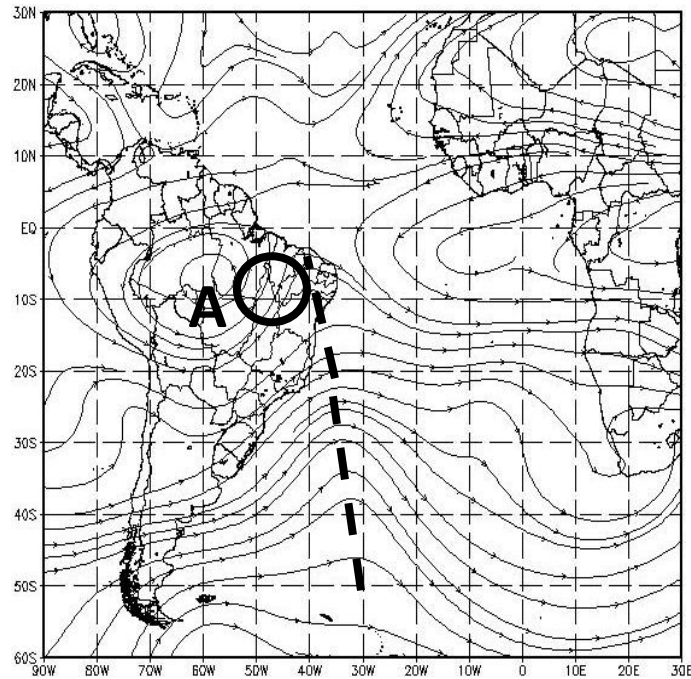
Altos Níveis

Para os níveis altos da atmosfera foram encontrados em média três padrões para os casos em que não foram observados processos convectivos na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil.

Padrão 1

A FIGURA 32 mostra o padrão 1 para altos níveis atmosféricos em casos sem processos convectivos associados a zona frontal sobre o nordeste do Brasil. Verifica-se a presença de um amplo cavado que se estende meridionalmente até aproximadamente 15°S, com uma leve inclinação NW-SE. Observa-se também a presença da Alta da Bolívia sobre o continente. A interação desses dois sistemas gera um cavado na amplificação da crista da AB, sobre o nordeste do Brasil.

FIGURA 32 - Padrão 1 em altos níveis para casos sem convecção, cavado meridional (tracejado), Alta sobre o continente (A), área de difluência (circulo), conforme linhas de corrente em 200 hPa

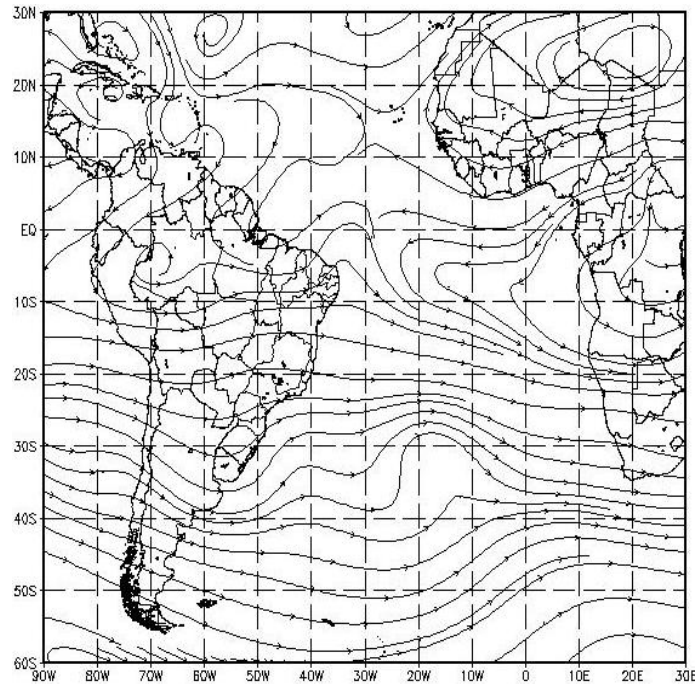


Fonte: Autor, 2011

Padrão 2

O padrão 2 para os altos níveis da atmosfera em casos sem convecção na extremidade frontal é apresentado na FIGURA 33. Observa-se, através da FIGURA 33, que a atmosfera em altos níveis apresenta um padrão praticamente zonal sobre o continente sul americano, apresentando apenas um pequeno cavado sobre a parte norte/nordeste da Região Nordeste.

FIGURA 33 - Padrão 2 em altos níveis para casos sem convecção, conforme linhas de corrente em 200 hPa.

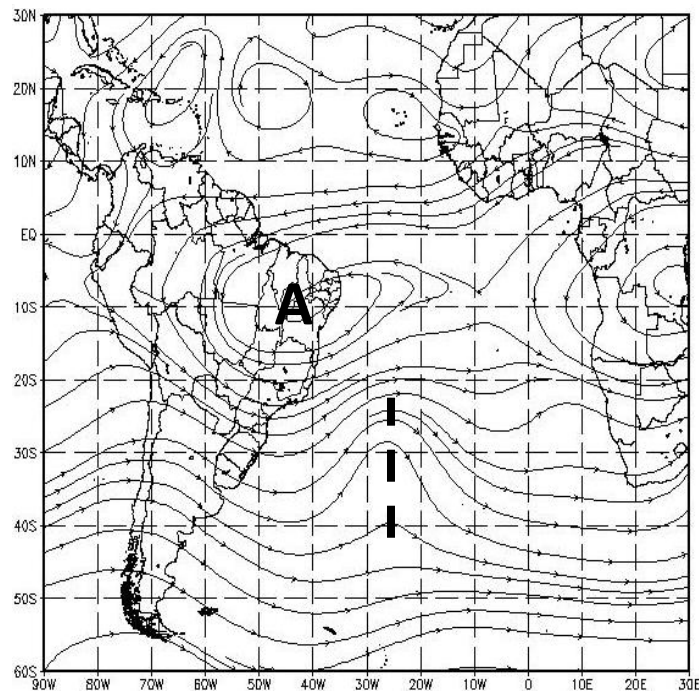


Fonte: Autor, 2011

Padrão 3

A FIGURA 34 mostra o padrão 3 encontrado em altos níveis para caso sem a presença de processos convectivos associados à zona frontal. Nota-se através da FIGURA 34 a presença de um sistema de alta pressão sobre toda a região nordeste do Brasil. Devido à presença desse sistema não há penetração do cavado frontal até latitudes mais baixas, ficando a atuação deste, a faixa aproximada de 20 graus de latitude sul.

FIGURA 34 - Padrão 3 em altos níveis para casos sem convecção, cavado (tracejado), Alta sobre o nordeste (A), conforme linhas de corrente em 200 hPa



Fonte: Autor, 2011

4.7 Comparação entre os padrões encontrados para os eventos com convecção e sem convecção na extremidade da zona frontal.

4.7.1 Baixos Níveis

Através das FIGURAS 35 e 36, pode-se fazer uma comparação entre os padrões encontrados para os baixos níveis atmosféricos, entre os eventos em que se observou o desenvolvimento de processos convectivos na extremidade frontal e os eventos em que não foram observadas atividades convectivas.

Nota-se que há uma grande diferença na circulação entre os padrões para os dois eventos distintos. Nos casos com convecção, observa-se sempre uma componente de norte no escoamento sobre a Região Nordeste, essa componente transporta ar mais quente e úmido da região equatorial, favorecendo o desenvolvimento dos processos convectivos. Já nos casos sem convecção, o fluxo é geralmente de sudeste/leste que são típicos para essa Região. Este resultado está de acordo com o encontrado por Moscati e Gan (2006), que mostraram que episódios de chuvas intensas sobre o interior do semi-árido do NEB, estão ligados com a intensificação dos ventos de norte e oeste sobre esta região.

Outra característica diferente da circulação para os eventos com e sem convecção está relacionada com a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Para os casos com convecção (FIGURA 35) percebe-se que a ASAS apresenta-se mais bem configurada e com sua circulação mais ampla, e dessa forma influencia diretamente a circulação sobre o Nordeste e, também interage com os demais sistemas presentes, o que propicia o desenvolvimento dos processos convectivos sobre a Região.

FIGURA 35 - Padrões em baixos níveis atmosféricos para os eventos em que se observou atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, linhas de corrente em 925 hPa.

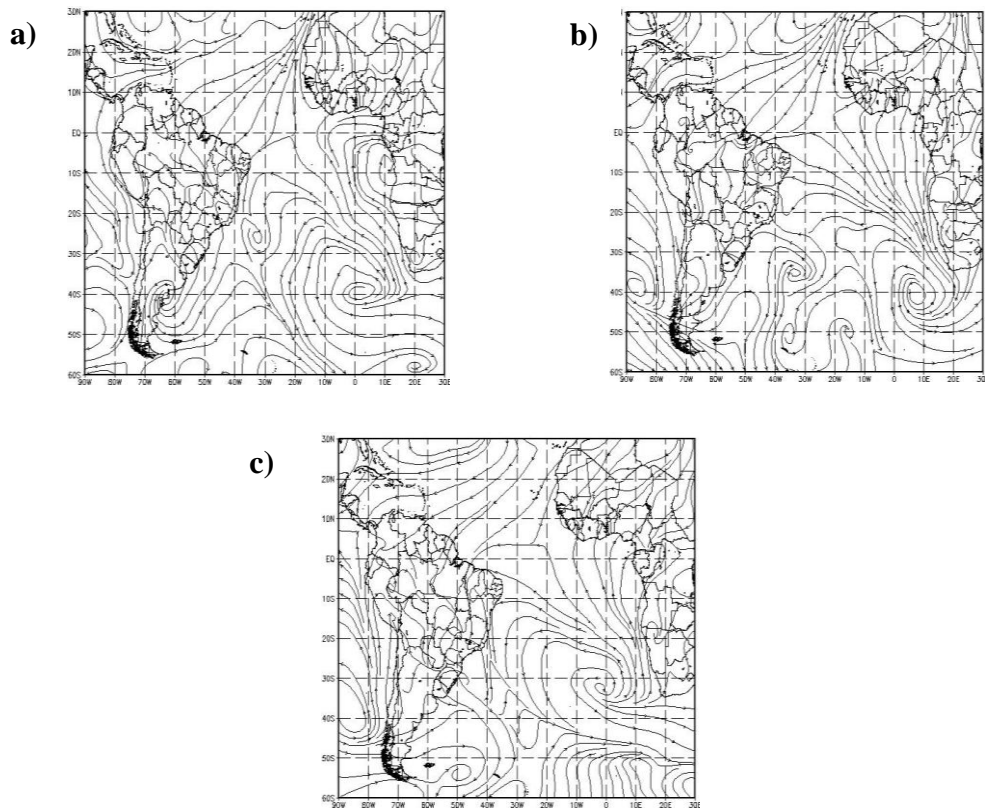
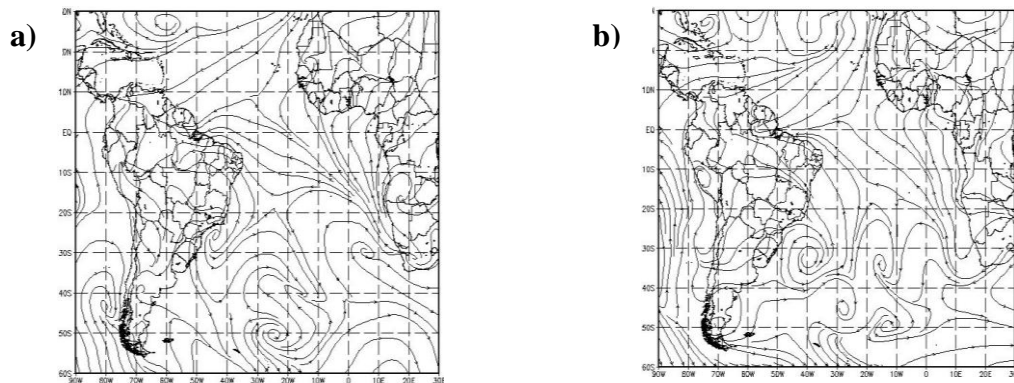


FIGURA 36 - Padrões em baixos níveis atmosféricos para os eventos em que não se observou atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, linhas de corrente em 925 hPa.



Fonte: Autor, 2011

4.7.2 Níveis médios:

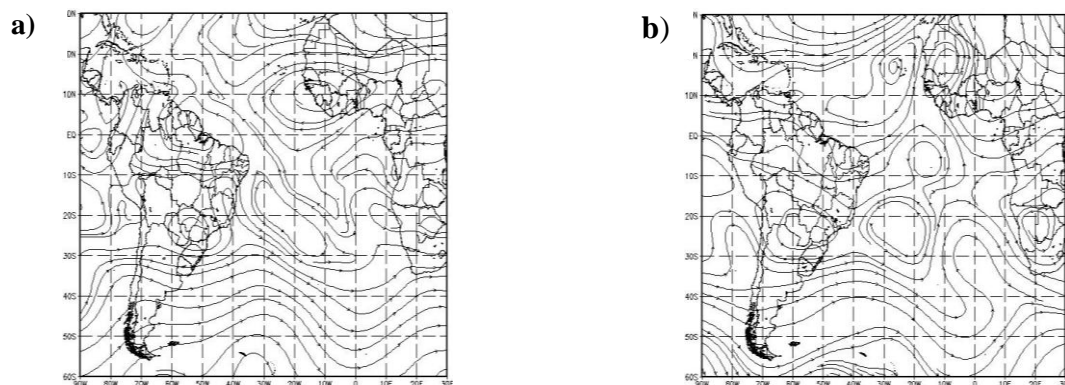
Uma comparação entre os padrões encontrados em médios níveis atmosféricos, entre os casos em que se observaram atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil e os casos em que não foram observados processos convectivos, pode ser visualizada através das FIGURAS 37 e 38.

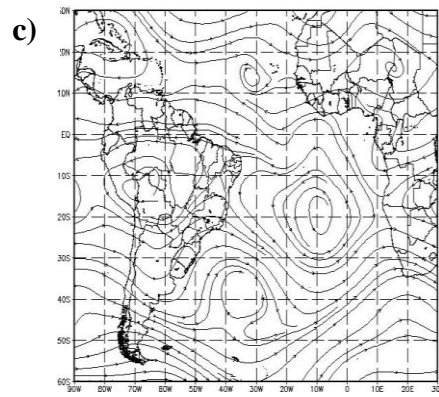
Para os eventos com convecção na extremidade frontal (FIGURA 37), verifica-se que sobre a Região Nordeste há confluência no escoamento o que favorece o desenvolvimento convectivo. Já nos casos sem convecção (FIGURA 38) observa-se difluência no escoamento em níveis médios, o que inibe os processos convectivos.

Visualiza-se também através da FIGURA 37 que para os casos com convecção se observa como padrão a presença da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), nos níveis médios, o que eleva o transporte de umidade para o continente, favorecendo o desenvolvimento das atividades convectivas. Através da FIGURA 38 nota-se que para o padrão encontrado para eventos sem convecção, a ASAS não é observada e quando está presente apresenta-se desconfigurada.

O fator 5 (F5) definido para os casos com convecção e apresentado também na FIGURA 37a, é semelhante ao padrão 3 mostrado na FIGURA 38c, para casos sem convecção. No entanto, para o fator 5 o cavado encontra-se sobre o continente, gerando uma região de convergência entre sua circulação e a da ASAS, que se encontra alongada em direção ao continente. Enquanto que no padrão 3, o cavado está sobre o oceano, gerando difluência sobre o nordeste devido à interação entre sua circulação e a da Alta da Bolívia.

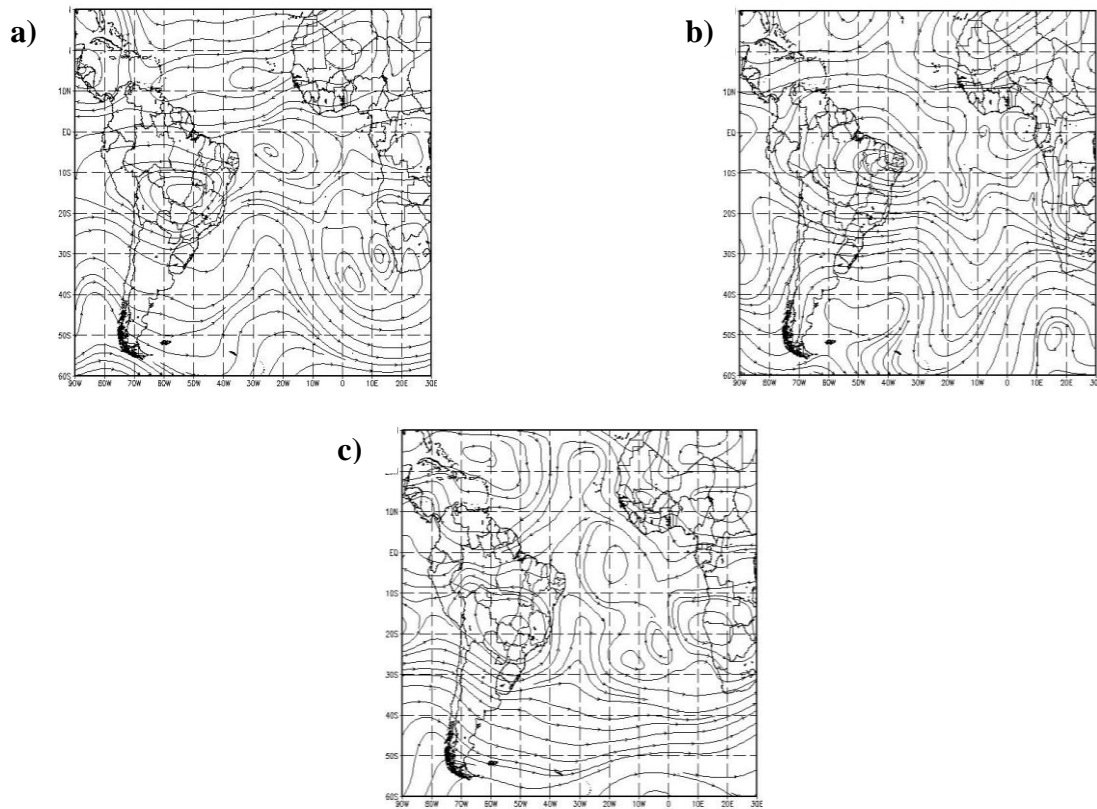
FIGURA 37 - Padrões em médios níveis atmosféricos para os eventos em que se observou atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, linhas de corrente em 500 hPa.





Fonte: Autor, 2011

FIGURA 38 - Padrões em médios níveis atmosféricos para os eventos em que não se observou atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, linhas de corrente em 500 hPa.



Fonte: Autor, 2011

4.7.3 Altos Níveis:

Analisando-se as FIGURAS 39 e 40, pode-se notar a diferença entre os padrões encontrados em altos níveis para os eventos com a presença de sistemas convectivos na extremidade frontal e os eventos sem a presença de nebulosidade convectiva.

A FIGURA 39a, que foi definida como o fator 7 para os casos com convecção na extremidade, em que se observamos um amplo cavado estendendo-se meridionalmente e uma região de difluência sobre o NE. A FIGURA 40b que representa o padrão 1 para os casos sem convecção, observamos também um cavado estendendo-se meridionalmente até latitudes mais baixas. Porém, nota-se que para o fator 7 (FIGURA 39a), o cavado estende-se sobre o continente, enquanto que para o padrão 1 (FIGURA 40b), o cavado encontra-se sobre o oceano adquirindo uma pequena inclinação NW-SE sobre o NEB.

Em ambos os padrões observa-se a presença da AB e a interação da sua circulação com a do cavado, no entanto devido ao posicionamento diferente do cavado para os dois padrões, a região de difluência, gerada devido à interação da circulação desses dois sistemas, tem uma localização diferente, no caso do fator 7 essa região de difluência se situa sobre a Região Nordeste do Brasil. Enquanto que no padrão 1, a área de difluência está sobre a Região Norte do Brasil. Como foi visto anteriormente, a localização dessa área de difluência em altos níveis está diretamente ligada com a localização da formação de células convectivas.

Outra diferença significativa, entre os padrões encontrados para os casos com convecção e os casos sem convecção na extremidade frontal, é a presença do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN). Para os eventos sem convecção não foi verificada a presença desse sistema em nenhum caso analisado, enquanto que para os eventos com convecção esse sistema foi encontrado na grande maioria dos casos, estando sempre com eixo em torno de $10^{\circ}\text{S}/20^{\circ}\text{W}$ e apresentando uma região de difluência sobre a Região Nordeste, que é resultado da interação entre a sua circulação e a Alta da Bolívia, conforme definido no fator 8 (FIGURA 39b).

FIGURA 39 - Padrões em altos níveis atmosféricos para os eventos em que se observou atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, linhas de corrente em 500 hPa.

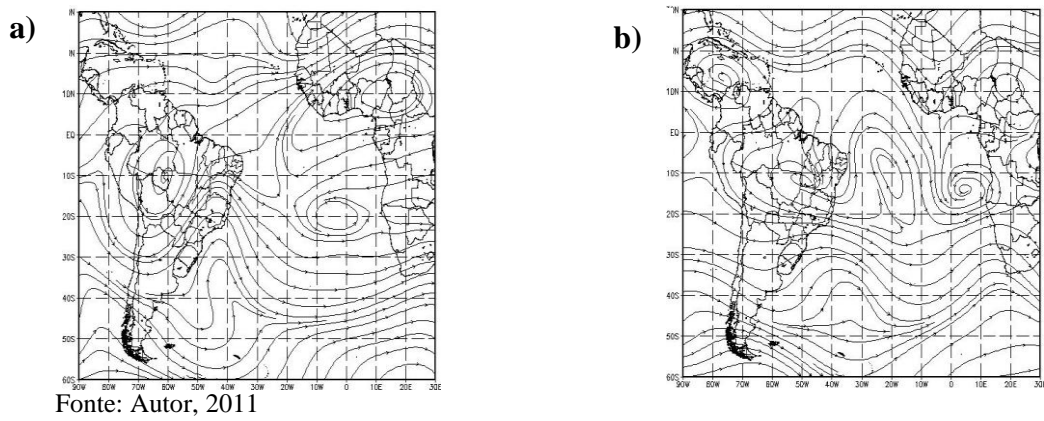
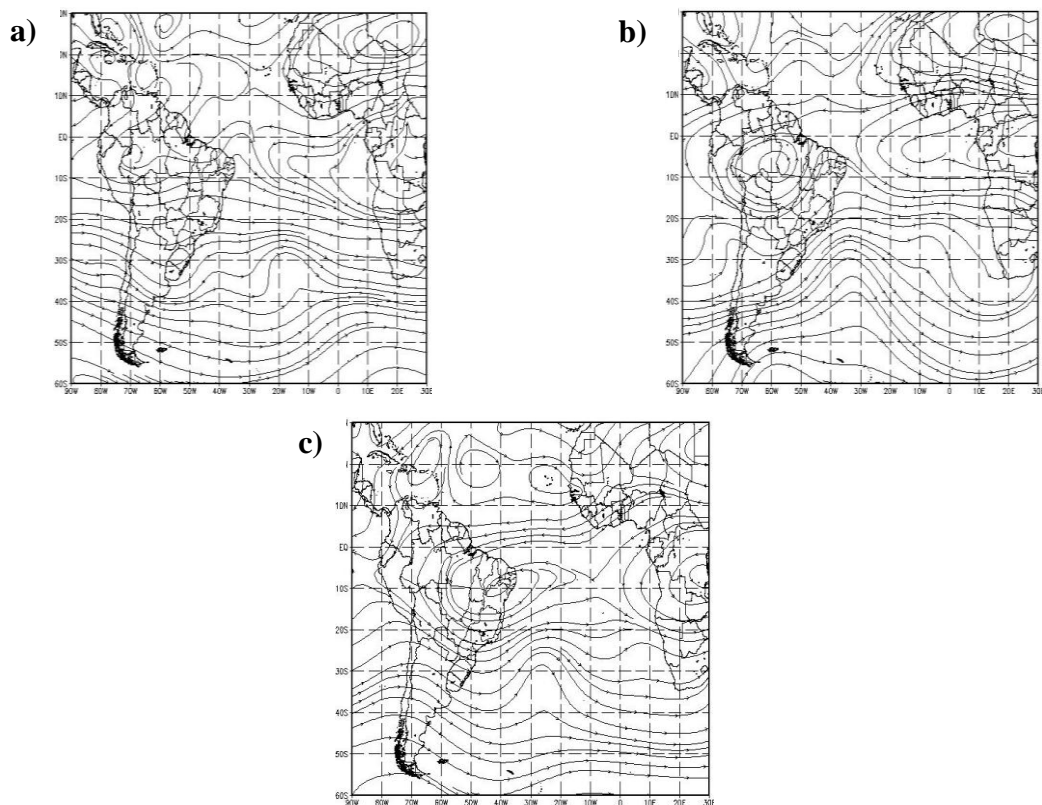


FIGURA 40 - Padrões em altos níveis atmosféricos para os eventos em não que se observou atividades convectivas na extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, linhas de corrente em 500 hPa.

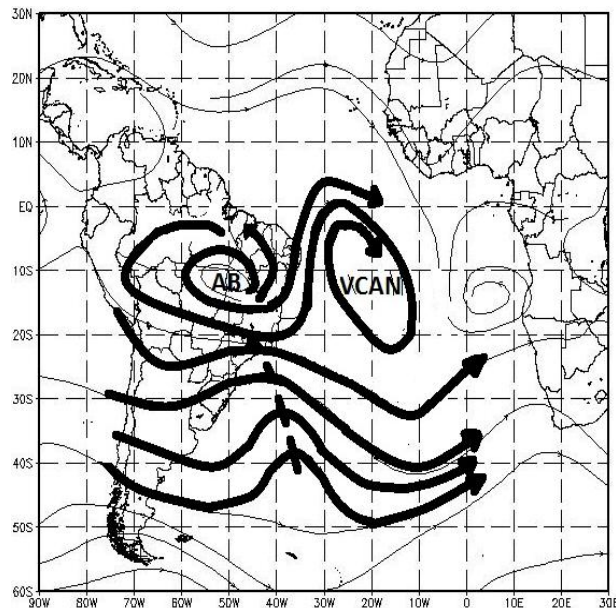


4.8 Modelo Conceitual para Formação Convectiva sobre o NEB, Organizada pela extremidade frontal.

Após a identificação dos fatores e a avaliação de como esses fatores se combinam em baixos, médios e altos níveis. Também após a comparação entre os padrões de circulação encontrados nos grupos G1 e G2, foi possível elaborar um modelo conceitual para a formação de processos convectivos sobre o NEB organizados pela extremidade frontal.

O modelo elaborado mostra a configuração padrão necessária para o desenvolvimento convectivo sobre o NEB, associado ao sistema frontal. Foi elaborado um modelo para o padrão de escoamento em 200 hPa (FIGURA 41) que mostra a AB atuando sobre o continente, VCAN sobre o Atlântico Tropical, a leste da região Nordeste do Brasil, e difluência sobre o NEB entre a circulação desses dois sistemas. Além de um cavado atuando a sul de 20°S.

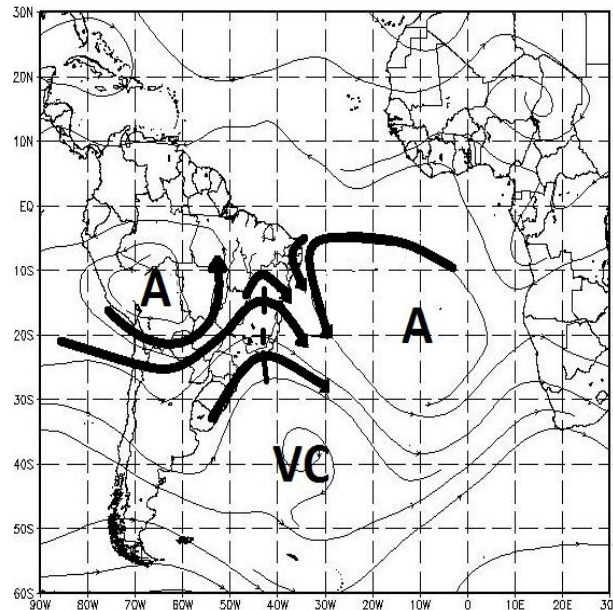
FIGURA 41 – Modelo para circulação em 200 hPa, para os casos com convecção na extremidade frontal.



Fonte: Autor, 2011

O modelo de circulação para o nível de 500 hPa (FIGURA 42) mostra um sistema de alta pressão sobre o continente. Sobre o Atlântico, uma alta pressão aproximadamente na região climatológica da ASAS, um vórtice ciclônico a sudeste da região Sul do Brasil e convergência no escoamento entre esses dois sistemas sobre o Atlântico.

FIGURA 42 - Modelo para circulação em 500 hPa, para os casos com convecção na extremidade frontal.



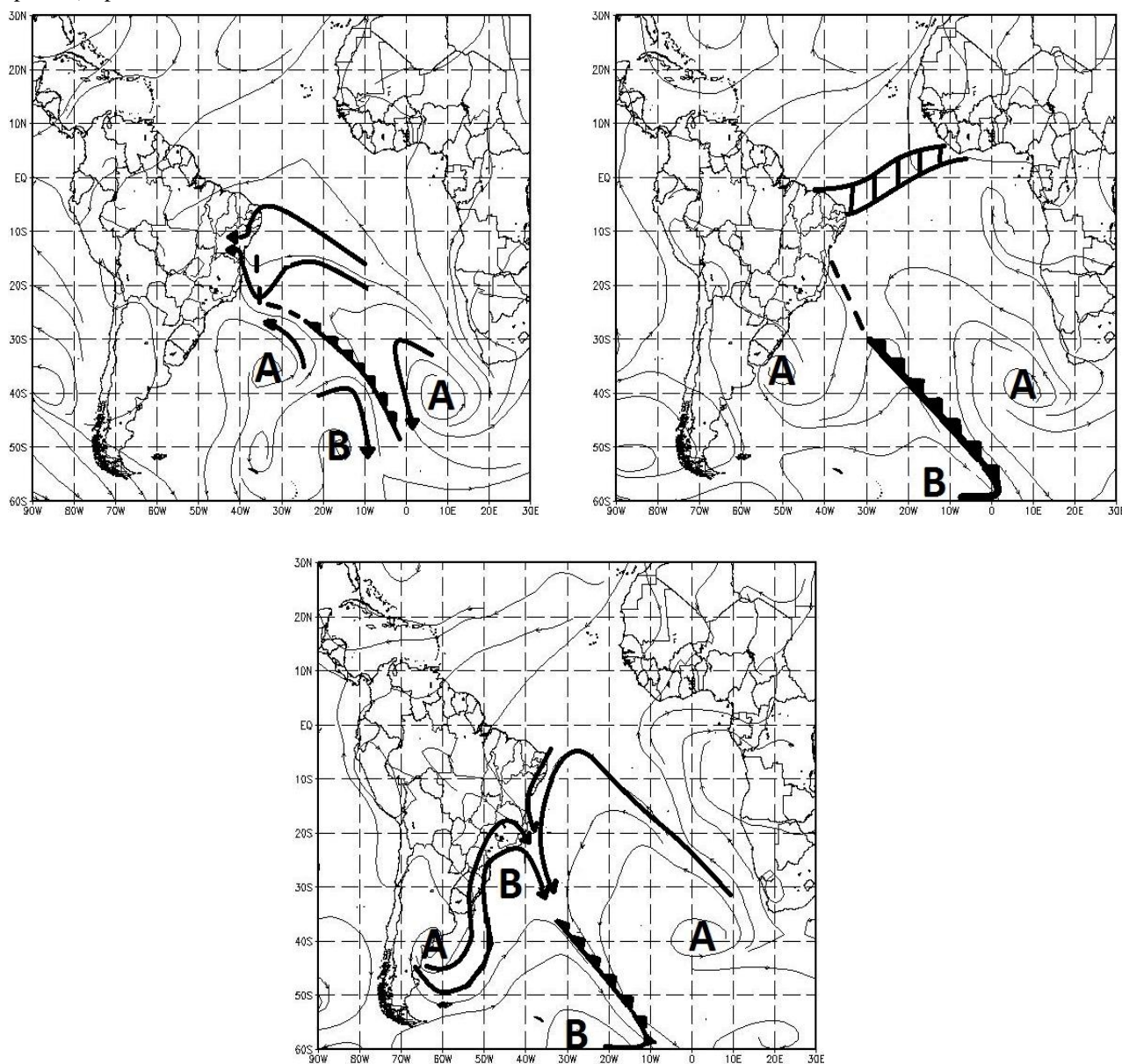
Fonte: Autor, 2011

Diferentemente dos níveis de 200 e 500 hPa em que se pode formar um modelo que pode ser utilizado como um padrão de circulação para o desenvolvimento convectivo sobre o NEB, em 925 hPa observaram-se quatro tipos diferentes de circulação para a formação de convecção na extremidade do sistema frontal sobre a região Nordeste. Através da FIGURA 43 podem-se diferenciar os quatro tipos de circulação diferentes para a formação convectiva sobre o NEB.

- Tipo 1: O Ciclone da frente fria principal encontra-se distante da costa, centrado aproximadamente em 50°S. A circulação de leste oriunda da ASAS interage com o anticiclone pós-frontal criando uma divisão no fluxo sobre o Atlântico e uma posterior convergência sobre o nordeste. O cavado formado pela bifurcação no escoamento acopla-se a extremidade da zona frontal, conforme mostrado na FIGURA 43a.
- Tipo 2: Observa-se a Zona de Convergência Intertropical com uma inclinação NE-SW atuando sobre o NEB. O sistema frontal encontra-se sobre o oceano Atlântico e extremidade desse sistema estende-se em direção a região Nordeste do Brasil, de acordo com a FIGURA 43b.
- Tipo 3 e 4: Os tipos 3 e 4, se define praticamente pela circulação mais ampla da ASAS com sua borda oeste atuando sobre o NEB, diferenciando-se pelo posicionamento do ciclone da frente em estudo, sendo estas situações distintas: a) com o ciclone aproximado em 60°S e o anticiclone pós-frontal na região da costa Argentina, há um

alongamento da extremidade frontal em direção ao NEB; b) quando há formação de uma baixa a leste da região Sudeste do Brasil, a região de convergência entre a baixa e a ASAS estende-se sobre o NEB, como a FIGURA 43c.

FIGURA 43 - Modelos para circulação em 925 hPa, para os casos com convecção na extremidade frontal, a) tipo 1; b) tipo 2; c) tipos 3 e 4.



Fonte: Autor, 2011

4.9 Fatores Termodinâmicos

4.9.1 Para os eventos com convecção

4.9.1.1 Diagrama Skew T – Log P

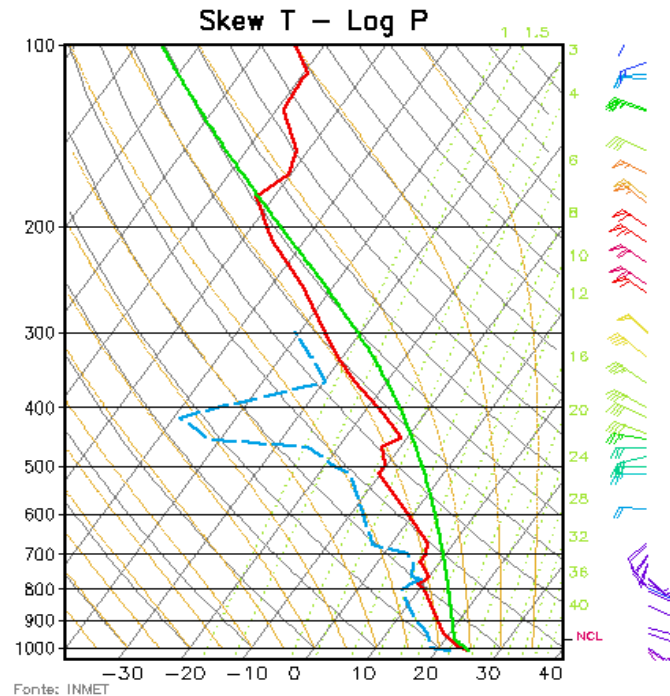
Observando-se os perfis atmosféricos, obtidos através das sondagens e plotados em diagramas Skew T – Log P, para os eventos com a presença de atividades convectivas organizadas pela zona frontal, verifica-se que em média o comportamento da atmosfera foi semelhante em todos os casos analisados.

Através da FIGURA 44, que apresenta um perfil representativo do padrão encontrado para os eventos com a presença de processos convectivos sobre a Região Nordeste do Brasil organizados pela extremidade frontal, é possível notar que para esses eventos a umidade encontra-se relativamente elevada em praticamente toda camada atmosférica, em alguns casos diminuindo a partir de níveis médios. Observou-se sempre em níveis baixos a presença de inversões na curva de temperatura (linha contínua em vermelho) e também na curva de temperatura do ponto de orvalho (linha tracejada em azul), sendo notadas também inversões em médios níveis da atmosfera.

Nas análises, notou-se bastante instabilidade em toda troposfera, com a temperatura da parcela estando sempre maior que a temperatura do ambiente, o que favorece a flutuabilidade da parcela. O nível de condensação por levantamento (NCL) encontrou-se em média a uma altura bem baixa em torno do nível de 900 hPa, o que indica facilidade para parcela adquirir saturação por levantamento forçado, esses fatores favorecem a formação de processos convectivos.

Essa configuração da atmosfera foi verificada tanto se analisando as sondagens para as 12h anteriores ao desenvolvimento convectivo máximo, quanto à análise para as 12h posteriores, porém para o último período, a temperatura da parcela nem sempre esteve maior que a temperatura do ambiente em todos os níveis, o que diminui a flutuabilidade da parcela, dificultando a formação de nuvens profundas.

FIGURA 44 - Diagrama Skew T – Log P, representativo do padrão médio da atmosfera, para os eventos com convecção na extremidade frontal (G1), curva de temperatura (contínua vermelha), curva de temperatura do ponto de orvalho (tracejada azul), e trajetória da parcela (contínua verde).



4.9.1.2 Índices de instabilidade

Os índices de instabilidade mostram a capacidade potencial da atmosfera de para desenvolvimento de tempestades ou formação de nuvens Cb. Para este trabalho, foram calculados os valores dos índices de instabilidade CAPE, K, TT e LI, a partir de dados de radiosondagens, cujos resultados são mostrados na TABELA 15.

A TABELA 15 mostra o valor crítico, estipulado para cada um dos índices, a partir do qual se caracterizou a capacidade potencial para a formação de nuvens Cb, e o percentual com relação ao número total de casos em que esse valor crítico foi ultrapassado, sendo os percentuais apresentados na TABELA 15 referentes aos eventos em que se observaram processos convectivos associados à extremidade frontal, ou seja, para os eventos do G1.

— **Índice CAPE:** observa-se, para os casos estudados, que para as 12 horas que antecederam o desenvolvimento máximo dos processos convectivo organizados pela sistema e frontal sobre a Região Nordeste, o CAPE apresentou valores acima do valor crítico, ou seja, um potencial para o desenvolvimento de processos convectivos em 88% dos casos. E para as

12 horas posteriores ao desenvolvimento convectivo máximo, esse índice mostrou em 81% dos casos que a atmosfera mantinha-se instável, ou seja, com valores acima do valor crítico estabelecido.

Esses resultados mostram que o CAPE pode auxiliar na previsão da formação de nuvens convectivas precipitantes, pois, através dos dados obtidos pela sondagem para 12 horas de antecedência, esse indicador de convecção se mostrou eficiente em 88% dos casos.

No entanto, a utilização somente desse índice para previsão de chuvas convectivas não é recomendada, pois em 12% dos casos não se verificaram valores significativos de CAPE, e foram verificadas fortes atividades convectivas organizadas pela extremidade frontal sobre o Nordeste do Brasil.

— **Índice K:** este índice não se mostrou uma boa ferramenta para a previsão de formação de nuvens convectivas sobre a Região Nordeste do Brasil. Observou-se que para uma antecedência de 12 horas, em apenas 39% dos casos estudados, o índice K apresentou valores superiores àqueles estipulados como críticos para o desenvolvimento de tempestades, não sendo dessa forma, pelos resultados encontrados nesse trabalho um bom indicador da formação de convecção na Região Nordeste.

Para as 12 horas posteriores, o índice K mostrou potencial convectivo em apenas 33% dos casos, mas através da observação das imagens de satélite, verificou-se a presença de nuvens convectivas na quase totalidade dos casos mesmo decorridas 12 horas do desenvolvimento convectivo máximo, o que reitera que este índice não é bom indicador da formação de nuvens de grande desenvolvimento vertical para a região de estudo.

— **Índice Total – Totals (TT):** este índice também não se mostrou uma boa ferramenta para prognosticar a probabilidade de desenvolvimento dos processos convectivos, pois este índice não indicou valores compatíveis com a instabilidade observada. Tanto para as 12 horas que precederam os aglomerados convectivos, quanto para as 12 horas posteriores ao máximo desenvolvimento convectivo observado, os valores obtidos para o índice total-totals foram condizentes com a instabilidade real em apenas 15% dos casos estudados.

— **Índice de Levantamento (LI):** em 85% dos casos estudados, com 12 horas de antecedência este índice denotou as condições de instabilidade, seguido da possibilidade da ocorrência de tempestades. Para o período posterior, esse índice mostrou possibilidade do desenvolvimento de nuvens convectivas em 91% dos casos.

Dessa forma, o índice de levantamentos se mostrou uma boa ferramenta para o meteorologista operacional utilizar no prognóstico da formação das atividades convectivas associadas à zona frontal na Região Nordeste do Brasil. No entanto, assim como o CAPE o índice LI não deve ser utilizado como único indicador para possível formação de tempestades na Região Nordeste, pois em pelo menos 15% dos casos ele não acusou essa possibilidade e nessas ocasiões foram observadas fortes atividade convectivas organizadas pela extremidade frontal, sobre esta Região.

TABELA 15 - Percentuais, de casos em que os índices denotaram valores compatíveis com a instabilidade observada, a partir de valores críticos estipulados, para as 12 h anteriores e 12 h posteriores aos processos convectivos máximos para o eventos do G1.

		Percentual a partir do valor crítico	
Índice	Valor Crítico	-12h	+12h
CAPE	>1000	88%	81%
K	>28	39%	33%
TT	>43	15%	15%
LI	<0	85%	91%

4.9.2 Para os eventos sem convecção

4.9.2.1 Diagrama Skew T – Log P

Através dos diagramas termodinâmicos Skew T – Log P, plotados através dos dados obtidos pelas sondagens, pode-se traçar um perfil vertical da atmosfera para os eventos em que se observou a influência da zona frontal sobre as condições do tempo na Região Nordeste do Brasil, sem verificar-se a presença de nebulosidade convectiva sobre essa Região.

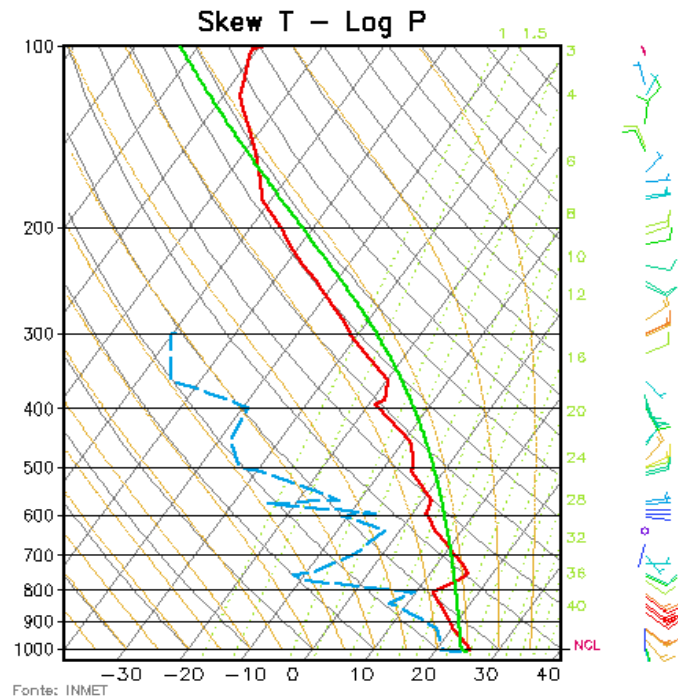
A FIGURA 45 apresenta um perfil representativo do padrão encontrado para os sem convecção associada com a extremidade frontal, sobre o Nordeste do Brasil. Notou-se que em média a atmosfera esteve relativamente com umidade em níveis inferiores, em média também se observou em níveis baixos uma camada de inversão. Acima dessa camada uma

diminuição no conteúdo de umidade na atmosfera, apresentando também uma inversão em níveis médios na grande maioria dos casos estudados.

Constatou-se, pela análise dos perfis, que a atmosfera caracterizou-se em média como instável, verificou-se que a temperatura da parcela esteve quase sempre maior que a temperatura do ambiente, que caracteriza a atmosfera com potencial convectivo. Verificou-se também que o NCL, assim como para os perfis representativos dos eventos com convecção, esteve sempre a uma altura muito baixa, estando também em média no nível 900 hPa, o que facilita a parcela adquirir saturação por levantamento forçado.

Entretanto, apesar de os perfis termodinâmicos mostrarem uma atmosfera relativamente instável, o que significa uma tendência para a formação de atividades convectivas sobre esta Região, observou-se apenas uma fraca nebulosidade associada com a presença da zona frontal.

FIGURA 45 - Diagrama Skew T – Log P, representativo do padrão médio da atmosfera, para os eventos sem convecção na extremidade frontal (G2), curva de temperatura (continua vermelha), curva de temperatura do ponto de orvalho (tracejada azul), e trajetória da parcela (continua verde).



4.9.2.2 Índices de instabilidade

A TABELA 16 mostra o valor crítico estipulado para cada um dos índices, a partir do qual se caracterizou a capacidade potencial para a formação de nuvens Cb, e o percentual com relação ao número total de casos em que esse valor crítico foi ultrapassado, sendo os

percentuais apresentados na TABELA 16 referentes aos eventos em que não se observaram processos convectivos associados à extremidade frontal, ou seja, para os eventos do G2.

— **Índice CAPE:** analisando-se os valores de CAPE para período anterior à influência da zonal frontal sobre o Nordeste do Brasil, para os eventos do G2, verifica-se que em 63% dos casos os valores desse índice indicavam um potencial para o desenvolvimento de convecção, sobre esta Região. Para o período posterior a influência do sistema frontal sobre a o Nordeste, os valores de CAPE estiveram acima do valor crítico estabelecidos em 61% dos casos.

Esses resultados mostram que mesmo não sendo observadas nuvens de desenvolvimento vertical sobre a região de estudo, para esses casos, as condições de instabilidade verificadas evidenciam condições de fluabilidade da parcela, o que implica a possibilidade de desenvolvimento de processos convectivos.

— **Índice K:** os valores encontrados para este índice foram compatíveis com as condições de nebulosidade verificadas, pois, em 88% dos casos analisados os valores do índice K estiveram a baixo do valor crítico, o que denota condições desfavoráveis ao desenvolvimento convectivo.

— **Índice Total-Totals (TT):** para este índice os valores encontrados também foram representativos das condições de nebulosidade encontradas na Região. Analisando-se os valores para o período anterior a influência do sistema frontal sobre o Nordeste, os valores do índice TT estiveram abaixo do valor crítico, que representa a possibilidade do desenvolvimento convectivo, em 94% dos casos estudados.

— **Índice de Levantamento (LI):** para o período anterior à atuação da zona frontal sobre a Região Nordeste do Brasil, em 75% dos casos do G2, ou seja, casos em que não se verificou nuvens de formação convectiva, o índice de levantamento mostrou condições favoráveis ao desenvolvimento de processos convectivos. Dessa forma, nota-se que os valores encontrados para este índice não correspondem às condições reais de nebulosidade encontradas sobre esta Região.

TABELA 16 - Percentuais, de casos em que os índices denotaram valores compatíveis com a instabilidade observada, a partir de valores críticos estipulados, para as 12 h anteriores e 12 h posteriores a atuação da zona frontal sobre o NEB, para os eventos do G2.

		Percentual a partir do valor crítico	
Índice	Valor Crítico	-12h	+12h
CAPE	>1000	63%	61%
K	>28	12%	8%
TT	>43	6%	3%
LI	<0	75%	72%

4.10 Considerações sobre os fatores dinâmicos e termodinâmicos para formação dos processos convectivos.

Comparando-se o comportamento da atmosfera para os eventos do G1, em que se observou a formação de processos convectivos sobre a Região Nordeste do Brasil, organizados pela extremidade frontal, e para os eventos do G2, em que se observou a influência do sistema frontal sobre o nordeste do Brasil, porém sem a formação convectiva. Verificou-se pela análise do perfil vertical, que o comportamento da atmosfera foi semelhante para os eventos dos dois grupos. Os perfis analisados mostraram para os dois grupos uma relativa instabilidade na atmosfera, observando-se para ambos os grupos na grande maioria dos casos condições para o desenvolvimento convectivo.

Tanto para os eventos do G1 quanto para os do G2 os níveis baixos da atmosfera apresentaram umidade elevada, o que pode ser explicado devido ao fato de os perfis analisados serem de estações situadas no litoral e a circulação predominante nessa região mantém frequente o transporte de umidade do oceano para o continente, e também pequenas inversões.

Verificou-se que a umidade, em médios níveis atmosféricos para os casos do G1, foi maior em relação ao do G2, essa configuração pode estar relacionada com o padrão de escoamentos encontrados para os casos do G1, em que se observou sobre o Atlântico Tropical Sul, a presença de um sistema de alta pressão no nível de 500 hPa, o que reforça o transporte de umidade para o continente em níveis médios. Enquanto nos eventos do G2, não foi observado sobre o Atlântico esse sistema de alta pressão.

Os índices de instabilidade CAPE e o Índice de Levantamento (LI), apresentaram valores que denotam a possibilidade de formação de processos convectivos, para grande

maioria dos eventos tanto pertencente ao Grupo 1 quanto aos do Grupo 2. Os índices K e Total-Totals (TT), não mostraram condições para formação de atividades convectivas sobre a Região Nordeste do Brasil, para quase totalidade dos eventos do Grupo 2, o que corresponde as condições de nebulosidade encontradas sobre a região. Contudo, para os eventos do Grupo 1 esses índices não mostraram para uma porcentagem muito grande dos casos a possibilidade de formação convectiva, não caracterizando, portanto, as condições de nebulosidade existentes nesses eventos.

Dessa forma, notou-se que a avaliação da possível formação de processos convectivos sobre a Região Nordeste do Brasil não deve ser realizada somente através da análise de índices de instabilidade, visto que em alguns eventos, mesmo com a presença de nebulosidade convectiva, os índices não mostravam essa possibilidade e em outros eventos os índices indicavam a possibilidade de desenvolvimento convectivo que não foi posteriormente verificado.

Para os eventos estudados, verificou-se que mesmo as condições termodinâmicas indicando a possibilidade do desenvolvimento convectivo, foram necessários mecanismos dinâmicos para que esses processos convectivos se iniciassem. Observou-se que a formação convectiva somente se deu principalmente quando foram observados confluência no escoamento em níveis inferiores e médios, forte difluência em altos níveis da atmosfera e também a presença do anticiclone sobre o Atlântico em médios níveis. Isso indica que é necessária uma atuação conjunta de fatores dinâmicos e termodinâmicos para formação de nebulosidade convectiva, conforme também foi encontrada por Zawadski e Ro (1977) e Mota e Nobre (2006).

4.11 Estudo de Caso: Atividades Convectivas sobre o NEB, Organizadas pela extremidade frontal.

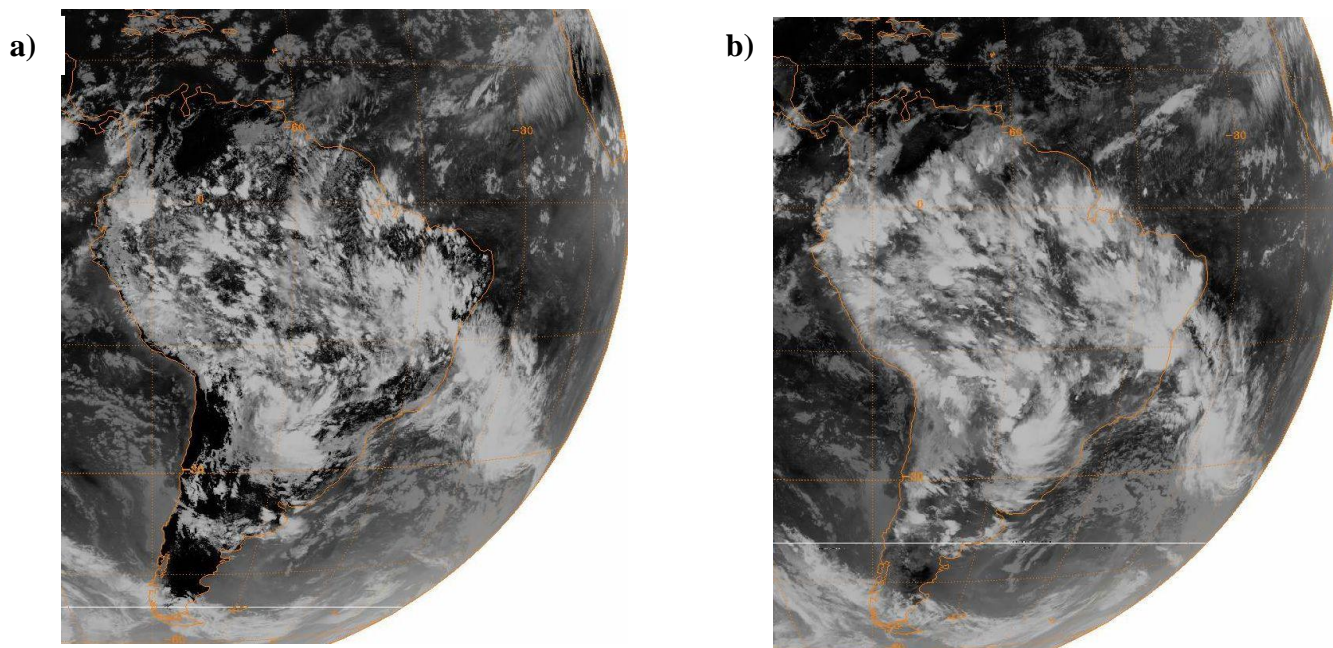
Entre os dias 26 e 29 de fevereiro de 2008, em grande parte da Região Nordeste do Brasil foi registrado um volume de precipitação bastante elevado, descargas elétricas e ocorrência de ventos fortes. Esses acontecimentos se devem a formação de uma onda frontal sobre o oceano Atlântico, a leste da região sudeste do Brasil, em conjunto com outros fatores em médios e altos níveis.

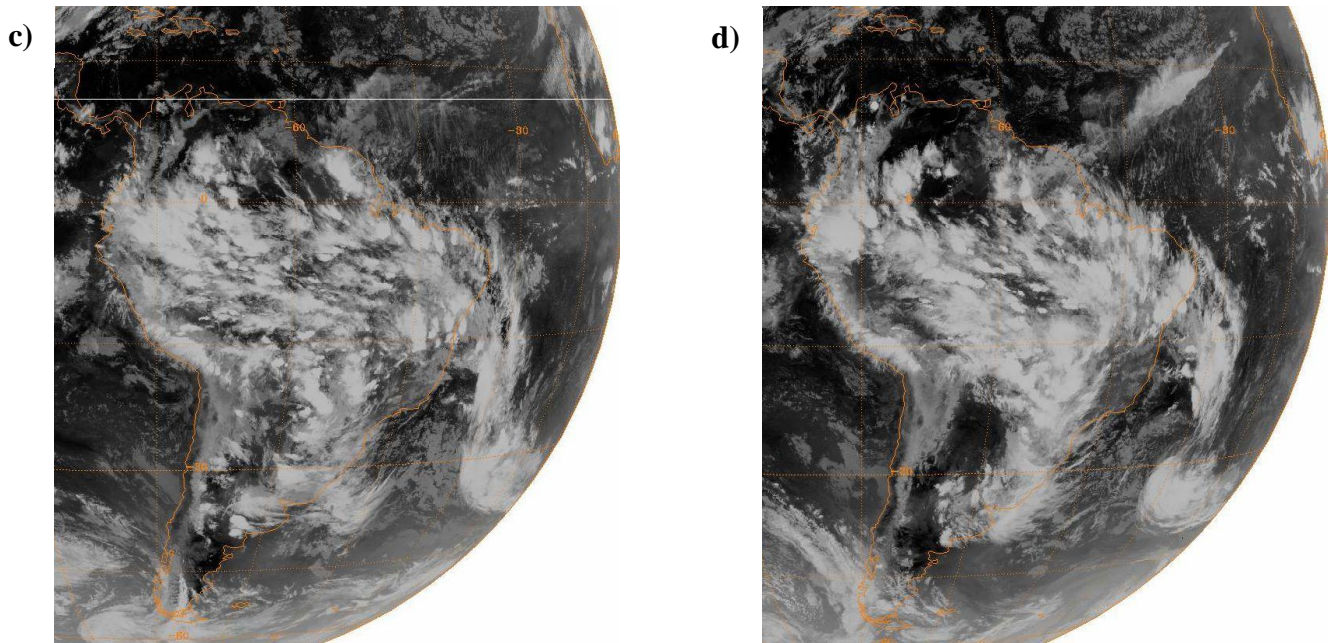
Análise dos processos ocorridos entre 26 e 29 de fevereiro de 2008

As imagens de satélite apresentadas na FIGURA 46 correspondem ao horário das 18 UTC dos dias 26, 27, 28 e 29 de fevereiro de 2008. Observando-se as imagens verifica-se a presença generalizada de nuvens convectivas, sobre grande parte do território brasileiro. Analisando-se as condições sobre a região Nordeste do Brasil. No dia 26 (FIGURA 46a), quando a zona frontal começou a influenciar as condições do tempo sobre o NEB, a nebulosidade convectiva concentrava-se principalmente sobre o estado da Bahia, região central dos estados de Sergipe, Alagoas. Em 27 de fevereiro (FIGURA 46b) notam-se conglomerados convectivos em praticamente todo nordeste do Brasil. Com as atividades convectivas mais intensas estendendo-se por toda costa leste da Região.

No dia 28 (FIGURA 46c), percebe-se bastante nebulosidade sobre a região Nordeste, no entanto não se observou atividades convectivas muito intensas sobre o esta região. Verificando-se algumas nuvens com maior desenvolvimento sobre o estado da Bahia. Para o dia 29 de fevereiro (FIGURA 46d), verifica-se que há uma nova intensificação dos processos convectivos sobre o nordeste. Porém as nuvens com maior desenvolvimento concentram-se principalmente, sobre o nordeste da Bahia, e regiões litorâneas de Sergipe, Alagoas e Pernambuco.

FIGURA 46 - Imagens de Satélite do canal infravermelho para: a) o dia 26 de fevereiro de 2008 às 00 UTC; b) para o dia 27 de fevereiro de 2008 às 00 UTC; c) para o dia 28 de fevereiro de 2008 às 18 UTC; d) para o dia 28 de fevereiro de 2008 às 18 UTC.





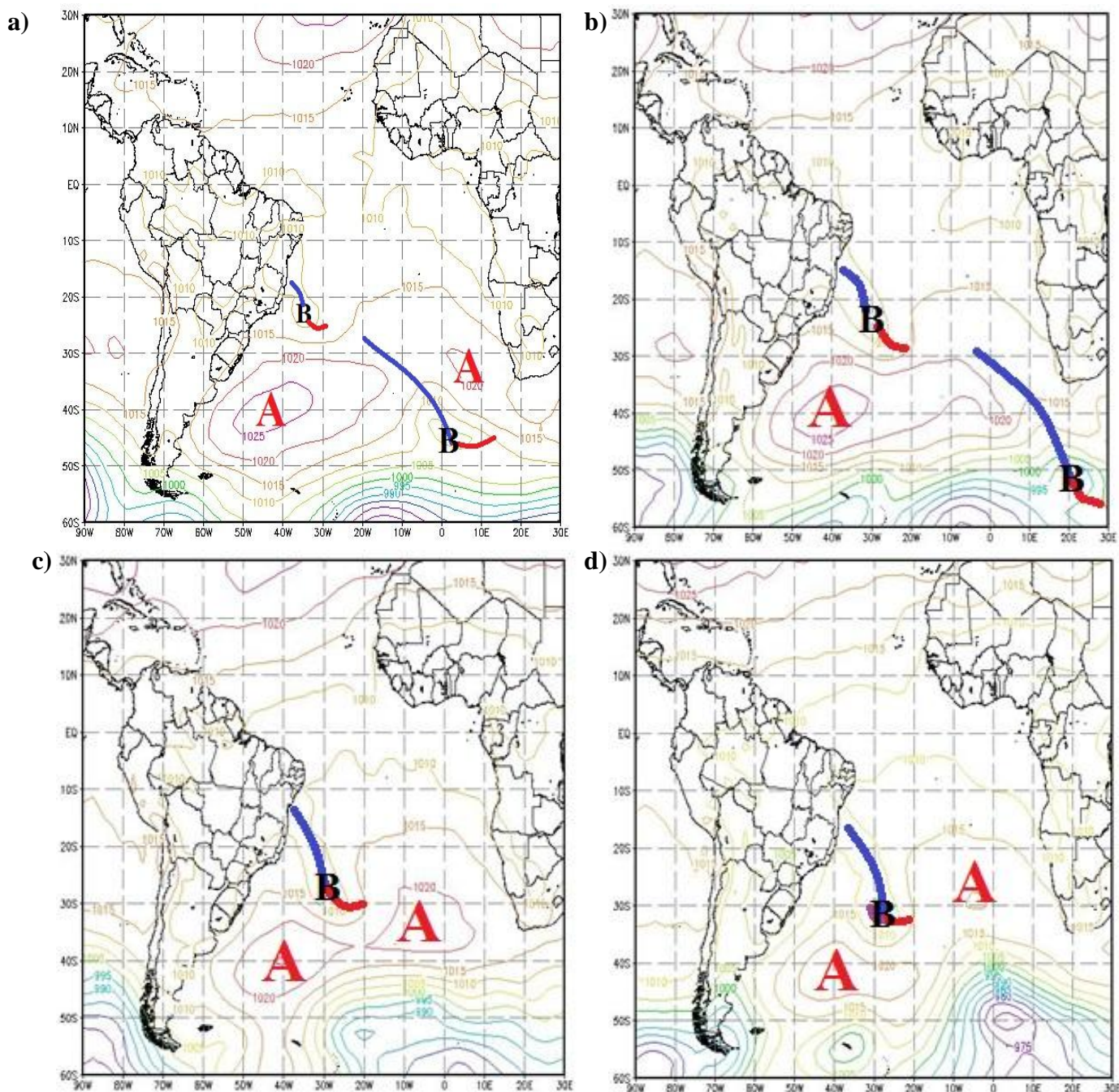
Fonte: Satélite GOES – NCDC/NOAA

A FIGURA 47 mostra os campos de pressão ao nível médio do mar as 18Z dos dias 26, 27, 28 e 29 de fevereiro de 2008, no horário das 18UTC. No dia 26 de fevereiro (FIGURA 47a), há um sistema frontal que se estende sobre o Atlântico, distante do continente, desde a baixa com centro com mínimo de 1005 hPa posicionada em torno de 45S/2E. O anticiclone na retaguarda desse sistema tem valor máximo de 1025 hPa com centro em torno 40S/43W. A ASAS está deslocada de sua posição climatológica devido a atuação do sistema frontal.

Observa-se que há formação de uma baixa próxima a região Sudeste do Brasil. Através da imagem pode-se identificar a existência de um cavado que estendem-se do interior da região nordeste até o Atlântico, a leste da região Sudeste. Mas através da imagem de satélite notou-se a presença de uma onda frontal influenciando as condições de tempo sobre o nordeste. Provavelmente a imagem não mostre uma isóbara fechada, evidenciando um centro de baixa pressão, devido ao intervalo de 5hPa entre as isóbaras.

Entre os dias 27 e 28 fevereiro de 2008 (FIGURA 47b e 47c), pela análise do campo de pressão, não há mudanças muito significativas nos sistemas atuantes sobre o continente. Observa-se que a partir do dia 28 (FIGURA 47c) a circulação da Alta Subtropical do Atlântico Sul apresenta-se mais ampla alongando-se em direção a região Nordeste.

FIGURA 47 - Campo de PNM, com a demarcação dos sistemas atuantes sobre o Brasil, para: a) dia 26 de fevereiro de 2008 às 18UTC ; b) dia 27 de fevereiro de 2008 às 18UTC; c) dia 28 de fevereiro de 2008 às 18UTC ; d) dia 29 de fevereiro de 2008 às 18UTC.



Fonte: Autor, 2011

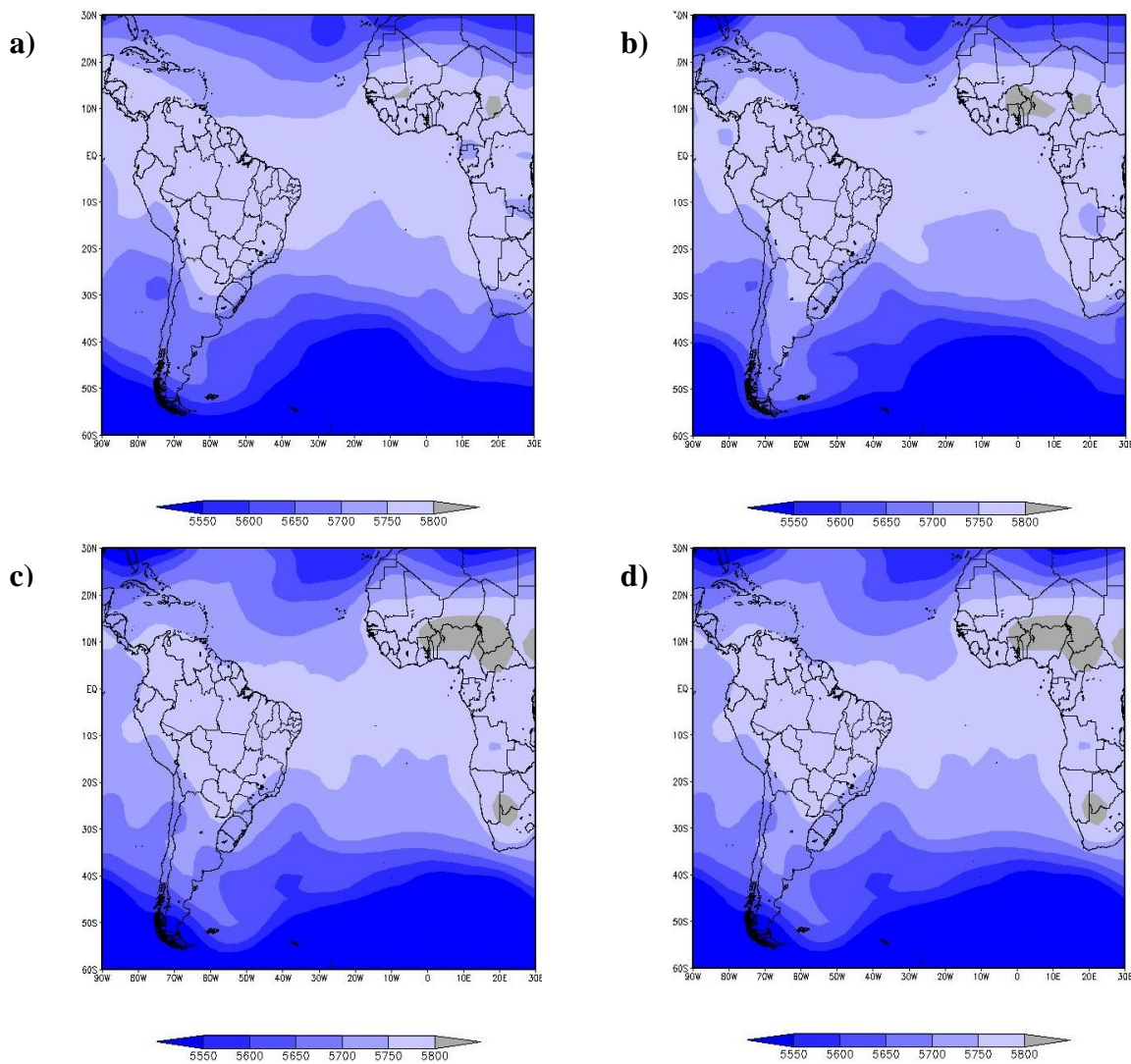
No dia 29 (FIGURA 47d), observa-se que há intensificação da baixa pressão, da frente em análise, que encontra-se com valor mínimo de 1005 hPa, centrada em torno de 30S/30W. É possível verificar também que a circulação da ASAS está bem ampla e a sua borda oeste atua sobre o leste da região Nordeste.

A FIGURA 48 mostra o campo de espessura entre os níveis de 500 e 1000 hPa, para os dias 26, 27, 28 e 29 de fevereiro de 2008, para as 18UTC. Verifica-se no dia 26 (FIGURA 48a), que na região de formação da baixa (entre 30 e 25S), associada ao sistema frontal

atuante sobre o Nordeste, o gradiente de espessura é muito pequeno. Há apenas uma pequena penetração de ar mais frio a leste das regiões Sul e Sudeste.

Em 27 de fevereiro (FIGURA 48b), observa-se uma intensificação do gradiente de espessura e um avanço maior do ar mais frio em direção ao sudeste do Brasil. Para os dias 28 (FIGURA 48c) e 29 (FIGURA 48d), a situação é semelhante, não se nota um gradiente de espessura intenso, mas percebe-se claramente a penetração de ar frio a norte de 20S, ao longo cavado.

FIGURA 48 - Campo de espessura entre os níveis de 500 e 1000 hPa, para: a) dia 26 de fevereiro de 2008 às 18UTC; b) dia 27 de fevereiro de 2008 às 18UTC; c) dia 28 de fevereiro de 2008 às 18UTC; a) dia 29 de fevereiro de 2008 às 18UTC.



Fonte: Autor, 2011

Análise em 925 hPa, para os dias 26, 27, 28 29 de fevereiro de 2008

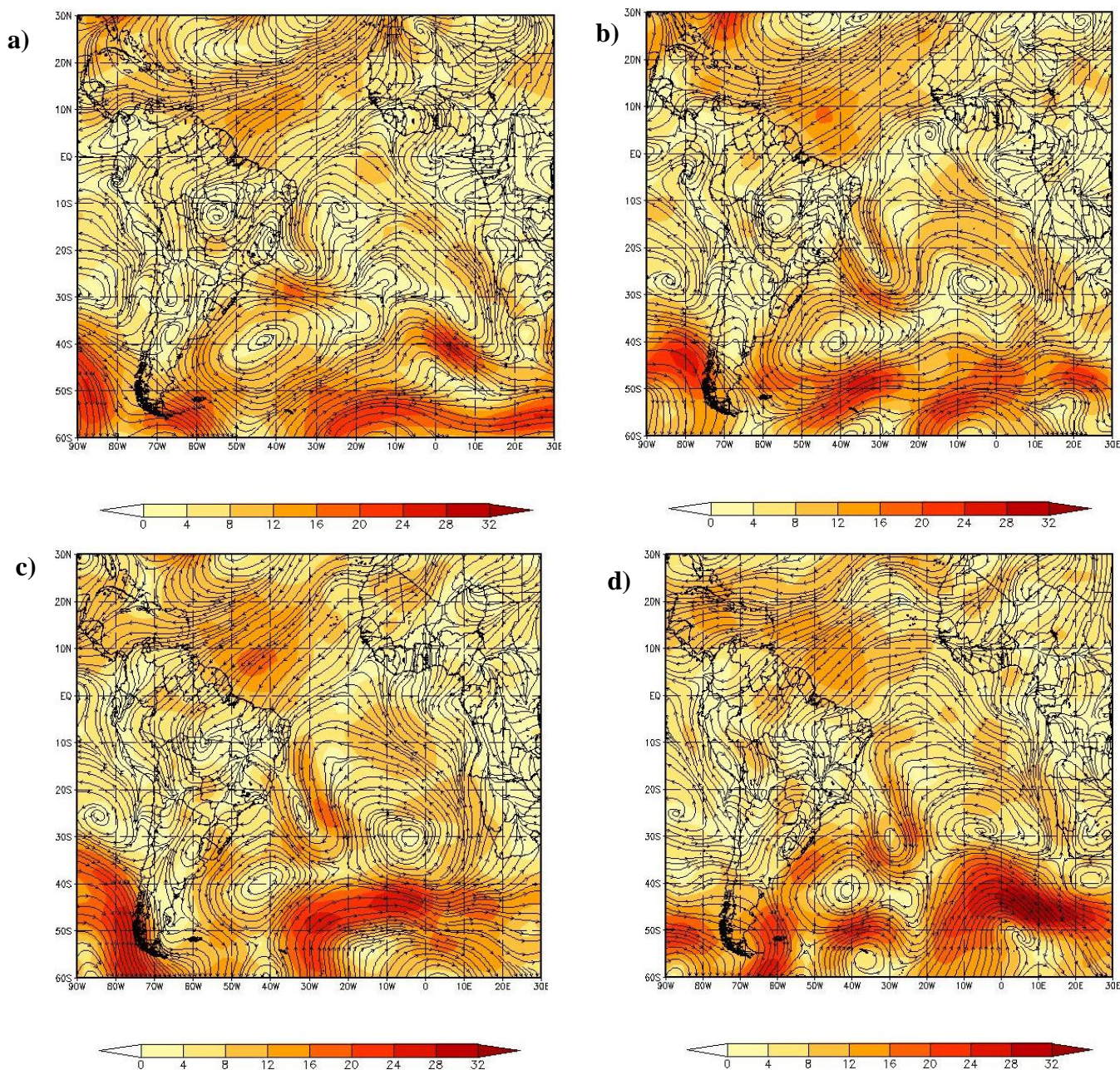
A FIGURA 49, mostra as linhas de corrente e magnitude do vento em 925 hPa de 26 a 29 de fevereiro de 2008, as 18UTC. Nota-se entre as regiões sudeste e nordeste uma ampla circulação ciclônica. Observa-se no dia 26 (FIGURA 49a), que a baixa relacionada à onda frontal encontra-se alongada, ligada a circulação ciclônica sobre o continente. A zona frontal encontra-se na região de confluência entre a baixa frontal e a alta pressão a leste da região nordeste. Os ventos de proximidade da costa do nordeste são de aproximadamente 16 m/s. Também se verifica um fluxo de nordeste sobre a região nordeste do Brasil, o qual transporta calor e umidade da região equatorial para o nordeste.

No dia 27 (FIGURA 49b), verifica-se pelas linhas de corrente que a baixa encontra-se alongada, com um amplo cavado sobre o Atlântico. A região de confluência encontra-se entre sobre o Atlântico entre a circulação do cavado e da ASAS. A intensidade dos ventos, próximo a costa está entre 12 e 16 m/s.

Em 28 de fevereiro (FIGURA 49c), a zona frontal encontra-se sobre o oceano, entre a circulação da baixa e da Alta Subtropical do Atlântico Sul. Observa-se também um cavado sobre a região nordeste do Brasil. A borda oeste da ASAS atua sobre o nordeste. Neste dia também se verificou uma componente de norte no escoamento sobre o nordeste do Brasil. A ZCIT estava inclinada na direção NE-SW.

No dia 29 (FIGURA 49d), a baixa encontra-se melhor configurada, a zona frontal, encontra-se sobre o Atlântico entre a circulação do ciclone frontal e da ASAS. Observa-se um cavado sobre o nordeste que está acoplado a extremidade frontal. Nota-se também uma região de confluência sobre o estado da Bahia. A borda oeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul, ainda atua sobre o nordeste, o que gera uma componente de norte no fluxo sobre o nordeste.

FIGURA 49 - Campo de linhas de corrente e magnitude do vento em 925 hPa, para: a) dia 26 de fevereiro de 2008 às 18UTC ; b) dia 27 de fevereiro de 2008 às 18UTC ; c) dia 28 de fevereiro de 2008 às 18UTC; d) dia 29 de fevereiro de 2008 às 18UTC.

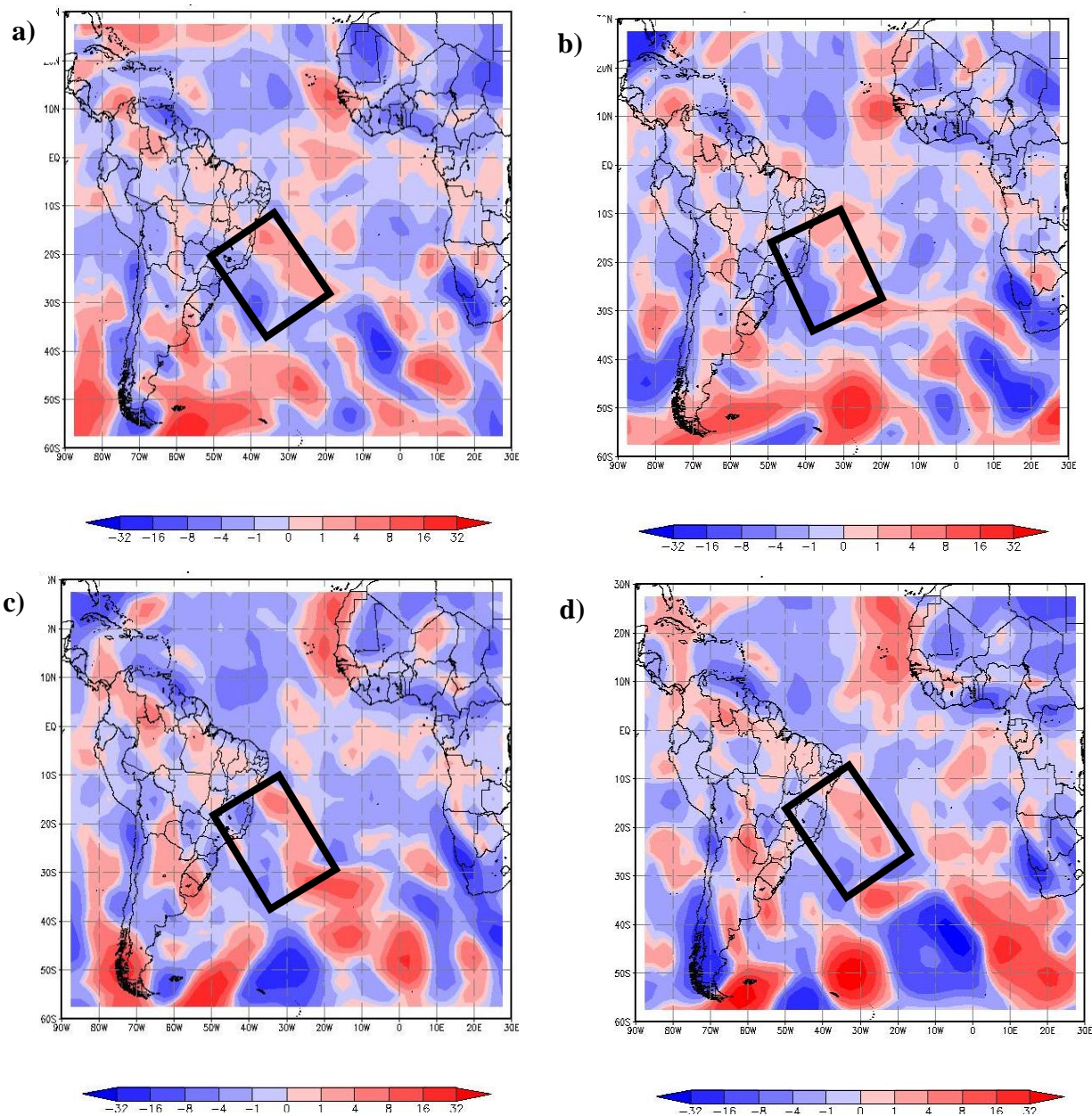


Fonte: Autor, 2011

Um campo que se mostrou muito útil para a identificação da zona frontal foi o de advecção de temperatura em 925 hPa. A FIGURA 50 mostra os campos de advecção de temperatura em 925 hPa, do dia 26 a 29 de fevereiro de 2008 para o horário das 18UTC.

Observando-se a FIGURA 50 (a,b,c e d), vê-se claramente, na região demarca, que há a zona frontal encontra-se entre uma área de advecção fria e uma área de advecção quente.

FIGURA 50 - Campo de advecção de temperatura em 925 hPa, área de posicionamento da zona frontal entre as regiões de advecção fria e quente, para: a) dia 26 de fevereiro de 2008 às 18UTC ; b) dia 27 de fevereiro de 2008 às 18:UTC ; c) dia 28 de fevereiro de 2008 às 18UTC; d) dia 29 de fevereiro de 2008 às 18UTC



Fonte: Autor, 2011

Análise em 500 hPa, para os dias 26, 27, 28 29 de fevereiro de 2008

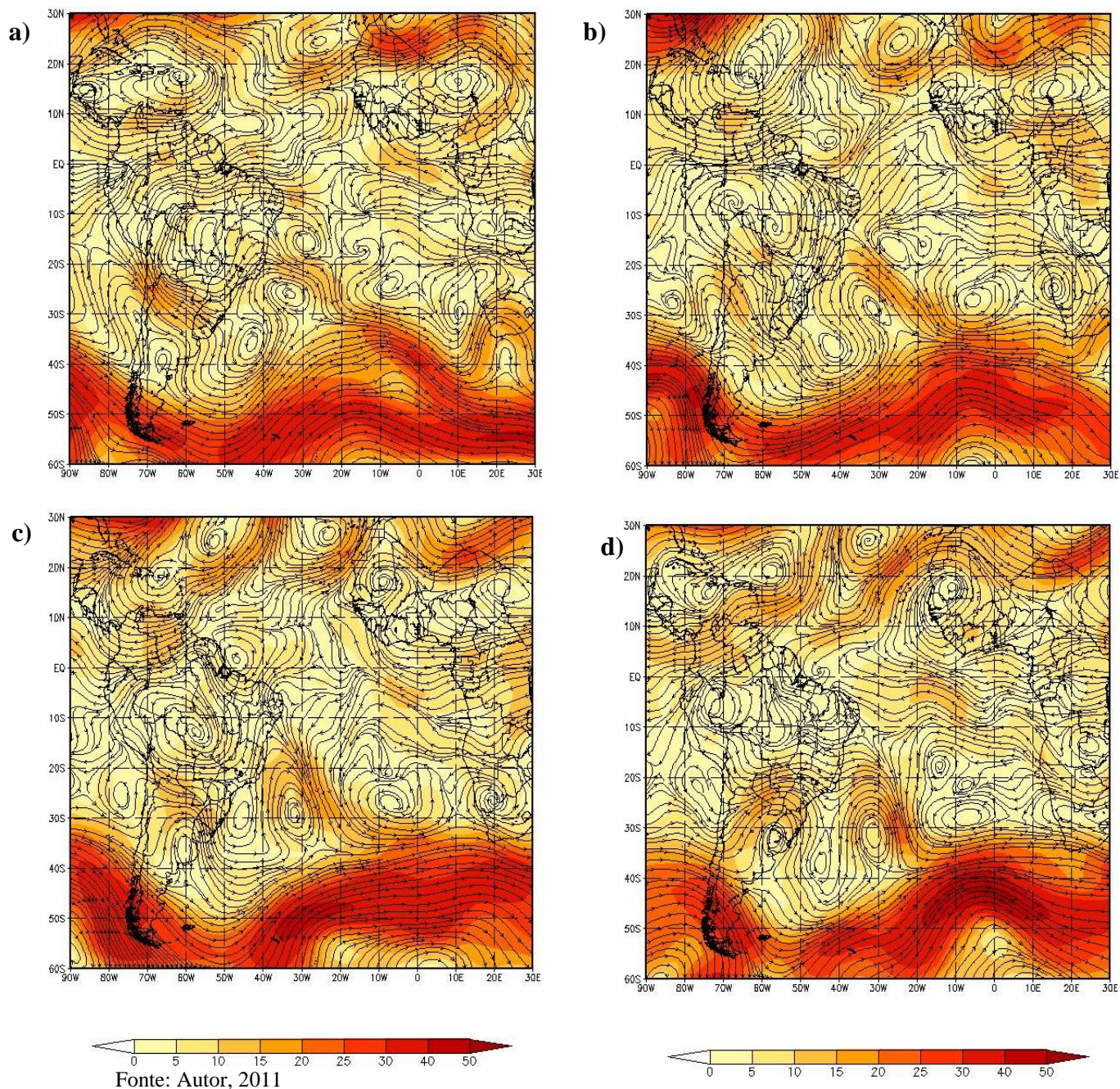
A FIGURA 51, mostra as linhas de corrente e magnitude do vento no nível de 500 hPa, entre os dias 26 e 29 de fevereiro de 2008 as 18UTC. No dia 26 (FIGURA 51a), observa-se a presença de um vórtice ciclônico entre 20 e 30S, um sistema de alta pressão entre 10 e 20S. Verifica-se entre esses dois sistemas uma região de convergência sobre o Atlântico. Nota-se também uma alta pressão sobre o continente, a interação da alta sobre o continente e o vórtice ciclônico alonga um cavado que atua sobre o continente até 10S.

No dia 27 de fevereiro (FIGURA 51b), nota-se que o vórtice ciclônico deslocou-se para leste, e sua circulação amplificou. A convergência entre a circulação do vórtice e da alta tem orientação NW-SE sobre o oceano Atlântico. O cavado ligado ao vórtice ciclônico atua a sul de 10S.

No dia 28 (FIGURA 51c), a zona de convergência entre o vórtice ciclônico e alta sobre o Atlântico estendem-se sobre o Atlântico até a região nordeste do Brasil. A alta pressão sobre o continente tem sua circulação mais ampla e encontra-se melhor configurada em relação aos dias anteriores. O cavado do vórtice ciclônico atua até 10S.

Em 29 de fevereiro de 2008 (FIGURA 51d), observa-se que a zona de convergência formada entre o vórtice ciclônico e a alta sobre o Atlântico, não estende-se mais em direção ao continente. Um segundo vórtice ciclone adentra o continente, deslocando a alta sobre o continente para norte e deixando a fluxo sobre o nordeste praticamente zonal.

FIGURA 51 - Campo de linhas de corrente e magnitude do vento em 500 hPa, para: a) dia 26 de fevereiro de 2008 às 18 UTC; b) dia 27 de fevereiro de 2008 às 18UTC ; c) dia 28 de fevereiro de 2008 às 18UTC; d) dia 29 de fevereiro de 2008 às 18UTC.



Análise em 200 hPa, para os dias 26, 27, 28 29 de fevereiro de 2008

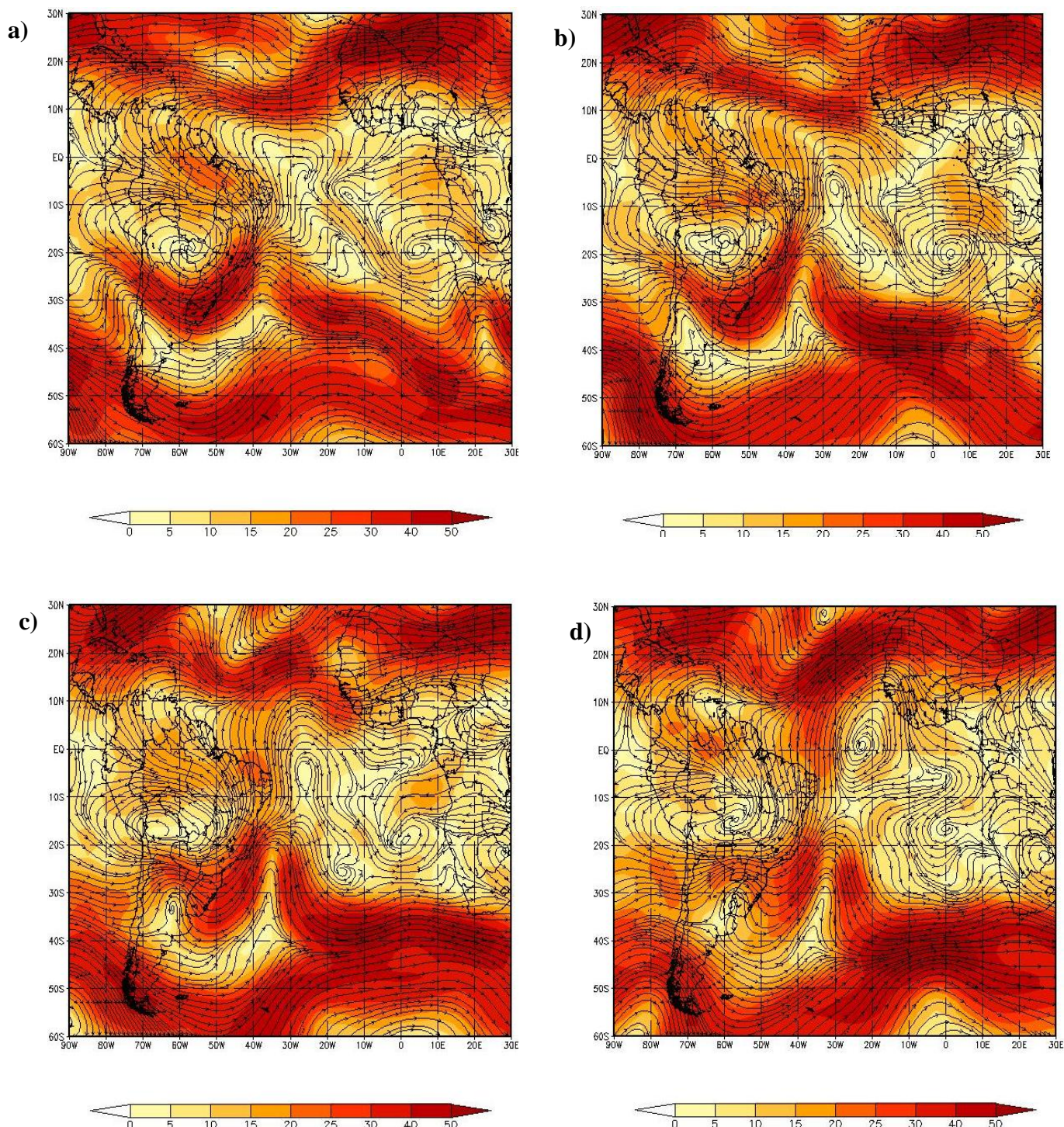
Na FIGURA 52 são apresentados os campos de linhas de corrente e magnitude do vento para o período de 26 a 29 de fevereiro de 2008, no nível de 200 hPa. Observa-se se analisando a FIGURA 52a, que corresponde ao dia 26 de fevereiro, a presença de um cavado com eixo orientado na direção norte/sul sobre o oceano Atlântico, atuando a norte de 20S. Nota-se que a corrente jato subtropical contorna o cavado. Verifica-se também sobre o centro do continente a presença da Alta da Bolívia, que atua sobre praticamente todo território brasileiro. Sobre a região Nordeste do Brasil há grande difluência, causa pela interação da circulação da AB e do cavado baroclínico. A leste do NEB, sobre o Atlântico percebe-se um cavado, com eixo NW-SE, estendendo-se em direção ao continente.

Para o dia 27 de fevereiro (FIGURA 52b), nota-se que o cavado baroclínico inclinou-se para leste, atuando a norte de 20S conforme o dia anterior. E observa-se a presença da corrente de jato subtropical contornando o cavado. A AB estende sua circulação sobre grande parte do Brasil. Verifica-se que o cavado existente no dia anterior próximo a costa nordestina, se intensificou e formou um Vórtice de Altos Níveis. Sobre o nordeste verifica-se grande difluência entre as correntes do VCAN e da AB.

No dia 28 (FIGURA 52c), o VCAN, aparece melhor configurado, com inclinação em direção ao continente. Sobre a parte norte do nordeste brasileiro, na região de difluência entre o VCAN e a AB, observa-se uma corrente de ar bastante intensa com magnitude de aproximada de 25 m/s. O cavado baroclínico atua a norte de 20S, sendo contornado pela Corrente de Jato Subtropical. A Alta da Bolívia deslocou-se um pouco para leste devido a penetração de um vórtice no sul do continente, sobre a Argentina.

Em 29 de fevereiro (FIGURA), verifica-se que o VCAN, deslocou-se para leste, inclinando-se com eixo NE-SW, distanciando-se da costa do Nordeste. O fluxo sobre a região Nordeste tornou mais meridional, diminuindo a região de difluência. Observa-se que a corrente a Corrente de Jato Subtropical, continua contornando o cavado baroclínico sobre o Atlântico, que atua a norte de 20S. Na borda oeste do VCAN percebe-se também uma corrente de ar bastante intensa, o que conjuntamente com a influência da CJS que contorna o cavado gera uma corrente de ar bastante intensa sobre a parte leste do NEB.

FIGURA 52 - Campo de linhas de corrente e magnitude do vento em 200 hPa, para: a) dia 26 de fevereiro de 2008 às 18UTC ; b) dia 27 de fevereiro de 2008 às 18UTC ; c) dia 28 de fevereiro de 2008 às 18UTC; d) dia 29 de fevereiro de 2008 às 18UTC.



Fonte: Autor, 2011

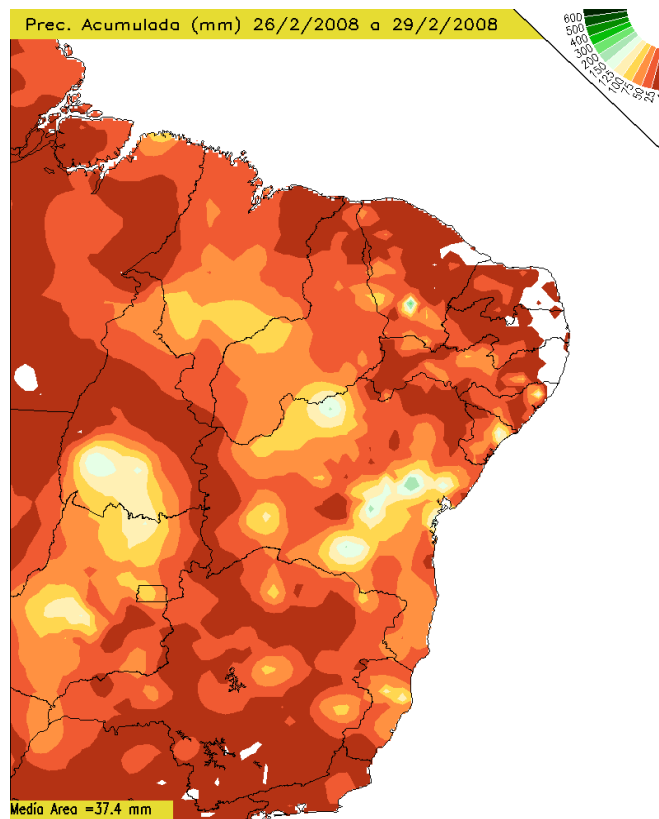
Após análise dos campos meteorológicos, de forma simplificada, verifica-se que o forte desenvolvimento de nebulosidade convectiva sobre a região nordeste do Brasil, foi consequência da organização e intensificação de uma onda frontal sobre o Atlântico próxima

a região sudeste do Brasil, em conjunto com a intensa difluência na corrente de níveis superiores.

A FIGURA 53, mostra a precipitação acumulada para o período de 26 a 29 de fevereiro de 2008. Verifica-se que durante o período de análise a grande parte da região nordeste sofreu alguma precipitação.

Observa-se grandes acumulados de precipitação para o período em algumas áreas da região Nordeste. No centro leste da Bahia, o total acumulado de chuva chegou a mais 200 mm no período de influencia da onda frontal sobre esta região. No norte de Sergipe e centro norte de Alagoas constatou-se um acumulado superior a 100 mm o que para o período considerado seco para a região é bastante significativo. Também observa-se acumulados significativos em áreas do sertão da Bahia e também no estado do Ceará.

FIGURA 53 - Precipitação acumulada para o período de 26 a 29 de fevereiro de 2008.



Fonte INPE/CPTEC

5 CONCLUSÕES

Através da análise realizada para o período de 10 anos (2000-2009), verificaram-se 103 influências frontais sobre a Região Nordeste do Brasil. Ficou evidente que o NEB sofre influência de sistemas frontais durante todas as estações do ano.

No entanto, dependendo da época do ano as zonas frontais influenciam o tempo sobre o Nordeste do Brasil de maneira distinta. Para os casos ocorridos durante o inverno austral (com exceção de um caso), e para a grande maioria dos casos do início da estação de transição fria e final da primavera do hemisfério sul, observou-se que a extremidade frontal sobre o NEB, configurou-se como uma banda de nebulosidade pouco ativa (G2). Durante esse período do ano, a atuação das zonas frontais no NEB, restringiu-se com maior frequência ao estado da Bahia, principalmente na parte sul. Sendo encontrados eventos com essa característica em 35 casos do total analisado.

Nos casos verificados durante o verão austral, e para grande parte dos casos ocorridos no início da estação de transição fria e final da primavera no hemisfério sul, evidenciou-se que a intensificação da extremidade sobre o NEB. Dessa forma, organizou fortes processos convectivos sobre grande parte da Região Nordeste do Brasil, configurando eventos pertencentes ao G1, que foram encontrados em 68 casos do total analisados. Verificou-se nesses casos que os efeitos relacionados com a presença da zona frontal foram muito mais abrangentes, influenciando as condições de tempo em praticamente e principalmente em toda costa leste do NEB. Em 11 desses casos, notou-se que as zonas frontais estavam também relacionadas com episódios de ZCAS.

Para formação dos processos convectivos organizados pela extremidade frontal, foi necessária a atuação de diferentes fatores dinâmicos. Pela análise dos casos foram estabelecidos oito fatores relacionados com a intensificação da extremidade frontal sobre a Região Nordeste do Brasil.

Sendo três fatores em níveis inferiores: F1 – Atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); F2 – bifurcação do escoamento sobre o Atlântico e convergência sobre o NEB; F3 - borda oeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul. Três em níveis médios: F4 – convergência e cavado sobre a Região Nordeste do Brasil; F5 – cavado com eixo NW-SE sobre o NEB; F6 – cavado estendendo-se do ciclone posicionado no HN. E dois fatores em altos níveis: F7 – cavado estendendo-se meridionalmente em 200 hPa; F 8 – interação entre a circulação da AB e do VCAN.

Os três fatores F1, F2, F3, em baixos níveis, foram encontrados com frequências semelhantes (45, 50 e 42%), já em médios níveis o F4 esteve presente na grande maioria dos casos (60%), e em altos níveis o F8 foi predominante (75%). Os demais fatores em médios níveis (F5 e F6) e altos níveis (F7) foram encontrados em casos isolados.

A associação dos fatores em várias camadas foi preponderante para a intensificação da extremidade frontal. Por isso, os processos convectivos deram-se principalmente quando estiveram combinados os fatores F4 e F8 conjuntamente com algum fator em baixos níveis (F1, F2, F3). Por conseguinte, o padrão médio de circulação para o desenvolvimento de processos convectivos organizados pela extremidade frontal consiste principalmente em convergência na circulação de médios níveis sobre a Região Nordeste, e forte difluência nas correntes de ar superior devido à interação entre a circulação da AB e a circulação oriunda do VCAN próximo a costa do NEB. O padrão de escoamento médio encontrado para os altos e médios níveis da atmosfera deve estar combinado em níveis inferiores com algum dos fatores F1, F2 ou F3.

A análise termodinâmica para os casos pertencentes aos grupos 1 e 2 mostrou que não há diferenças significativas entre os perfis atmosféricos obtidos para os eventos do G1 e G2. Da mesma forma, os índices de instabilidade analisados (CAPE, K, TT, LI) não mostraram comportamentos muito distintos, quando comparados os valores encontrados para os casos do G1 e G2. Os índices também muitas vezes não denotaram as condições reais de nebulosidade observadas através das imagens de satélite.

Por isso, pode-se determinar que a previsão de processos convectivos sobre o NEB, associados à extremidade frontal, não pode ser realizada somente através da análise de perfis termodinâmicos e de índices de instabilidade. Pois os índices termodinâmicos mostram potencial para o desenvolvimento convectivo em grande parte dos casos estudados, tanto para o G1 quanto para o G2, no entanto esse provável potencial convectivo dado pelos índices termodinâmicos parece não ser suficiente para o desenvolvimento dos processos convectivos, sendo necessária a presença de mecanismos dinâmicos para início desses processos.

Por conseguinte, para tentar realizar-se a previsão de prováveis processos convectivos sobre a Região Nordeste do Brasil, organizado pela extremidade frontal, é necessário determinar a presença de alguns mecanismos ou sistemas dinâmicos que forcem o desenvolvimento desses processos. Portanto, é necessário identificar para fins de previsão desses processos os seguintes mecanismos ou sistemas dinâmicos:

No nível de 200 hPa, é necessária principalmente a presença de um vórtice ciclônico, ou de um cavado a leste da costa do Nordeste, em conjunto com a atuação no centro do país

da AB, a ligação da circulação desses dois sistemas gera forte difluência sobre o NEB, propiciando o desenvolvimento convectivo.

No nível de 500 hPa, é necessário identificar-se principalmente a presença de um vórtice ciclônico a leste/sudeste da Região Sul do Brasil, e também a presença de um sistema de alta pressão sobre o Atlântico, situado aproximadamente na região climatológica da ASAS, a circulação entre esses dois sistemas gera uma região de convergência que se estende sobre o NEB, favorecendo a formação convectiva. Ainda se pode observar com menos frequência a presença de um cavado sobre o NEB o qual se estende de um sistema posicionado a norte da linha do equador.

No nível de 925 hPa, é necessário analisar quatro situações distintas: a) quando há um processo ciclogênico próximo à Região Sudeste do Brasil, é preciso analisar se há interação entre a circulação do ciclone e da ASAS, gerando uma região de confluência sobre o NEB; b) quando se tem o ciclone distante da costa com a extremidade frontal sobre a Região Sudeste, é indispensável observar se há divisão no fluxo de leste próximo à costa do nordeste. Essa configuração gera um cavado que se acopla à extremidade frontal, dando início aos processos convectivos sobre o NEB. Essa caracterização acontece principalmente quando o anticiclone pós-frontal se encontra sobre o Atlântico próximo à costa do sudeste; c) também deve-se observar se a borda oeste da ASAS estende-se em direção à costa leste do NEB, alongando dessa forma a extremidade frontal sobre essa região; d) independente dos demais sistemas, é necessário verificar o posicionamento da ZCIT, principalmente entre os meses de fevereiro e abril. Pois se a ZCIT tiver uma inclinação SW-NE sobre a Região Nordeste, a atuação conjunta do sistema frontal, e da ZCIT gera fortes atividades convectivas sobre grande parte do NEB.

REFERÊNCIAS

- ALGARVE, V. R. Características da circulação atmosférica associadas à ocorrência de geadas no sul do Brasil. 1994. 128p. Dissertação (mestrado em meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.
- ANDRADE, K.M. & CAVALCANTI I, F. A. Climatologia dos sistemas frontais e padrões de comportamento para o verão na América do Sul. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 13, Fortaleza, CD Anais, 2004.
- BARROS, V. R., A. M. GRIMM, E M. E. DOYLE, 2002: Relationship between temperature and circulation in southeastern South America and its influence from El Niño and La Niña events. Journal of the Meteorological Society of Japan, 80, 21-32.
- BJERKNES, J., 1919: On the structure of moving cyclones. Geophys. Publ., 1 (2), 1-8.
- BJERKNES, J., AND H. SOLBERG, 1922: Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. Geophys. publ., 3 (1), 3-18.
- BOSART, L. F., 1998: Observer cyclone life cycles. The life cycles of extratropical cyclones, M. A., Shapiro and S. Granas, eds., in press.
- BOWDITCH, N., American Practical Navigator, An Epitome of Navigation. Defense Mapping Agency Hydrographic Center, 1977.
- BROWING, K. A., 1990: Organization of clouds and precipitation in extratropical cyclones. Extratropical cyclones, the Erik Palmén Memorial Volume, C. W. Newton and E. O. Holopainen, eds., American Meteorological Society., 129-153.
- CARVALHO, A.M. G. Conexões entre a circulação em altitude e a convecção sobre a América do Sul. Dissertação de mestrado em meteorologia, INPE. São José dos Campos-SP, 1989.
- CAVALCANTI & KOUSKY, 2009: Tempo e clima no Brasil, São Paulo. Ed. Oficina de Textos, v. 1, p. 135, 2009.
- CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY V. E. Climatology of South American cold fronts. In: International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 7., Wellington, New Zealand, 2003. Proceedings... New Zealand: American Meteorological Society, 2003. 1 CD-ROM.
- CAVALCANTI, I.F.A. 1996. Episódios El Niño/oscilação Sul durante a década de 1986 a 1996 e suas influências sobre o Brasil. Climanálise 10 anos, CPTec/INPE.
- CAVALCANTI, I.F.A. Casos de intensa precipitação nas regiões Sul e Sudeste do Brasil no período de inverno de 1979 a 1983. São José dos Campos: INPE, 1985. (INPE- 3743-RPE/498).

CITEAU, J.; BERGÉS, J.; DEMARCQ, H.; MAHÉ, G. Position de la zone de convergence a 28 n et température de surface de l'ocean. *Veille climatique satellitaire*, sv (21), p. 3-7, 1988a.

CITEAU, J.; CAMMAS, J. P.; GOURIOU, Y. & GUILLOT, B. (1985). Questions about the itcz migration over the tropical atlantic, sea surface temperature in the gulf of guinea and the flow of senegal river, ccco meeting, rio de janeiro, sept 9-13, 15 p.

CITEAU, J; BERGÉS, J. C.; DEMARCQ, H.; MAHÉ, G., 1988B. The watch of itcz migrations over tropical atlantic as an indicator in drought forecast over sahelian area. *Ocean-atmosphere newsletter*, sv(45):1-3, 1988b.

COELHO, C. A. S. ; UVO, C. B. ; AMBRIZZI, T. . Exploring the impacts of the tropical pacific sst on the precipitation patterns over south america during enso periods. *Theoretical and applied climatology*, austria, v. 71, p. 185-197, 2002.

COELHO, M. S. Estudo da estrutura vertical horizontal da precipitação e da circulação atmosférica na região da zcit. 2002. 160f. Dissertação (mestrado em meteorologia) – inpe, são josé dos campos, 2002.

CRUZ, C. D. Determinação sinótica dos fatores que favorecem as influência frontais sobre o estado de alagoas. 121 p. 2008. (met-ufal-ms-052). Dissertação (mestrado em meteorologia) – universidade federal de alagoas, maceió. 2008.

CRUZ, C. D.; FIGUEIREDO, E. L.; FEDOROVA, N., LEVIT, V., Utilização do campo de advecção de temperatura potencial equivalente para análise de um sistema frontal na região tropical. In: congresso brasileiro de meteorologia, 15, são paulo, cd anais, 2008.

DEFANT, F. & MRTH, HT., meteorology sinoptic, compendium of meteorology, genebra: world meteorological organization, 1978.

FEDOROVA, N. Meteorologia sinótica. Pelotas: ed. Universidade federal de pelotas, v.1, p.259, 1999.

FEDOROVA, N. Meteorologia sinótica. Pelotas: ed. Universidade federal de pelotas, v.2, p.242, 2001.

FEDOROVA, N.; carvalho, m.h. Processos sinóticos em anos de la niña e de el niño. Parte ii: zonas frontais. *Revista brasileira de meteorologia*, v.15, n.2, p. 57-72, 2000.

FERREIRA, N. J., alta da bolívia.iv curso de interpretação de imagens e análises meteorológicas, são josé dos campos, 18p, 1995.

FIGUEROA, N. F., SATYAMURTY, P. AND P. L. SILVA DIAS, 1995. Simulations of the summer circulation over the south american region with an et coordinate model. *J. Atmos. Sci.*,52, 1573-1584.

FIGUEROA, SILVIO NILO. Estudo de sistemas de circulação de verão sobre a américa do sul e suas simulações com modelos numéricos, 1997, 181f. Tese (doutorado em meteorologia) – inpe, são josé dos campos.

- FORTUNE, M.; KOUSKY, v.e. Two severe freezes in brazil: precursors and synoptic evolution. *Monthly weather review*, v.111, n.1, p.181-196, jan. 1983.
- FRANK, N.L. On the energetics of the cold lows. In: symposium on tropical meteorology. *Proceedings...* Boston: american meteorological society, 1970. P.eiv i-eiv 6.
- GAN & SELUCHI, 2009: tempo e clima no brasil, são paulo. Ed. Oficina de textos,v. 1, p. 112, 2009.
- GAN, M. A. Ciclogêneses e ciclones sobre a américa do sul. 1993. 221p.
- GAN, M. A. In: iii curso de interpretação de imagens e análise meteorológica. Universidade do vale do paraíba, capítulo b5, 1-12, 4 a 8 de outubro, 1993.
- GAN, M.A; KOUSKY, V.E, 1982. Estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera nas latitudes subtropicais do atlântico sul e leste do brasil. São josé dos campos, inpe,. (inpe -2579-pre/227)
- GANDU, A. W. E P. L. SILVA DIAS, 1998: impact of tropical heat sources on the south american tropospheric upper circulation and subsidence. *J. Geoph. Res.*, 103 (d6), 6001-6015.
- GARREAUD, R. D. Cold air incursions over subtropical south america: mean structure and dynamics. *Monthly weather review*, v.128, n.7, p. 2544-2559, july 2000.
- GEMIACKI, L. Atuação de sistemas frontais na estação seca do nordeste do brasil. 121 p. 2005. (met-ufal-ms-035). Dissertação (mestrado em meteorologia) – universidade federal de alagoas, maceió. 2005.
- GUTMAN, G. J., SCHWERDTFEGER, W., 1965: the role of latent and sensible heat for the development of a high pressure system over the subtropical andes, in summer, *Jg. Heft* , 18(3), mai., 1965
- HOLTON, J.R. Na introduction to dynamic meteorology.2 ed. Newyork, p. 391, 1979.
- JUSTI, M.G.A.DA SILVA DIAS, M. A. F. A frequência de fenômenos meteorológicos na américa do sul: uma climatologia.anais do xi congresso brasileiro de meteorologia, foz do iguaçu, 2002. Cd-rom.
- KALNAY, E.,KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS,W., deaven, d., gandin, l., iredell,m., saha, s., white, g., woolen, j., zhu, y., chelliah, m., ebisuzaki,w., higgins, w., janowiak,j., mo, k. C., ropelewsky, c., wang, j., leetma, a., reynalds, r., jenne, r.,joseph, d. The nmc/ncar 40-year reanalysis project. *Bulletin of the american meteorology society*, 77, 437-471. 1996.
- KALNAY, K.C.M.O. E PAEGLE, J., 1986 large-amplitude, short-scale stationary rossby waves in the southern hemisphere: observations and mechanistic experiments to determine their origin. *J. Atmos. Sci.*, 43, 252-275.

- KAYANO, M. T.; FERREIRA, N. J. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of northeast brazil during the 1980-1989. *Atmosfera*, 12, n. 2, p. 75-88, 1999.
- KOCH, S. E. & MITCHEM, J. D. 2003. A structured process for prediction of convection associated with split cold fronts. *Bulletin of the american meteorology society*, v. 81 n° 2, p. 174-179.
- KODAMA, Y-M., 1993: large-scale common features of sub-tropical precipitation zones (the baiu frontal zone, the spcz, and the sacz). Part ii: conditions of the circulations for generating the stczs. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71, 581-610.
- KOUSKY, V. E. E M. T. KAYANO. Principal modes of outgoing longwave radiation and 250-mb circulation for the south american sector. *J. Climate*, 7, 1131- 1143, 1994.
- KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the south american sector. *Revista brasileira de meteorologia*, 3, p. 217-231, 1988.
- KOUSKY, V.E. Frontal influences on northeast brasil. *Monthly weather review*, v.107, n.9, p.1140-1153, sept. 1979.
- KOUSKY, V.E.; FERREIRA, N.J. Interdiurnal surface pressure variatons in brazil: their spatial distributions, origins and effects. *Monthly weather review*, v.109, n.9, 1999-2008, sept. 1981.
- KOUSKY, V.E.; GAN, M.A. 1981. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical south atlantic. *Tellus*, 36(6):538-551, dec.
- LEMOS, C. F. & DE CALBETE, N. O. 1996. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987 a 1995. *Climanálise*, ed. 10 anos.
- LICHTENSTEIN, E. Some influences of andes cordillera on the synoptic scale circulation. In: international conference on southern hemisphere meteorology and oceanography, 3., buenos aires, argentina, 1989. *Proceedings...* Buenos aires: american meteorology society, 1989. P.146-148.
- MARENGO, J.; CORNEJO, A.; SATYAMURTY, P.; nobre, c.a.; sea, w. Cold surges in tropical and extratropical south america: the strong event in june 1994.
- MEDINA, M., *meteorologia básica sinóptica*. Madrid, paraninfo,1976.
- NEWTON, C.W., VAN LOON, H., MITCHEL JR., J. M., TALJAARD, J.J., SASAMORI, T., LONDON,J., HOYT, D. V., LABITZKE, K.1972, *meteorology of the southern hemisphere*, v.13,n 35.
- OLIVEIRA, A. S., 1986. Interações sobre sistemas frontais na américa do sul e a convecção da amazônia,dissertação de mestrado,inpe.
- OLIVEIRA, L. L.; VIANELLO, R.L.;FERREIRA, N.J. *Meteorologia fundamental*. Rio grande do sul, erechim/rs: edinfapes, 2001.

PALMÉN, E. & NEWTON, C. W. Atmospheric circulations systems. new york, academic press, 1969.

PALMÉN, E. Origin and structure of high- level cyclones south of the maximum westerlies. *Tellus*, 1:22-31, 1949.

PALMER, C. E. 1951. On high-level cyclones originating in the tropics. *Transactions of american geographycs union*, 32 (5): 683- 695.

PARMENTER, F.C. A southern hemisphere cold frost passage at the equador. *Bulletin american meteorological society*, v.57, n.12, p.1435-1440, 1976.

PEAGLE, J. American low-level jets in observation and theory: the allproject. In: sixty int. Conf. On southern hemisphere meteorology and oceanography. 2000. Santiago, chile, amer. Meteor. Soc., p.161-162, 2000.

PETTERSEN, S., weather analysis and forecasting: motion and motion systems. New york, macgraw-hill, 1956. V. 1.

QUADRO M. F. L. ET AL. Climatologia de precipitação e temperatura. *Climanálise especial de 10 anos.* . V.1, n.5, p.23-31, 1996.

QUADRO, M.F.L. Estudo de episódios de zonas de convergência do atlântico sul (zcas) sobre a américa do sul. 1994. 97p. Dissertação (mestrado em meteorologia) – instituto nacional de pesquisas espaciais, são josé dos campos, 1994.

REEDER, M. J.; SMITH, R. K. CHAPTER 5: mesoscale meteorology. In: karoly, d. J. & vicent, d. G. *Meteorology of the south hemisphere. Meteorological monographs.*, 27, n.49, p. 201-243, 1998.

RIVERO, S. N. F., 1991: simulações da circulação atmosférica no verão sobre a américa do sul com a presença da cordilheira dos andes usando coordenadas eta. *Inpe-5269-tdi/445*, 110 p.

SATYAMURTY, P.; nobre, c. A.; silva dias, p. L. *Topics: south america.*

SAUCIER, W.,J., principle of meteorology analysis. University of chigago. 1955.

SELUCHI, M. E., SAULO, A. C., NICOLINI, M., SATYAMURTY, P. 2003. The northwestern argentinean low: a study of two typical events. *Monthly weather review*, v. 131, 2361-2378.

SELUCHI, M.E.; SERAFINI, Y.V.; LE TREUT, H. The impact of the andes on transient atmospheric systems: a comparision between observations and gcm results. *Monthly weather review*, v. 126, n. 4, p. 895-912, apr. 1998.

SHULTZ, D.M.,KEYSER, D., BOSART, L. F. 1998. The effect of large -scale flow on low-level frontal structure and evolution in midlatitude cyclones. *Monthly weather review*,v. 126 n° 7, p. 1767-1791.

SIGNORINI, E., 2001. Processos sinóticos associados com a intensificação da extremidade da frente fria no sul do Brasil, dissertação de mestrado, UFPEL.

SIQUEIRA, J.R.; MACHADO, L.A.T. Influence of the frontal systems on the day-to-day convection variability over South America. *Journal of Climate*, v. 17, p. 1754-1766. 2004.

SMIGIELSKY, F. J., AND H. M. MOGIL, 1995: a systemic satellite approach for estimating central surface pressures of mid-latitude cold season oceanic cyclones. *Tellus*, 47a, 876-891.

SMITH, R. K., REEDER, M. TAPPER, N.J., CHRISTIE, D.R. 1995. Central Australian cold fronts., *Monthly Weather Review*, v. 123, p. 16- 38.

SOUZA, A. S. & NECHET, D. Influência de sistema frontal na Amazônia oriental: estudo de caso. in: congresso brasileiro de meteorologia, 13, Fortaleza, CD Anais, 2004.

SUTCLIFFE R. C.; 'A contribution to the problem of development', *QJRMets/RMets*, 73, 1947.

TALJAARD, J.J. Topics: synoptic meteorology of the southern hemisphere. *Meteorological Monographs*, v.13, n.35, p.129-213, 1972.

UVO, C.B. Dissertação de mestrado: a zona de convergência intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da região norte do Nordeste brasileiro, 1989.

VALVERDE RAMÍREZ, M.C. Padrões climáticos dos vórtices ciclônicos em altos níveis no Nordeste do Brasil". Dissertação de mestrado do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE-6408-TDI/618). São José dos Campos, p. 132, 1996.

VAREJÃO- SILVA, M. A., *Meteorologia e climatologia*. 2ª edição. Brasília: INMET, gráfica e editora Pax, 2001.

VAREJÃO- SILVA, M. A., *Meteorologia e climatologia*. Versão digital. Recife. 2001.

VIRJI, H., 1981: a preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds, *Monthly Weather Review*, vol 109.

WALISER D. E. GAUTIER C. A satellite-derived climatology of the ITCZ *Journal of Climate*, v.6, n.11, p.2162-2174, nov. 1993.