



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

**ESTUDOS DE CASOS DE FRENTES DE VERÃO: ANÁLISES SINÓTICAS E
TERMODINÂMICAS.**

JULIA AMANDA NANINI

Campina Grande – PB

2019

JULIA AMANDA NANINI

**ESTUDOS DE CASOS DE FRENTES DE VERÃO: ANÁLISES SINÓTICAS E
TERMODINÂMICAS.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito final à obtenção do Título de Mestre em Meteorologia.

Orientadores: Dr. Enio Pereira de Souza

Dra. Josefina Moraes Arraut

Campina Grande – PB

2019

N182e Nanini, Julia Amanda.
Estudos de casos de frentes de verão: análises sinóticas e termodinâmicas / Julia Amanda Nanini. – Campina Grande, 2019.
122 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Enio Pereira de Souza, Prof. ^a Dr.^a Josefina Moraes Arraut".

Referências.

1. Incursão de ar frio. 2. Sistemas frontais. 3. Magnitude do gradiente de umidade. 4. Convecção. 5. Inibição convectiva. I. Souza, Enio Pereira de. II. Arraut, Josefina Moraes. III. Título.

CDU 551.58(043)

JÚLIA AMANDA NANINI

ESTUDOS DE CASOS DE FRENTES DE VERÃO: ANÁLISES SINÓTICAS E
TERMODINÂMICAS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 25/02/2019

BANCA EXAMINADORA



PROF. DR. EMÍLIO PEREIRA DE SOUZA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. JOSEFINA MORAES ARRAUT
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. SANDRA ISAY SAAD
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Dr. KLEBER RENATO DA PAIXÃO ATAÍDE
Instituto Nacional de Meteorologia

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado essa oportunidade e por ter me ajudado a enfrentar todas as etapas desse caminho de dois anos.

Agradeço aos meus pais, Flávia e Alexandre pelo apoio dado para seguir em frente com os estudos e me ajudarem a superar a distância que foi necessária para que isso fosse possível, aos meus irmãos, Luiza e Alexandre, por se fazerem tão presente mesmo estando tão longe amenizando a saudade, assim como o restante da minha família

Agradeço ao meu namorado Felipe por ter se mudado comigo, deixando tudo para trás, para que eu tivesse a companhia e amor no decorrer dos estudos e pela compreensão nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao meu orientador professor Ênio, por ter dado oportunidade de trabalharmos juntos e por todo o conhecimento compartilhado e minha coorientadora professora Josefina, por ter compartilhado todo o seu conhecimento, por ter tido paciência com as minhas dificuldades, por acreditar no meu potencial e pela amizade.

Agradeço aos membros da banca, professora Sandra, professor David e ao pesquisador Kleber, por terem aceitado meu convite e terem lido e analisado meu trabalho com tanta atenção e comprometimento, e também a todos os professores que no decorrer do mestrado me ajudaram, com ênfase para os professores Ivaldo, Bernardo e Magaly por serem tão atenciosos comigo.

Agradeço a CAPES por ter concedido a bolsa de estudos. Agradeço ao ECMWF e as demais fontes de dados utilizados nesse trabalho.

Agradeço a Arilene e ao Danilo pelos serviços prestados durante esses dois anos e também pela amizade e a todo o pessoal da UFCG/UACA/PPGMET.

Agradeço a todos os meus amigos por terem deixado essa trajetória mais leve e divertida. Obrigada Marley, Victoria, Alanne, Felipe, Carol, Carla, Silvia, Mauricio. Os dois últimos ainda mais por serem meus colegas de sala e me ajudarem muito com minhas dificuldades e dúvidas. E tantos outros colegas que passaram por minha vida nesses últimos dois anos.

Agradeço ao meu filho de quatro patas Jack, por ter dado tantos momentos de felicidades e carinho.

Agradeço a minha amiga Josivanda que me ajudou muito no começo da mudança para Campina Grande, sempre atenciosa, disponível e preocupada.

Todos foram muito importantes para o sucesso dessa jornada. Muito obrigada.

*“Não sou nada.
Nunca serei nada, não posso querer ser nada.
À parte isso, tenho em mim todos os sonhos do mundo (...).”*

Fernando Pessoa

RESUMO

Cinco diferentes casos de distúrbios sinóticos no continente sul-americano foram considerados neste estudo. A análise aplicada a eles usa uma nova abordagem, que combina os pontos de vista sinótico/dinâmico e termodinâmico, investigando o efeito de movimentos aéreos em escala sinótica sobre a instabilidade atmosférica. Incurções frias foram um dos assuntos importantes dos estudos. Eles foram o principal distúrbio sinótico em dois dos estudos de caso. Comportamentos contrastantes foram observados entre as magnitudes da temperatura horizontal e os gradientes de umidade. Enquanto o gradiente de temperatura enfraquece o gradiente de umidade se intensifica. Com base nessa observação, parece apropriado considerar que as Incurções de Ar Frio são frentes de umidade. Além disso, observou-se que os casos do estudo indicaram que existe uma distinção entre as massas de ar tropicais, subtropicais e extratropicais. Essa distinção é representada pelos valores de Energia Potencial Disponível por Convecção (CAPE). Por fim, notou-se que os movimentos da Escala Sinótica afetam a distribuição espacial do CAPE tanto na meso escala quanto na escala subsinótica.

Palavras-chave: Incurção de ar frio; sistemas frontais; magnitude do gradiente de umidade; convecção; inibição convectiva.

ABSTRACT

Five different cases of synoptic disturbances in the South American continent were considered in this study. The analysis applied to them uses a novel approach, which combines both the synoptic/dynamic and the thermodynamic points of view, investigating the effect of synoptic scale air movements over atmospheric instability. Cold incursions were one of the studies' important subject matters. They were the main synoptic disturbance in two of the case studies. Contrasting behaviors were noted between the magnitudes of the horizontal temperature and moisture gradients. While the temperature gradient weakens the moisture, gradient intensifies. Based on this observation it seems appropriate to consider that Cool air Incursions are moisture fronts. In addition to this it was seen the study cases have indicated there to be a distinction between the tropical, subtropical and extratropical air masses. This distinction is represented by the values of Convective Available Potential Energy (CAPE). Lastly, it was noted that Synoptic Scale air movements affect the spatial distribution of CAPE both in the meso and in the subsynoptic scales.

Keywords: Ingress of cold air; frontal systems; magnitude of the moisture gradient; convection; convective inhibition

.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO.....	19
2. OBJETIVOS.....	22
2.1 Objetivo geral.....	22
2.2 Objetivos específicos.....	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1 Incursão de ar frio.....	23
3.2 Mecanismos de frontogênese.....	26
3.3 Frentes de verão	30
3.4 Zona de Convergência do Atlântico Sul.....	32
3.5 Ciclos diurnos da Baixa do Noroeste da Argentina	35
4. DADOS E METODOLOGIA.....	37
4.1 Dados.....	37
4.2 Metodologia.....	49
4.2.1 Calculo de variáveis.....	49
4.2.1.1 Temperatura potencial.....	49
4.2.1.2 Temperatura potencial equivalente.....	50
4.2.1.3 Temperatura potencial equivalente de saturação.....	50
4.2.1.4 Frontogênese.....	51
4.2.1.5 Imagem proporcional ao CAPE e CINE.....	51
5. RESULTADOS.....	53
5.1 Caso híbrido (7 a 9 de abril de 2014).....	53
5.2 Incursão – período de 7 a 10 de janeiro de 2011.....	68

5.3 Incursão – período de 19 a 21 de janeiro de 2011.....	81
5.4 Casos relacionados aos estudos de Rocha (2018).....	94
5.4.1 BNOA caso 1: forte ciclo diurno.	94
5.4.2 BNOA caso 2: fraco ciclo diurno; seguido por excursão de ar frio.....	107
6. CONCLUSÃO.....	118
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS

AMS	América do Sul
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
AVA	Advecção de vorticidade anticiclónica
BNOA	Baixa do noroeste da Argentina
CAPE	Convective Available Potential Energy
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CMN	Centro meteorológico nacional
CINE	Convective INhibition Energy
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ROL	Radiação de Onda Longa
SA	Sela da Argentina
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCPS	Zona de Convergência do Pacífico Sul
ZFB	Zona Frontal de Baixo
ZFP	Zona Frontal Polar
ZFS	Zona Frontal Subtropical
ZPS	Zona de Precipitação Subtropical

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Exemplo de avanço de frente fria desde a formação até a dissipação. As posições frontais dia e hora estão escritas na extremidade esquerda da frente, com avanços a cada 12 horas. Fonte: FORTUNE & KOUSKY (1983), adaptado.....19
- Figura 2: Número médio anual de passagens de frentes frias durante o período de 1979 a 2005. Áreas com pressão menor que 925hPa nos dados das reanálises CDAS são mascaradas. Fonte: CAVALCANTI E KOUSKY (2009).....20
- Figura 3: Campo médio da pressão ao nível do mar (hPa, intervalo 2 hPa) obtida a partir das reanálises do modelo Eta/CPTEC para os meses de verão (dezembro a janeiro) do período 2000-2004 e a localização da Baixa do Noroeste Argentino (BNOA). Os tons de cinza representam a altura (m) da topografia. Fonte: SELUCHI E GARREAUD (2012), adaptado.....24
- Figura 4: Modelo conceitual de incursões de ar frio da América do Sul. Setas grossas escuras indicam ventos de baixos níveis e frios, setas claras indicam ventos de altos níveis e quentes. Fonte: GARREAUD (2000), adaptado.....25
- Figura 5: Função frontogenética climatológica anual – 1975 a 1980 em 850 hPa, onde as linhas contínuas (tracejadas) representam frontogênese (frontólise). Fonte: SATYAMURTY E MATTOS (1989), adaptado.....27
- Figura 6: Climatologia da frontogênese em temperatura potencial equivalente (K/100 km/dia) a 850 hPa. A frontogênese total FG é a soma dos quatro termos FG1, FG2, FG3 e FG4, calculados como Ninomya (1984) propôs. Fonte: ARRAUT e BARBOSA, (2009).....28
- Figura 7: A frente como uma descontinuidade na densidade ρ (linha contínua) e temperatura T (linha tracejada). Fonte: BLUESTAIN, (1986) in BLUESTEIN, (1993), adaptado.....29
- Figura 8: Descontinuidade da temperatura potencial. Fonte: Satyamurty, (2004), adaptada.....29
- Figura 9: Representação da Sela da Argentina. Língua de baixa pressão. Campo de altura geopotencial a 850hPa. Fonte: Arraut, (2008).....31
- Figura 10: Relação entre a orientação relativa do eixo de dilatação e as isotermas de temperatura potencial representadas pelas linhas tracejadas. θ representa o ângulo entre as isotermas e o eixo de dilatação. (Esquerda) indica frontogênese, ângulo entre 0° e 45° . (Direita) indica frontólise, ângulo entre 45° e 90° . Fonte: BLUESTEIN (1986. In, BLUESTEIN 1993), adaptado.....31
- Figura 11: (a) Média das distribuições de radiação de onda longa (OLR) para os verões NH (Jun-Ago) e (b) para os verões SH (Dez-Mar) entre 1979 e 1986. O intervalo de contorno é de 20 Wm^{-2} e o sombreado de espessura grossa (fina) indica que a OLR é menor que 220 Wm^{-2} (240 Wm^{-2}). Fonte: KODAMA, (1992).....34

Figura 12: Anomalia de precipitação acumulada (<i>mm/mês</i>) para o verão (de dezembro 2015 a março de 2016), a partir de dados do TRMM. O retângulo vermelho destaca o recorte feito da região de estudo. Fonte: Rocha (2018).....	36
Figura 13: Imagens de satélite GOES, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 05Z45 (a), 11Z45 (b), 17Z45 (c), 23Z45 (d) do dia 07 abril de 2014 e 5Z45 (e), 11Z45 (f) do dia 08 de abril de 2014. Fonte: CPTEC/INPE (2019).....	39
Figura 13 continuação: Imagens de satélite GOES, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 17Z45 (g), 23Z45 (h) do dia 08 de abril de 2014, 05Z45 (i), 11Z45 (j), 17Z45 (k) e 23Z45 (l) do dia 09 de abril de 2014. Fonte: CPTEC/INPE (2019).....	40
Figura 14: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 18Z00 (a) do dia 07 de janeiro de 2011, 00Z00 (b), 06Z00 (c), 12Z00 (d), 18Z00 (f) do dia 08 de janeiro de 2011, 00Z00 (g) do dia 09 abril de 2011. Fonte: CPTEC/INPE (2019).....	41
Figura 14 continuação: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 06Z00 (g), 12Z00 (h), 18Z00 (i) do dia 09 de janeiro de 2011, 00Z00 (j), 06Z00 (k) e 12Z00 (l) do dia 10 de janeiro de 2011. Fonte: CPTEC/INPE (2019).....	42
Figura 15: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 00Z00 (a), 06Z00 (b), 12Z00 (c), 18Z00 (d) do dia 19 de janeiro de 2011, 00Z00 (e), 06Z00 (f), do dia 20 de janeiro de 2011. Fonte: CPTEC/INPE (2019).....	43
Figura 15 continuação: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 12Z00 (g), 18Z00 (h) do dia 20 de janeiro de 2011, 00Z00 (i), 06Z00 (j) 12Z00 (k), 18Z00 (l), do dia 21 de janeiro de 2011. Fonte: CPTEC/INPE (2019).....	44
Figura 16: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 18Z00 (a) do dia 2 de janeiro de 2016, 00Z00 (b), 06Z00 (c), 12Z00 (d) e 18Z00 (e) do dia 3 de janeiro de 2016, e 00Z00 (f) do dia 04 de janeiro de 2016. Fonte: CPTEC/INPE (2019).....	45
Figura 16 continuação: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 06Z00 (g), 12Z00 (h), 18Z00 (i) do dia 04 de janeiro de 2016, 00Z00 (j), 06Z00 (k), 12Z00 (l) do dia 05 de janeiro de 2016. Fonte: CPTEC/INPE (2019).....	46
Figura 17: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 18Z00 (a) do dia 23 de janeiro de 2016, 00Z00 (b), 06Z00 (c), 12Z00 (d), 18Z00 (e), do dia 24 de janeiro de 2016, 00Z00 (f) do dia 25 de janeiro de 2016. Fonte: CPTEC/INPE (2019).....	47
Figura 17 continuação: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 06Z00 (g), 12Z00 (h), 18Z00 (i), do dia 25 de janeiro de 2016, 00Z00 (j), 06Z00 (k), 12Z00 (l) do dia 26 de janeiro de 2016. Fonte: CPTEC/INPE (2019)	48
Figura 18: Exemplo de gráfico SkewT-Log p. Fonte: Notas de aula. SOUZA (2015) adaptado.....	52

Figura 19: Temperatura em °C (cores), vento em m/s (setas) e geopotencial (contornos). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	55
Figura 19 continuação: Temperatura em °C (cores), vento m/s (setas) e geopotencial (contornos). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autor.....	56
Figura 20: Umidade específica em g/Kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora	57
Figura 20 continuação: Umidade específica g/Kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	58
Figura 21: Magnitude do gradiente de temperatura em °C/100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	59
Figura 21 continuação: Magnitude do gradiente de temperatura °C/100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	60
Figura 22: Magnitude do gradiente de umidade g/Kg*100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte:Autora.....	61
Figura 22 continuação: Magnitude do gradiente de umidade g/Kg*100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	62
Figura 23: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	63
Figura 23 continuação: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	64
Figura 24: a) Frontogênese por deformação em temperatura potencial equivalente (K/100 km*dia). b) convergência do vento (valores negativos) para 925hPA c) Perfil de θ d) perfil de θ_e e) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). f) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de 58°O, e para 06Z do dia 8/04/2014. Fonte: Autora.....	65
Figura 25: a) Frontogênese por deformação em temperatura potencial equivalente (K/100 km*dia). b) convergência do vento (valores negativos) para 925hPA c) Perfil de θ d) perfil de θ_e e) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). f) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de 58°O, e para 12Z do dia 08/04/2014. Fonte: autora.....	66
Figura 26: Temperatura em °C (cores), vento em m/s (setas) e geopotencial (contornos). Em 925 hPa. A cada 6 horas.Fonte:Autora.....	69
Figura 26 continuação: Temperatura em °C (cores), vento em m/s (setas) e geopotencial (contornos). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	70

Figura 27: Umidade específica em g/Kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	71
Figura 27 continuação: Umidade específica em g/Kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	72
Figura 28: Magnitude do gradiente de temperatura °C/100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	73
Figura 28 continuação: Magnitude do gradiente de temperatura °C/100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	74
Figura 29: Magnitude do gradiente de umidade em g/Kg*100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora	75
Figura 29 continuação: Magnitude do gradiente de umidade em g/Kg*100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	76
Figura 30: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	77
Figura 30 continuação: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	78
Figura 31: a) Frontogênese por deformação em temperatura potencial equivalente (K/100 km*dia). b) convergência do vento (valores negativos) para 925hPa c) Perfil de θ d) perfil de θ_e e) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). f) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de 62°O, e para 06Z de 10/01/2011. Fonte: Autora.....	79
Figura 32: Temperatura em °C (cores), vento em m/s (setas) e geopotencial (contornos). Em 925hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	82
Figura 32 continuação: Temperatura em °C (cores) , vento (setas) e geopotencial (contornos).. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	83
Figura 33: Umidade específica em mm (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	84
Figura 33 continuação: Umidade específica em mm (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	85
Figura 34: Magnitude do gradiente de temperatura em °C/100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	86
Figura 34 continuação: Magnitude do gradiente de temperatura em °C/100Km.. Em 925hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	87
Figura 35: Magnitude do gradiente de umidade em g/Kg*100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	88

Figura 35 continuação: Magnitude do gradiente de umidade em g/Kg*100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	89
Figura 36: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	90
Figura 36 continuação: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	91
Figura 37: a) Frontogênese por deformação em temperatura potencial equivalente (K/100 km*dia). b) convergência do vento (valores negativos) para 925hPA c) Perfil de θ d) perfil de θ_e e) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). f) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de 65°O, e para 12Z do dia 20/01/2011. Fonte: autora.....	92
Figura 38: Temperatura em °C (cores), vento em m/s (setas) e geopotencial (contorno). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	95
Figura 38 continuação: Temperatura em °C (cores) e vento em m/s (setas) e geopotencial. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	96
Figura 39: Umidade específica em g/Kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	97
Figura 39 continuação: Umidade específica em g/Kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	98
Figura 40: Magnitude do gradiente de temperatura em °C/100km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	99
Figura 40 continuação: Magnitude do gradiente de temperatura em °C/100Km. Em 950 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	100
Figura 41: Magnitude do gradiente de umidade em g/Kg*100Km. Em 950 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	101
Figura 41 continuação: Magnitude do gradiente de umidade em g/Kg*100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	102
Figura 42: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	103
Figura 42 continuação: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	104
Figura 43: a) Frontogênese por deformação em temperatura potencial equivalente (K/100 km*dia). b) Convergência do vento (valores negativos) para 925hPA c) Perfil de θ d) perfil de θ_e e) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). f) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de 65°O, e para 12Z do dia 03/01/2016. Fonte: Autora.....	105

Figura 44: Temperatura em °C (cores) , vento em m/s (setas) e geopotencial (contorno). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	107
Figura 44 continuação: Temperatura em °C (cores) vento em m/s (setas) e geopotencial (contorno) Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	108
Figura 45: Umidade específica em g/Kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	109
Figura 45 continuação: Umidade específica em g/Kg(cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	110
Figura 46: Magnitude do gradiente de temperatura °C/100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	111
Figura 46 continuação: Magnitude do gradiente de temperatura °C/100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	112
Figura 47: Magnitude do gradiente de umidade g/Kg*100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	113
Figura 47 continuação: Magnitude do gradiente de umidade g/Kg*100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	114
Figura 48: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	116
Figura 48 continuação: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora.....	117
Figura 49: a) Frontogênese por deformação em temperatura potencial equivalente (K/100 km*dia). b) Convergência do para 925hPA c) Perfil de θ d) perfil de θ_e e) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). f) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de 65°O, e para 06Z do dia 24/01/2016. Fonte: Autora.....	118

1 – INTRODUÇÃO

Frentes frias e as incursões de ar frio têm um papel importante no tempo e no clima do continente sul-americano.

Os sistemas frontais acontecem durante todo o ano, porém com maior intensidade no inverno (TALJAARD, 1972; FORTUNE e KOUSKY, 1983; OLIVEIRA 1986), se deslocam de sudoeste para nordeste, varrendo a extensão territorial do leste da Cordilheira do Andes até o Oceano Atlântico, diagonalmente, com alcance meridional variável podendo atingir até as menores latitudes como se pode ver na Figura 1. Porém, os casos se concentram no Sul e Sudeste do Brasil e centro da Argentina, como foi visto por Taljaard (1972) e como mostrado na Figura 2.

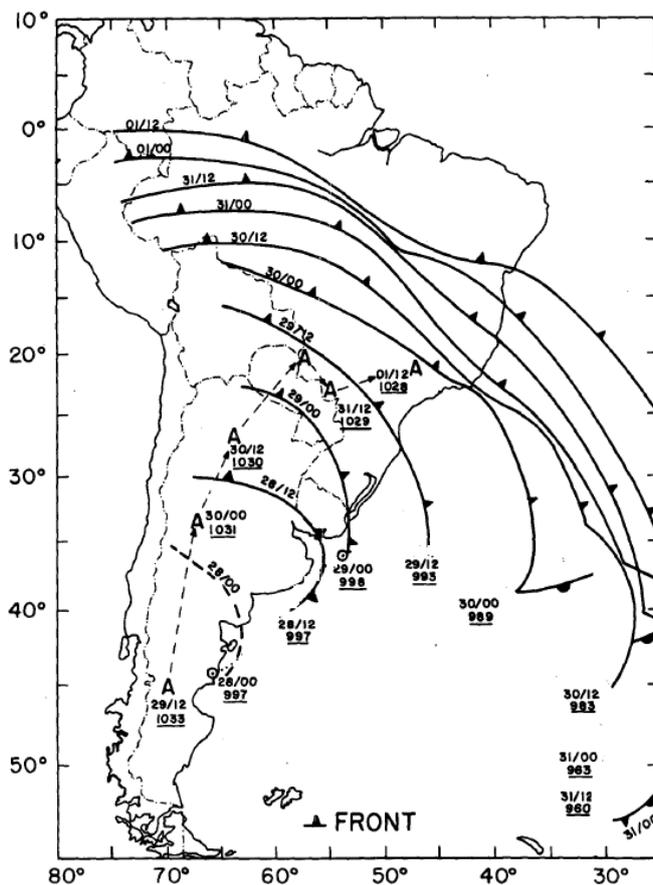


Figura 1. Exemplo de avanço de frente fria desde a formação até a dissipação. Dia e hora escrito na extremidade esquerda da frente, com avanços a cada 12 horas. Fonte: FORTUNE & KOUSKY (1983), adaptado.

As frentes de verão são produtoras de chuvas, contribuindo para os totais sazonais de precipitação tanto no verão quanto no inverno nos subtropicais e extratropicais. Nos casos de verão, por promoverem as condições de convergência, as frentes frias têm como principal efeito as chuvas intensas (GARREAUD e WALLACE, 1998), pois disparam a convecção (KOUSKY, 1979). Essas bandas de convecção geralmente estão dispostas a norte da frente acompanhando-a, chegando a atingir a Amazônia e até mesmo a costa do Nordeste do Brasil, em eventos extremos.

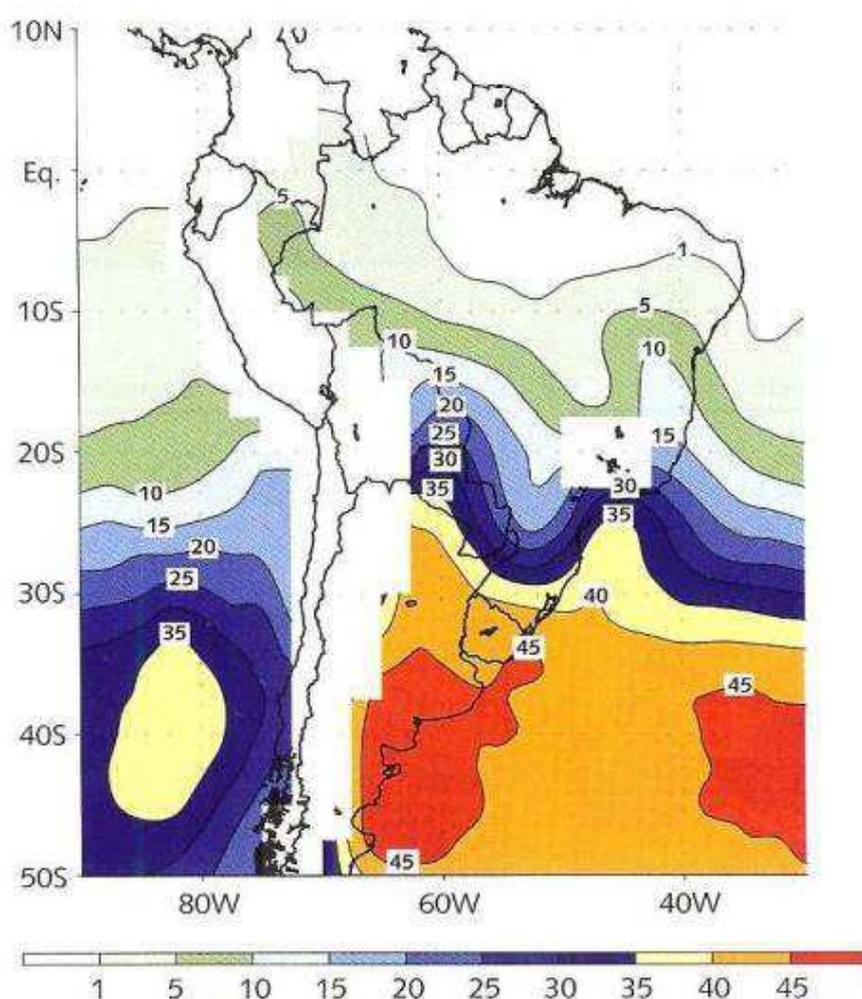


Figura 2: Número médio anual de passagens de frentes frias durante o período de 1979 a 2005. Áreas com pressão menor que 925hP. Fonte: CAVALCANTI E KOUSKY (2009).

Seluchi et. al (2017) recentemente estudaram casos de frentes frias relacionadas a chuvas intensas no sul do Brasil, mais precisamente no leste do estado de Santa Catarina que sofre com desastres naturais causados por alto volume pluviométrico.

Enquanto no verão as frentes e incursões são mais chuvosas, no inverno, a estação mais seca, estes sistemas são os principais responsáveis pela ocorrência das poucas precipitações na América do Sul (AMS). A alta pluviosidade dos subtropicais sul-americanos possibilita que a região tenha sido originalmente coberta por Mata Atlântica, e que hoje seja considerado o “celeiro do continente” destacando-se pela produção de grãos, além de ser um grande centro de geração de energia por hidrelétricas.

Além do seu papel na produção das chuvas de estação seca, que garantem a sobrevivência de espécies vegetais e o abastecimento continuado das cidades, as frentes de inverno também introduzem grande variabilidade intra-sazonal na temperatura. Muitas vezes causam quedas bruscas, que podem ser acentuadas, levando a geadas nos casos extremos, gerando grande ameaça às safras agrícolas. Episódios de inverno, com queda acentuada de temperatura e por vezes chegando ao extremo das geadas, foram estudados por Fortune e Kousky (1983), Garreaud (2000) e Marengo et al. (1997). Estes últimos relacionaram casos extremos de frentes frias a perdas na produção de café no sudeste do Brasil.

O tema incursão de ar frio foi cunhado por Garreaud (et al. 1998; 2000 e 2001) para diferenciar das frentes frias, pois nas incursões a transição entre as massas de ar fria e quente é menos abrupta do que nas frentes. Em outras palavras, o gradiente de temperatura é menos acentuado nas bordas de ar frio. No entanto as incursões de ar frio de verão podem ser extremamente chuvosas. A primeira vista isto pode ser contraditório, já que a acentuada variação horizontal de temperatura que é típico das frentes constitui um mecanismo de forçamento da convecção.

Um olhar abrangendo tanto a termodinâmica quanto a sinótica e a dinâmica gera um estudo mais completo do sistema meteorológico e seus desdobramentos/consequências, assim criando uma base conceitual mais forte e completa para embasar outros futuros estudos e se desenvolvido um padrão para a identificação dos sistemas pode auxiliar também a previsão do tempo. A autora desconhece até o momento a existência de estudos sistemáticos sobre as características termodinâmicas das frentes frias de verão. Avançar o conhecimento acerca desse tema é o que motiva este trabalho.

2 - OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Procurar uma classificação para diferentes casos de frentes frias e incursões de ar frio de verão do ponto de vista sinótico e termodinâmico.

2.2. Objetivos específicos

Analisar os diferentes sistemas mencionados acima levando em consideração a intensidade dos seus gradientes horizontais de umidade e temperatura.

Considerar a estrutura vertical desses sistemas fazendo análises de temperatura potencial, temperatura potencial equivalente e temperatura potencial equivalente de saturação. Com isso tentar responder as seguintes perguntas:

- Existe uma categoria de frentes, que poderiam ser chamadas de subtropical, caracterizada por forte gradiente de umidade?
- As incursões de ar frio são tipicamente frentes subtropicais ou frentes em umidade?
- É possível diferenciar as massas de ar tropical/subtropical da extratropical com base na presença ou ausência de Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE, sigla em inglês)?

3 - REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Incursões de ar frio

Os eventos de incursões de ar frio na América do Sul acontecem a leste da Cordilheira dos Andes e duram aproximadamente de 3 a 5 dias, apresentam bandas de convecção cuja extensão pode superar 1000 ou 2000 quilômetros e desempenham um papel importante no tempo e no clima da AS. Com frequência, estas incursões têm um alcance meridional considerável, constituindo um importante mecanismo de interação entre as latitudes tropicais e extratropicais (GARREAUD e WALLACE, 1998).

Incursões de ar frio podem gerar efeitos bastante acentuados por onde passam. Precedidas ou não pelas frentes frias, as incursões podem chegar até a bacia Amazônica. O ar frio e seco advindo dos polos pode ocasionar, nos eventos mais extremos, geadas/friagens e fortes precipitações dependendo da estação do ano.

As geadas acontecem principalmente com as incursões do inverno austral, nas regiões subtropicais da AS. Há também incidência de casos no final da primavera e no outono. As geadas têm o potencial de causar graves danos para as atividades agrícolas. As friagens são aquelas incursões de ar frio que atingem baixas latitudes, e em alguns casos atravessam a linha do equador (PARMENTER, 1976), além de causar danos a agricultores, podem chegar a causar mortes por hipotermia em comunidades não preparadas para a queda de temperatura (MYRES, 1964; MARENGO et. al. 1997). Estudos como Fortune e Kousky (1983), Marengo et. al (1997) mostram os efeitos das geadas em diversas localidades do Brasil. No verão austral as incursões de ar frio, assim como as frentes frias, têm maior influência sobre a precipitação do que sobre a própria temperatura, causando aproximadamente 50% das chuvas totais da região subtropical, como estimaram Garreaud e Wallace (1998).

Garreaud e Wallace (1998) e Garreaud (2000) estudaram incursões de ar frio no verão austral e destacaram a importância dos Andes para a sua evolução. Na fase preliminar destas incursões, a acentuação da Baixa do Noroeste Argentino (BNOA), apresentada na Figura 3, aproximadamente dois dias antes da incursão promove o transporte de ar Amazônico para o sul, inundando os subtrópicos com umidade. Esta umidade alimenta a precipitação quando o ar frio avança para o norte. Os autores analisaram o desenvolvimento das incursões em todos os seus estágios, do preliminar (A Dia -1) até o maduro (C Dia +1) (Figura 4). Foram selecionadas para os compostos as incursões com precipitações intensas ocorrendo simultaneamente em dois pontos: (20°S 60°O) e (25°S 55°O) . Num primeiro momento, o

gradiente de geopotencial entre uma crista transiente e uma baixa transiente a sudeste acelera ventos de sudoeste vindos dos extras trópicos. Este ar executa um semi-giro anticiclônico, forçado pela inversão na componente meridional do gradiente de geopotencial, que passa a ser de norte para sul na presença da crista transiente. A Cordilheira dos Andes exerce um efeito de barreira para o vento de leste, fazendo com que esse ar se acumule, o que intensifica o gradiente zonal de pressão a leste das encostas. Esta força contrabalança a componente zonal da Força de Coriolis, possibilitando que o ar na extremidade da alta transiente avance para norte, na direção da força de gradiente de pressão. Esta sequência de processos está ilustrada na Figura 4, adaptada de Garreaud (2000).

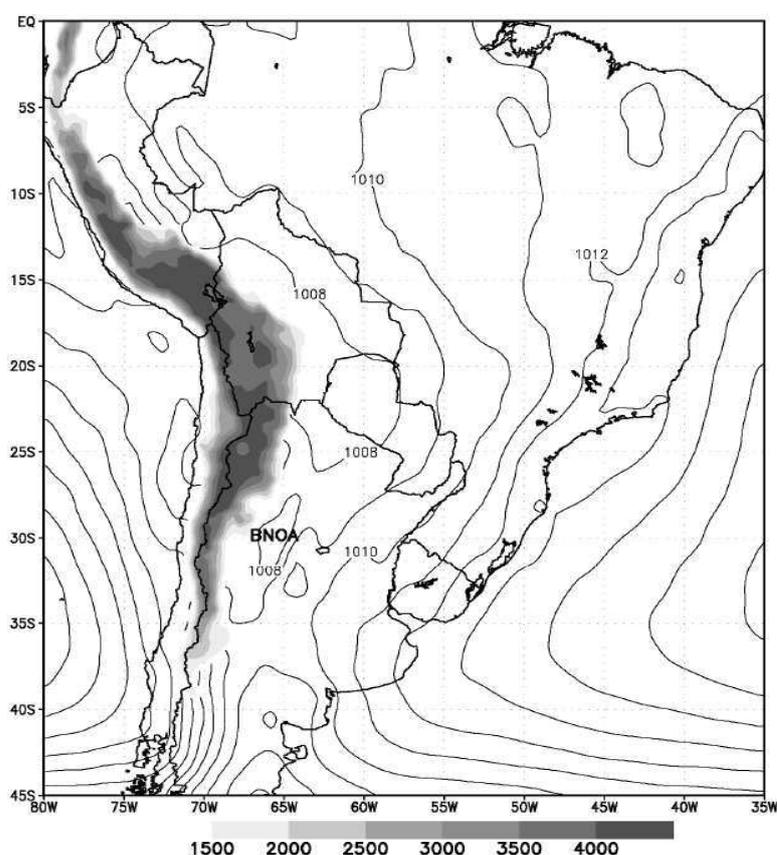


Figura 3: Campo médio da pressão ao nível do mar (hPa, intervalo 2 hPa) obtida a partir das reanálises do modelo Eta/CPTEC para os meses de verão (dezembro a janeiro) do período 2000-2004 e a localização da Baixa do Noroeste Argentino (BNOA). Os tons de cinza representam a altura (m) da topografia. Fonte: SELUCHI E GARREAUD (2012), adaptado.

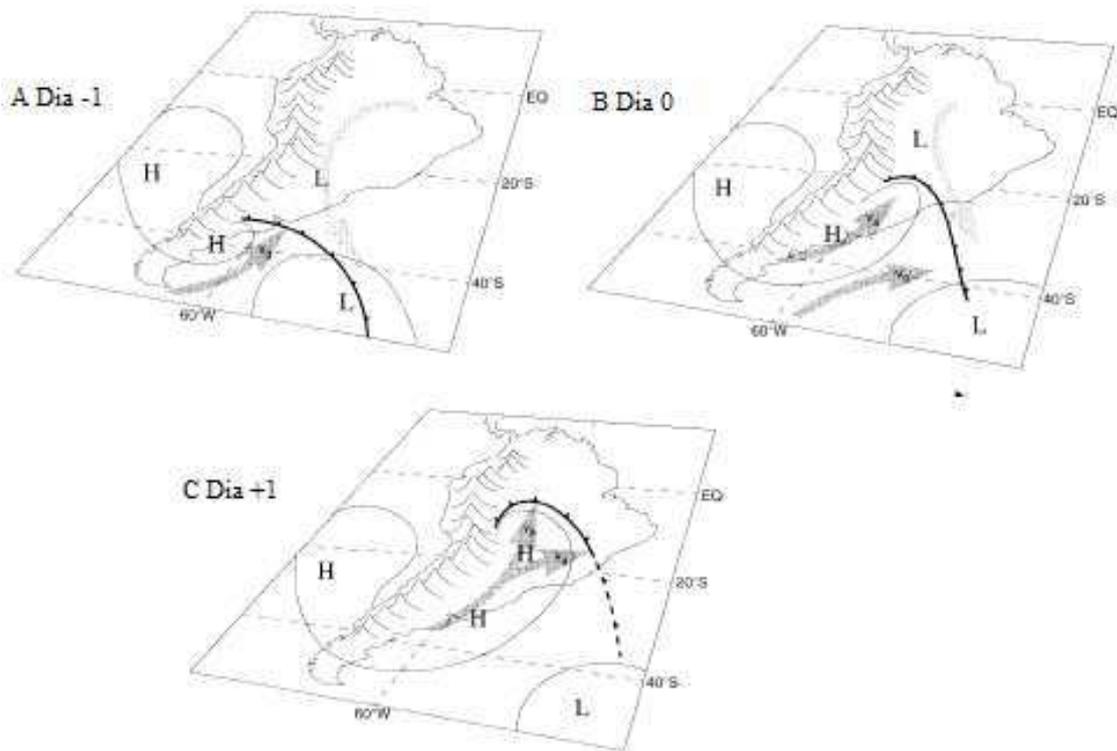


Figura 4: Modelo conceitual de incursões de ar frio da América do Sul. Setas grossas escuras indicam ventos de baixos níveis e frios, setas claras indicam ventos de altos níveis e quentes. Fonte: GARREAUD (2000), adaptado.

Lupo et al (2001) definiram 3 categorias distintas de incursões de ar frio sobre a AMS, levando em consideração o escoamento atmosférico durante o seu desenvolvimento. O tipo 1 foi associado à fraca anticiclogênese de superfície a leste dos Andes, em interação com uma crista transitória que no primeiro momento fortalece o anticiclone e que, depois de passar pelos Andes, o enfraquece. São casos de incursões mais fracas e de curta duração. O tipo 2 está associado a forte advecção de vorticidade anticiclônica (AVA) fornecido por um cavado quase-permanente. São incursões mais intensas, produzindo maiores ondas de frio no interior do continente sul americano. A circulação anticiclônica tem a função de transportar o ar frio das latitudes extratropicais no sentido do equador. No tipo 3 a incursão de ar frio é relacionada a um anticiclone situado na costa da AS, que se movimenta de maneira lenta. A maioria de eventos de incursão do tipo 2 evoluem para eventos de tipo 3 depois que atravessam a AS antes de seguirem em sentido nordeste. Os autores analisaram casos entre os anos de 1992 e 1996 e concluíram que as incursões de ar frio acontecem com maior frequência entre junho e novembro, o inverno e primavera austral.

3.2 Mecanismos de frontogênese.

Os critérios para a caracterização de uma frente fria, segundo Kousky (1979) são mudanças abruptas da intensidade e direção do vento, variação da pressão a nível médio do mar, forte gradiente de temperatura ocasionado por variações locais acentuadas e espacialmente irregulares desta grandeza ou pelo encontro de massas de ar com temperatura e densidade contrastantes. Durante o avanço das frentes frias, a massa fria se posiciona abaixo da massa quente, causando a sua elevação, o que pode levar à formação de chuvas. É comum que a magnitude do gradiente de temperatura supere $10^{\circ}\text{C}/100\text{km}$ e a magnitude do gradiente de umidade seja maior que $10\text{ g/kg}/1000\text{ km}$. Os ventos ao longo da frente podem superar os 30 m/s , apresentando cisalhamento vertical de no mínimo 5 m/s/km .

A topografia do continente Sul Americano também contribui na formação frentes, a Cordilheira dos Andes acaba por facilitar a canalização sul-norte do vento (SATYAMURTY e MATTOS 1989; BLUESTEIN, 1993). A América do Sul (AS) subtropical apresenta um máximo intenso da função frontogenética, que é representada pela variação do gradiente da temperatura potencial, na equação seguinte (BLUESTAIN, 1993).

A função frontogenética é dada por:

$$F = \frac{D |\nabla x|}{Dt} \quad (1)$$

Em que x é uma grandeza escalar como temperatura (T), umidade (U), temperatura potencial (θ) e temperatura potencial equivalente (θ_e)

O hemisfério sul é mais frontogenético do que o hemisfério norte como aponta Satyamurty e Mattos (1989). A Figura 5 mostra a função frontogenética calculada nos dois hemisférios, destacando o máximo da função na AS. Usando dados mensais de temperatura e vento nos níveis de 850 e 700 hPa do Centro Meteorológico Nacional (NMC), para sete anos, de 1975 a 1981. Os autores atribuem a existência desse máximo ao fato de ser uma região de sela entre as duas altas subtropicais.

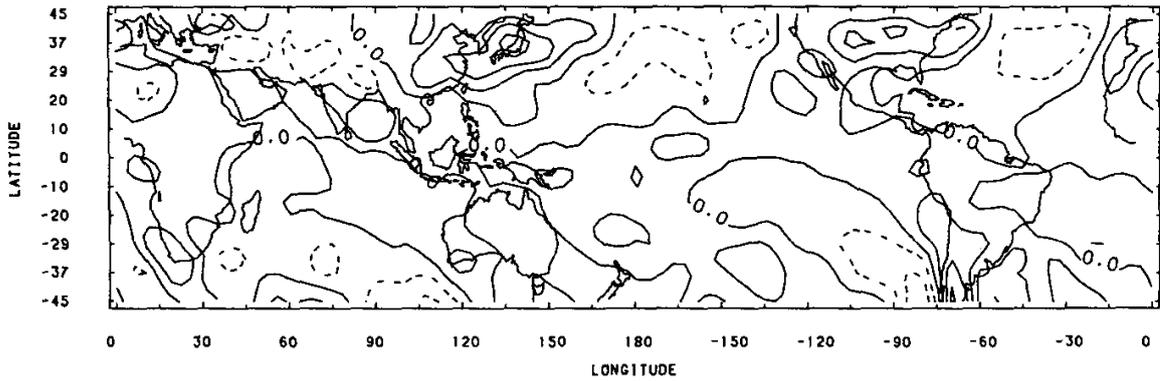


Figura 5: Função frontogênica climatológica anual – 1975 a 1980 em 850 hPa, onde as linhas contínuas (tracejadas) representam frontogênese (frontólise). Fonte: SATYAMURTY E MATTOS (1989), adaptado.

Ninomiya (1984) propôs a decomposição da função frontogênica em 4 termos (equação 2), cada um associado a um mecanismo físico.

$$FG = \frac{d|\nabla\theta_e|}{dt} = FG1 + FG2 + FG3 + FG4 \quad (2)$$

Sendo

$$FG1 = \frac{1}{|\nabla\theta_e|} \cdot \left[(\nabla\theta_e \cdot \nabla) \frac{d\theta_e}{dt} \right] \quad (3)$$

termo no qual é descartado devido a não contribuição de maneira efetiva, quantificando apenas as variações diabáticas do campo de temperatura potencial equivalente.

$$FG2 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{|\nabla\theta_e|} \cdot (\nabla\theta_e)^2 D \quad (4)$$

$FG2$ representa o efeito da divergência, associado ao escoamento horizontal de grande escala. Em que D é a divergência.

$$FG3 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{|\nabla\theta_e|} \left\{ \left[\left(\frac{\partial\theta_e}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial\theta_e}{\partial y} \right)^2 \right] \cdot A + 2 \cdot \frac{\partial\theta_e}{\partial x} \cdot \frac{\partial\theta_e}{\partial y} \cdot B \right\} \quad (5)$$

A representação do $FG3$ está associada ao efeito da deformação. Este termo é o de maior intensidade e apropriado para detectar frentes. Em que A e B

$$A = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6) \quad B = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (7)$$

Representam a deformação.

$$FG4 = - \frac{1}{|\nabla\theta_e|} \cdot \frac{\partial\theta_e}{\partial P} \cdot \left(\frac{\partial\theta_e}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial\theta_e}{\partial y} \cdot \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (8)$$

O último termo $FG4$ quantifica a frontogênese devido à estratificação vertical da temperatura potencial equivalente.

Ninomiya (1984) menciona que o principal mecanismo de frontogênese na troposfera é a deformação do vento, representado pelo termo $FG3$. A prevalência deste termo foi confirmada para o caso particular dos subtropicais sul-americanos por (Arraut 2008; Arraut e Barbosa 2009), mostrado na Figura 6.

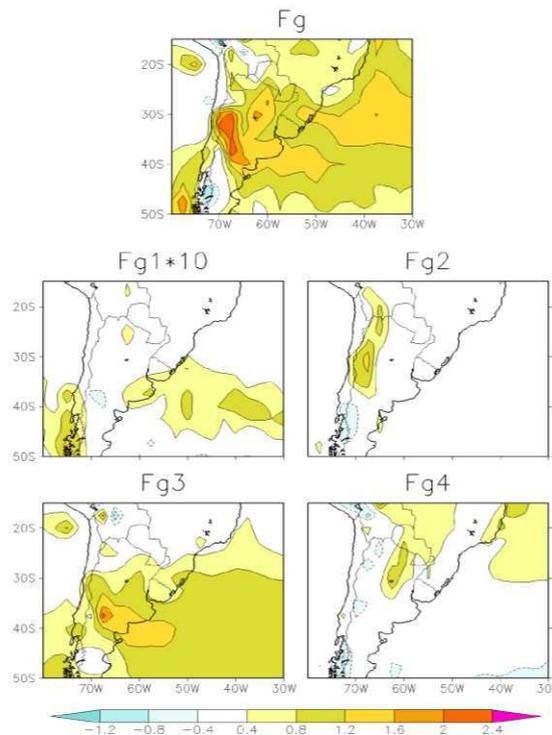


Figura 6: Climatologia da frontogênese em temperatura potencial equivalente (K/100 km/dia) a 850 hPa. A frontogênese total FG é a soma dos quatro termos FG1, FG2, FG3 e FG4, calculados como Ninomya (1984) propôs. Fonte: ARRAUT e BARBOSA, (2009).

Em um caso de frente existe deformação e descontinuidade no campo de densidade, temperatura, como pode ser visto na Figura 7, e no campo de temperatura potencial (θ), havendo uma inclinação da frente para o lado de menor temperatura (lado frio), apresentado na Figura 8.

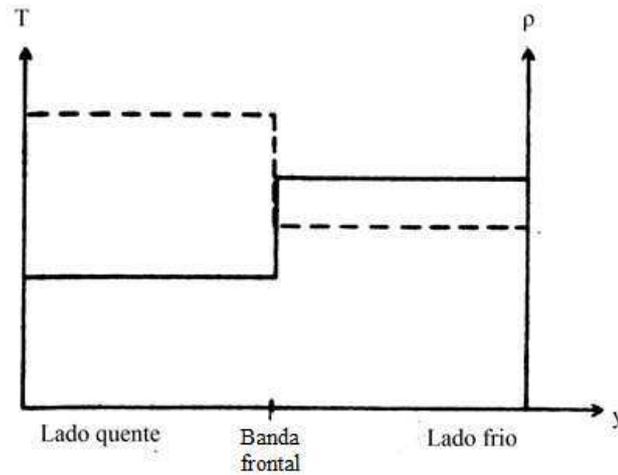


Figura 7: A frente como uma descontinuidade na densidade ρ (linha contínua) e temperatura T (linha tracejada).
 Fonte: BLUESTEIN, (1993), adaptada.

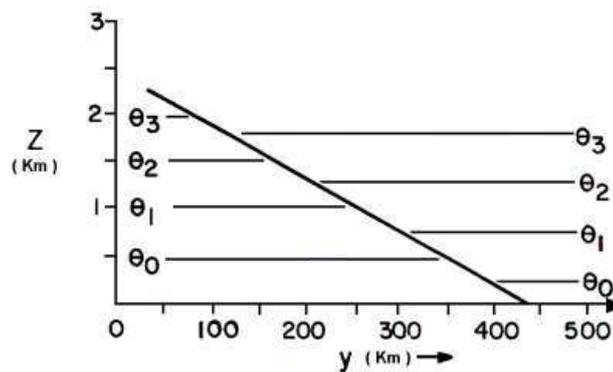


Figura 8: Descontinuidade da temperatura potencial. Fonte: Satyamurty, (2004), adaptada.

O encontro das massas de ar, onde ocorre a frente, é inclinada, tendo maior componente vertical quanto mais próximo da superfície estiver. Quanto mais alta a frente, menor componente vertical ela terá, apresentando então diferenças de alturas no seu decorrer. A deformação, que na frontogênese aproxima as isótermas, pode ser dada pela confluência dos ventos no campo horizontal, mudança no movimento vertical dos ventos em relação ao

gradiente de temperatura já estabelecido com maior componente na vertical. Já o aquecimento a liberação de calor latente e radiação são mecanismos que afastam as isotermas, diminuindo o gradiente de temperatura (mecanismos de frontólise) BLUESTEIN, (1992),(1993); HOLTON, SATYAMURTY, (2004).

Mattos (2004) e Arraut (2008) são exemplos de trabalhos desenvolvidos com diferentes casos de frentes e frontogênese. O primeiro relaciona frontogênese e frentes de inverno, levantando a questão das friagens que atingiram os subtropicais da América do Sul, o autor ressalta que para haver uma friagem é necessária a ocorrência de uma frontogênese intensa, porém o contrário não é regra. O segundo é relacionado à frontogênese e frentes de verão, avaliando o impacto dessas sobre a quantidade e distribuição de precipitação sobre o continente sul americano. Ambos desenvolveram modelos conceituais de frontogênese. O modelo conceitual de Arraut (2008) terá destaque no próximo tópico (3.3).

3.3 Frentes de verão

Os sistemas com maior responsabilidade em relação à precipitação na América do Sul são a Zona de Convergência do Atlântico Sul - assunto que será melhor tratado no próximo tópico (3.4) – e as frentes frias de verão. As frentes frias e incursões de ar frio atingem a América do Sul em maior quantidade no inverno, como dito no começo dessa sessão.

Praticamente as frentes atingem as menores latitudes seguem um caminho que tem sentido de sudoeste a nordeste, no Hemisfério Sul. Arraut (2008; et. al. 2009, et. al. 2017) estudaram o desenvolver das frentes frias de verão que se deslocavam para nordeste (e atingiam menos de 35 ° S) ou para leste, criando duas categorias de frentes. Este último com característica de quase-estacionário.

A Sela da Argentina (AS) (Figura 9), conceito apresentado por Arraut (2008), concentra-se aproximadamente nas localidades entre e 64 a 70° O e 33 e 38 ° S, é mostrada pela autora como a separação entre a BNOA e os ventos de oeste.

Toda sela tem o potencial frontogenético, porém não obrigatoriamente será uma frontogênese, já que para isso outros fatores influenciam, como a configuração das isotermas, gradiente de temperatura e velocidade dos ventos (BLUESTEIN, 1986). A SA é uma sela ativa, ou seja, é frontogenética, pois tem uma dinâmica que propicia isso.

Para que haja a frontogênese, um dos requisitos, é que as isotermas precisam ter um ângulo menor que 45° em relação ao eixo de contração, para que as massas de ar contrastantes possam ser unidas (BLUESTEIN, 1986). Como representado na Figura 10, onde o caso da

direita indica frontogênese e aproximação das massas de ar (ângulo menor que 45°) e o caso da esquerda frontólise, afastamento das massas de ar (ângulo maior que 45°).

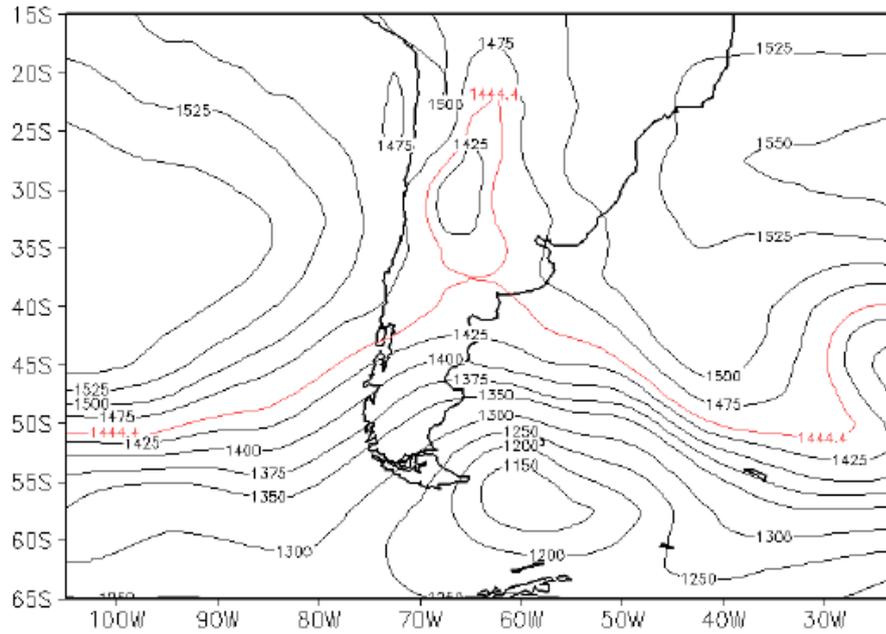


Figura 9: Representação da Sela da Argentina. Língua de baixa pressão. Campo de altura geopotencial a 850hPa. Fonte: Arraut, (2008).

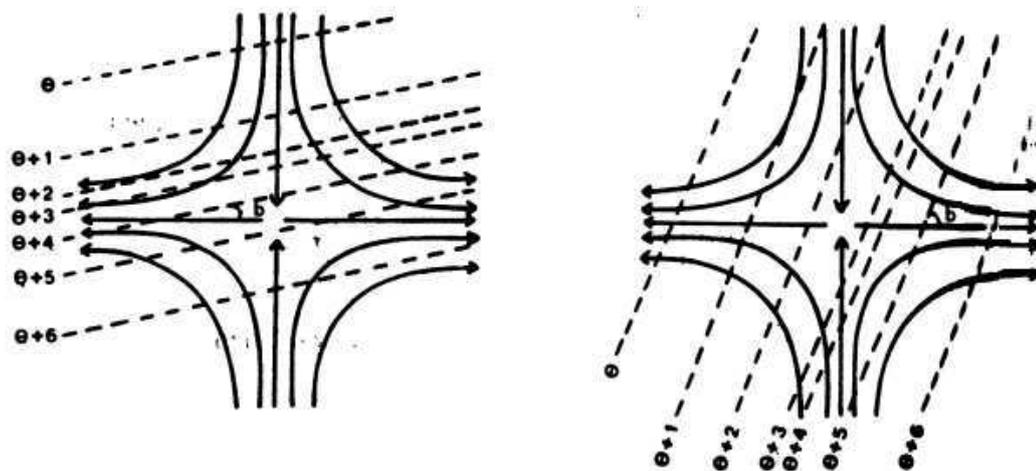


Figura 10: Relação entre a orientação relativa do eixo de dilatação e as isotermas de temperatura potencial representadas pelas linhas tracejadas. b representa o ângulo entre as isotermas e o eixo de dilatação. (Esquerda) indica frontogênese, ângulo entre 0° e 45° . (Direita) indica frontólise, ângulo entre 45° e 90° . (BLUESTEIN, 1986. In, BLUESTEIN, 1993) Adaptado.

Apenas a disposição das isothermas não basta para que a sela efetivamente gere uma frente. Se o gradiente de temperatura for muito pequeno o que irá acontecer quando aproximarem será apenas um aumento do gradiente e não evoluirá para uma frente.

Arraut (2008; et. al. 2009, et. al. 2017) mostra o papel da SA em produzir o máximo da função frontogenética. A SA se efetiva quando existe a interação de um sistema transiente com a BNOA, esse sistema é um cavado transiente que se movimenta de leste para oeste no sul da América do Sul, que ao avançar no continente passando os Andes, não necessariamente leva o vento, mas mantém o padrão de onda até se dissipar. O escoamento de umidade envolvido no sistema é da Amazônia, a massa de ar quente é tropical e é acelerada pela BNOA. Quando o padrão de onda do cavado avança para o leste, ventos extratropicais entram no continente. Os autores atribuem esse comportamento extremo frontogenético da Sela da Argentina ao sempre propício gradiente de temperatura que se instala na região. Essa disposição propícia do gradiente de temperatura se deve aos que os autores chamam de fase preliminar. Fase essa em que o cavado entra no Oceano Pacífico e a BNOA se intensifica, aumentando o transporte de umidade advinda dos trópicos, havendo advecção quente, onde o papel dos ventos acaba sendo de moldar as isothermas, deixando as mais perpendiculares ao eixo de dilatação.

Os dois tipos de frentes frias caracterizadas por Arraut (2008) se dá em consideração ao desenvolvimento do cavado transiente que entra no continente Sul Americano. A frente que se desenvolve e avança para a direção nordeste, atingindo latitudes inferiores à 35° S, se dá pelo crescimento do cavado transiente que com isso avança com a incursão de ar frio, com a frontogênese e com a chuva. Isso dissipa a BNOA e acaba com o suplemento de umidade. O segundo caso de frente tem relação com a dissipação do cavado à medida que ele avança para leste, que faz com que a advecção de ar frio seja pequena porém mantendo a alimentação de umidade e a chuva continua. (ARRAUT, et. al. 2008; et. al. 2009, et. al. 2017)

3.4. Zona de convergência do Atlântico Sul

Assim como as frentes frias e as incursões de ar frio, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é de fundamental importância para o regime de chuva nos trópicos e subtropicais da América do Sul (AS).

A Zona de Convergência do Atlântico Sul é caracterizada como uma banda de nebulosidade convectiva persistente (TALJAARD, 1972; STRETEN, 1973) que se estende, diagonalmente, desde o oceano Atlântico Subtropical até o centro sul da Amazônia e

permanece estacionária por pelo menos quatro dias, podendo atingir dez. (KODAMA, 1992; QUADRO, 1993). É um sistema típico de verão da AS, inexistente no inverno (NOBRE, 1988), que contribui para o total sazonal da precipitação, e tem consequências importantes na vida da população dos locais afetados (CARVALHO e JONES, 2002). A ZCAS atinge principalmente a região sudeste do Brasil. Os estudos de Silva Dias e colaboradores (1988 e 1991) analisaram casos de intensa precipitação associados às ZCAS, que trouxeram danos materiais e mortes na cidade do Rio de Janeiro e no estado São Paulo.

Ninomya (1984) definiu o conceito de Zona Frontal Subtropical (ZFS) ao perceber que a Zona Frontal de Baiu (ZFB) localizada a leste da Ásia entre as latitudes de 20° e 40°, era fundamentalmente diferente da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e da Zona Frontal Polar (ZFP), mesmo que o seu fornecimento de precipitação fosse tão relevante quanto das outras zonas citadas. O autor pôde concluir, a partir da observação da Zona Frontal de Baiu as características típicas das ZFS, forte gradiente de temperatura potencial equivalente, grande convergência de fluxo de umidade ocasionando em um forte movimento ascendente e geração de instabilidade convectiva.

KODAMA (1992) procurou outras zonas no planeta que pudessem ser comparadas com a ZFB, encontrando características semelhantes nas porções subtropicais da Zona de Convergência do Atlântico Sul e da Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS). O autor batizou-as (a ZFB, ZCAS e ZCPS) de Zonas de Precipitação Subtropicais (ZPS), as únicas três áreas com forte precipitação no verão. Kodama (1992; 1993) optou por não analisar a fundo as diferenças entre as ZPS, que observou poderem estar associadas à disposições topográficas singulares. Ao invés disso ele colocou ênfase nas suas semelhanças. A disposição das ZPS, e a média da distribuição de radiação de onda longa (OLR), um dos parâmetros utilizados pelo autor para a identificação, pode ser visto na Figura 11.

De acordo com o autor, as ZPS podem ser classificadas também como zonas de convergência de umidade. As ZPS, quando ativas, são fronteiras entre a massa de ar monçônica, que é tropical úmida, e a de latitudes médias, mais fria e principalmente mais seca. Por isso são tipicamente zonas de grande gradiente de umidade.

Essas bandas de convergência apresentam precipitação acentuada, em torno de 400 mm/mês quando estão ativas. Já a taxa de evaporação local é bem menor, aproximadamente 60 mm/mês. Isto significa que a precipitação é alimentada por fluxos de umidade. Estes devem convergir a taxas entre 150 e 300 mm/mês para manter a acentuada precipitação. Um dos fluxos é ao longo da ZPS com sentido para leste e outro em direção à ZPS na alça sudoeste da alta subtropical do Hemisfério Sul, ou na alça noroeste, se for uma alta

subtropical do Hemisfério Norte. Esses fluxos além de importantes para as precipitações, são também necessários para haver frontogênese no campo de temperatura potencial equivalente e geração de instabilidade convectiva das latitudes subtropicais em que se encontram as ZPS.

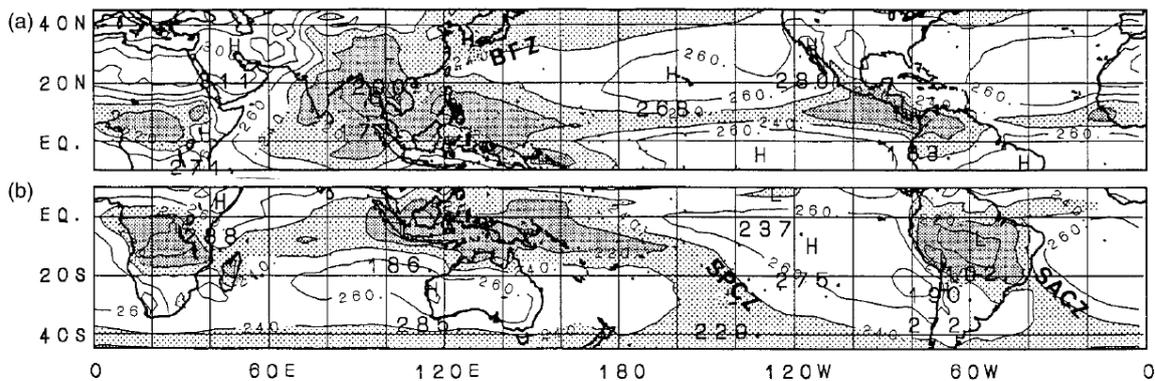


Figura 11: (a) Média das distribuições de radiação de onda longa (OLR) para os verões NH (Jun-Ago) e (b) para os verões SH (Dez-Mar) entre 1979 e 1986. O intervalo de contorno é de 20 Wm^{-2} e o sombreamento de espessura grossa (fina) indica que a OLR é menor que 220 Wm^{-2} (240 Wm^{-2}). Fonte: KODAMA, (1992).

Segundo estudos (SILVA DIAS E KASAHARA, 1987; SATYAMURTY E RAO, 1988) a disposição espacial em que a ZCAS ocupa deve-se a fatores como: a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) para a convergência do ar que vem dos trópicos e dos extras trópicos.

Silva Dias e Kasahara (1987) também sugerem que a fonte de calor associada à precipitação Amazônica seja um gatilho para a formação de um anticiclone superior e de um cavado na direção da ZCAS. Estes distúrbios contribuiriam para a geração de convecção organizada, fazendo com que a ZCAS seja ela mesma uma fonte de calor para a atmosfera, levando à queda da pressão e favorecendo a convergência da circulação e portanto da umidade. Isto constitui um processo de retro-alimentação, em que a convecção é capaz de intensificar o seu próprio fornecimento de umidade.

Figuroa e et. al. (1995) e Kodama (1999), por meio de diferentes modelos, que tiram e/ou minimizam a atuação da porção continental no sistema atmosférico, puderam concluir que a Zona de Convergência do Atlântico Sul está associada a áreas de forte aquecimento convectivo, como a bacia da Amazônia, por exemplo, e não indispensavelmente relacionada à existência da Cordilheira Andes, confirmando o estudo anterior.

A convergência de umidade que a ZCAS dispõe juntamente com as frentes frias e incursões de ar frio que chegam com intensidade na região sudeste e sul do Brasil proporcionam características ambientais únicas para o desenvolvimento econômico local.

3.5 Ciclos diurnos da Baixa do Noroeste da Argentina.

A Baixa do Noroeste da Argentina (BNOA) previamente citada neste trabalho nos tópicos 3.1 e 3.3 foi denominada por Schwerdtfeger, (1954, apud FERREIRA, 2008), como uma baixa térmica que apresenta uma grande variabilidade diurna, com maior intensidade no horário de 00Z.

O autor aponta como o principal causador da BNOA, semipermanente no verão, o aquecimento diabático da atmosfera mais rasa pela superfície terrestre. Já no inverno a BNOA apresenta um comportamento ocasional e o principal mecanismo formador seria o efeito *Föhn*, gerado pelo reflexo das cadeias de montanhas sob os ventos, esses que seguem montanha a baixo com velocidade que pode chegar a 25m/s^2 e que costumam ser quentes e secos gerando, quando se acumulam após a descida adjacente à montanha, um bolsão de ar quente nos níveis mais baixos, alterando assim o gradiente de pressão e intensificando a baixa (SELUCHI et al., 2003a).

Rocha (2018) traz em sua tese de doutorado, um estudo da região subtropical da América do Sul, com foco na BNOA e seus efeitos para o transporte de umidade. A área de estudo e os máximos de anomalia de precipitação acumulada dos meses de dezembro de 2015 a março de 2016 se coincidem (Figura 12), destacando a BNOA como um mecanismo, dentre outros, importantíssimo para geração da quantidade de chuva ocasionada nessa região no continente.

Os casos estudados por Rocha (2018) mostraram a BNOA tendo diferentes ciclos diurnos, denominado pelo autor de forte e fraco, nos dias 2 a 3 e 23 a 24 de janeiro de 2016 respectivamente, em relação à sua intensidade e a magnitude do gradiente de geopotencial. No ciclo diurno forte, a BNOA apresenta enfraquecimento nos horários mais frios, os ventos não foram intensos o suficiente para a massa de ar quente e úmida chegasse até o extratropical, se mantendo assim mais a norte do continente. Foi o caso em que as temperaturas ficaram mais baixas, em torno de 22°C , 4 a 5°C a menos que o caso do ciclo diurno fraco, porém seu campo de temperatura potencial equivalente se mostrou bem mais alto. No ciclo diurno fraco encontra-se a BNOA intensa mesmo nos horários mais frios e a massa tropical quente e úmida atingiu menores latitudes, com ventos de norte mais intensos e com maior transporte de umidade, apresentando uma frontogênese bem intensa.

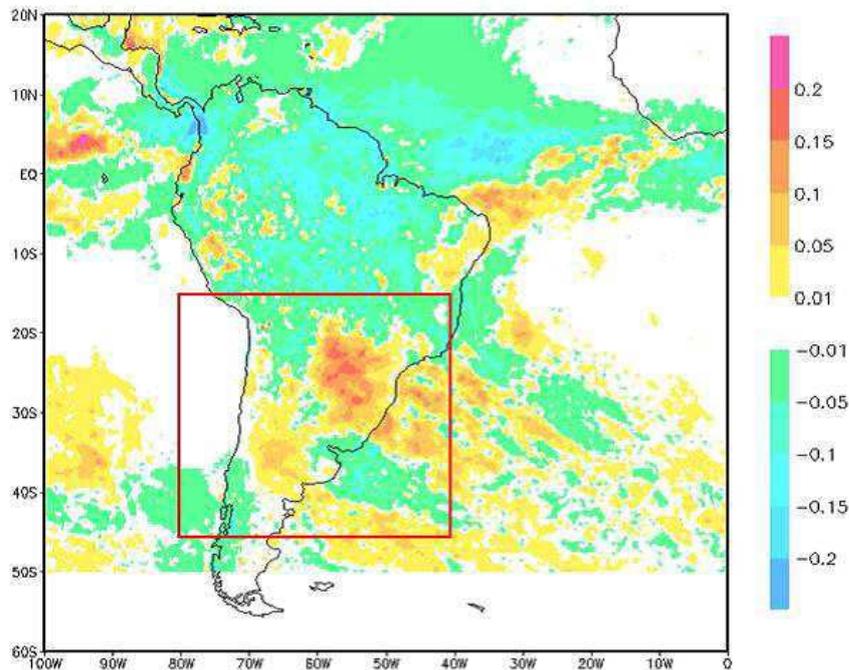


Figura 12: Anomalia de precipitação acumulada ($mm/mês$) para o verão (de dezembro 2015 a março de 2016), a partir de dados do TRMM. O retângulo vermelho destaca o recorte feito da região de estudo. Fonte: Rocha (2018).

Os resultados encontrados pelo autor fazem questionar o comportamento inesperado da precipitação. No ciclo diurno fraco, que tem um transporte de umidade mais intenso, o acúmulo de chuva é menor. O contrário acontece com o ciclo diurno forte, em que o transporte de umidade é menos intenso e a precipitação é maior e mais bem organizada. Um estudo mais aprofundado da termodinâmica desses casos poderia trazer melhor compreensão sobre esse comportamento atmosférico, a análise de alguns perfis como temperatura potencial equivalente, temperatura potencial equivalente de saturação em perfis poderiam trazer mais respostas se bem explorados. È o que também se procura nesse trabalho.

4 - DADOS E METODOLOGIA

4.1. Dados

Foram utilizados dados de reanálise ERA - Interim do banco de dados *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF, <https://www.ecmwf.int/>), conjuntos de dados de precipitação como o Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM, <https://pmm.nasa.gov/trmm>) e do Global Precipitation Climatology Project (GPCP, <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access>), para os meses de janeiro de 2011, abril de 2014, e janeiro de 2016, a cada 6 horas (00Z, 06Z, 12Z e 18Z), com a resolução de grade de $0,75^\circ \times 0,75^\circ$. Esses são dados gratuitos e de fácil acesso.

Os dados baixados foram de vorticidade potencial, altura geopotencial, temperatura, umidade específica, umidade relativa, velocidade vertical, CAPE, precipitação, e as componentes zonal (u) e meridional (v) do vento. Outras variáveis meteorológicas de interesse foram calculadas, como perfil de temperatura potencial, perfil de temperatura potencial equivalente, perfil de temperatura potencial equivalente de saturação e perfil de velocidade vertical, meridional do vento e frontogênese.

Imagens de satélite também foram usadas, para as mesmas datas dos dados baixados. Imagens essas disponibilizadas pelo CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), do Satélite GOES 10 e GOES 13 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) com a temperatura realçada.

O caso das incursões selecionadas entre dia 07 e 09 de abril de 2014, sobre a América do Sul e do Oceano Atlântico, foi denominado como um caso a banda de nebulosidade híbrida por parecer apresentar dois tipos de sistema, uma incursão possivelmente seguindo o modelo de Garreaud (2000), com o deslocamento para norte a leste dos Andes, e outra de uma ciclogênese. Seguem imagens de satélites a cada 6 horas, do dia 07 ao dia 09 de abril de 2014 a fim de mostrar a evolução dos sistemas, onde as cores representam a temperatura do topo de nuvem em °C (Figura 13).

Foram escolhidas também as incursões entre dia 07 e 09 e do dia 19 a 21 de janeiro de 2011, sobre a América do Sul, a fim de mostrar mais situações onde o gradiente de diversas variáveis se comportam de maneiras diferentes (Figuras 14 e 15).

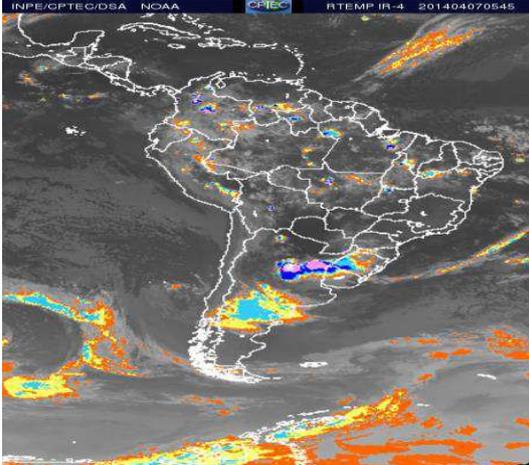
Foi analisado também períodos do mês de janeiro de 2016, mais precisamente entre os dias 2 e 5 e dia 23 a 26, períodos estudados por Rocha (2018), representados por satélite pelas

Figuras 16 e 17. Decidiu-se verificar o comportamento termodinâmico nesses períodos a fim de entender melhor os sistemas descritos por Rocha (2018).

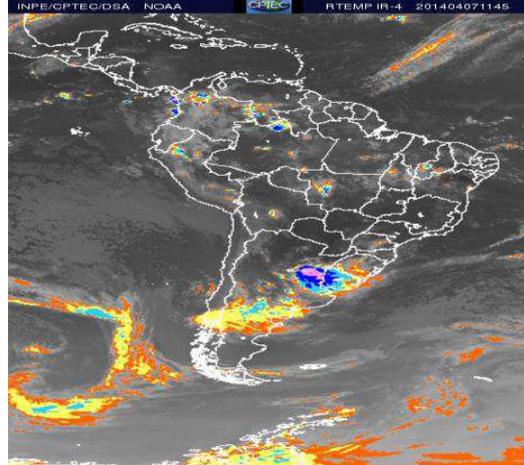
Ao todo são cinco períodos de dados observados para que as perguntas propostas possam ser respondidas.

As seguintes imagens de satélite a cada 6 horas 00Z, 06Z, 12Z e 18Z, salvo algumas com diferença de 15 minutos para menos. As cores representam a temperatura do topo de nuvem em °C, rosa -80 °C, azul escuro -70°C, azul claro -60°C, amarelo -50°C e laranja -30°C.

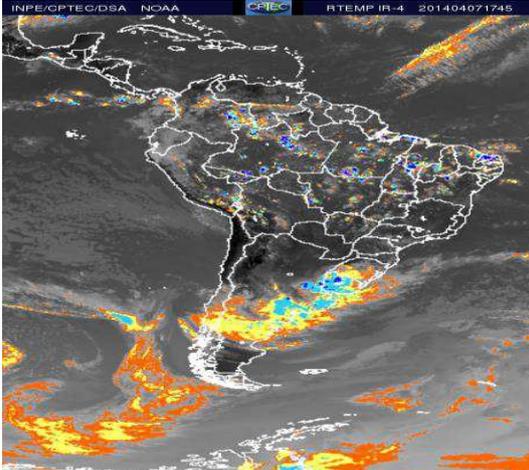
a) 05Z45 07/04/2014



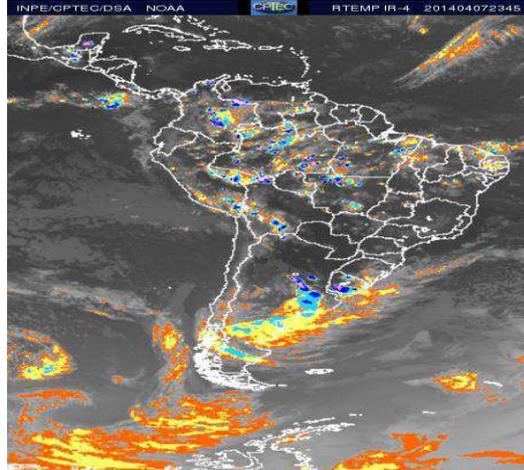
b) 11Z45 07/04/2014



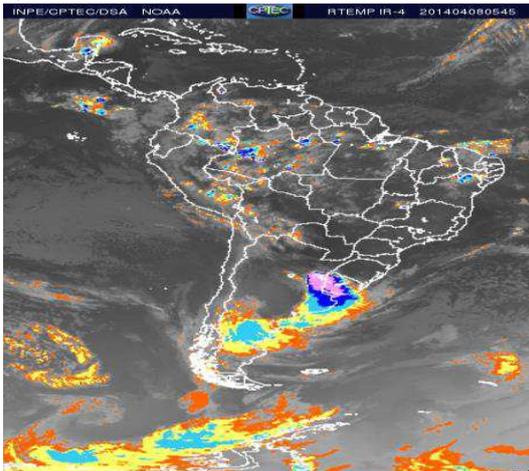
c) 17Z45 07/04/2014



d) 23Z45 07/04/2014



e) 05Z45 08/04/2014



f) 11Z45 08/04/2014

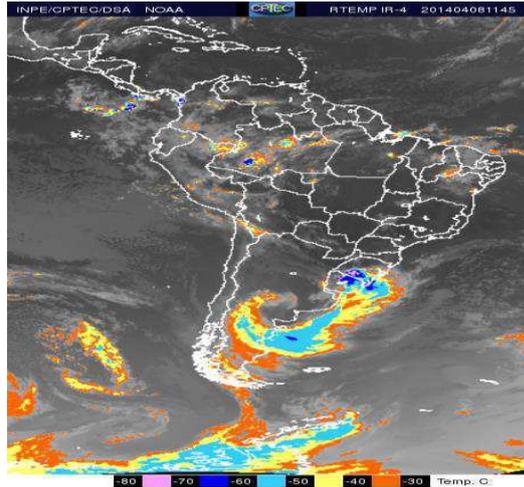
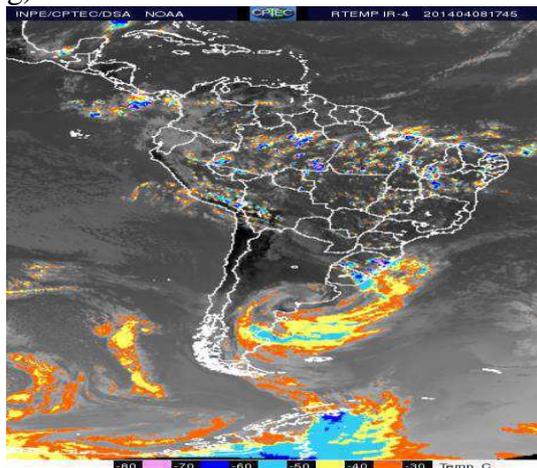
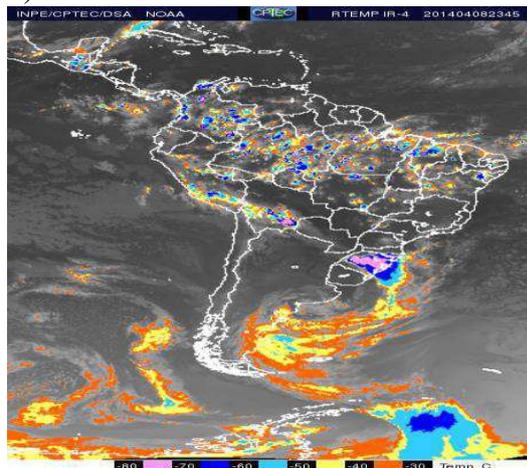


Figura 13: Imagens de satélite GOES, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 05Z45 (a), 11Z45 (b), 17Z45 (c), 23Z45 (d) do dia 07 abril de 2014 e 5Z45 (e), 11Z45 (f) do dia 08 de abril de 2014. Fonte: CPTEC/INPE (2019)

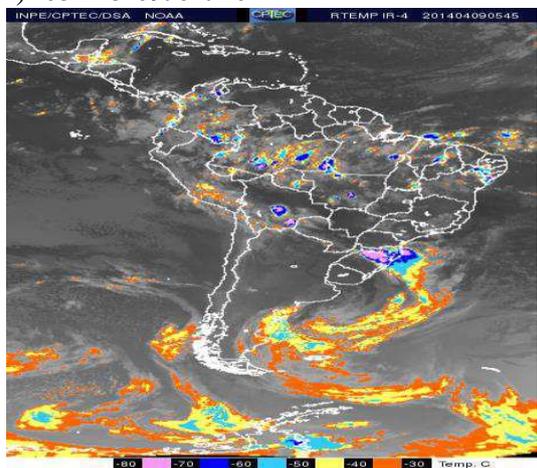
g) 17Z45 08/04/2014



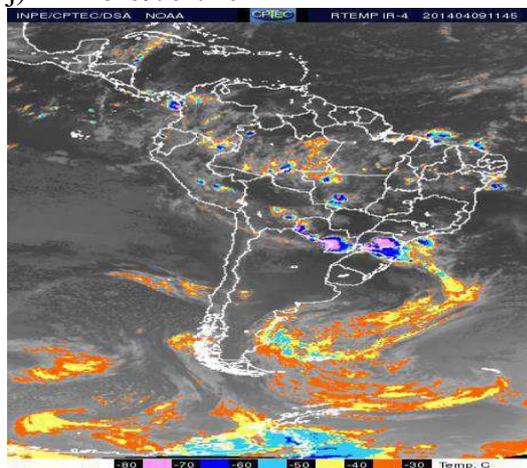
h) 23Z45 08/04/2014



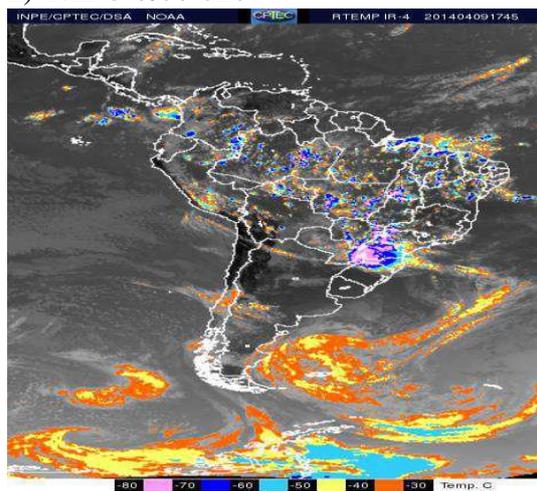
i) 05Z45 09/04/2014



j) 11Z45 09/04/2014



k) 17Z45 09/04/2014



l) 23Z45 09/04/2014

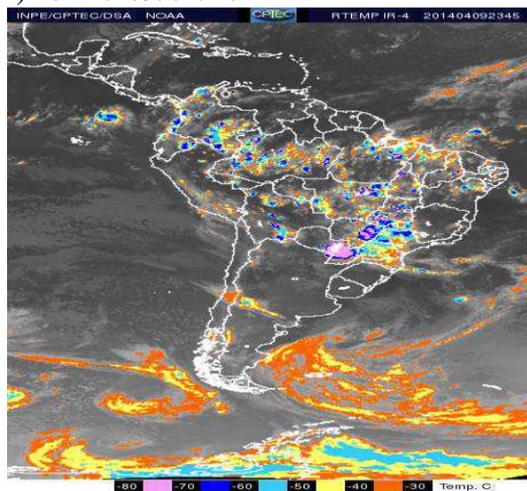
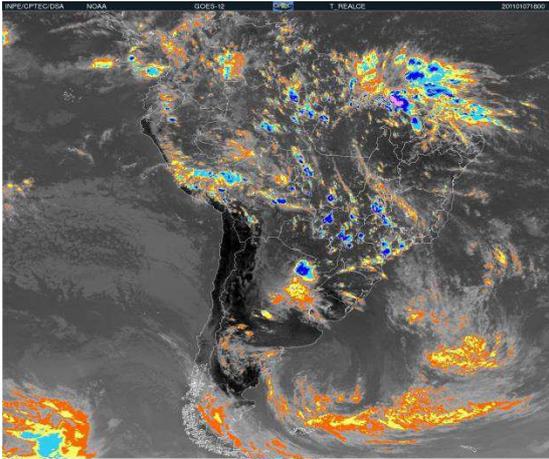
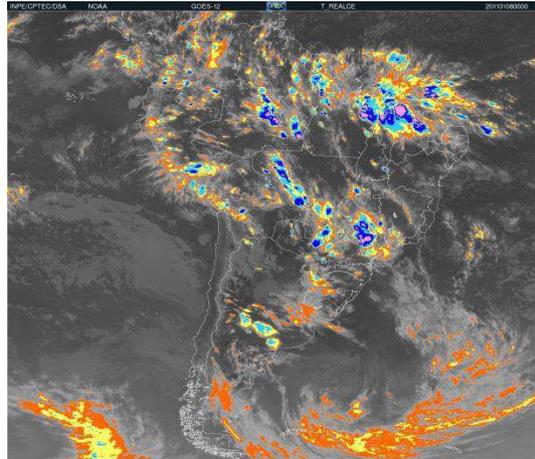


Figura 13 continuação: Imagens de satélite GOES, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 17Z45 (g), 23Z45 (h) do dia 08 de abril de 2014, 05Z45 (i), 11Z45 (j), 17Z45 (k) e 23Z45 (l) do dia 09 de abril de 2014. Fonte: CPTEC/INPE (2019)

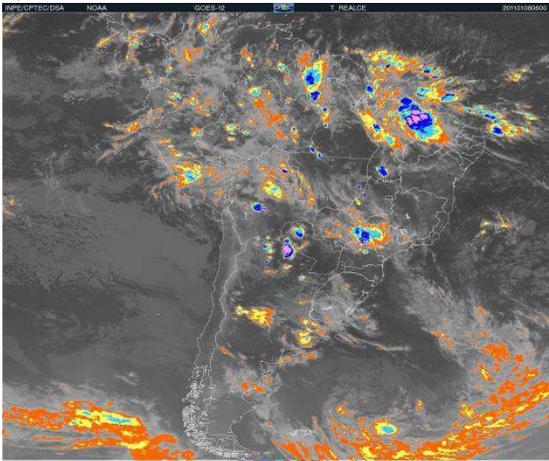
a) 18Z00 07/01/2011



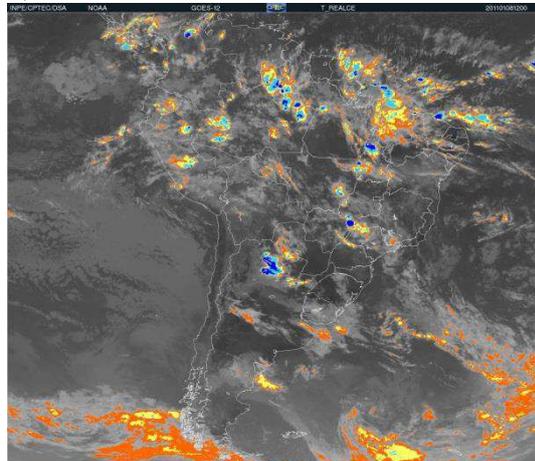
b) 00Z00 08/01/2011



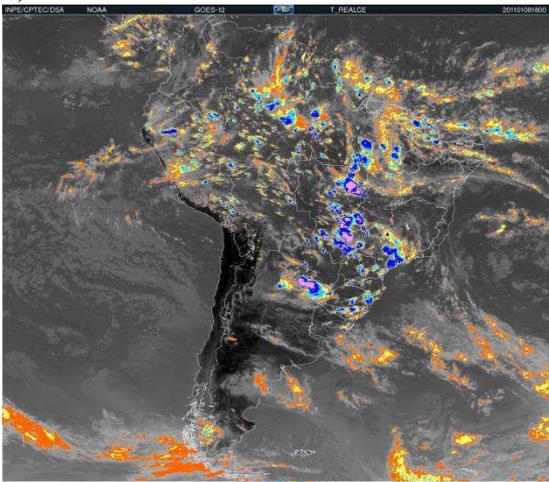
c) 06Z00 08/01/2011



d) 12Z00 08/01/2011



e) 18Z00 08/01/2011



f) 00Z00 09/01/2011

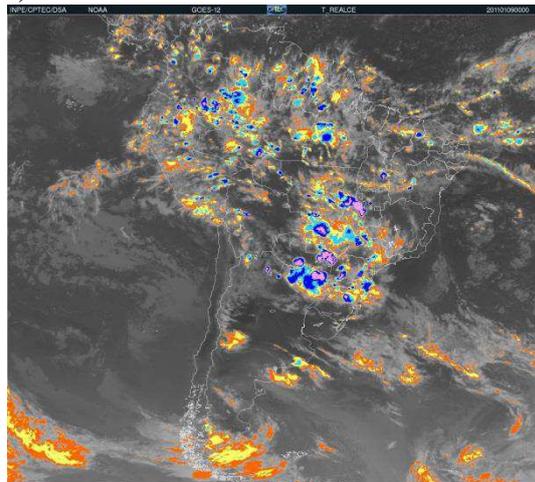
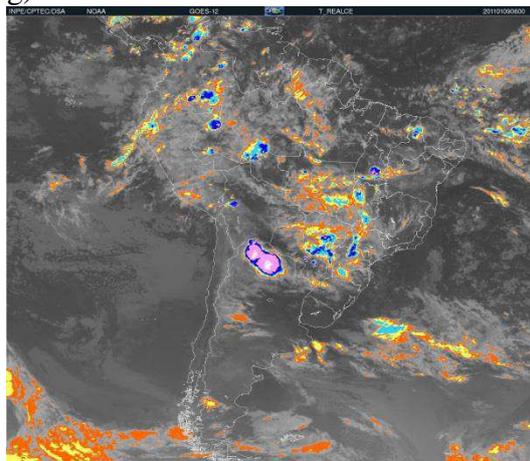
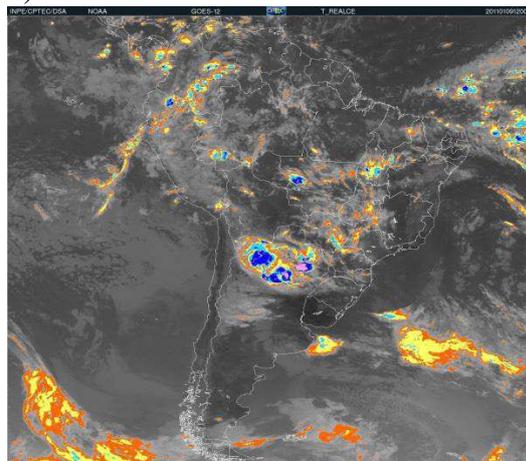


Figura 14: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 18Z00 (a) do dia 07 de janeiro de 2011, 00Z00 (b), 06Z00 (c), 12Z00 (d), 18Z00 (e) do dia 08 de janeiro de 2011, 00Z00 (f) do dia 09 abril de 2011. Fonte: CPTEC/INPE (2019)

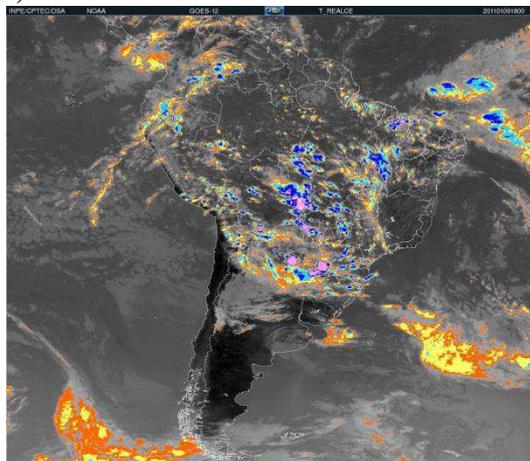
g) 06Z00 09/01/2011



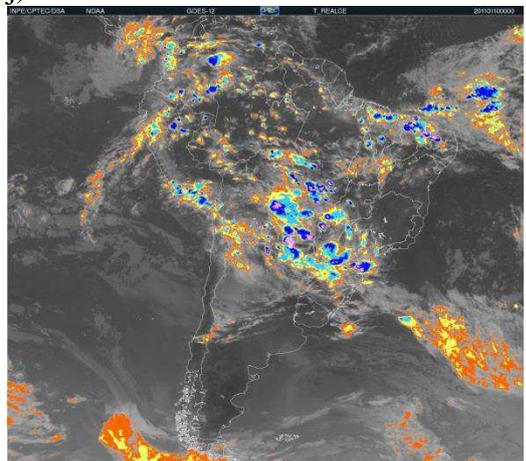
h) 12Z00 09/01/2011



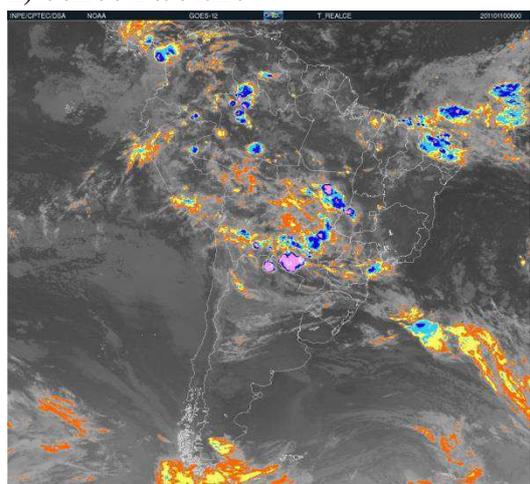
i) 18Z00 09/01/2011



j) 00Z00 10/01/2011



k) 06Z00 10/01/2011



l) 12Z00 10/01/2011

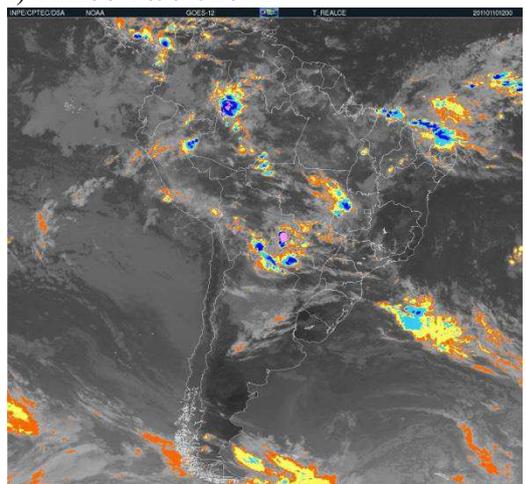
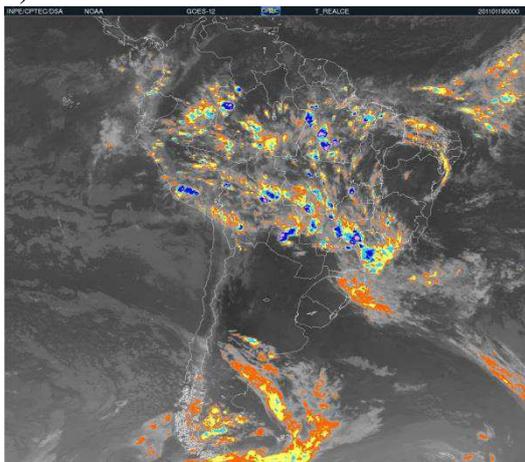
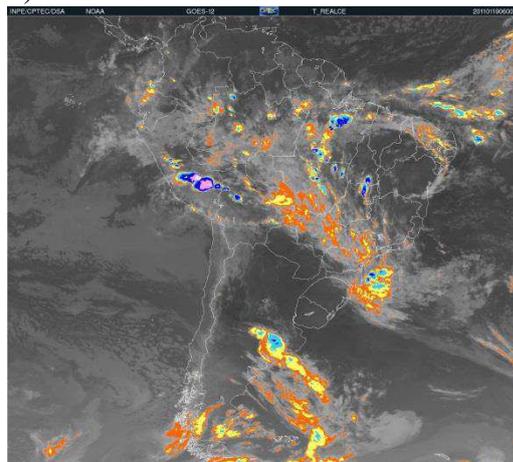


Figura 14 continuação: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 06Z00 (g), 12Z00 (h), 18Z00 (i) do dia 09 de janeiro de 2011, 00Z00 (j), 06Z00 (k) e 12Z00 (l) do dia 10 de janeiro de 2011. Fonte: CPTEC/INPE (2019)

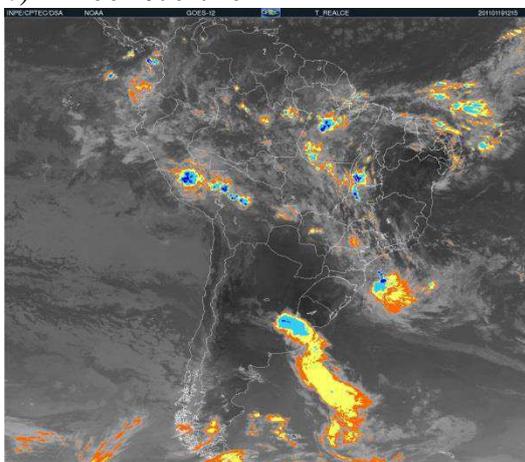
a) 00Z00 19/01/2011



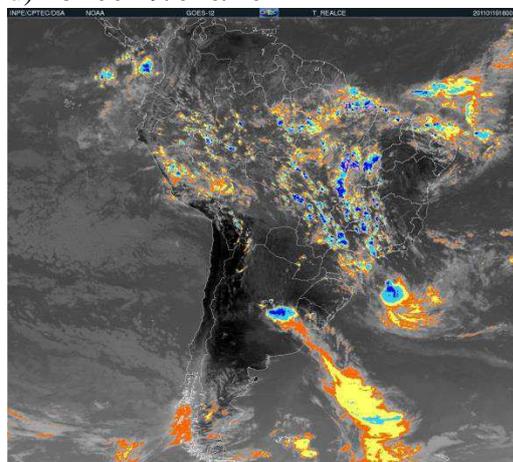
b) 06Z00 19/01/2011



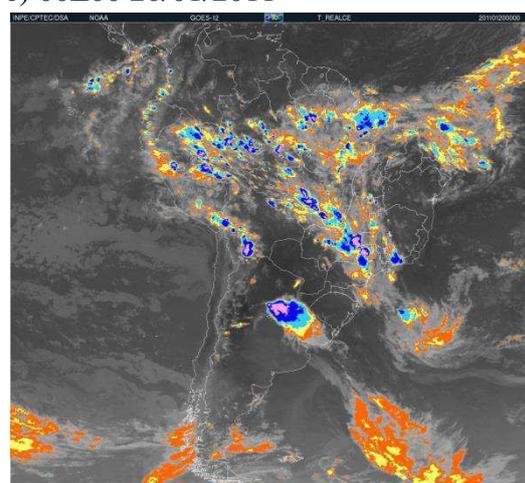
c) 12Z00 19/01/2011



d) 18Z00 19/01/2011



e) 00Z00 20/01/2011



f) 06Z00 20/01/2011

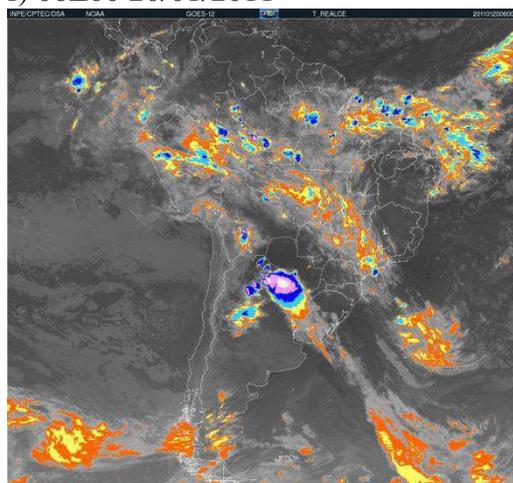
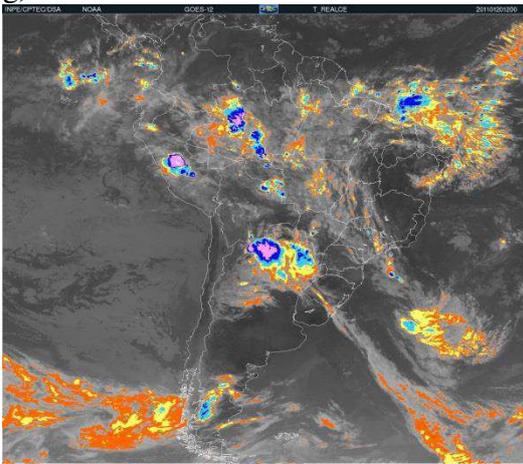
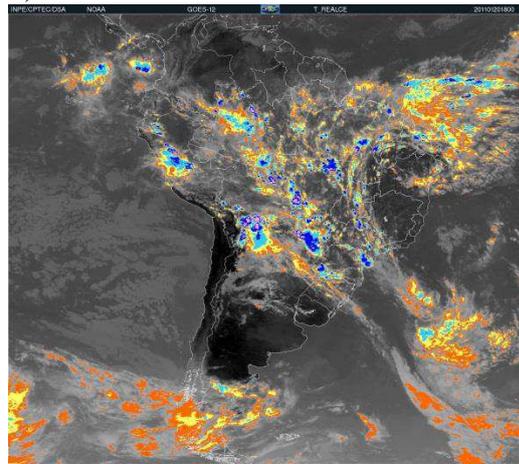


Figura 15: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 00Z00 (a), 06Z00 (b), 12Z00 (c), 18Z00 (d) do dia 19 de janeiro de 2011, 00Z00 (e), 06Z00 (f), do dia 20 de janeiro de 2011. Fonte: CPTEC/INPE (2019)

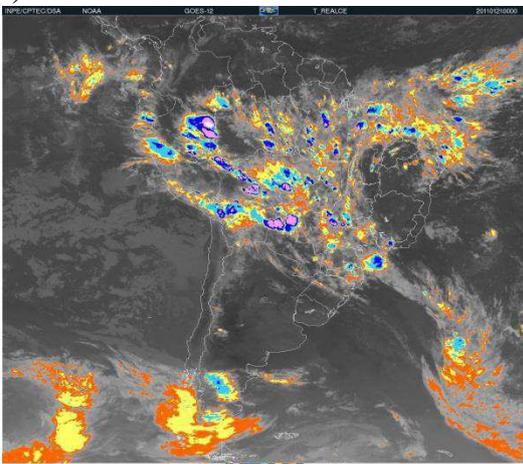
g) 12Z00 20/01/2011



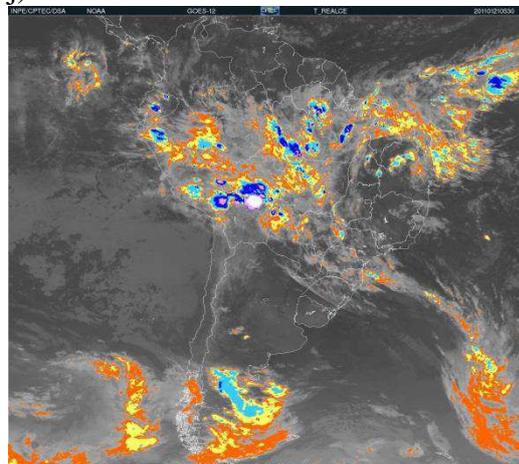
h) 18Z00 20/01/2011



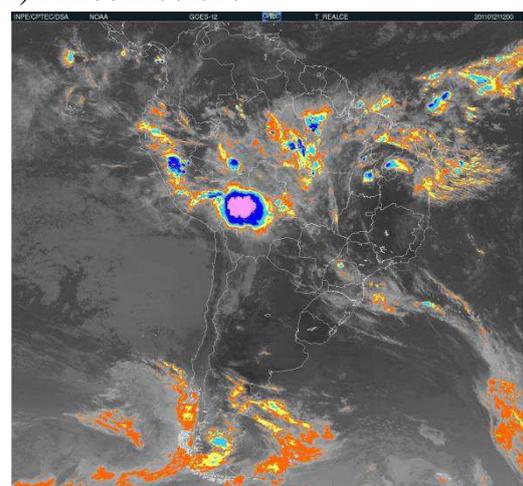
i) 00Z00 21/01/2011



j) 06Z00 21/01/2011



k) 12Z00 21/01/2011



l) 18Z00 21/01/2011

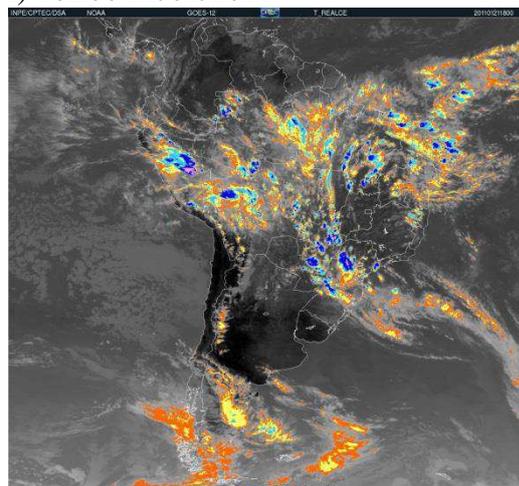
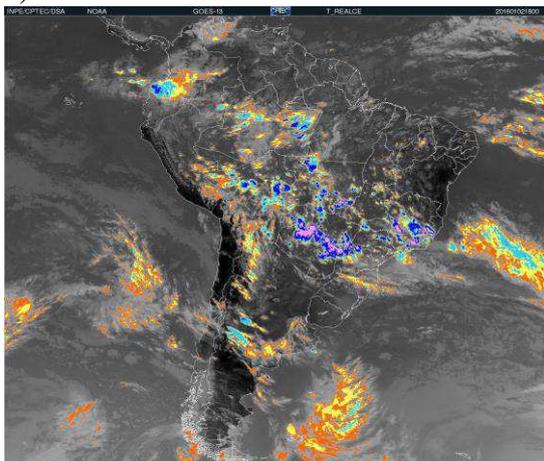
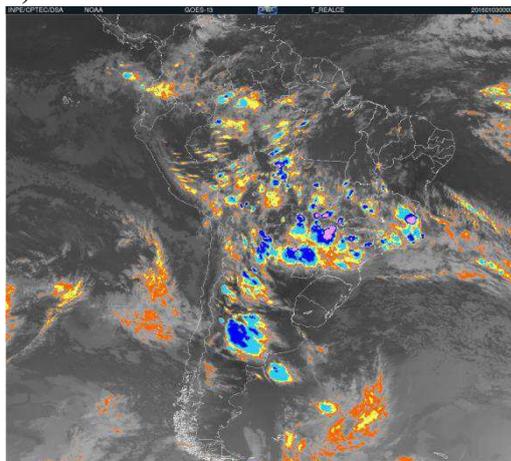


Figura 15 continuação: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 12Z00 (g), 18Z00 (h) do dia 20 de janeiro de 2011, 00Z00 (i), 06Z00 (j) 12Z00 (k), 18Z00 (l), do dia 21 de janeiro de 2011. Fonte: CPTEC/INPE (2019)

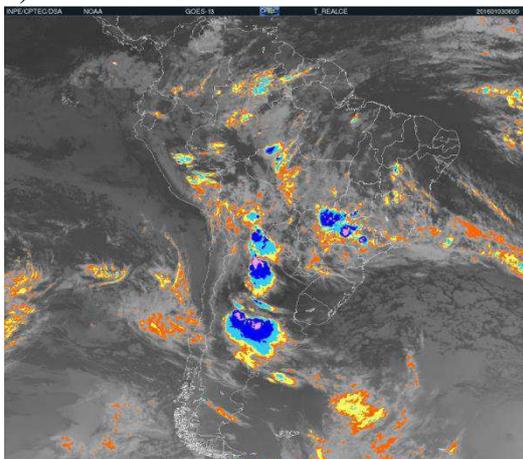
a) 18Z00 02/01/2016



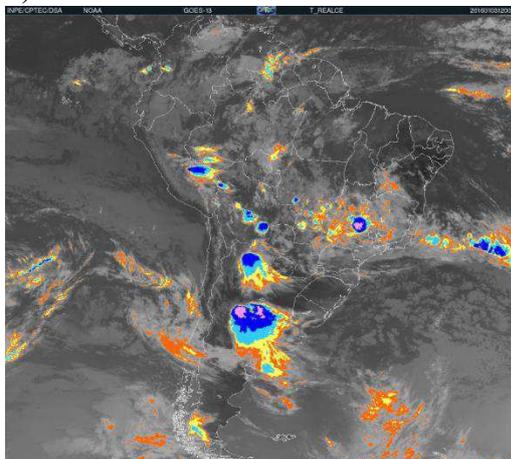
b) 00Z00 03/01/2016



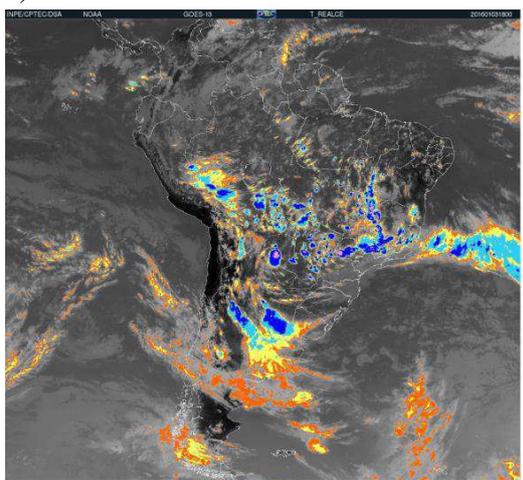
c) 06Z00 03/01/2016



d) 12Z00 03/01/2016



e) 18Z00 03/01/2016



f) 00Z00 04/01/2016

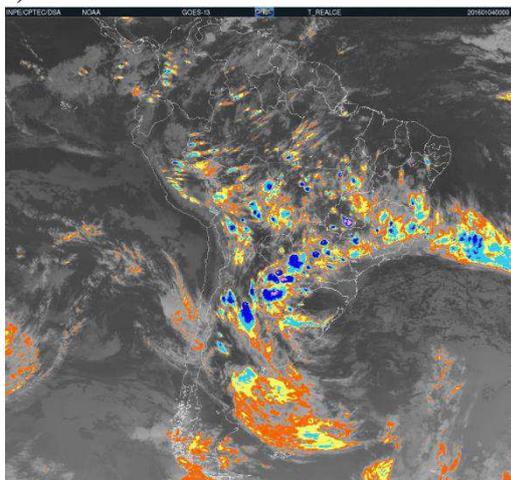
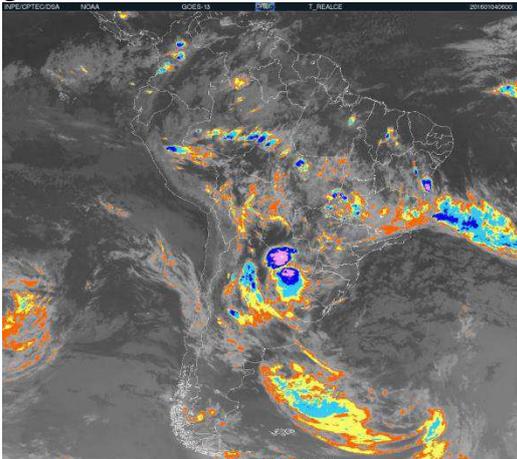
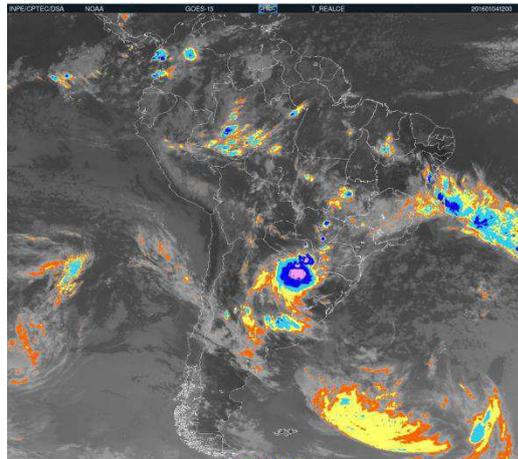


Figura 16: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 18Z00 (a) do dia 2 de janeiro de 2016, 00Z00 (b), 06Z00 (c), 12Z00 (d) e 18Z00 (e) do dia 3 de janeiro de 2016, e 00Z00 (f) do dia 04 de janeiro de 2016. Fonte: CPTEC/INPE (2019)

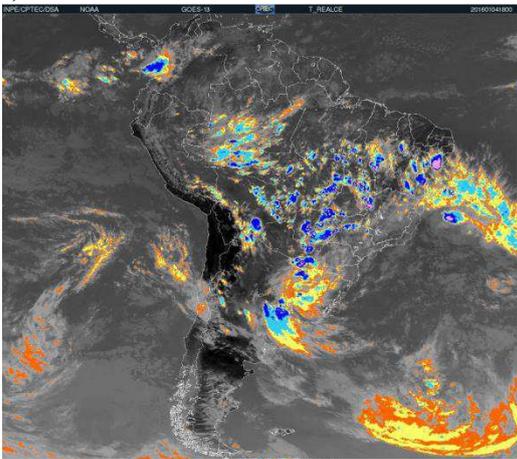
g) 06Z00 04/01/2016



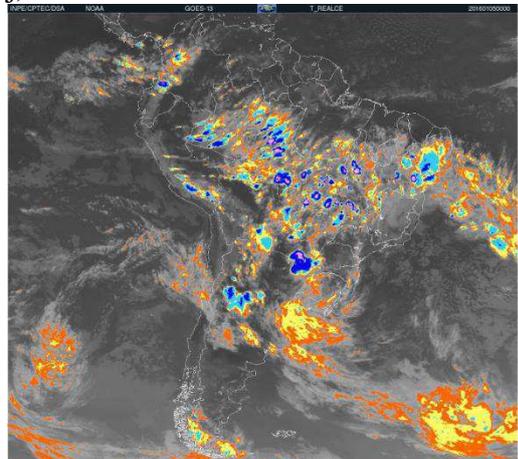
h) 12Z00 04/01/2016



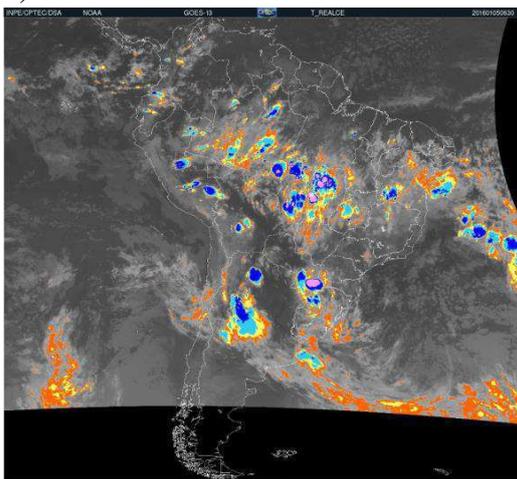
i) 18Z00 04/01/2016



j) 00Z00 05/01/2016



k) 06Z00 05/01/2016



l) 12Z00 05/01/2016

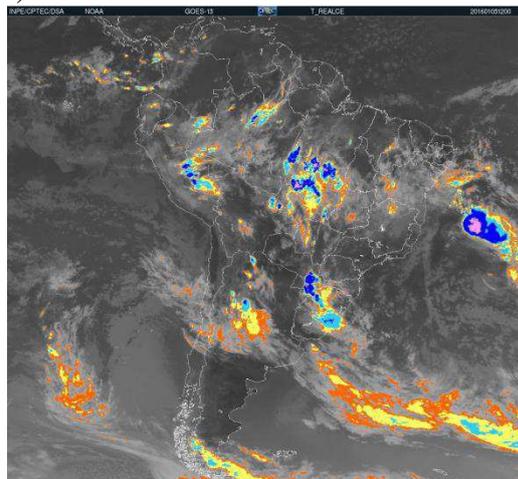
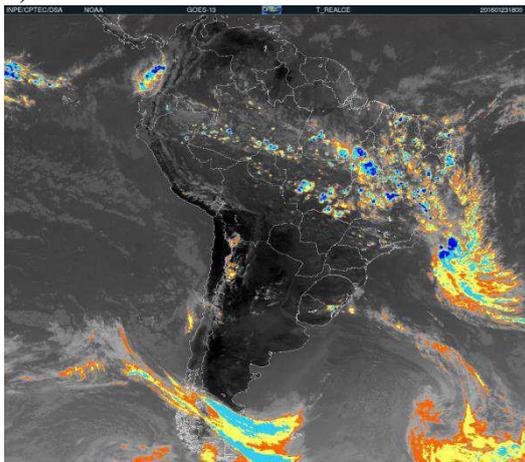
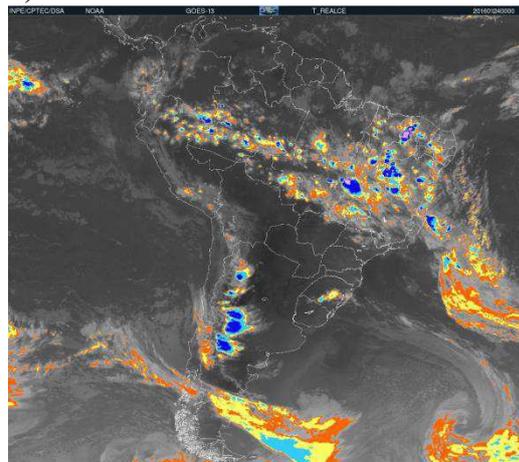


Figura 16 continuação: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 06Z00 (g), 12Z00 (h), 18Z00 (i) do dia 04 de janeiro de 2016, 00Z00 (j), 06Z00 (k), 12Z00 (l) do dia 05 de janeiro de 2016. Fonte: CPTEC/INPE (2019)

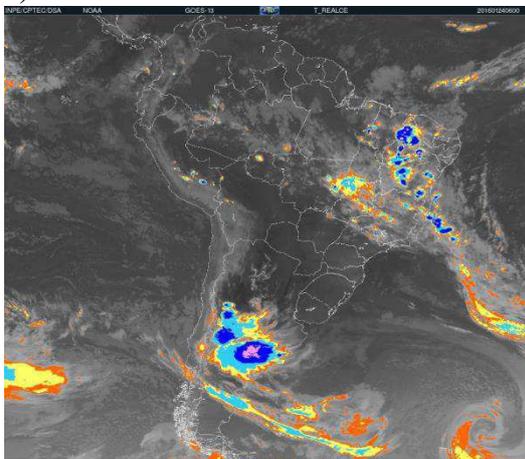
a) 18Z00 23/01/2016



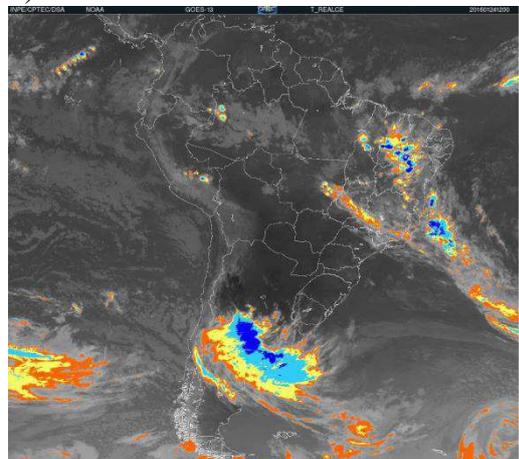
b) 00Z00 24/01/2016



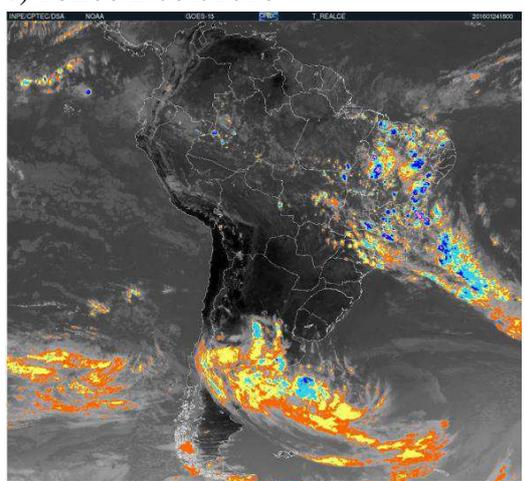
c) 06Z00 24/01/2016



d) 12Z00 24/01/2016



e) 18Z00 24/01/2016



f) 00Z00 25/01/2016

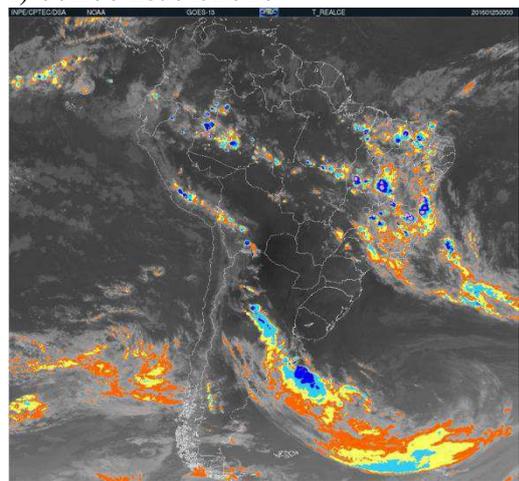
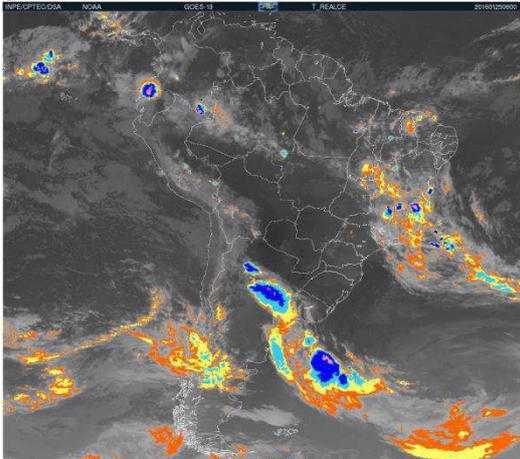
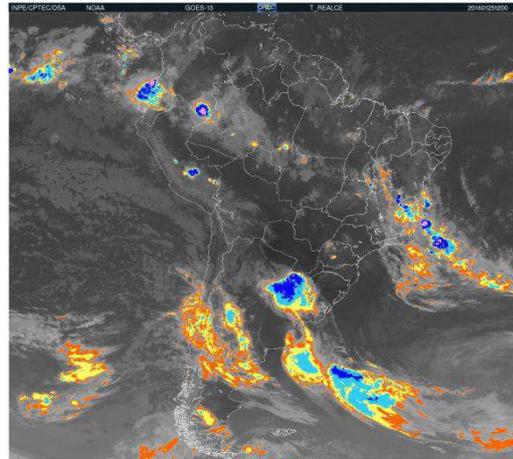


Figura 17: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 18Z00 (a) do dia 23 de janeiro de 2016, 00Z00 (b), 06Z00 (c), 12Z00 (d), 18Z00 (e), do dia 24 de janeiro de 2016, 00Z00 (f) do dia 25 de janeiro de 2016. Fonte: CPTEC/INPE (2019)

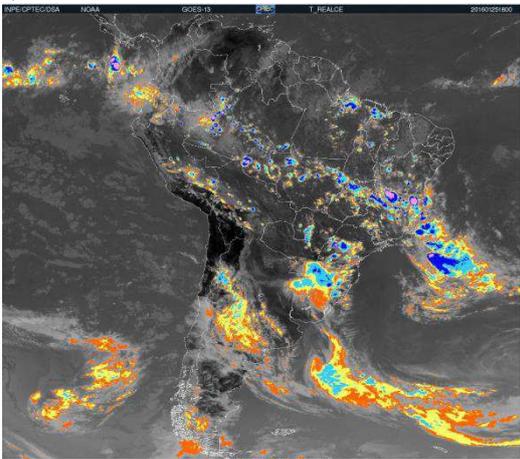
g) 06Z00 25/01/2016



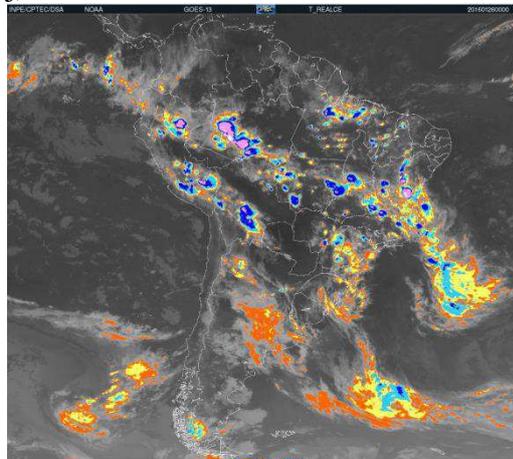
h) 12Z00 25/01/2016



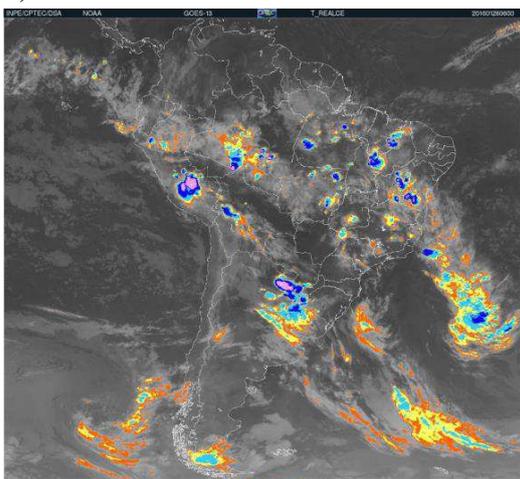
i) 18Z00 25/01/2016



j) 00Z00 26/01/2016



k) 06Z00 26/01/2016



l) 12Z00 26/01/2016

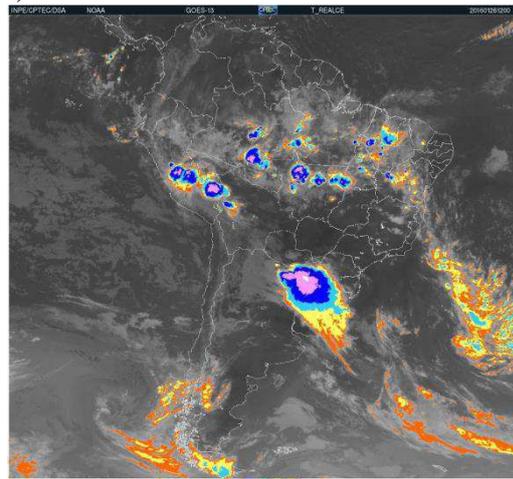


Figura 17 continuação: Imagens de satélite GOES 12, com temperatura realçada, a cada 6 horas, 06Z00 (g), 12Z00 (h), 18Z00 (i), do dia 25 de janeiro de 2016, 00Z00 (j), 06Z00 (k), 12Z00 (l) do dia 26 de janeiro de 2016. Fonte: CPTEC/INPE (2019)

4.2. Metodologia

Para a geração de imagens os dados baixados foram processados utilizando o programa *Grid Analysis Display System (GrADS)*, na versão para Windows.

As imagens geradas foram de temperatura e escoamento do vento, umidade específica e escoamento de umidade, geopotencial em 950 hPa, e perfis verticais de umidade e vento meridional e zonal, temperatura potencial e temperatura potencial equivalente e também uma imagem mostrando a diferença de temperatura potencial equivalente em 1000hPa menos a temperatura potencial equivalente de saturação para todos os outros níveis, afim de mostrar a inibição convectiva, e frontogênese. Quando necessário, as imagens contem mascaras para esconder valores que poluem a imagem devido à altitude. As longitudes dos perfis gerados foram determinadas levando em consideração a localização da chuva – essa definida pela imagem de satélite e dados do TRMM, no instante identificada pelas imagens de satélite, que variou de 58° e 65°O dependendo do caso.

Foram feitas comparações quanto ao comportamento de temperatura e umidade e dos perfis verticais para analisar a instabilidade da atmosfera. Para isso foi calculado as variáveis temperatura potencial (θ), temperatura potencial equivalente (θ_e) e temperatura potencial equivalente de saturação (θ_{es}).

4.2.1 Cálculo das variáveis.

4.2.1.1 Temperatura potencial (θ)

Para o cálculo de temperatura potencial (θ) foi utilizado a equação desenvolvida a partir da Equação de Poisson (9), apresentada em Holton (1992).

$$\frac{T_o}{T} = \left(\frac{P_o}{P}\right)^{\frac{Rd}{Cp}} \quad (9)$$

Dividindo os valores de Rd (constante universal dos gases) para o ar seco e Cp (calor específico) a pressão constante que valem, respectivamente, 287,04 $Jkg^{-1}K^{-1}$ e 1005 $Jkg^{-1}K^{-1}$ e $P_o = 1000$ hPa tem-se:

$$\Theta = \left(\frac{1000 \text{ hPa}}{P}\right)^{0,286} \quad (10)$$

4.2.1.2 Temperatura potencial equivalente (θ_e)

Para o cálculo de temperatura potencial equivalente (θ_e) foi usada a equação (11) a seguir apresentada em Bolton (1980).

$$\theta_e = T \cdot \frac{1000^{0,2854(1-0,28 \cdot 10^{-3} r)}}{P} \exp \left[\left(\frac{3,376}{T} - 0,0024 \right) \cdot r (1 + 0,81 \cdot 10^{-3} \cdot r) \right] \quad (11)$$

Sendo T , P e r , temperatura (K), pressão (hPa) e razão de mistura, respectivamente, do nível inicial onde se encontra a parcela e T_L a temperatura absoluta do nível de condensação. (BOLTON, 1980). Onde T_L foi calculada pela equação (12):

$$T_L = \frac{1}{\frac{1}{T-55} - \frac{\ln(ur)}{2840}} + 55 \quad (12)$$

Para isso foi necessário o calculo de r (razão de mistura), através da equação (13):

$$r = \frac{0,662e}{P-e} \quad (13)$$

q é a umidade específica (kg/kg), P é pressão do nível onde se encontra a parcela (hPa) e e é pressão de vapor d'água e para calcula-la foi usando a seguinte equação (14)

$$e = \frac{qP}{0,622-0,38q} \quad (14)$$

4.2.1.3 Temperatura potencial equivalente de saturação (θ_{es})

Para o calculo da temperatura potencial equivalente de saturação (θ_{es}) seguiu-se também Bolton (1980), equação (15):

$$\theta_{es} = \theta \exp \left(\frac{2,675r_s}{T} \right) \quad (15)$$

sendo θ calculado pela equação (10) e r_s (razão de mistura de saturação) que foi calculada pela equação (16):

$$r_s = \frac{0,622e_s}{P-e_s} \quad (16)$$

e_s pressão de vapor de saturação, foi calculado usando a Equação de Tetens (17) :

$$e_s = 6,11 \cdot 10^{\frac{aT}{b+T}} \quad (17)$$

4.2.1.4 Frontogênese

Para o cálculo da frontogênese foi utilizada a metodologia desenvolvida por Ninomiya (1984). Utilizando o termo FG3 que apresenta o efeito da deformação do vento no campo de temperatura potencial determinado por ele como o de maior intensidade para detectar frentes, representado pela equação 18 a seguir:

$$FG3 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{|\nabla\theta_e|} \left\{ \left[\left(\frac{\partial\theta_e}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial\theta_e}{\partial y} \right)^2 \right] \cdot A + 2 \cdot \frac{\partial\theta_e}{\partial x} \cdot \frac{\partial\theta_e}{\partial y} \cdot B \right\} \quad (18)$$

(equação melhor desenvolvida no tópico 3.2)

4.2.1.5 Imagem proporcional ao CAPE e CINE

A inibição convectiva e/ou as condições favoráveis à convecção foram mostradas a partir de cálculo da diferença de θ_e no nível de 1000 hPa e θ_{es} de todos os níveis de pressão, 1000 a 100 hPa, na longitude pretendida. A Figura resultante desse cálculo foi um perfil que possibilita identificar a formação de convecção e de nuvens convectivas, onde valores negativos caracterizam inibição e valores positivos mostram condições favoráveis à convecção assim como saber a altura (nível de pressão) que essas condições começam ou terminam. Esses resultados são proporcionais às áreas especificadas na Figura 18, onde CAPE mostra a Energia Potencial Convectiva Disponível e CIN mostra a Energia de Inibição Convectiva.

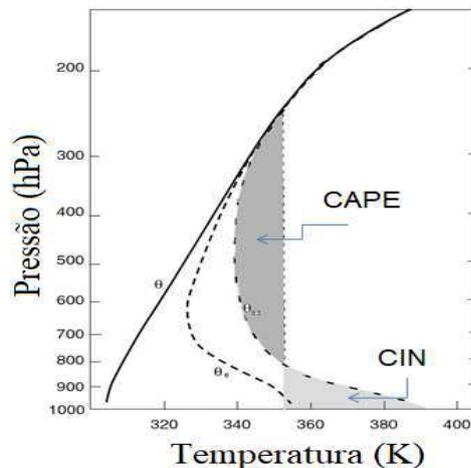


Figura 18: Exemplo de gráfico termodinâmico. Fonte: Notas de aula, SOUZA (2015) adaptado.

5 – RESULTADOS

5.1 Caso híbrido. 7 a 9 de Abril de 2014

Nas datas selecionadas, de 7 a 9 de abril de 2014, se desenvolveu uma faixa de nebulosidade em forma de virgula invertida estendendo-se sobre a Argentina (Figura 13). A análise dos campos de geopotencial e vento (Figura 13) em 925hPa revelam que esta faixa de nebulosidade é na verdade formada pela atuação simultânea de dois sistemas transientes. Um deles é um ciclone extratropical, que se forma sobre a costa da América do sul em torno das latitudes de 30°S e 40°S (Figura 19e). Durante sua fase de intensificação provoca uma incursão e ar frio sobre o continente, que não chega a ultrapassar a latitude de 40°S, ficando entre 60°O a 72°O (Figura 19). A nebulosidade desse sistema é formada no seu quadrante sudeste, onde ocorre o encontro de ar extratropical com uma língua de ar quente e úmido trazido de latitudes mais baixas (Figura 20).

A noroeste deste ciclone ocorre a incursão de uma alta transiente no continente sul-americano, que provoca uma incursão de ar frio nos moldes de Garreaud (2000) atingindo latitudes mais baixas (Figura 19 e até l). Esta incursão é responsável pela porção subtropical da faixa de nebulosidade que avança para nordeste à frente da incursão.

A faixa de nebulosidade foi denominada híbrida porque durante uma etapa do seu ciclo de vida ela aparece coesa, apesar de ser formada por dois sistemas qualitativamente diferentes (Figura 13 e). Apesar da faixa nebulosidade ser contínua, sua parte subtropical tem menor temperatura de topo de nuvem, e está associada à maiores taxas de chuva, segundo dados do TRMM (Figura 23).

Durante toda a evolução do sistema os subtrópicos se mantem mais aquecidos do que os trópicos, apresentando também um forte ciclo diurno (Figura 19). O aquecimento subtropical é concomitante à intensificação da BNOA. Nos horários de 18Z e 00Z o CAPE (não mostrado) é bem maior sobre o continente do que sobre o oceano, maior ainda sobre os subtrópicos do que sobre os trópicos. O CAPE é advectado para os extratropicos pelo ciclone.

Em 00Z do dia 08 a banda ainda está acoplada (Figura 13d), existe um valor alto de frontogênese (não mostrado) e o gradiente de umidade (Figura 22d) e temperatura são intensos (Figura 21d).

A circulação da ciclogênese (entre 32°S e 45°S) promove entrada de ar mais frio e seco para latitudes subtropicais (Figura 20 e 22), uma língua de ar mais úmido e quente do lado sudeste, provoca frontogênese (não mostrada).

As 06Z do dia 08 a subdivisão de umidade se dá até o nível de 850 hPa em 58°O (Figura 24 e). Isso ocorre devido ao ressecamento em torno de 37°S (Figura 24 e), confirmado também pelo bolsão de ar seco entre 850 e 700 hPa (Figura 24 f) possivelmente associado ao movimento descendente do ar (Figura 24 e). Entre 37°S e 35°S observa-se ar com maiores valores de θ_e posicionado sobre ar com valores menores de θ_e (Figura 24 d), o que caracteriza estabilidade potencial, a partir de 950hPa. Nesse horário a chuva se forma com a ajuda da convergência (Figura 24 b).

As 12Z do dia 8 de Abril, a incursão a leste dos Andes chega a 26°S (Figura 19 f). A incursão vertical de ar seco chega ao nível de 1000 hPa (Figura 24 k). Já é possível perceber duas regiões distintas de acentuado gradiente de θ e de θ_e , centradas em 40°S e em 30°S (Figura 24 i e j). No perfil de θ_e observa-se a assinatura da língua úmida, caracterizada por uma estreita faixa de ar úmido em meio ao ar mais seco formado pela circulação do ciclone.

Seis horas depois (18Z), o bolsão de ar seco cresceu e a instabilidade potencial é mais intensa. Na imagem de satélite (Figura 13 g), observa-se que a faixa de nebulosidade em formato de vírgula começa a se subdividir. Assim que acontece a separação das incursões a frente subtropical apresenta valores de frontogênese maiores e sobre uma área maior do que a porção extratropical.

A frente localizada em 40°S é mais tênue, e estável em θ , que decresce com a altitude. Já a frente posicionada em 30°S é mais intensa e tem perfil neutro em θ até aproximadamente 880 hPa. A Figura 25e mostra que a incursão de ar frio chega a 25°S em 65°O.

A partir de 00Z do dia 09 o gradiente de temperatura se ameniza (Figura 21 f) enquanto que o de umidade se intensifica desde 00Z do dia 08 (Figura 22 f). Esta diferença no comportamento das intensidades dos gradientes de temperatura e umidade é particularmente clara para a incursão subtropical. O gradiente de temperatura em 25°S está entre 2,75 e 3°C/100km (Figura 21 i) e na latitude de entre 40 e 45°S chega a 3,5°C/100km (Figura 21 i). O gradiente de umidade (Figura 22 i) entre 30°S e 25°S atinge valores maiores do que 0,006g/kg/100km enquanto que na latitude de 47°S a 40°S esses valores não atingem 0,0035 g/kg*100km. Há advecção horizontal, com movimento de sul para norte, até 950 hPa, Como a mesma advecção não ocorre em 1000mb, este efeito acaba contribuindo para a instabilidade potencial. A frente subtropical avança para 27°S, com neutralidade em θ e instabilidade em θ_e (Figura 24 c e d).

As 18Z do dia 9 de Abril, a incursão chega a 22°S (Figura 20 i) aproximadamente. Os Figuras 21 j e 22 j mostram que, em 58° O, o contraste de temperatura entre as massas de ar extratropical e subtropical é tênue, mas o contraste de umidade atinge um máximo.

A Figura 24 f mostra claras diferenças entre as massas de ar extratropical e subtropical. A massa de ar extratropical é caracterizada por inibição convectiva moderada em toda a troposfera, enquanto a subtropical mostra inibição convectiva forte até 900 hPa e moderada até 750mb, e CAPE desse nível em diante. Estas diferenças (também mostrada na Figura 25 f) são importantes, pois significam que apenas chuva estratiforme é possível nos extratropicais, enquanto que nos subtropicais é possível disparar chuva convectiva, contanto que haja um distúrbio capaz de forçar movimento ascendente até que o ar de baixos níveis vença a camada de inibição convectiva. Estas diferenças estão presentes durante todo o ciclo de vida do distúrbio (não mostrado). A comparação com o painel e da mesma Figura, mostra que fronteira do CAPE coincide com a fronteira entre as massas subtropical úmida e extratropical seca. Esta fronteira coincide com o limite da massa de ar úmido e migra para o norte juntamente com a incursão de ar mais frio e mais seco. A análise do painel d (Figura 24) mostra que a região de fronteira entre as massas de ar, entre 40°S e 30°S, é caracterizada por um perfil estável em temperatura potencial equivalente, o que evidencia ser de fato necessário algum forçamento para que seja vencida a camada de inibição convectiva. O horário representado na Figura 24 (a a f) coincide com o horário de chuva. O painel b mostra uma faixa de forte convergência marcando o encontro entre as massas de ar subtropical e extratropical. Esta convergência é, possivelmente o mecanismo que força o levantamento do ar além da camada de inibição convectiva. O horário posterior a chuva está representado na Figura 25 (a a f).

No horário de 12Z do dia 8 existe uma faixa de nebulosidade coesa, sendo mais densa na parte subtropical (Figura 13). Observando os perfis (Figura 25 c a f) é possível ver um comportamento quase neutro em 40°S e 30°S. Em torno dessas latitudes há frentes em θ_e , com perfil quase neutro até 900hPa (Figura 25 d) e estabilidade potencial de ar dessa primeira camada com relação aos níveis superiores. Faixa de convergência do vento que cruza 58° em 40°S e 30°S. Aumento da água precipitável com o crescimento vertical da coluna úmida (Figura 25 c) associado a movimento ascendente nessas duas latitudes. Em 35°S forte divergência do vento, ressecamento associado a movimento descendente. Este ressecamento acontece de cima para baixo, seguindo verificado no horário imediatamente anterior (06Z do dia 8, não mostrado). A fronteira de instabilidade potencial e de CAPE (Figura 25 d e f) está localizada em 30°S, com inibição convectiva até 800 hPa aproximadamente. Em 40°S há inibição convectiva em toda a camada. A CAPE está associado a um perfil decrescente de θ_e , que caracteriza toda a faixa tropical e equatorial. A chuva ocorre em 30°S, onde há coincidência da convergência do vento, movimento ascendente e CAPE. (Figura 25 b, e e h).

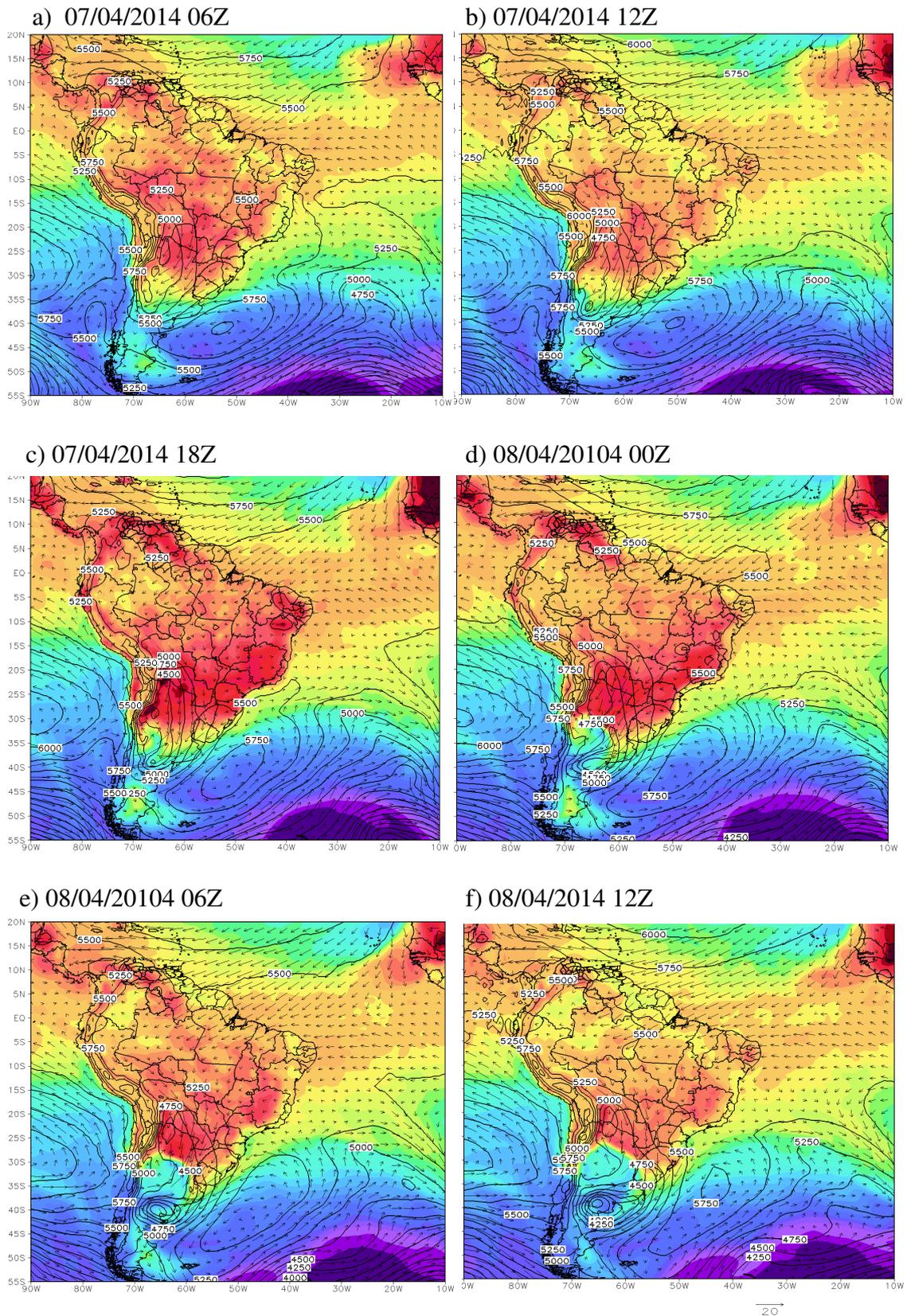


Figura 19: Temperatura em °C (cores), vento (setas m/s) e geopotencial (linhas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

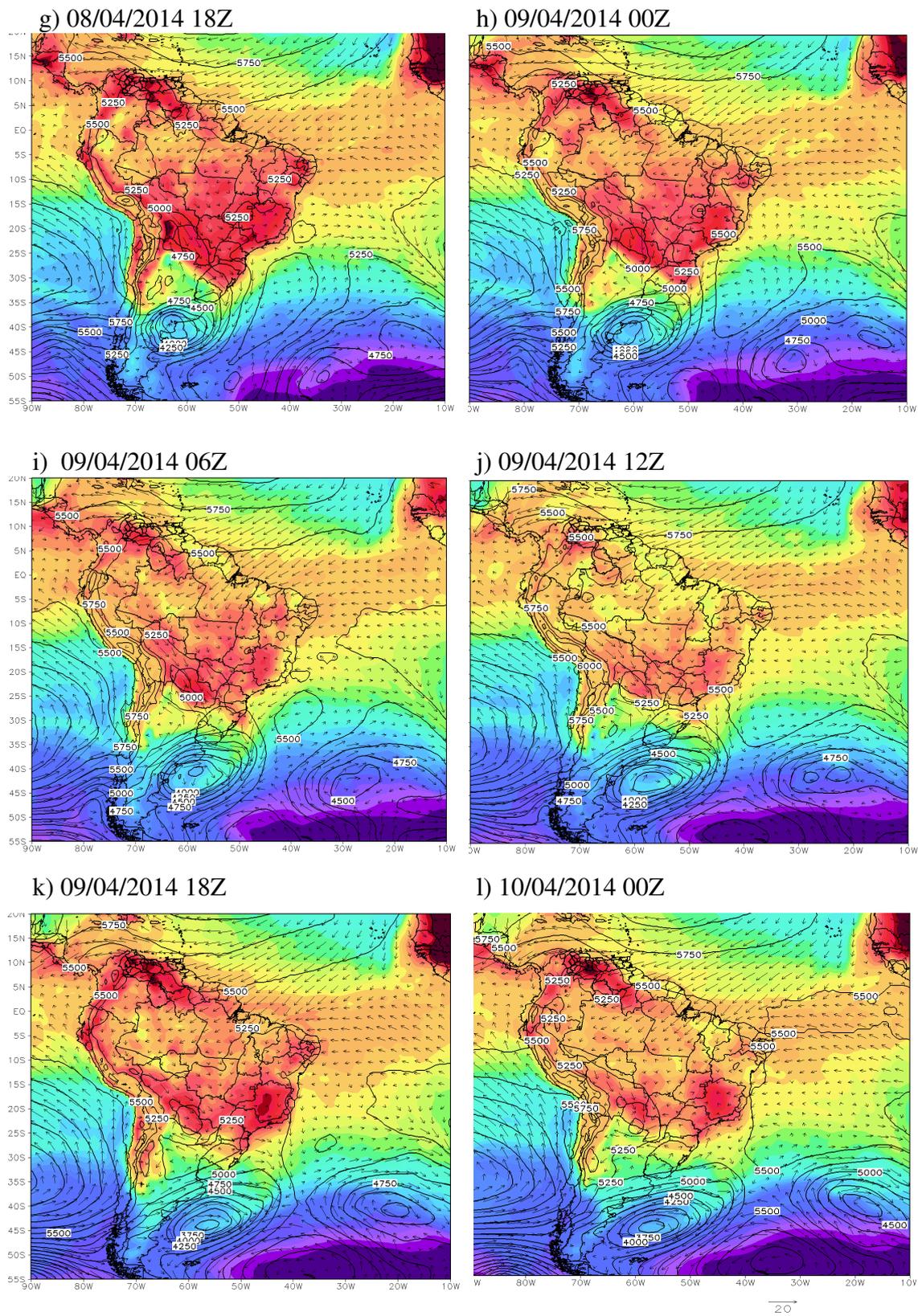


Figura 19 continuação: Temperatura em °C (cores) , vento (setas m/s) e geopotencial (linhas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

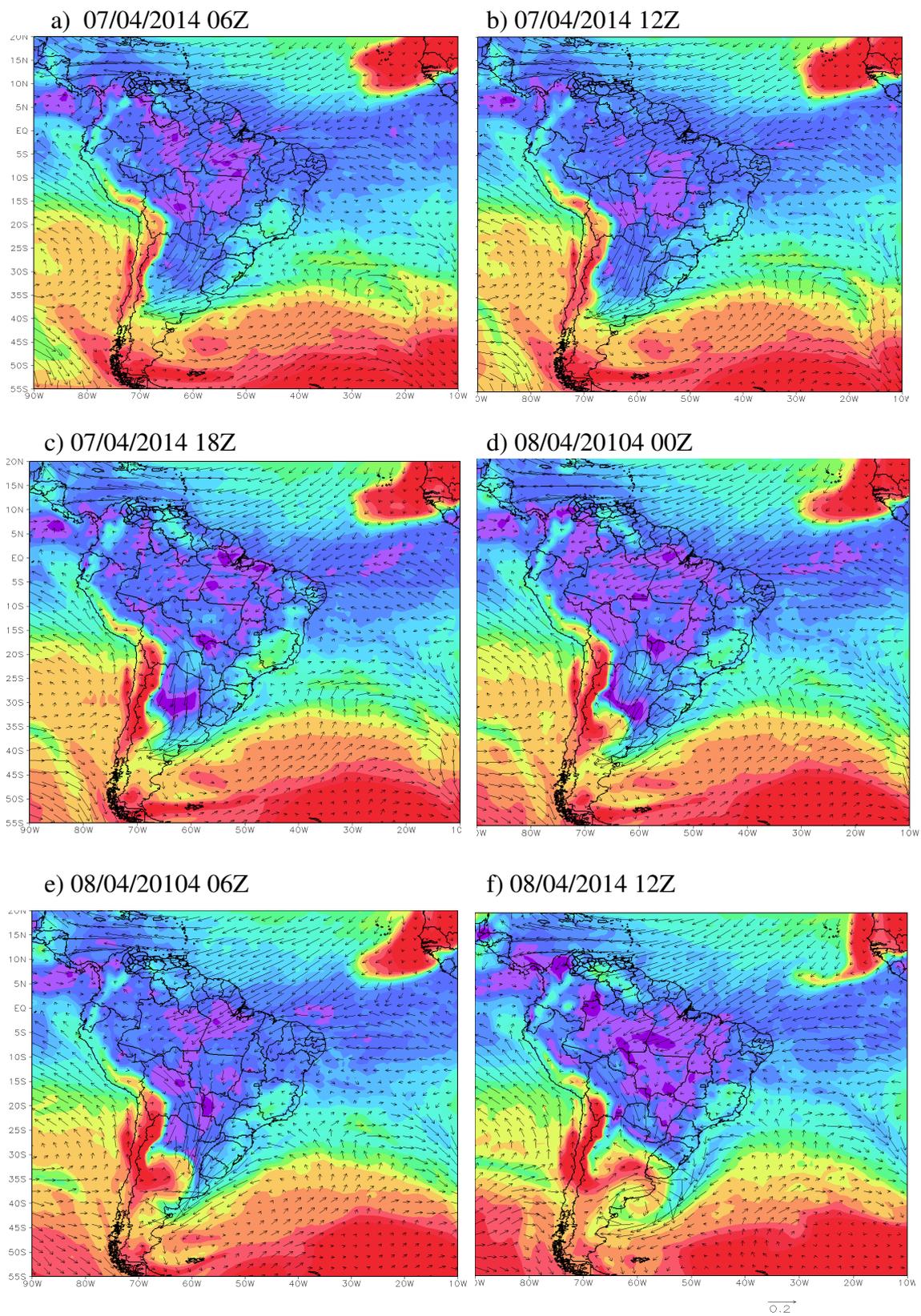


Figura 20: Umidade específica em g/kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

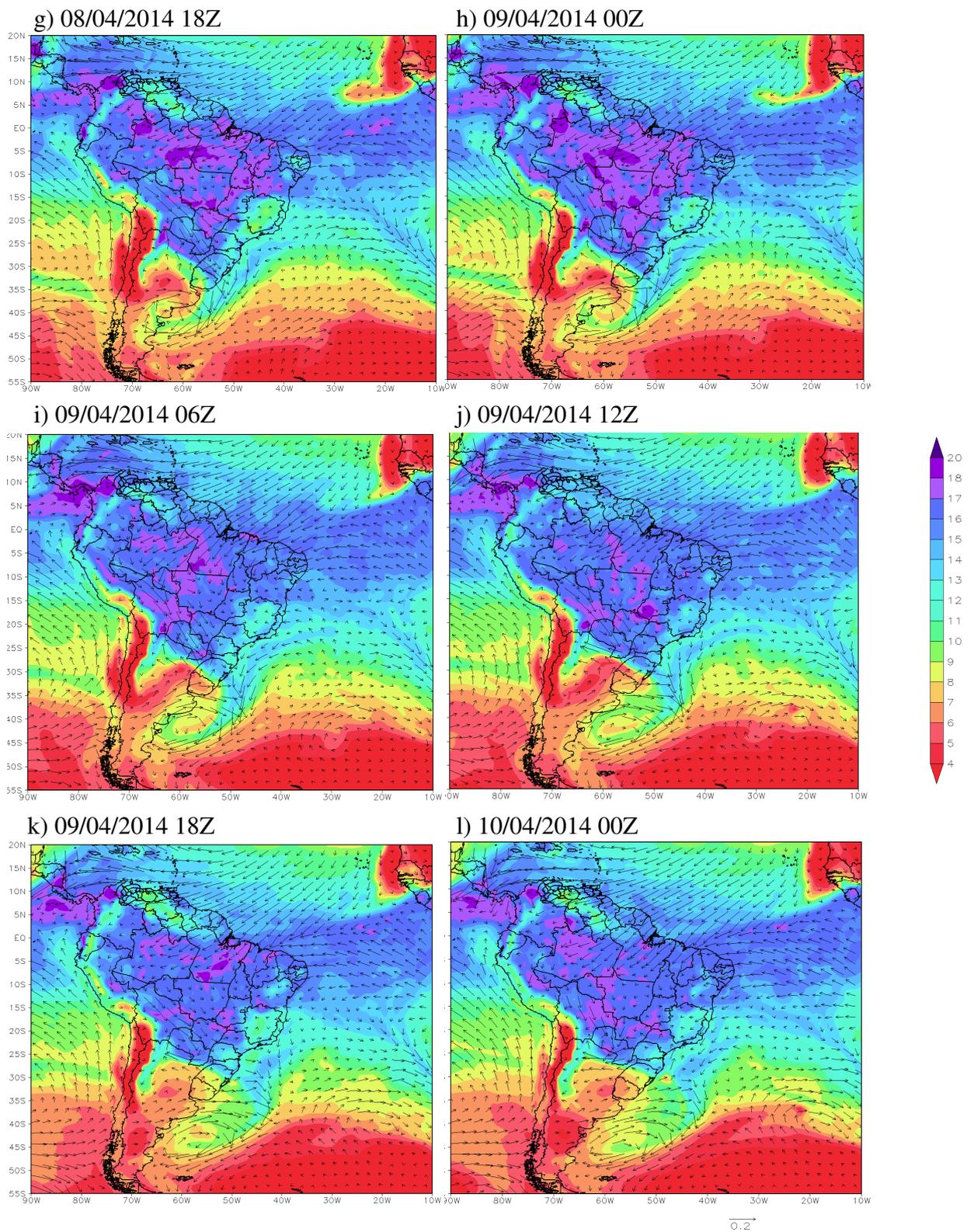


Figura 20 continuação: Umidade específica em g/kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

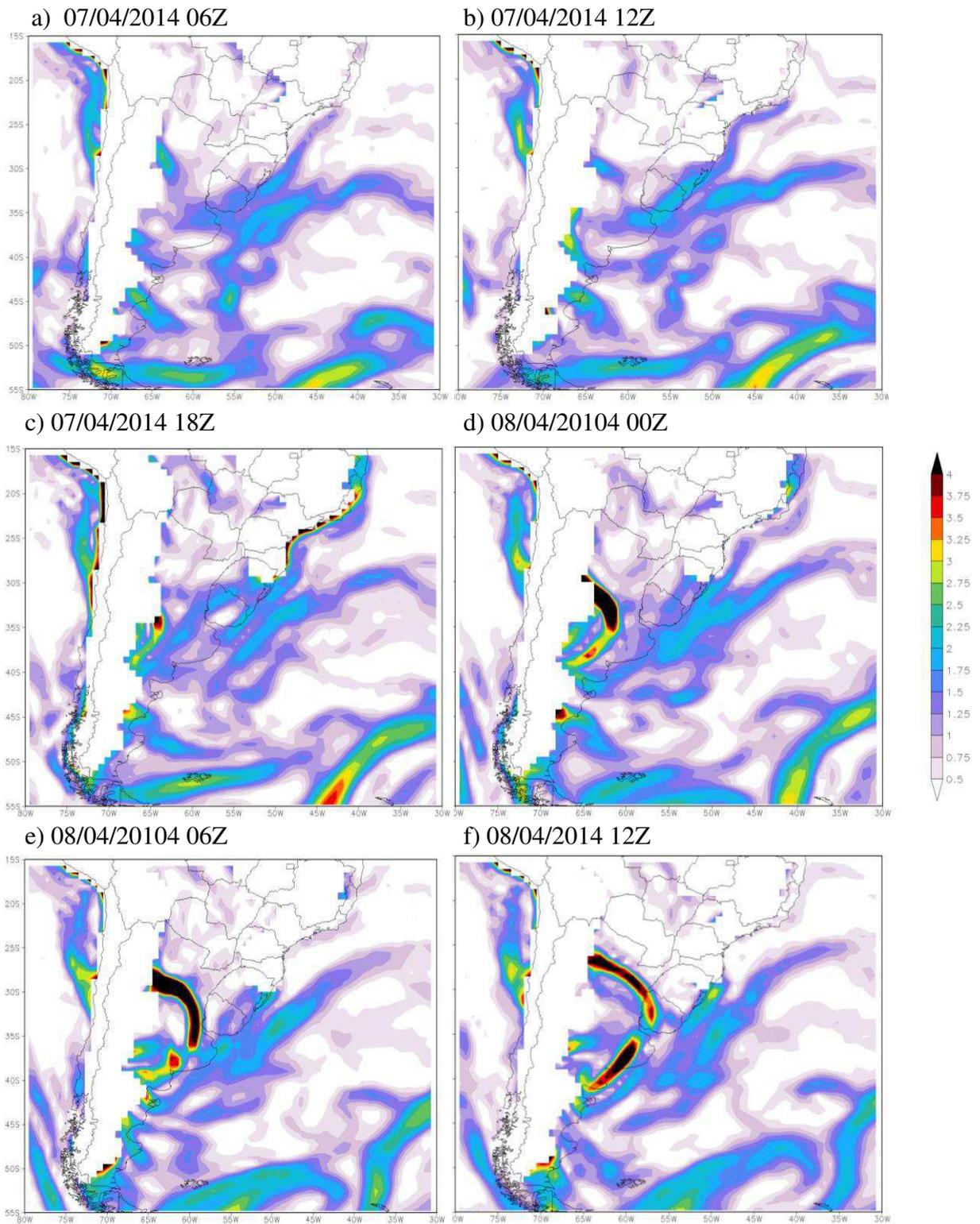


Figura 21: Magnitude do gradiente de temperatura °C/100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

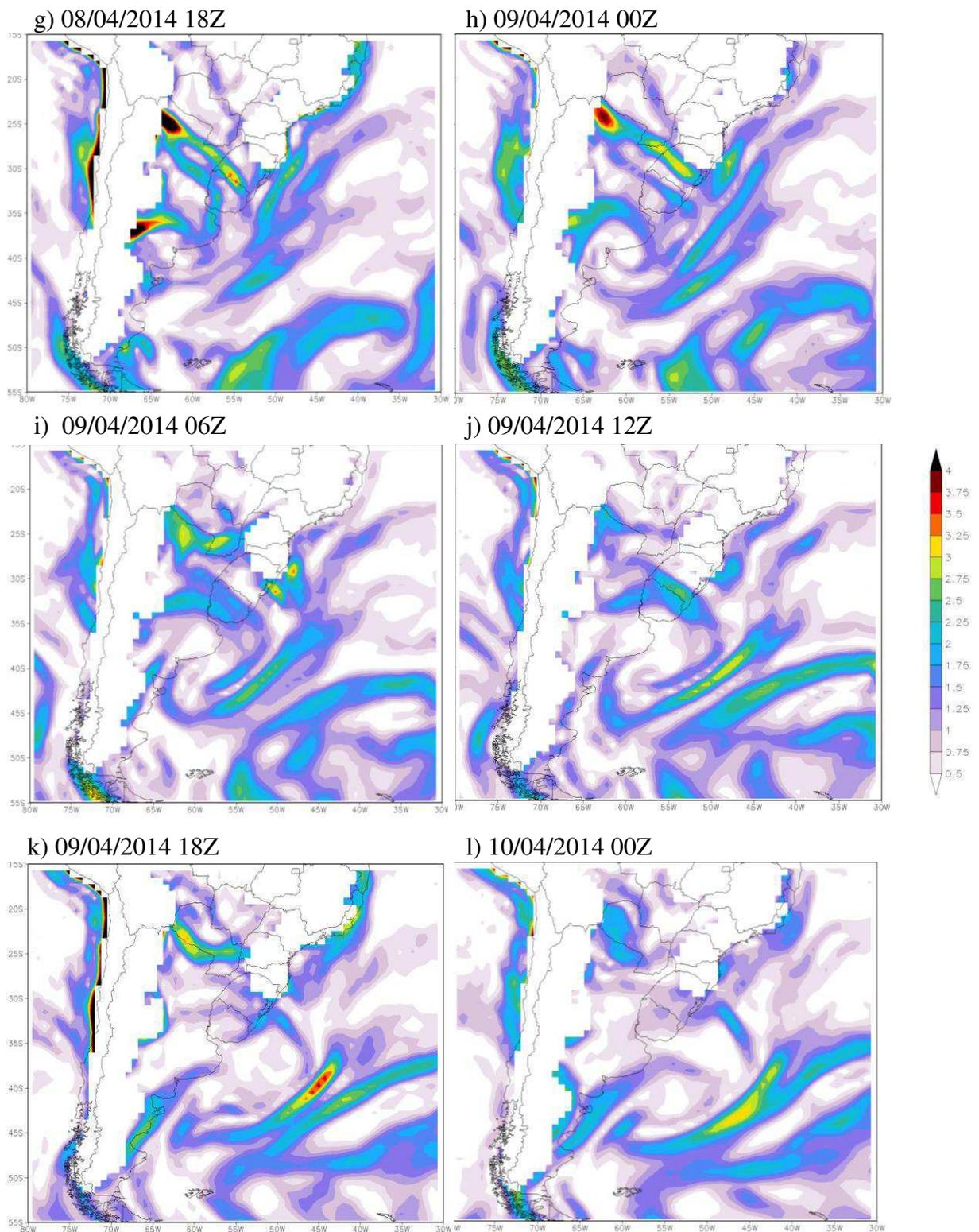


Figura 21 continuação: Magnitude do gradiente de temperatura °C/100Km. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

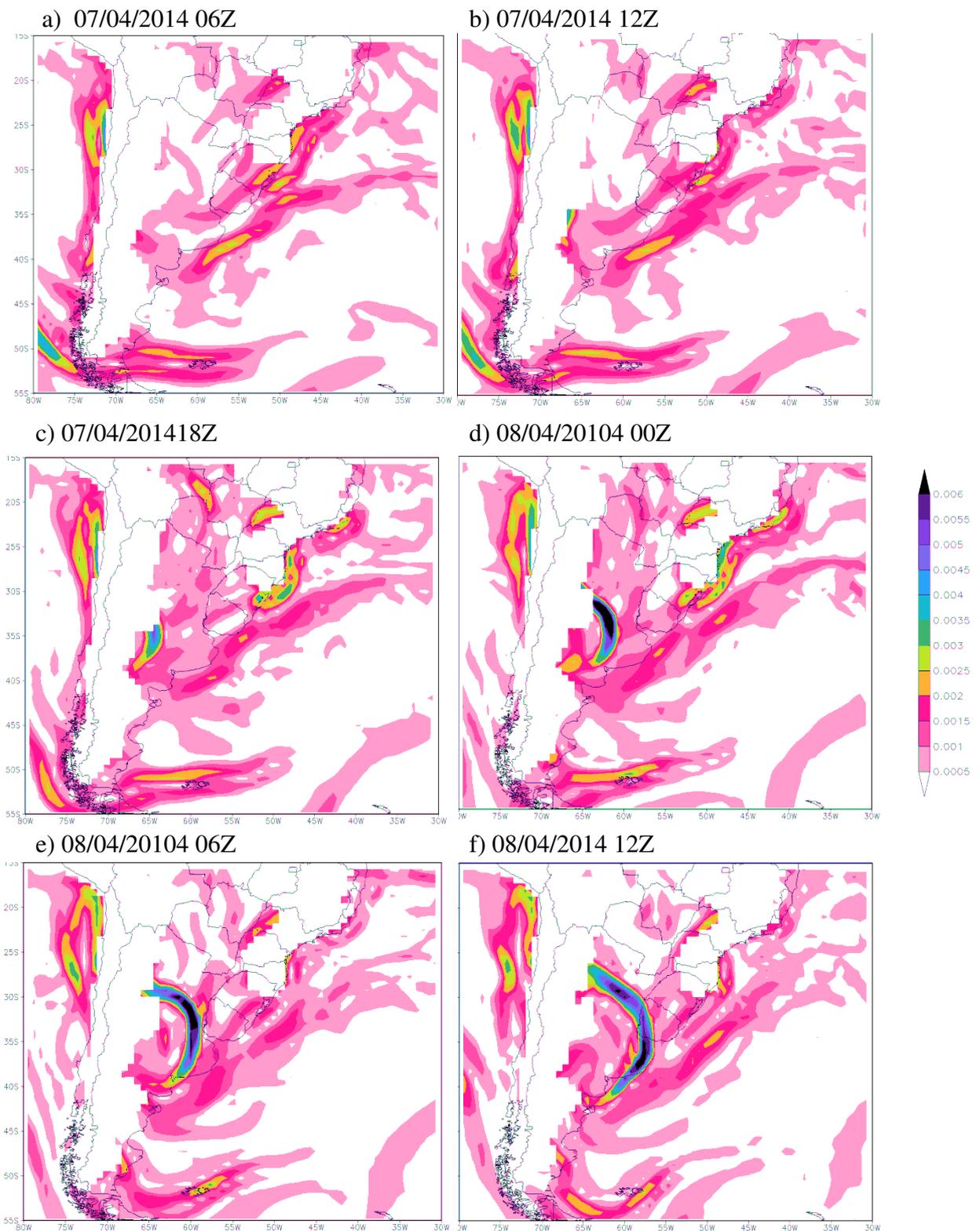


Figura 22: Magnitude do gradiente de umidade $g/kg*100Km$. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

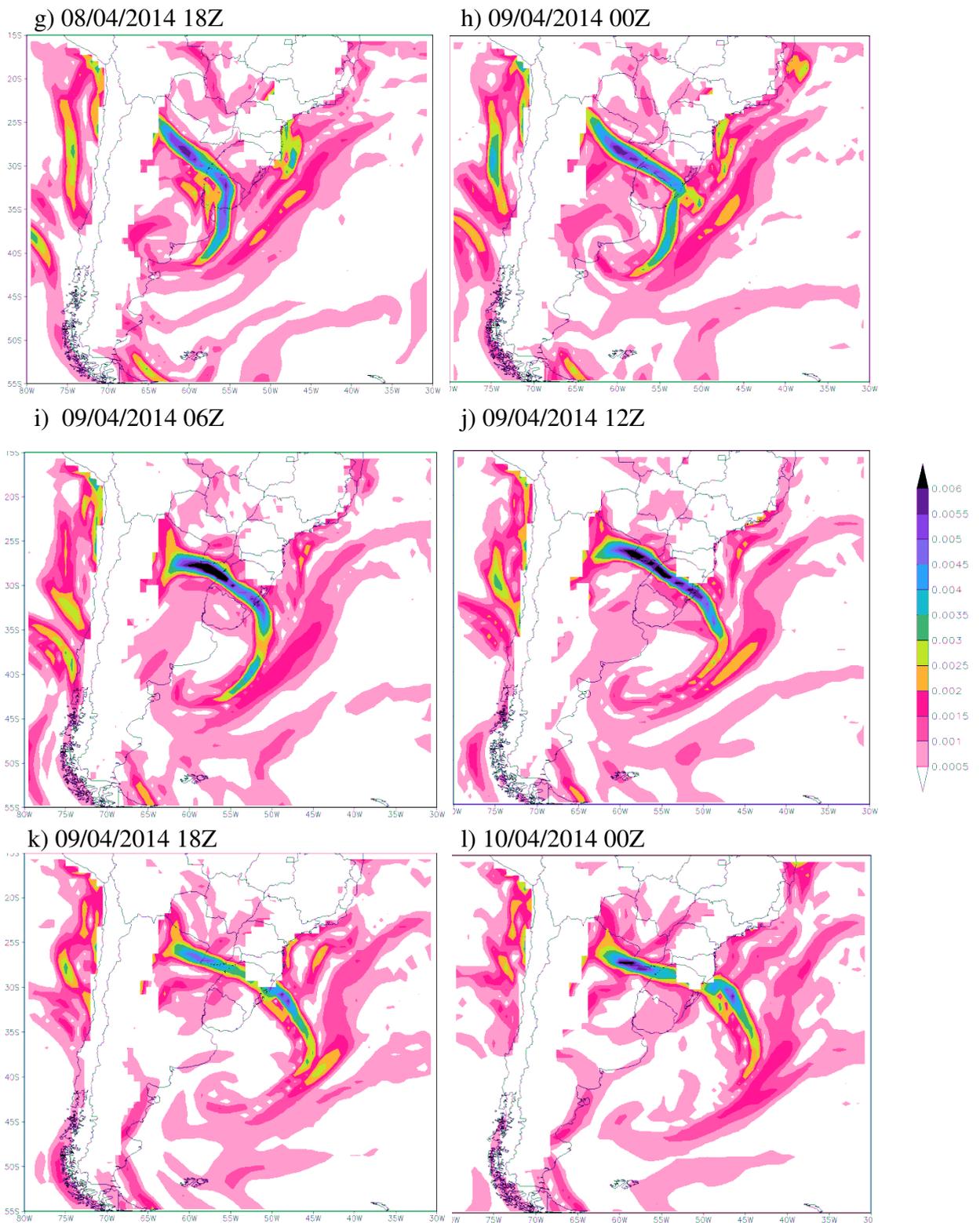


Figura 22 continuação: Magnitude do gradiente de umidade $g/Kg*100Km$. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

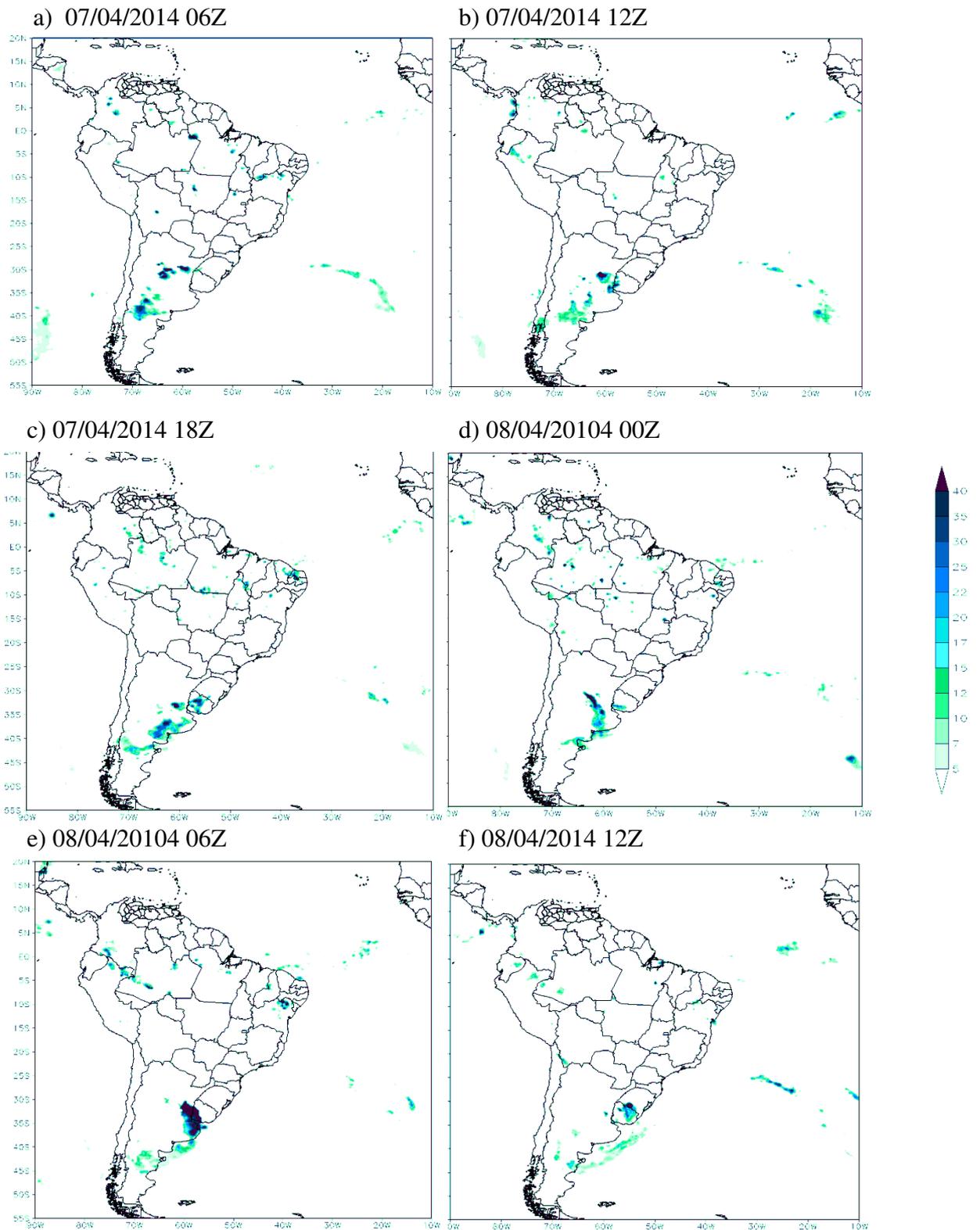
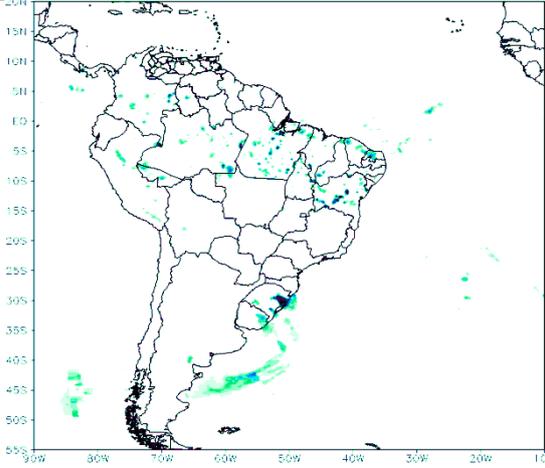
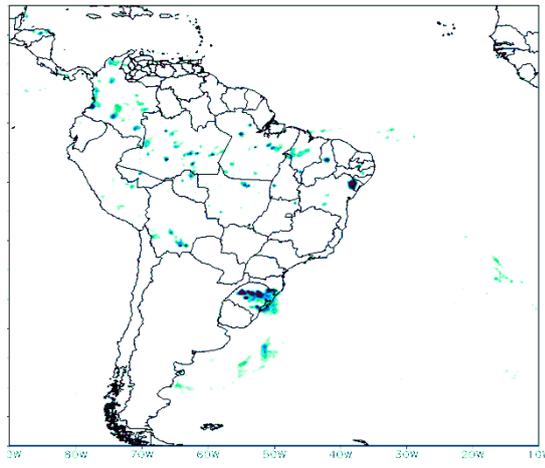


Figura 23: Precipitação acumulada de 6 horas em mm. A cada 6 horas. Fonte: Autora

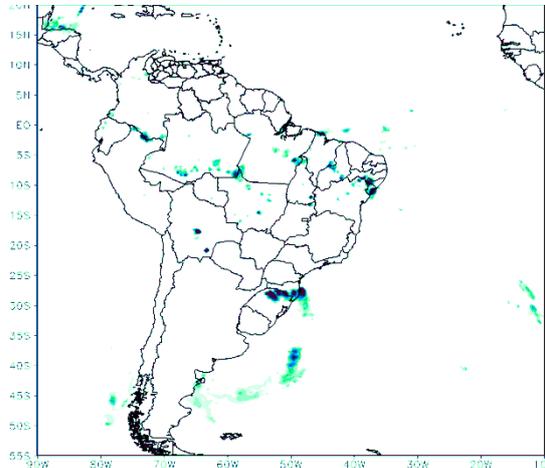
gg) 08/04/2014 18Z



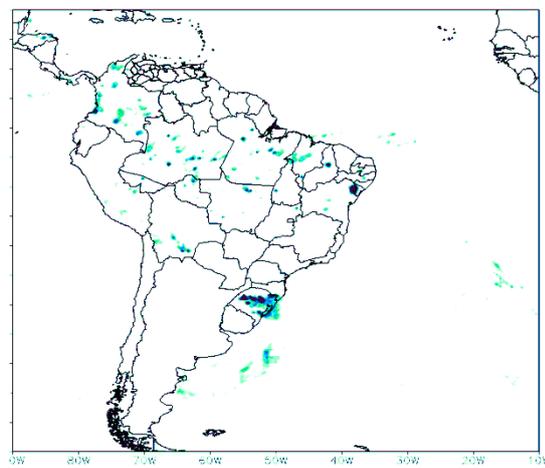
h) 09/04/2014 00Z



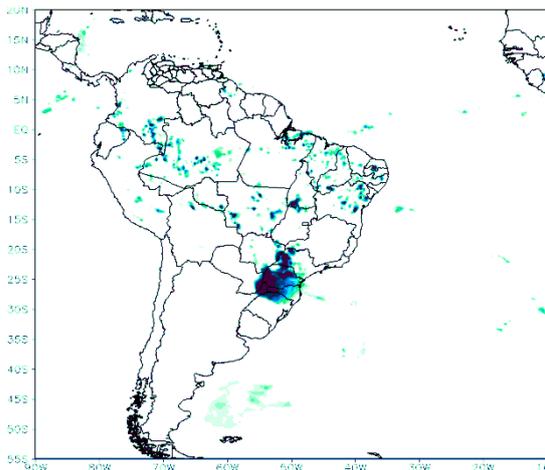
i) 09/04/2014 06Z



j) 09/04/2014 12Z



k) 09/04/2014 18Z



l) 10/04/2014 00Z

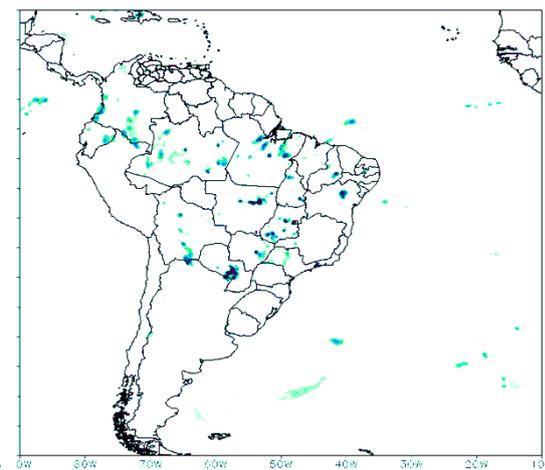


Figura 23 continuação: Precipitação acumulada de 6 horas em mm. A cada 6 horas. Fonte: Autora

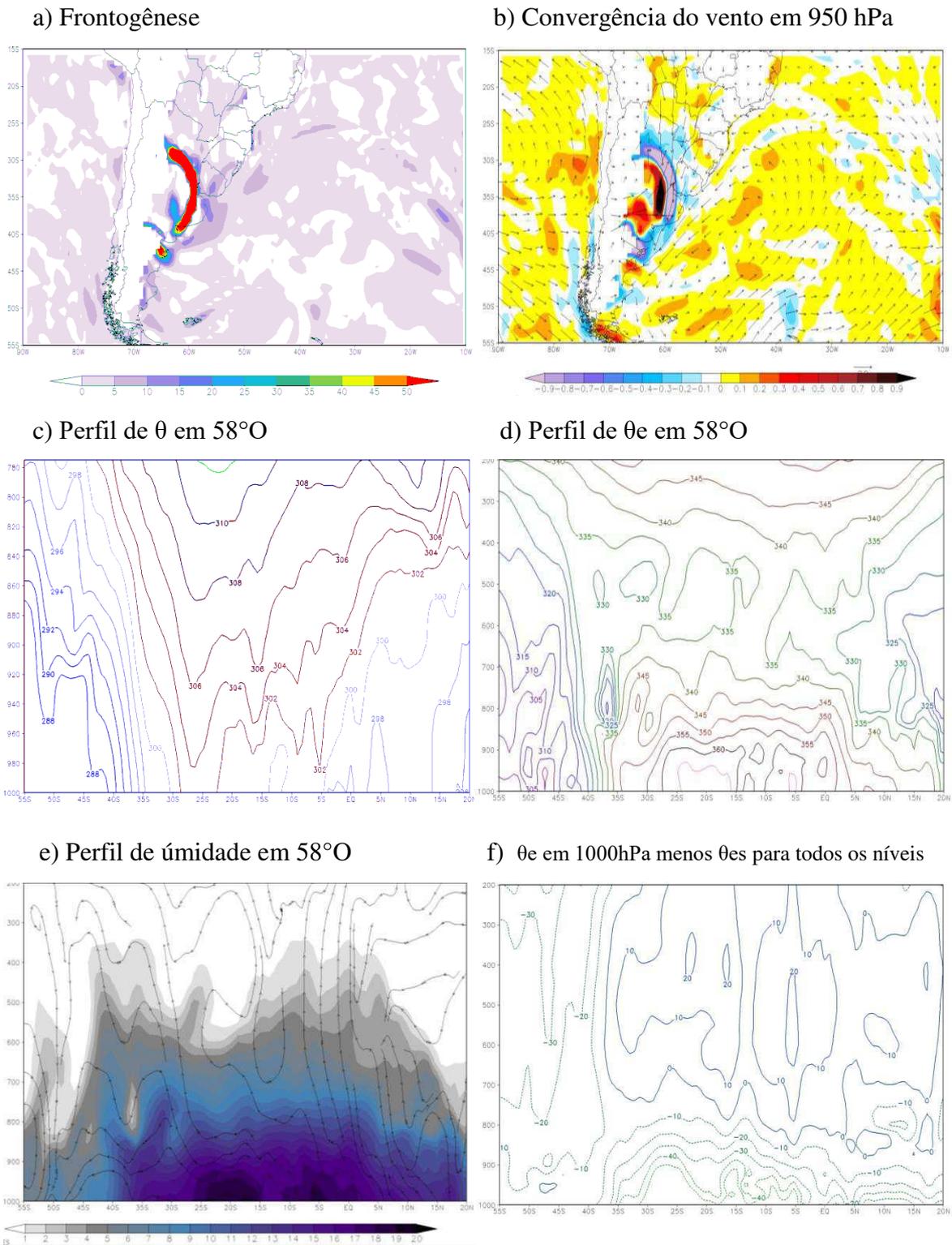
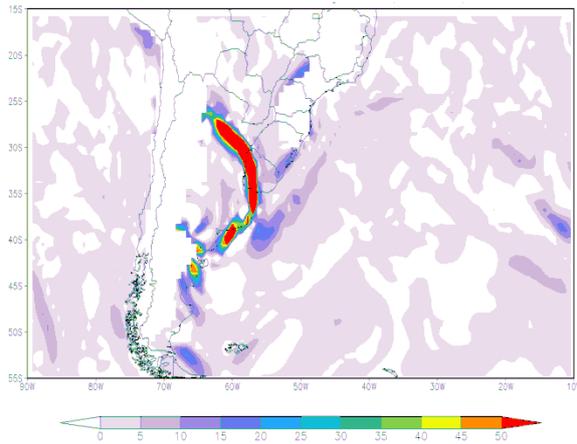
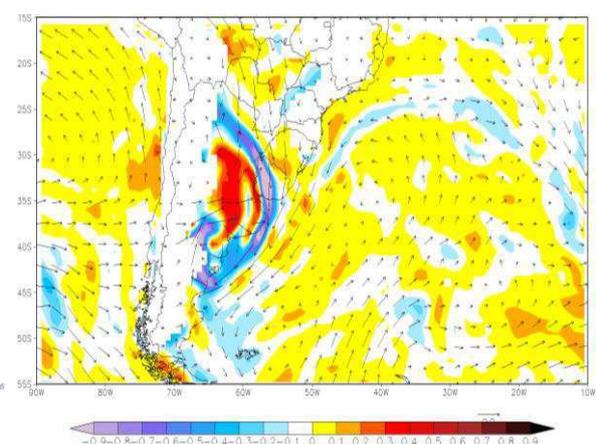


Figura 24: a) Frontogênese por deformação em temperatura potencial equivalente ($K/100km^2/dia$) b) convergência do vento (valores negativos), para 925hPa c) Perfil de θ d) perfil de θ_e e) perfil de umidade específica em g/Kg (cores) e movimento do vento em m/s (setas). f) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de $58^\circ O$, e para 06Z do dia 08/04/2014. Fonte: autora.

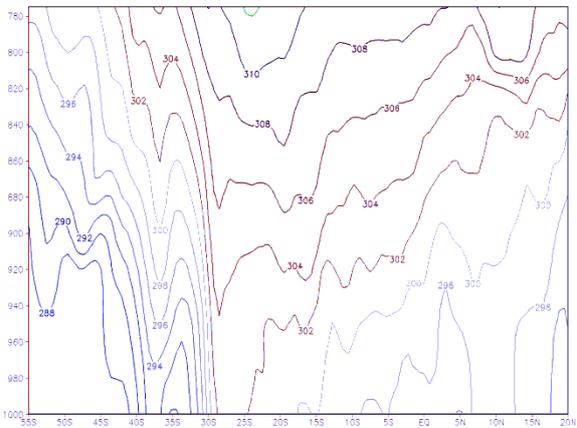
a) Frontogênese



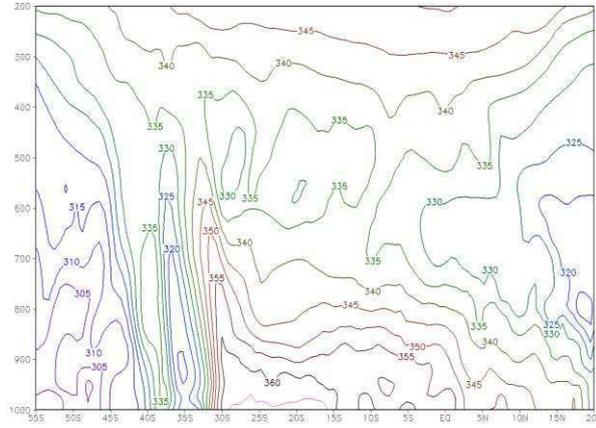
b) Convergência do vento em 950 hPa



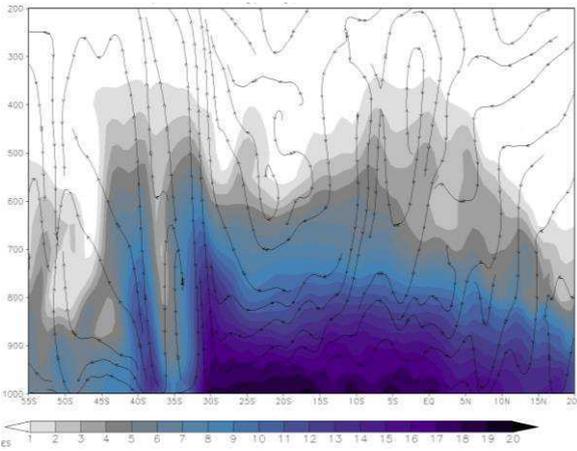
c) Perfil de θ em 58°O



d) Perfil de θ_e em 58°O



e) Perfil de umidade em 58°O



f) θ_e em 1000hPa menos θ_e s para todos os níveis

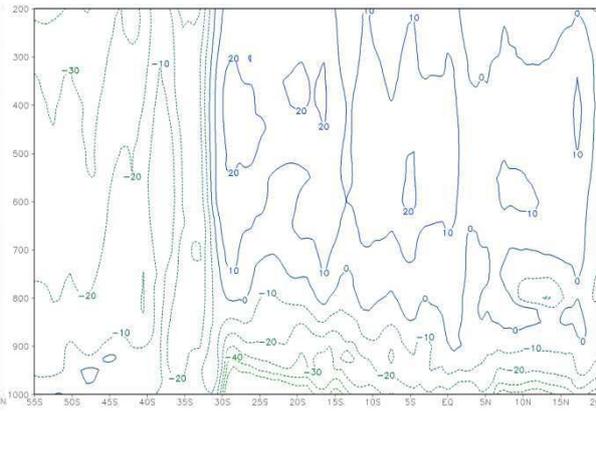


Figura 25: a) Frontogênese por deformação em temperatura potencial equivalente ($K/100km*dia$) b) convergência do vento (valores negativos), para 925hPA c) Perfil de θ d) perfil de θ_e e) perfil de umidade específica em g/Kg (cores) e movimento do vento em m/s (setas). f) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de $58^\circ O$, e para 12Z do dia 08/04/2014. Fonte: autora

5.2 Incursão – período de 7 a 10 de janeiro de 2011

O período desta excursão (18Z do dia 07 a 12Z do dia 10 de janeiro de 2011), que ocorreu sobre o sul da América do Sul, causada pela passagem de uma alta transiente (Figura 26 campo de geopotencial), apresenta um ciclo diurno forte (Figura 26). Porém sempre com a massa tropical mais quente e úmida do que a massa extratropical (Figura 27). Os maiores valores do módulo dos gradientes de umidade e temperatura avançam de aproximadamente 40°S até aproximadamente 20°S durante o período da excursão (Figura 28 e 29) e atingindo menores latitudes à medida que o tempo avança, chegando a 25°S.

Durante os horários iniciais da excursão, em particular em 18Z do dia 7 de janeiro e 00Z do dia 8 de janeiro, os subtropicais são mais secos do que os trópicos, com a umidade específica assumindo valores entre 11 e 14 g/Kg e 16 e 18 g/kg respectivamente. A partir de 06Z do dia 8 de janeiro é possível ver como o escoamento com componente de norte, a leste dos Andes, transporta a massa de ar mais úmido. Esta massa chega até 30°S em 12Z do dia 8 (Figura 27, c a j).

Durante todo o período os valores de frontogênese não passam de 35 K/100Km*dia.

A excursão de ar extratropical rumo a latitudes mais baixas na América do Sul começa por volta de 18Z do dia 8 de janeiro de 2011 (Figura 26 e), ganhando força 12 horas depois (Figura 26 c), quando o módulo do gradiente de temperatura é maior do que 4°C/100km (Figura 28 c). A massa de ar seca apresenta umidade em 9 g/Kg e a massa de ar úmida atinge mais de 16 g/kg.

Em 12Z do dia 9 a excursão atinge aproximadamente 30°S (Figura 26 h). O perfil de umidade relativa para 62°O (Figura 31 e), longitude escolhida de forma a intersectar o local de chuva, mostra que o avanço da massa de ar extratropical intensifica o gradiente de umidade (Figura 29 k). A partir de 18 z do dia 09, com o módulo do gradiente de umidade superior 0,0025 g/kg*100Km, considera-se que há uma frente em umidade. Esta frente se intensifica durante as 18 horas subsequentes, superando 0,004 g/Kg*100Km as 12Z do dia 10.

É importante salientar uma diferença de comportamento entre os módulos do gradiente de temperatura e de umidade. O módulo do gradiente de temperatura atinge seus valores mais altos na fase inicial da excursão, diminuindo progressivamente uma vez que esta atinge latitudes subtropicais. Em 06Z do dia 08, o módulo do gradiente de temperatura supera 4°C/100km, numa faixa em torno de 43°S. À medida que a excursão avança, este módulo vai perdendo intensidade, tendo sido reduzido a 2°C/100km quando a faixa atinge tantos 31°S. Em contrapartida, o módulo do gradiente de umidade assume valores máximos em torno de

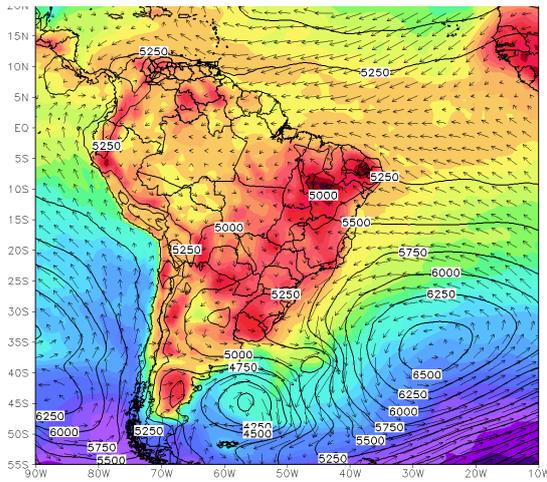
0,001 g/Kg*100Km em 06Z do dia 8 em 31°S, aumentando progressivamente até atingir 0,0035 g/*Kg*m) em 12Z do dia 10 na latitude de 23°S.

A chuva associada à incursão tem início em 18Z do dia 07 (Figura 30 a). Em 06Z do dia 10 (Figura 30 k) a precipitação se desloca para nordeste à frente do gradiente de umidade (Figura 29 k), que atinge seu máximo nesse horário.

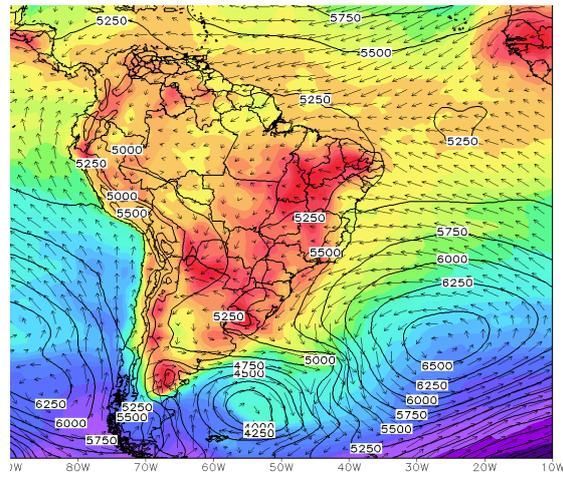
Os perfis de θ e θ_e mostram a fronteira da incursão entre 30° e 25°S. Nesta fronteira o perfil vertical se mostra neutro com relação à instabilidade convectiva. Já em 35°S entre 1000 e 700 hPa existe uma região de forte instabilidade (Figura 31 c e d).

A Figura 31 f, mostra entre 30°S e 25°S uma fronteira bem definida das condições convectivas entre os subtropicais e os extratropicais. Essa condição se mantém por vários horários durante o desenvolvimento da incursão. Em 22°S e 62°O, que é um local de chuva, a inibição convectiva se mantém alta até o nível de 800 hPa. Com base na Figura 31 b, propõe-se que a convergência do vento seja o mecanismo físico que promove a ascensão do ar, possibilitando que a inibição convectiva seja vencida (Figura 31 f).

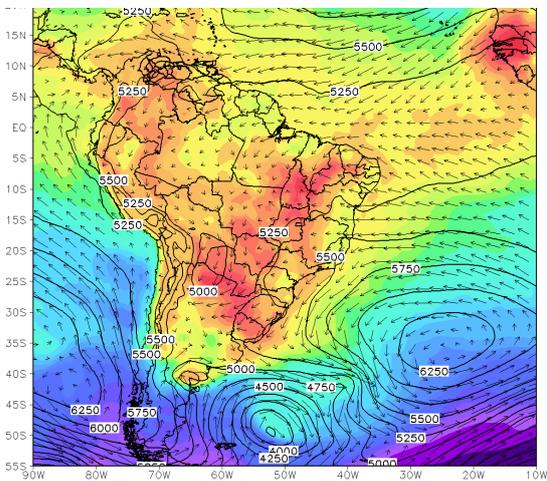
a) 07/01/2011 18Z



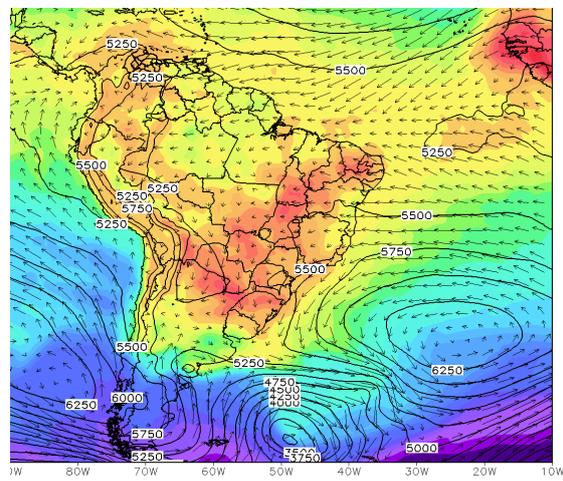
b) 08/01/2011 00Z



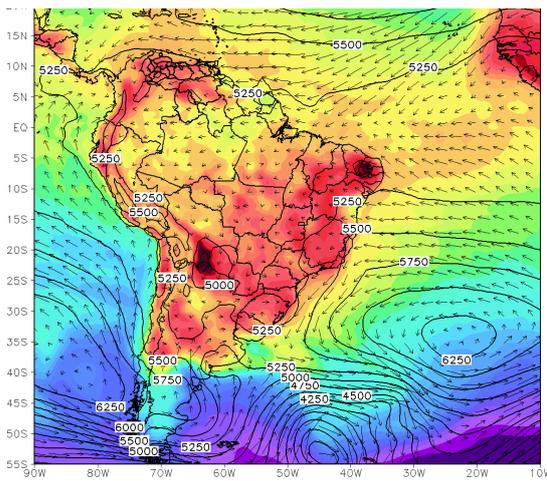
c) 08/01/2011 06Z



d) 08/01/2011 12Z



e) 08/01/2011 18Z



f) 09/01/2011 00Z

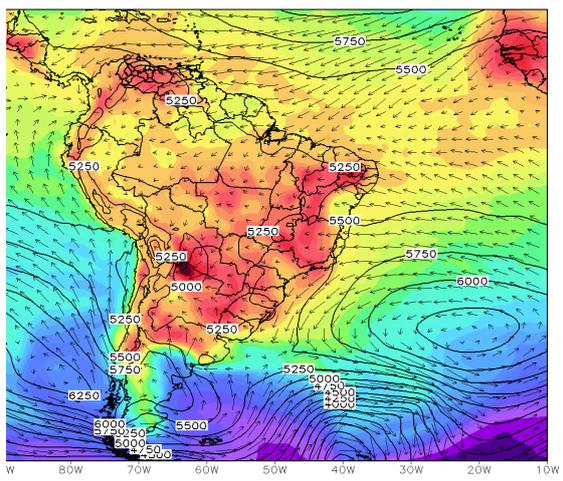
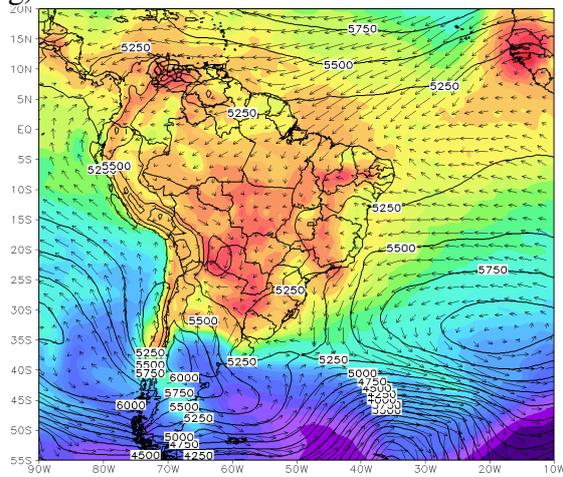
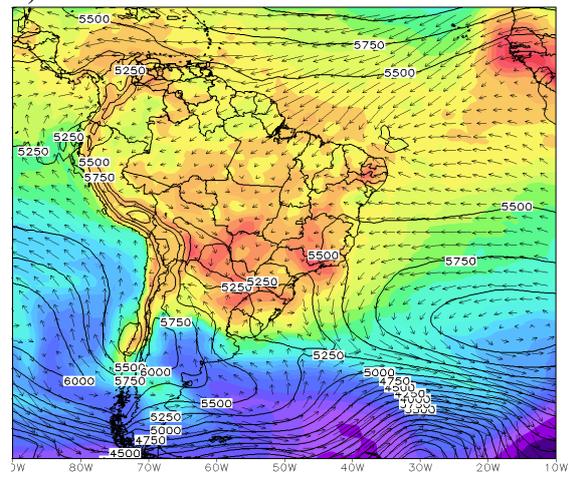


Figura 26: Temperatura em °C (cores), vento (setas m/s) e geopotencial (contorno). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

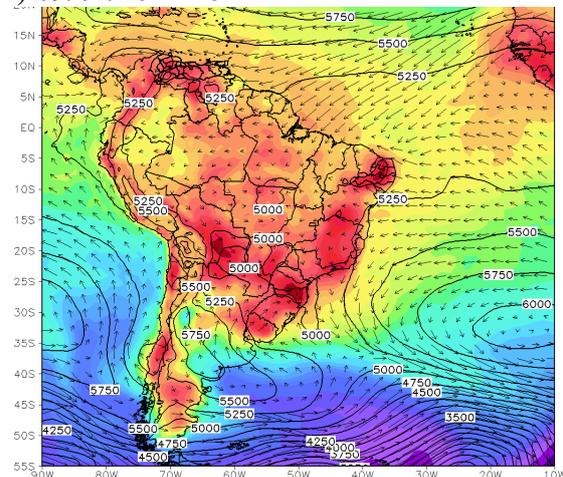
g) 09/01/2011 06Z



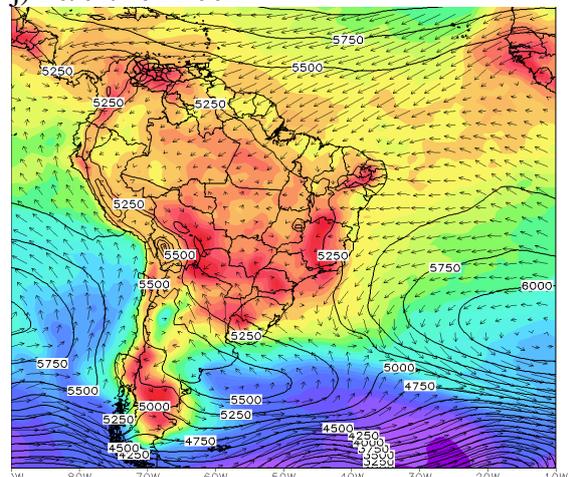
h) 09/01/2011 12Z



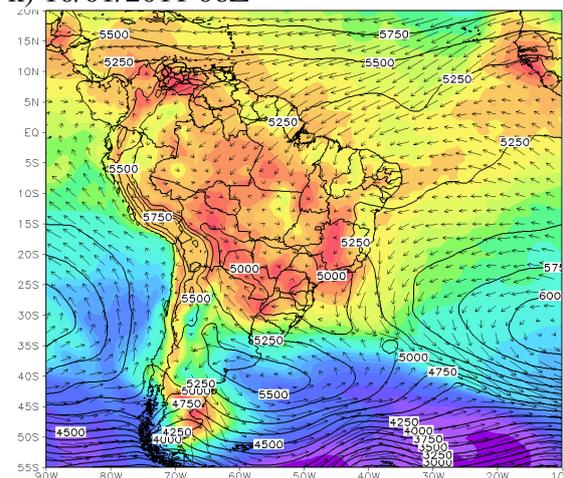
i) 09/01/2011 18Z



j) 10/01/2011 00Z



k) 10/01/2011 06Z



l) 10/01/2011 12Z

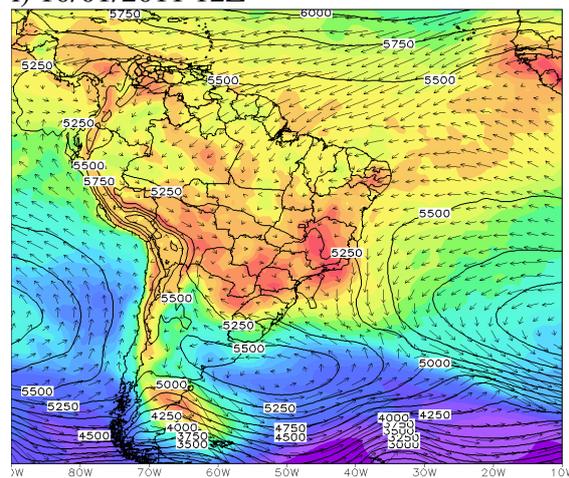


Figura 26 continuação: Temperatura em °C (cores), vento em m/s (setas) e geopotencial (contorno). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

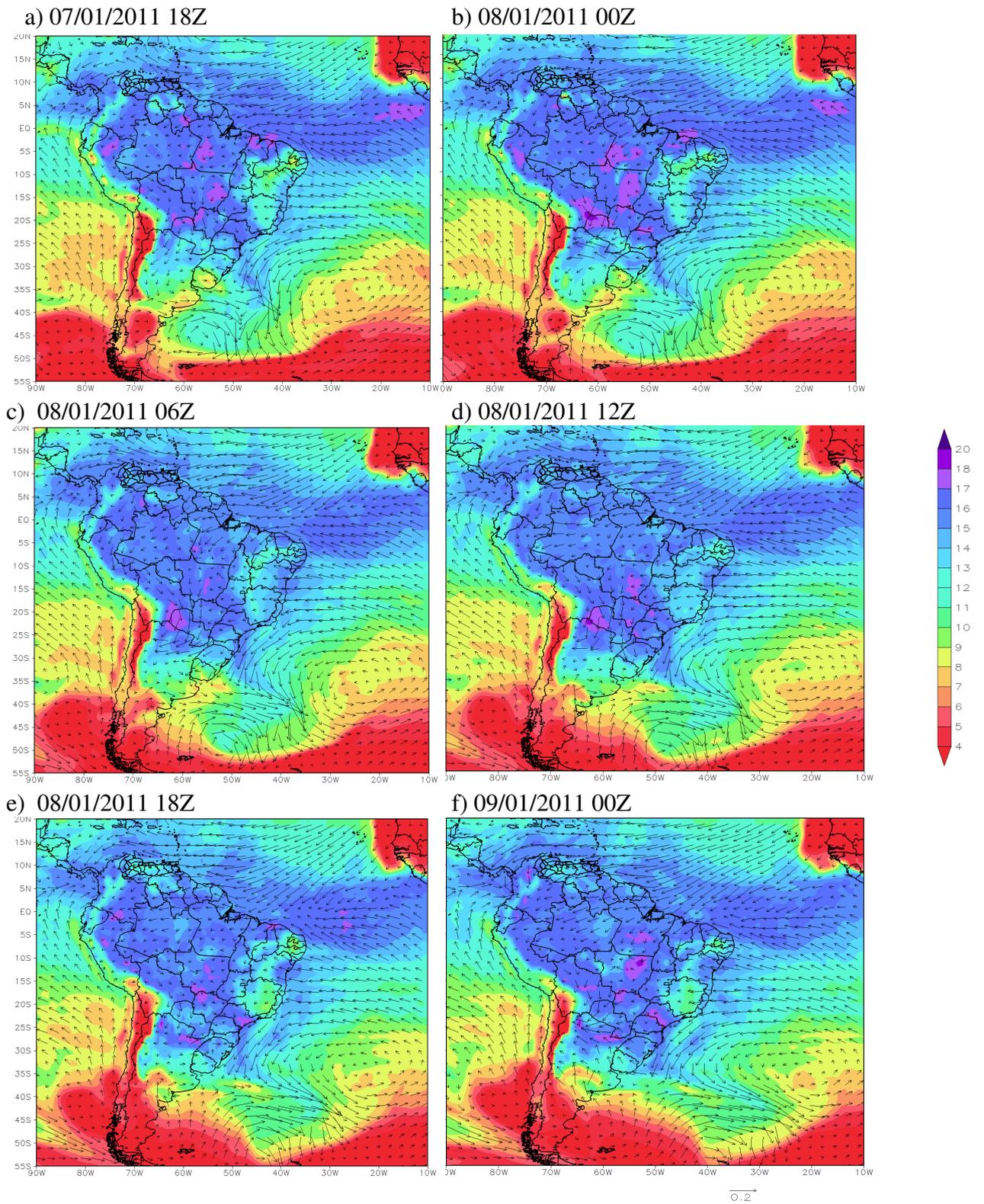
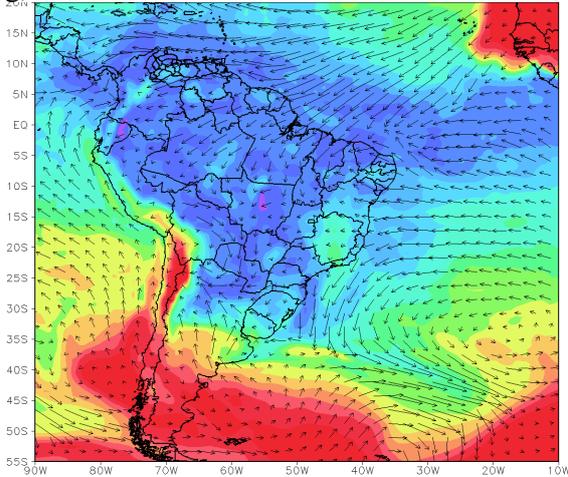
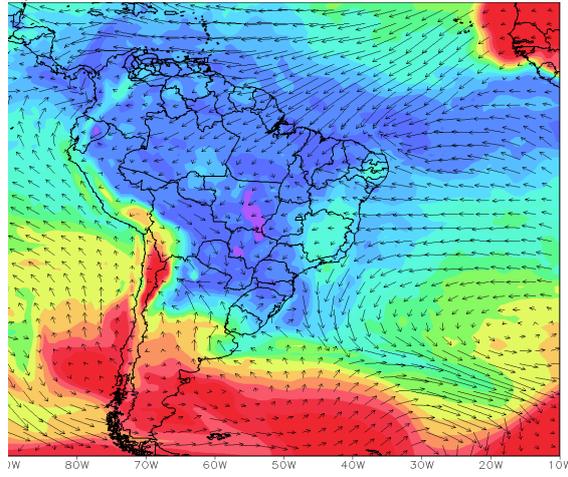


Figura 27: Umidade específica em g/Kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.

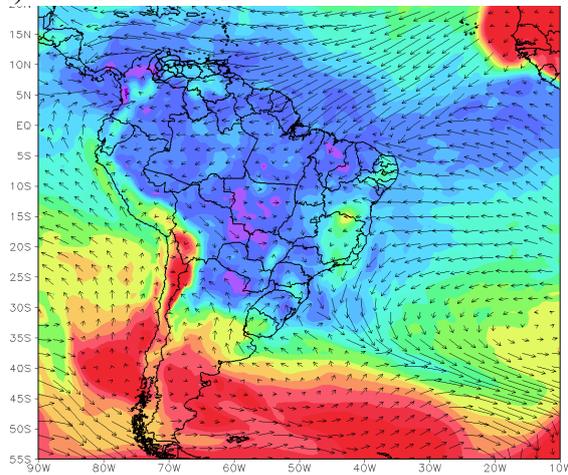
g) 09/01/2011 06Z



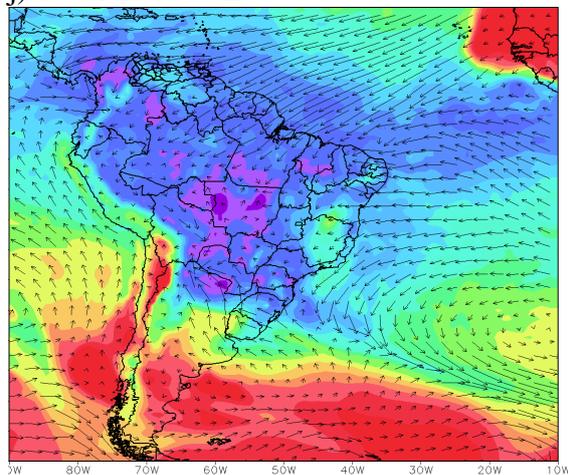
h) 09/01/2011 12Z



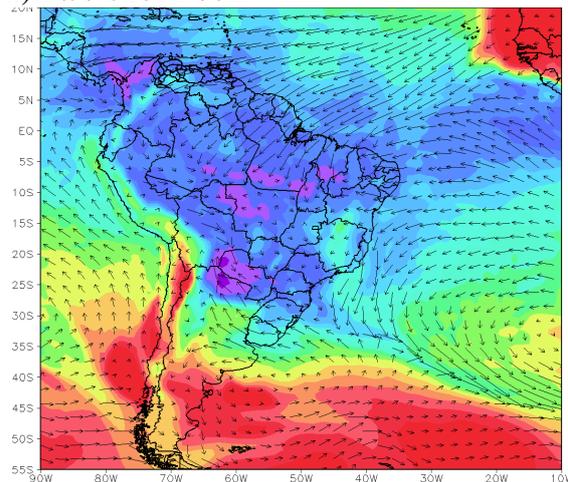
i) 09/01/2011 18Z



j) 10/01/2011 00Z



k) 10/01/2011 06Z



l) 10/01/2011 12Z

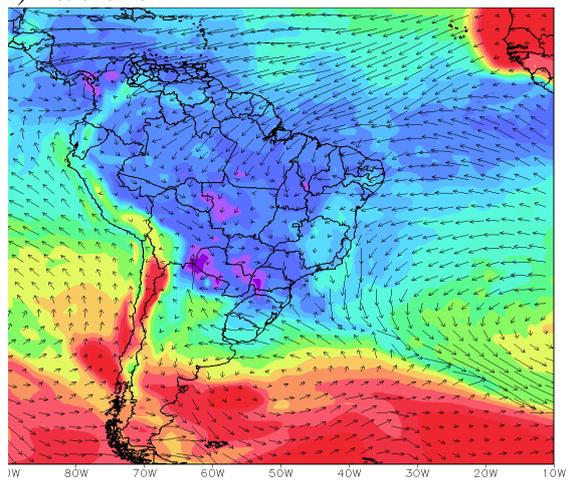
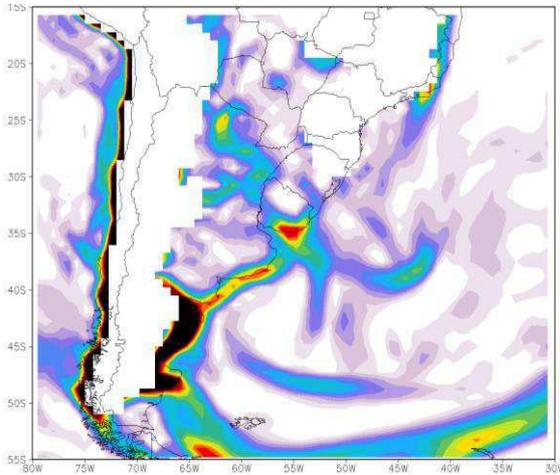
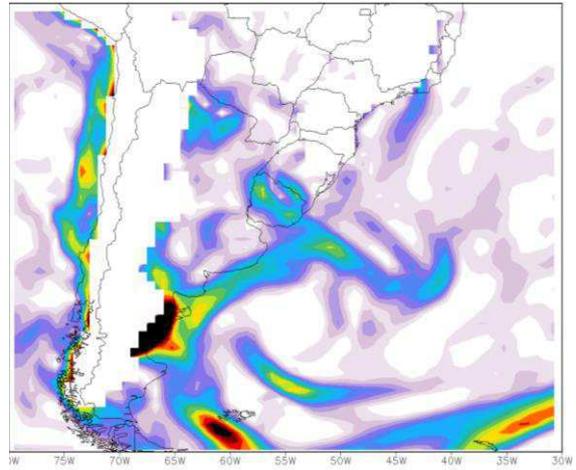


Figura 27 continuação: Umidade específica em g/Kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

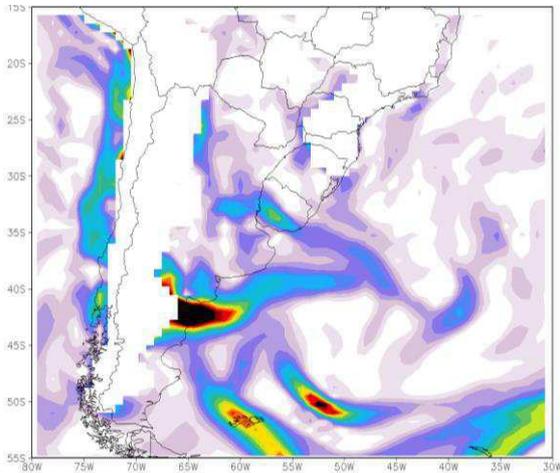
a) 07/01/2011 18Z



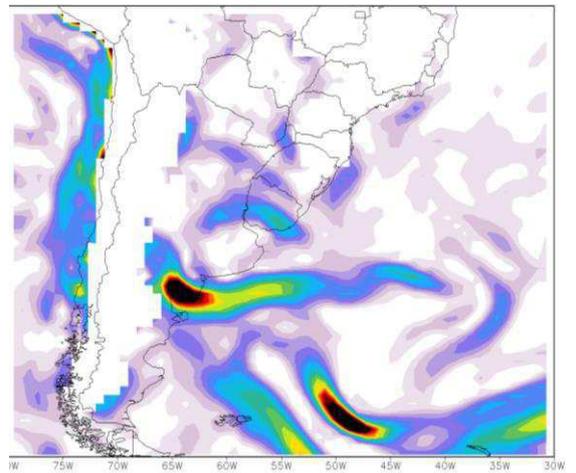
b) 08/01/2011 00Z



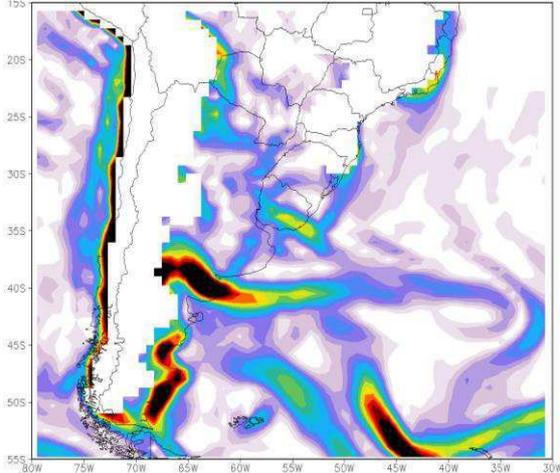
c) 08/01/2011 06Z



d) 08/01/2011 12Z



e) 08/01/2011 18Z



f) 09/01/2011 00Z

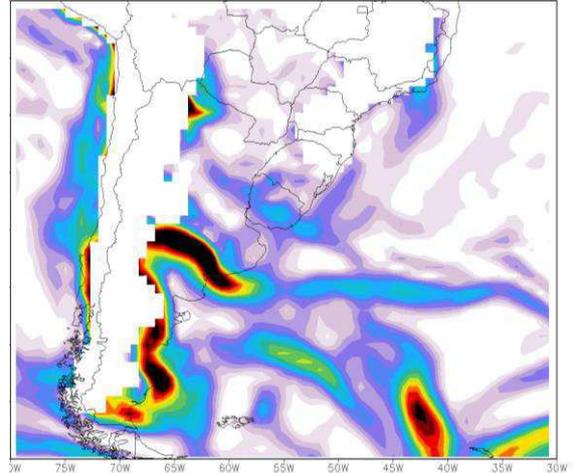
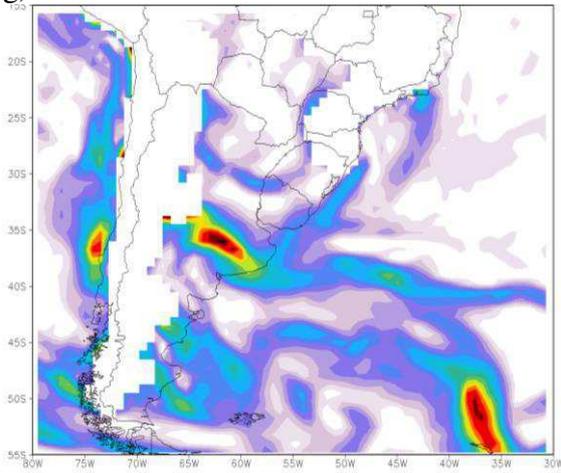
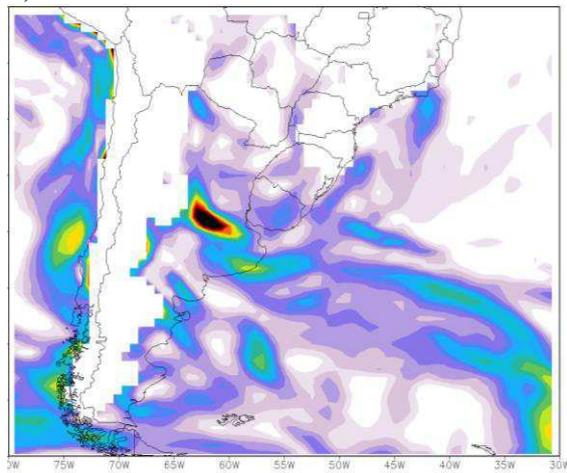


Figura 28: Magnitude do gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/100\text{Km}$). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

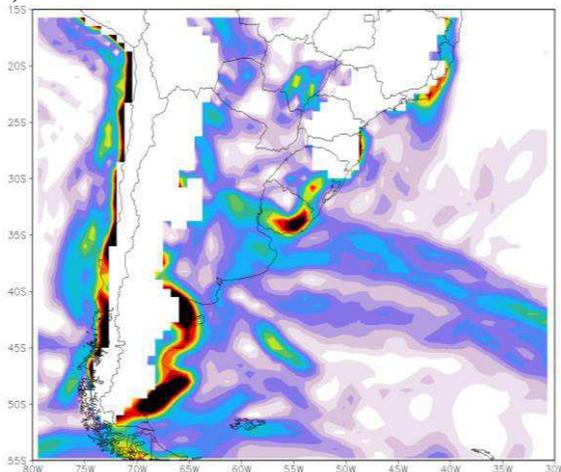
g) 09/01/2011 06Z



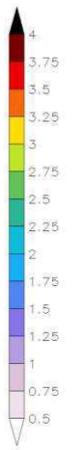
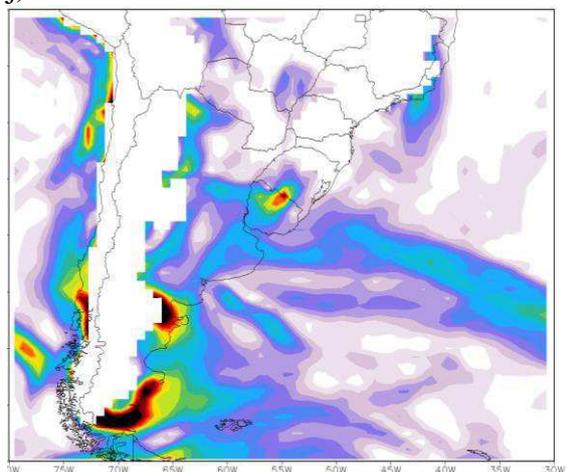
h) 09/01/2011 12Z



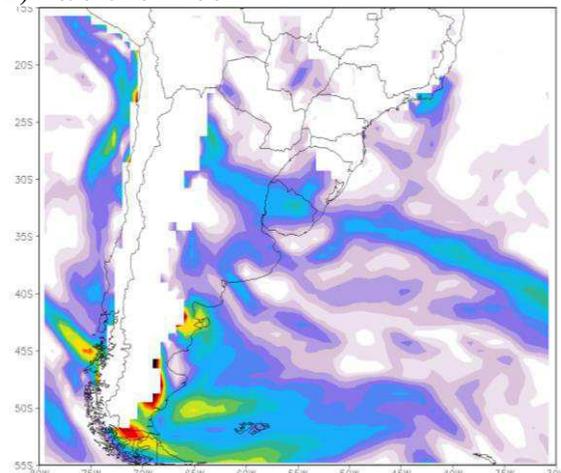
i) 09/01/2011 18Z



j) 10/01/2011 00Z



k) 10/01/2011 06Z



l) 10/01/2011 12Z

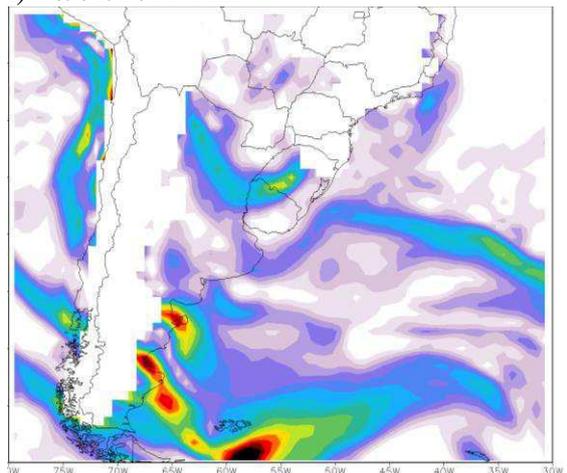


Figura 28 continuação: Magnitude do gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/100\text{Km}$). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

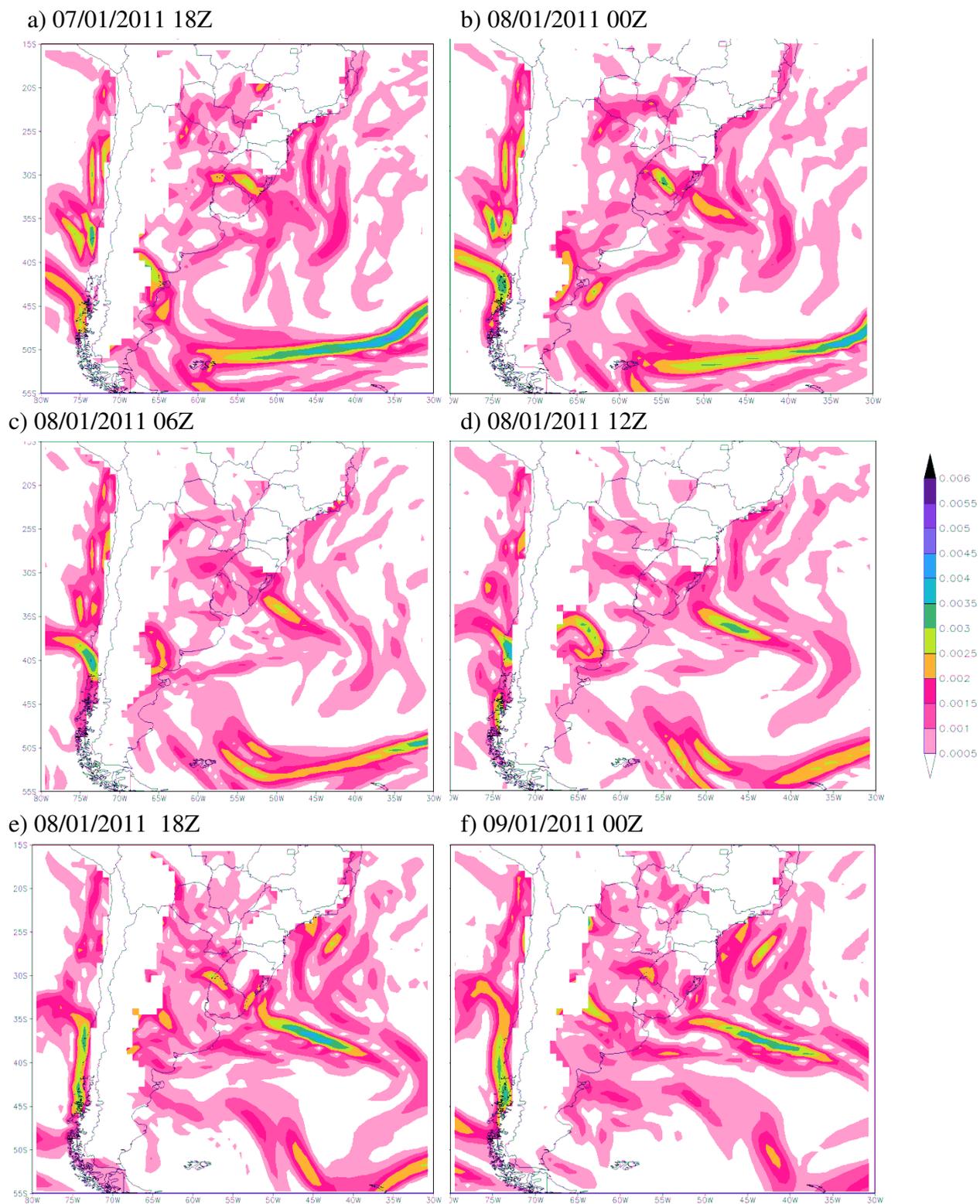
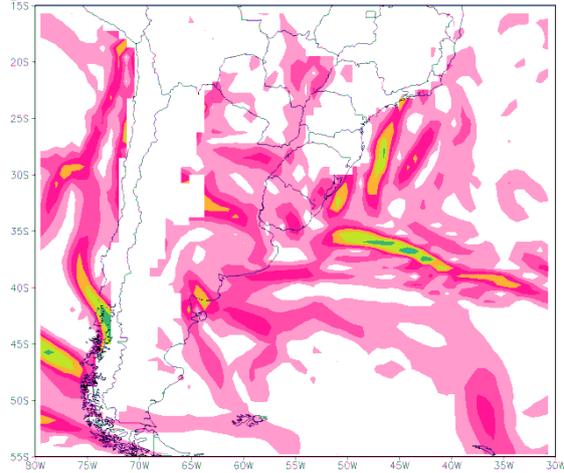
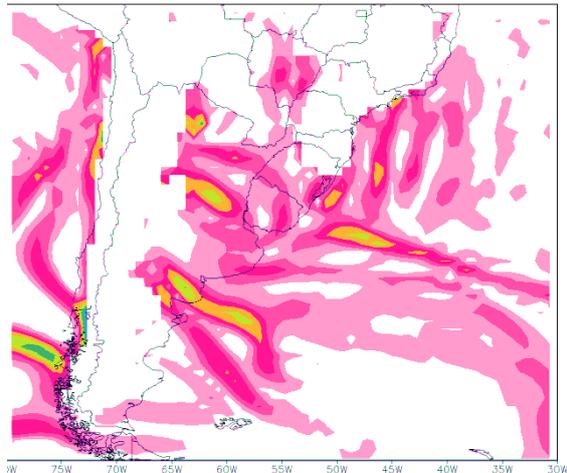


Figura 29: Magnitude do gradiente de umidade ($\text{g/Kg} \cdot 100\text{Km}$). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

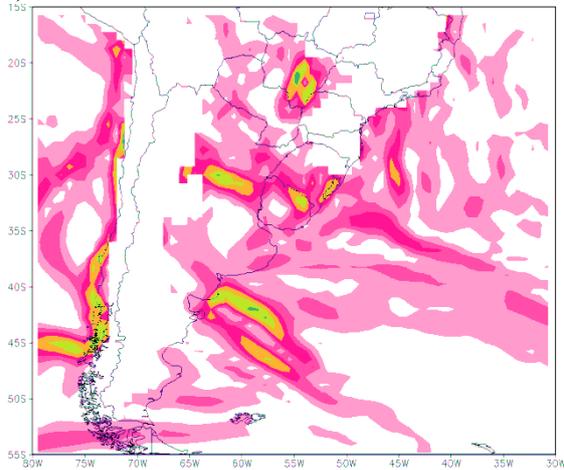
g) 09/01/2011 06Z



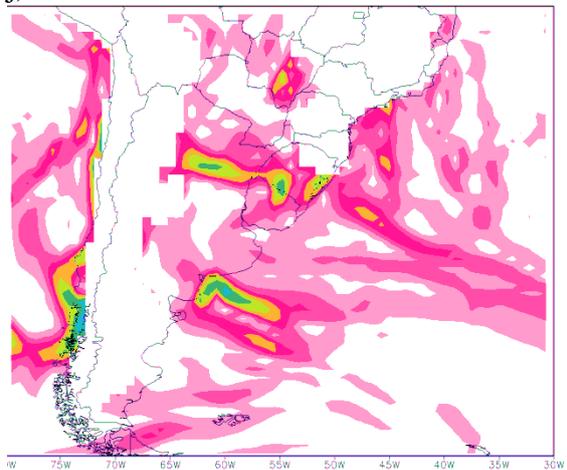
h) 09/01/2011 12Z



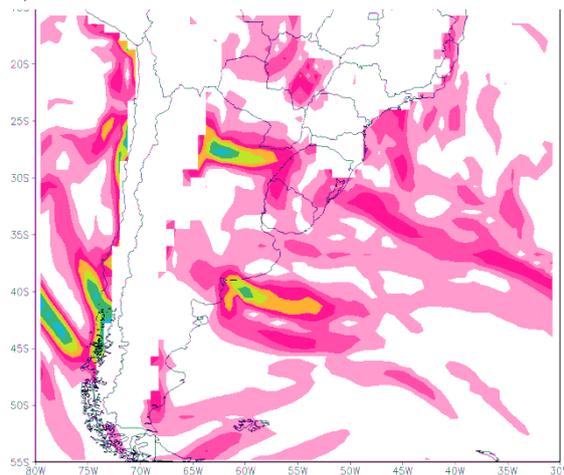
i) 09/01/2011 18Z



j) 10/01/2011 00Z



k) 10/01/2011 06Z



l) 10/01/2011 12Z

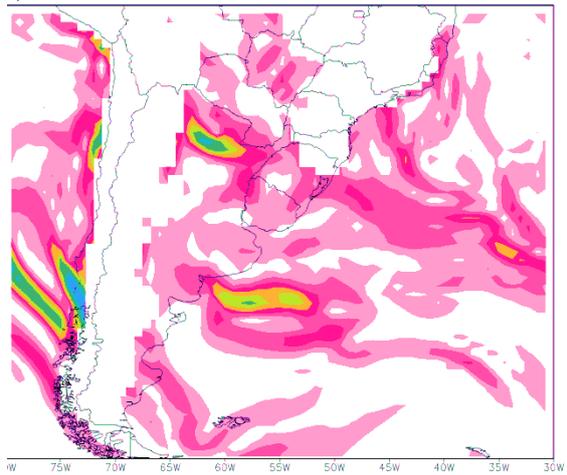


Figura 29 continuação: Magnitude do gradiente de umidade ($g/Kg \cdot 100Km$). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

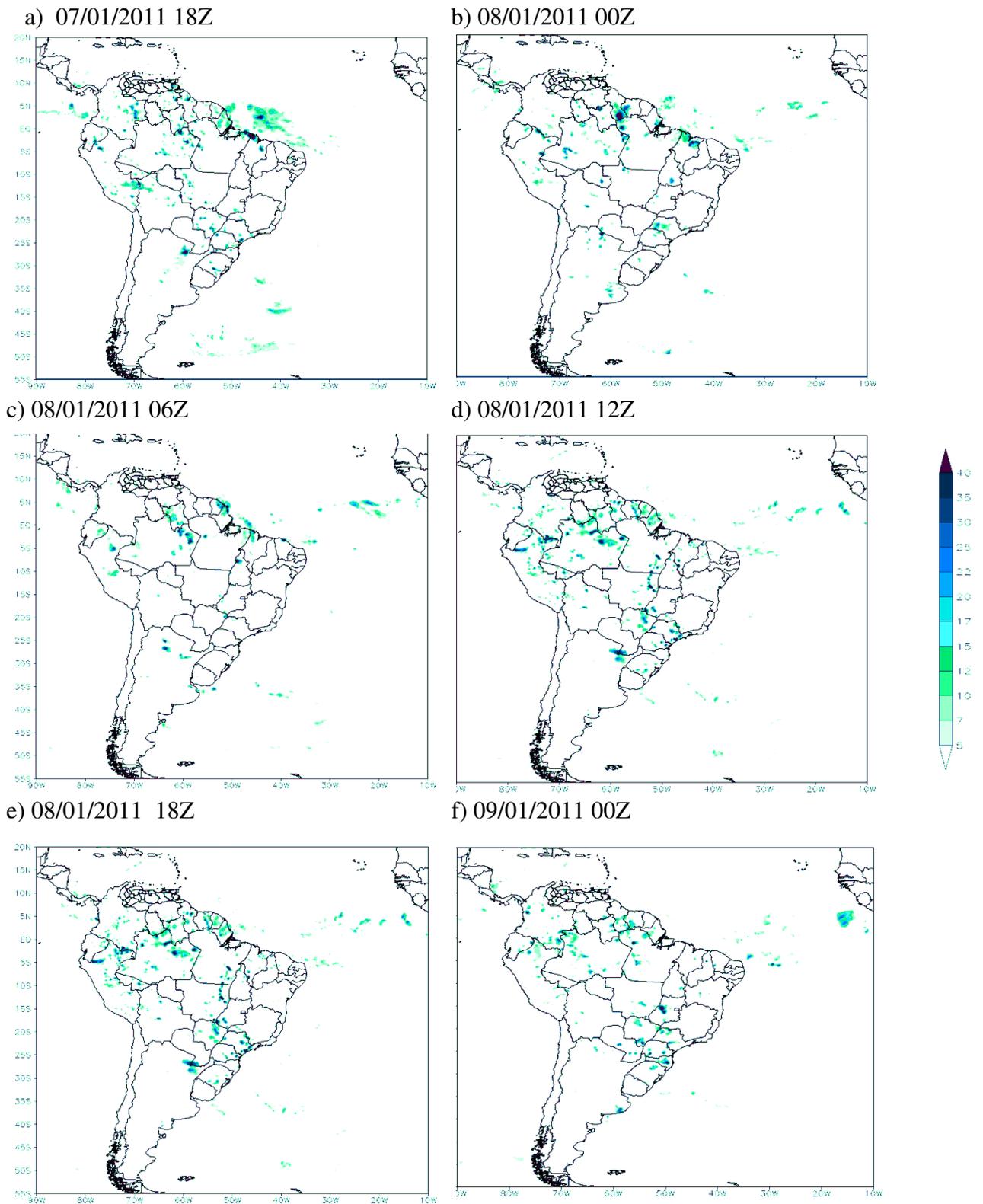
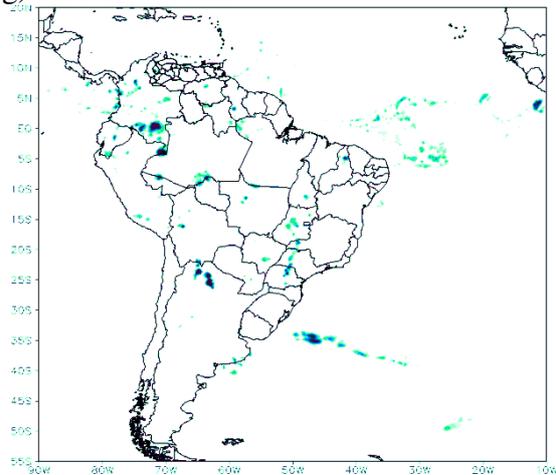
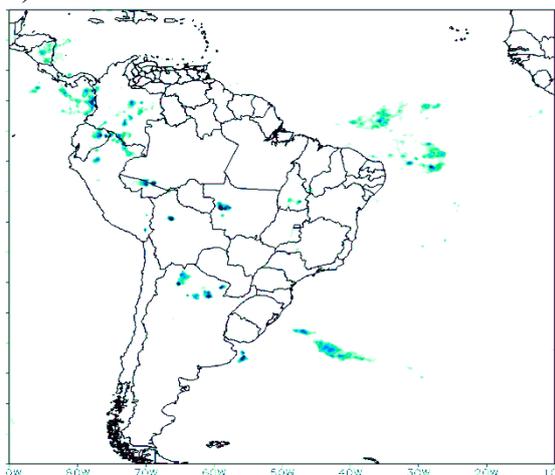


Figura 30: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora

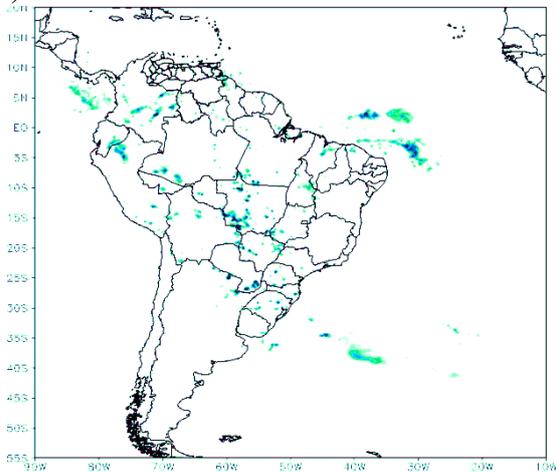
g) 09/01/2011 06Z



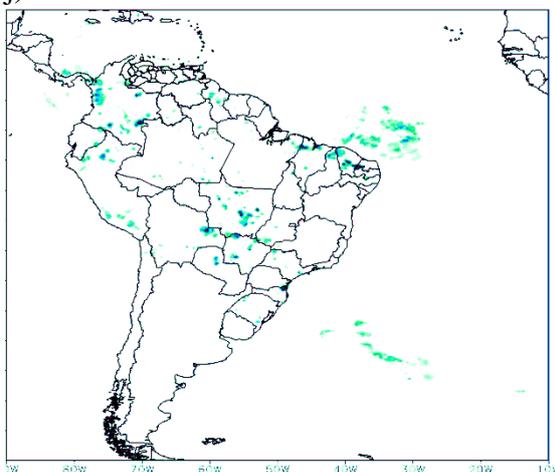
h) 09/01/2011 12Z



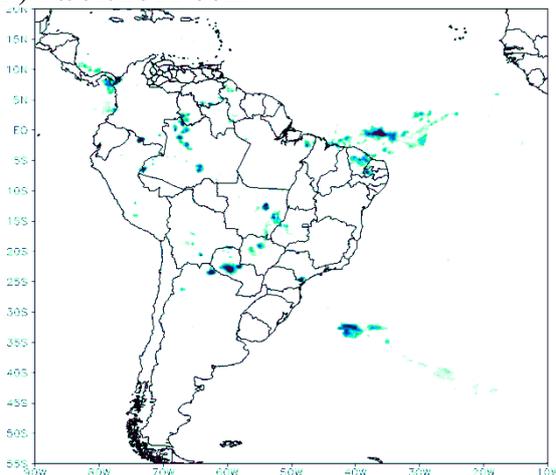
i) 09/01/2011 18Z



j) 10/01/2011 00Z



k) 10/01/2011 06Z



l) 10/01/2011 12Z

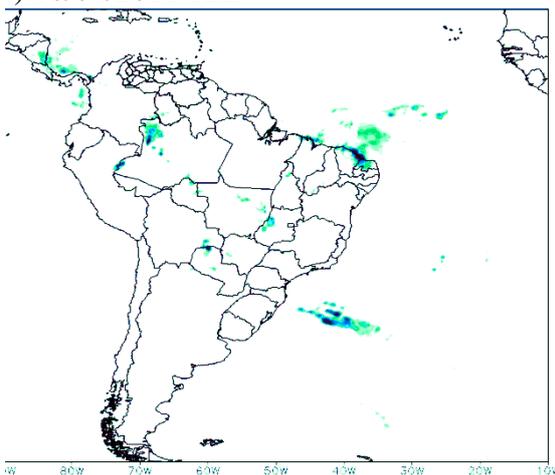


Figura 30 continuação: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora

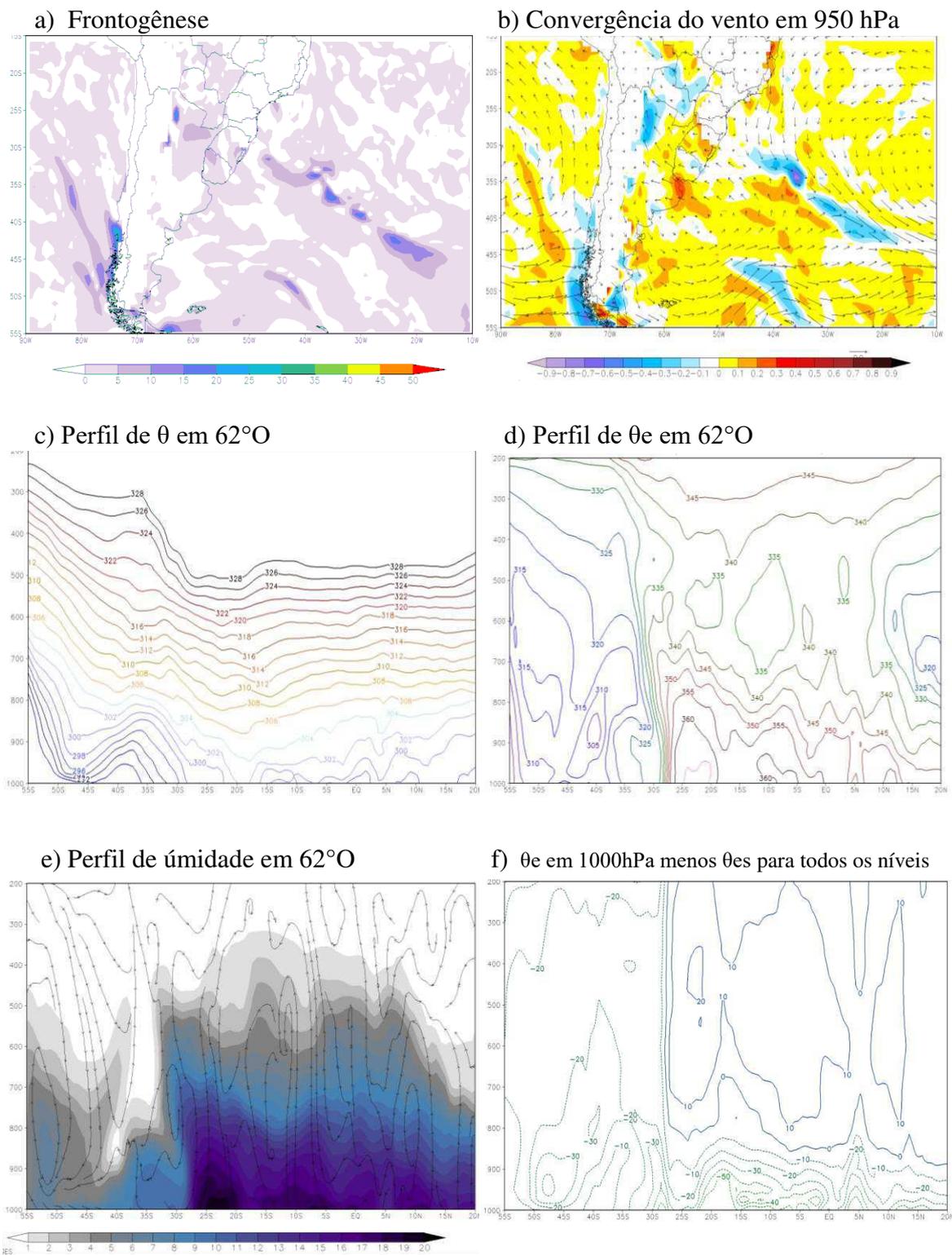


Figura 31: a) Frontogênese por deformação em temperatura potencial equivalente ($\text{K}/100\text{km} \cdot \text{dia}$) b) convergência do vento (valores negativos), para 925hPa c) Perfil de θ d) perfil de θ_e e) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). f) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de 62°O , e para 06Z de 10/01/2011. Fonte: Autora.

5.3 Incursão – período de 19 a 21 de janeiro de 2011.

A incursão de ar frio que ocorreu entre 00Z do dia 19 a 18Z do dia 21, sobre a América do Sul é causada pelo prolongamento de uma alta transiente resultando um acúmulo de ar nos Andes, seguindo o mecanismo proposto por Garreaud e Wallace 1998 (ver campo de geopotencial na Figura 32). O campo de geopotencial mostra também a BNOA intensificada até 06Z do dia 20.

A massa de ar entre 42°S e 20°S apresenta uma temperatura superior a 30°C, como uma diferença de aproximadamente 10°C em relação à massa de ar Amazônica nos horários mais quentes (Figura 32). Em relação à umidade, as massas de ar Amazônica e subtropical são mais semelhantes. A fronteira entre as massas de ar subtropical e extratropical recua para norte à medida que a incursão avança (Figura 33).

O gradiente de umidade e temperatura não ultrapassam 0,0050g/Kg*100Km e 3°C/100km respectivamente, durante todo o ciclo de vida do evento (Figuras 34 e 35). Porém em 06Z do dia 20 (Figura 35 f) o gradiente de umidade se intensifica e o de temperatura enfraquece (Figura 34 f). O módulo do gradiente de umidade atinge um máximo entre 30°S e 33°S em 18Z do dia 19, preservando essa intensidade durante as 12 horas subsequentes (Figura 35 e a h). Em 00Z do dia 21 (Figura 34 i) quase não é possível distinguir uma perturbação no gradiente de temperatura com relação ao campo de fundo. Durante toda a incursão observa-se constante decréscimo do módulo do gradiente de temperatura conforme a incursão se desloca para nordeste (Figura 34).

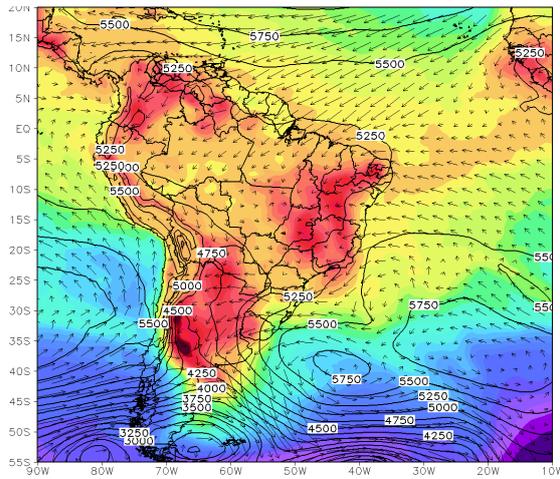
A frontogênese sobre o continente às 12Z do dia 20 entre 30°S e 40°S se desintensifica muito, não ultrapassando a latitude de 33°S, não ultrapassando 5K/100Km*dia (Figura 37 a).

O perfil de temperatura potencial (Figura 37 c) mostra em 62°O um comportamento estável da coluna de ar entre 22°S e 26°S, com os valores de temperatura decrescendo à medida em que a pressão também diminui. Já o perfil de temperatura potencial equivalente (Figura 37 d) mostra instabilidade potencial por volta de 27°S, latitude onde a chuva está localizada (Figura 35 g). Também é possível ver na Figura 37 f uma fronteira entre latitudes que apresentam CAPE e latitudes que não apresentam (ou apresenta pouco) como é o caso das latitudes entre 35°S e 25°S, para a longitude de 62°O.

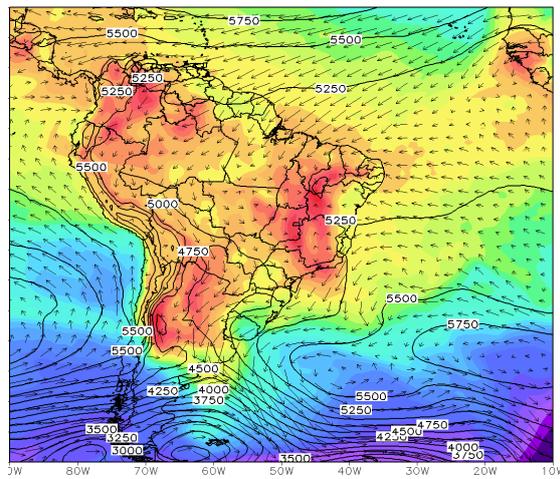
A precipitação relacionada à incursão começa por volta do 06Z do dia 19 (Figura 36 b), se movimentando para nordeste. Em 06Z do dia 20 atinge seu máximo em aproximadamente 30°S, passando de 40 mm. Ao mesmo tempo existe a convergência do

vento (Figura 37 b), que possivelmente vence a inibição convectiva em um ponto que quase não tem CAPE (Figura 37 f). Em 18Z do dia 20 a precipitação está a norte da incursão.

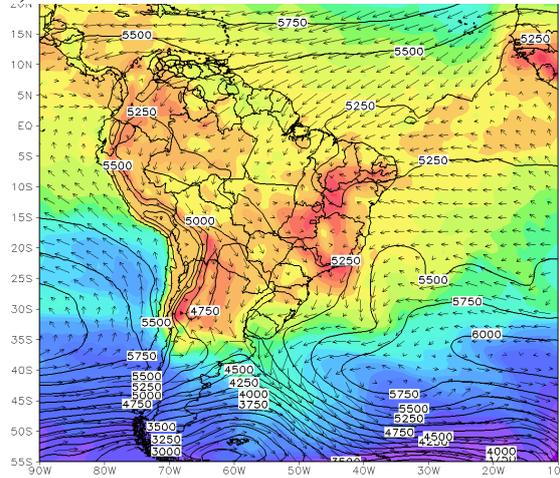
a) 19/01/2011 00Z



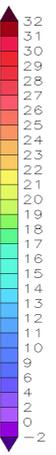
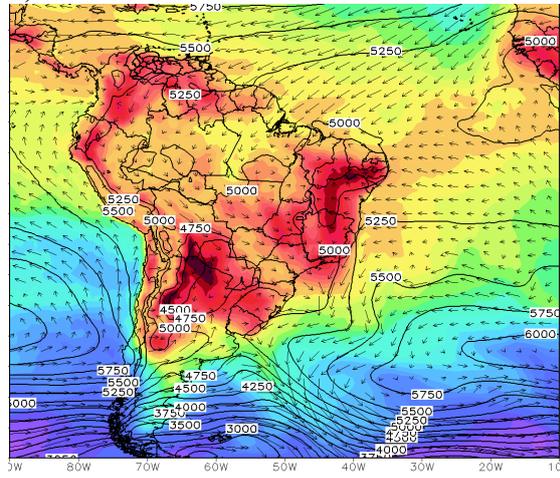
b) 19/01/2011 06Z



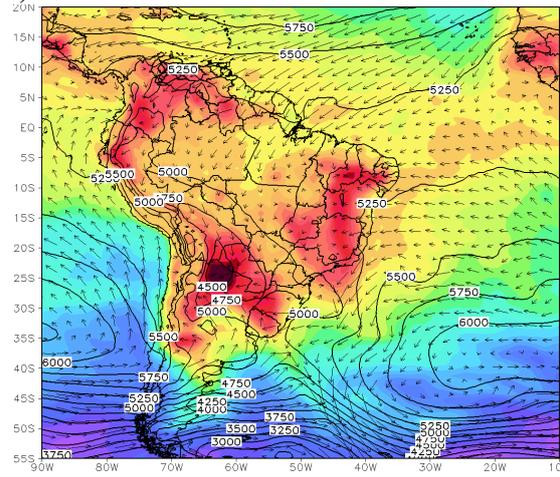
c) 19/01/2011 12Z



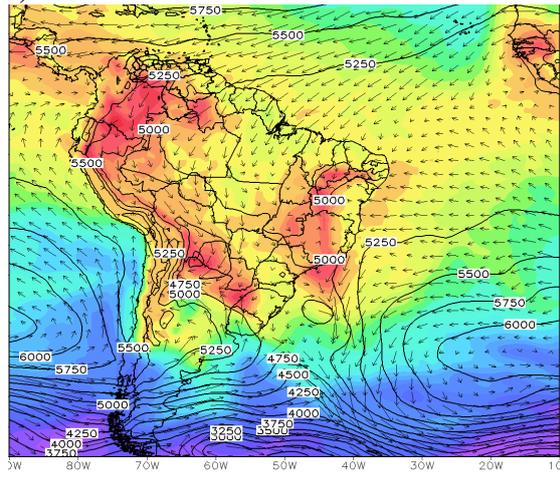
d) 19/01/2011 18Z



e) 20/01/2011 00Z



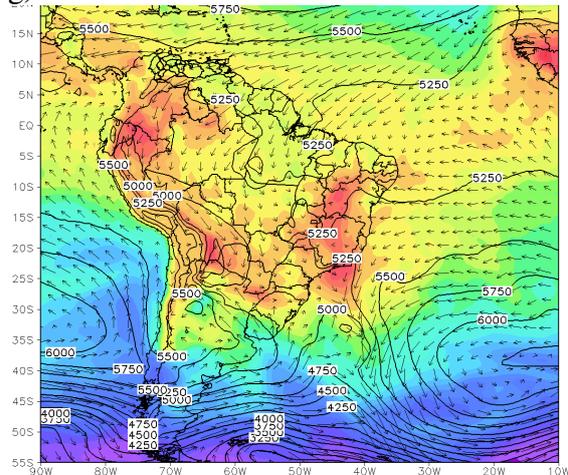
f) 20/01/2011 06Z



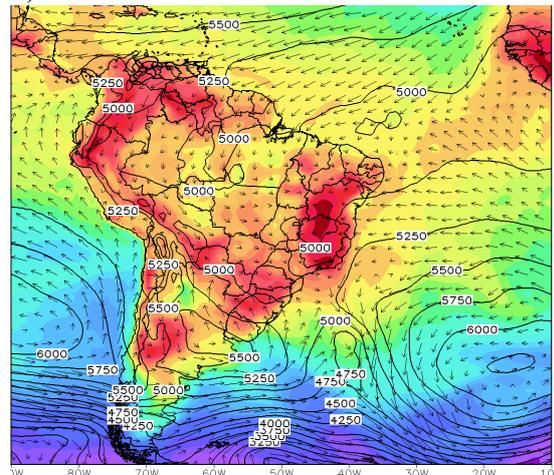
20

Figura 32: Temperatura em °C (cores), vento (setas m/s) e geopotencial (contorno). Em 925hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

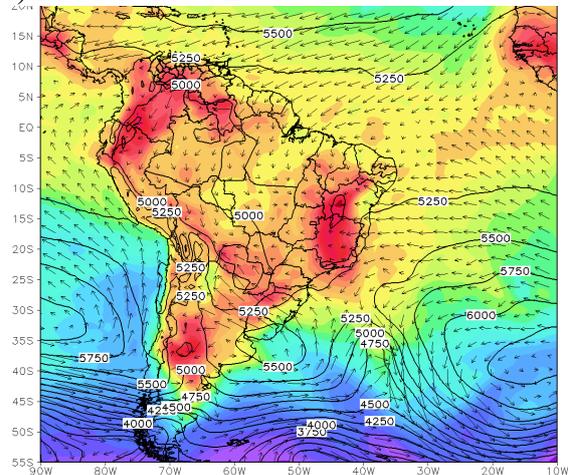
g) 20/01/2011 12Z



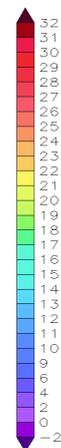
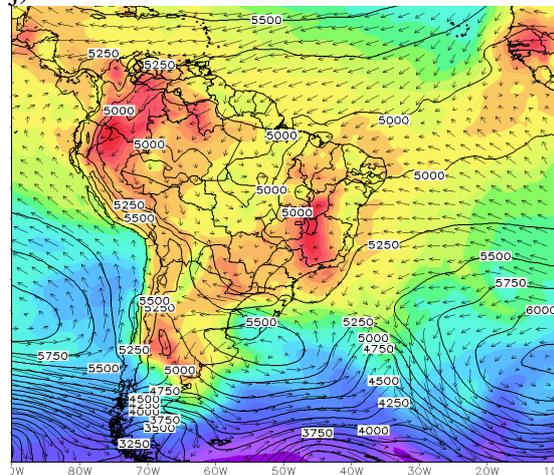
h) 20/01/2011 18Z



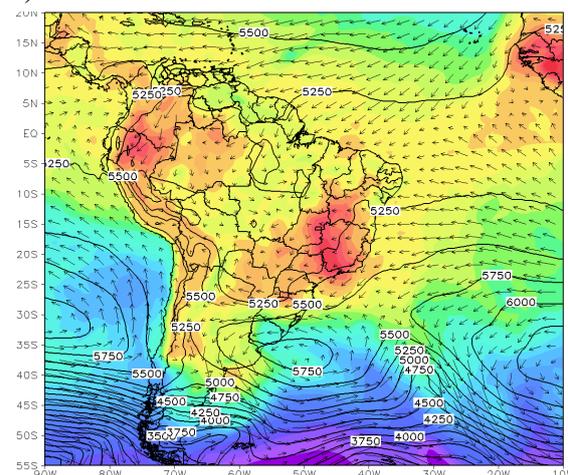
i) 21/01/2011 00Z



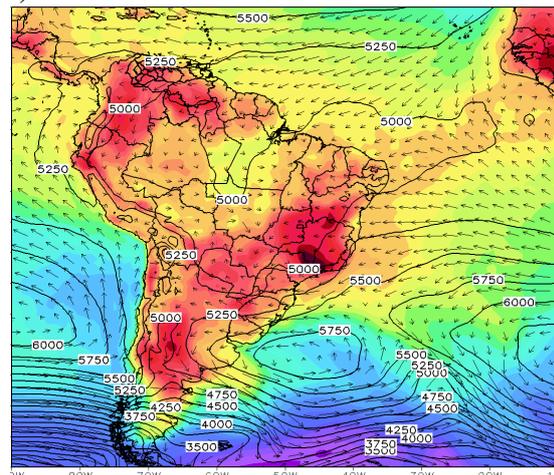
j) 21/01/2011 06Z



k) 21/01/2011 12Z



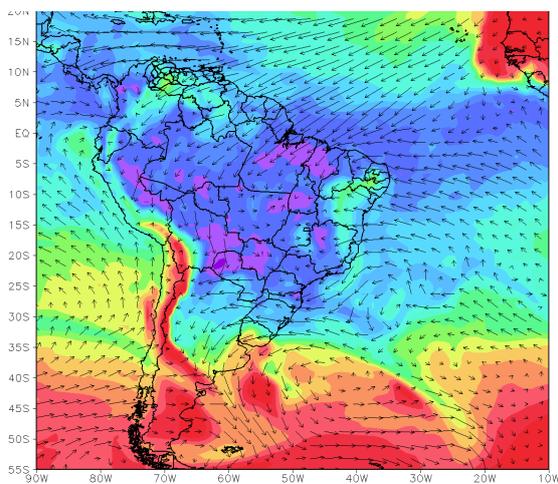
l) 21/01/2011 18Z



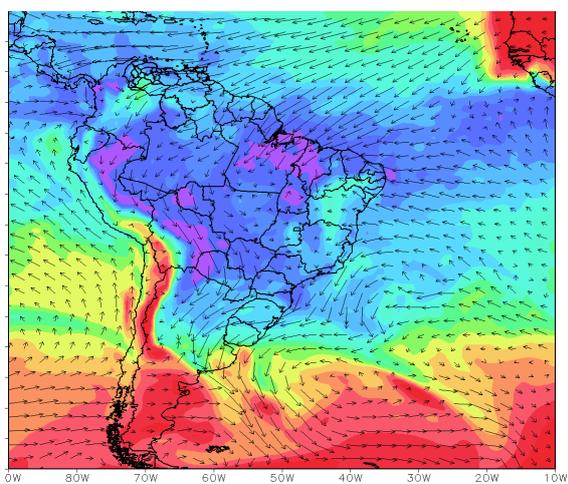
20

Figura 32 continuação: Temperatura em °C (cores), vento (setas m/s) e geopotencial (contorno). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

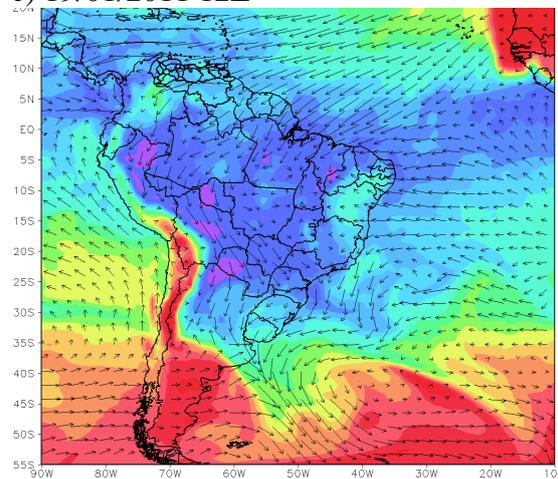
a) 19/01/2011 00Z



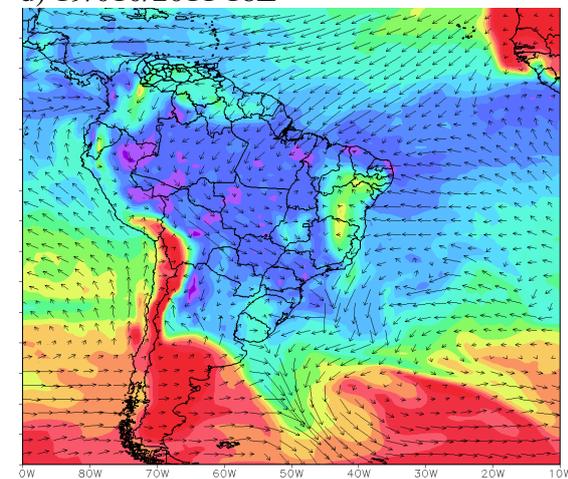
b) 19/01/2011 06Z



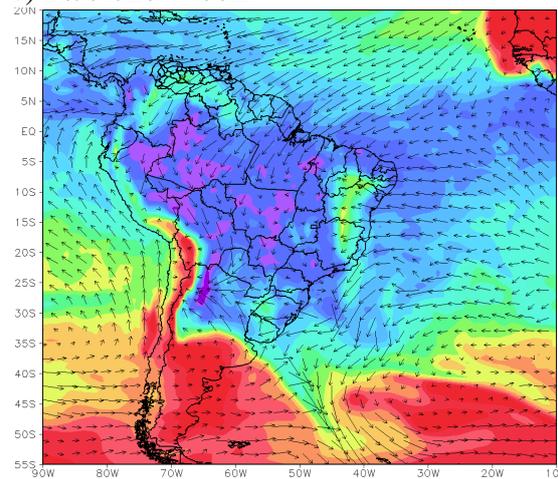
c) 19/01/2011 12Z



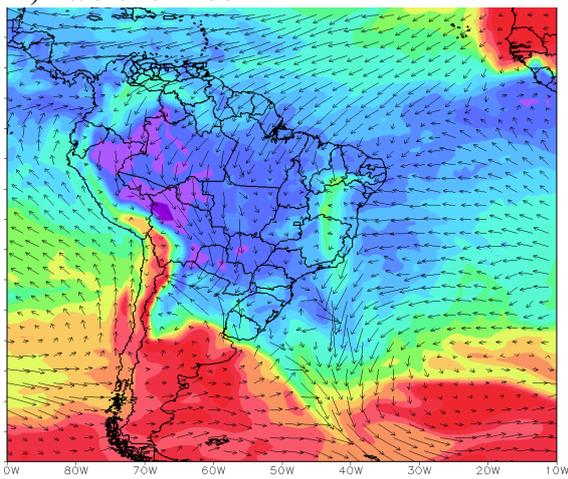
d) 19/01/2011 18Z



e) 20/01/2011 00Z



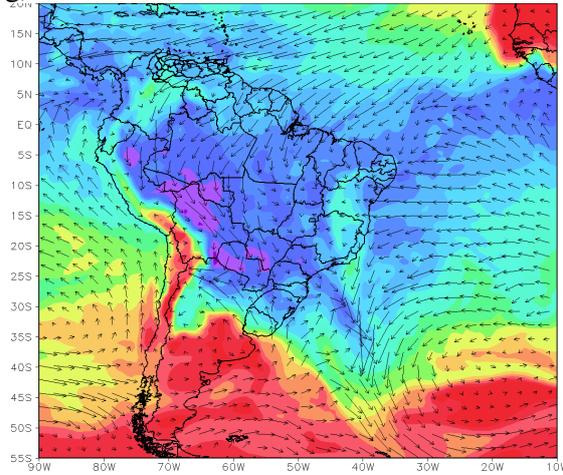
f) 20/01/2011 06Z



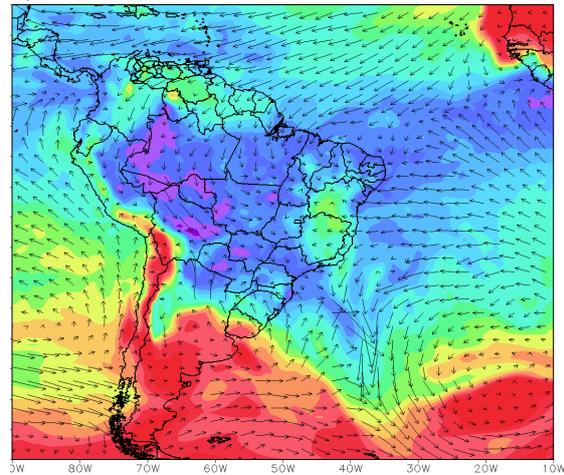
0.2

Figura 33: Umidade específica em g/Kg/100Km (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

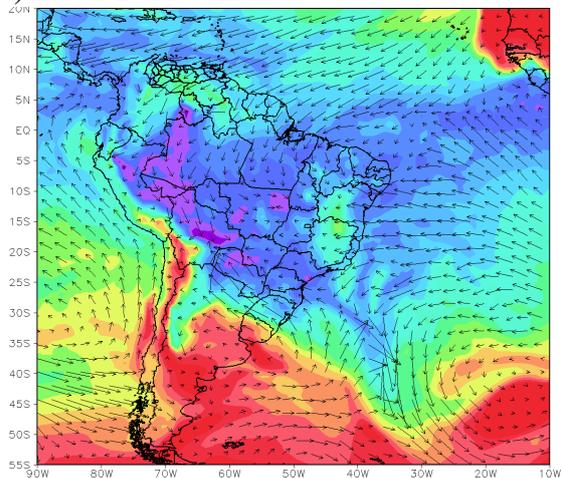
g) 20/01/2011 12Z



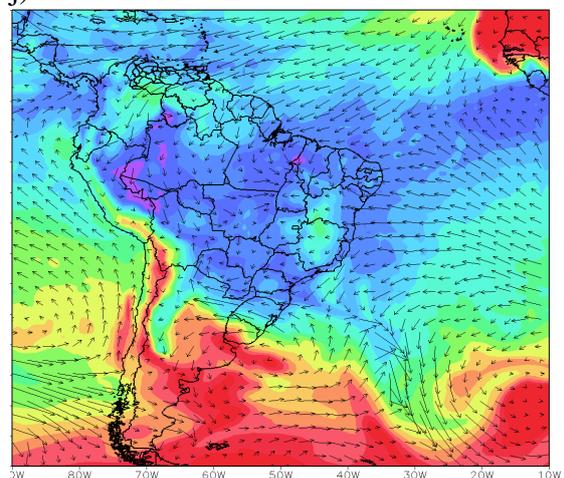
h) 20/01/2011 18Z



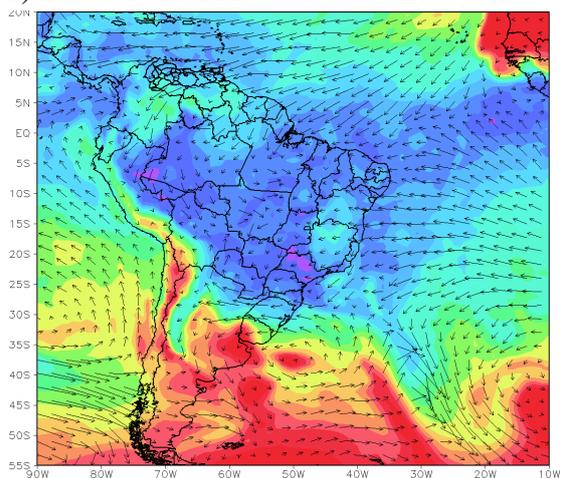
i) 21/01/2011 00Z



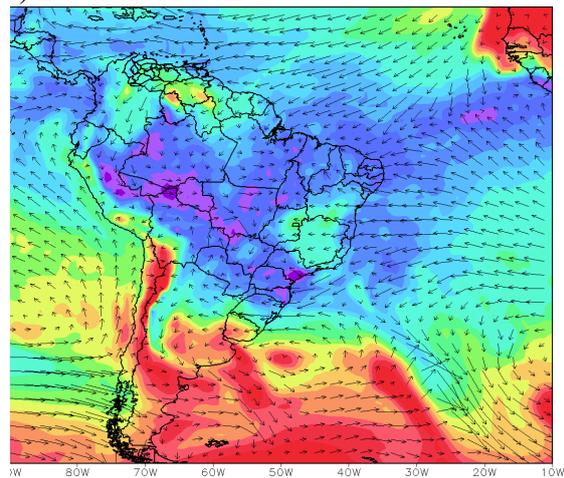
j) 21/01/2011 06Z



k) 21/01/2011 12Z



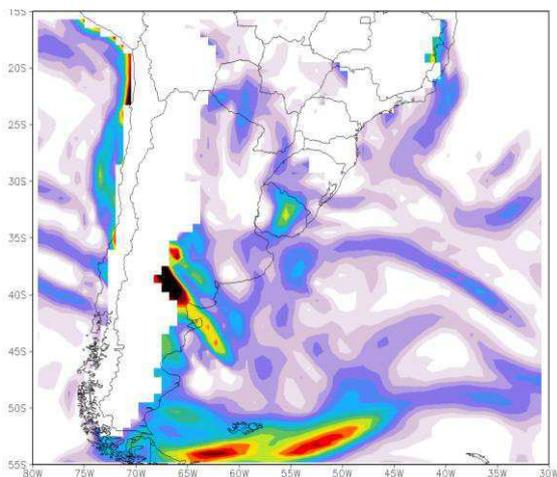
l) 21/01/2011 18Z



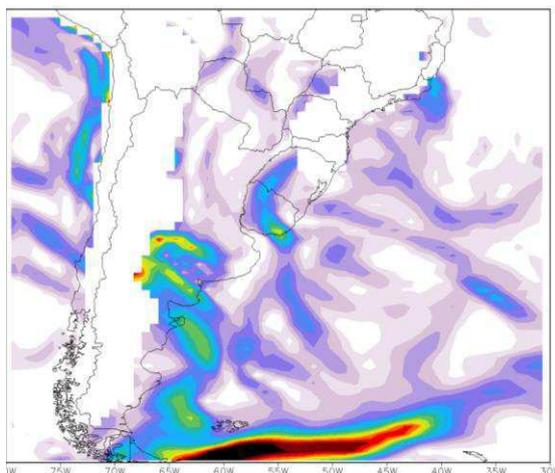
0.2

Figura 33 continuação: Umidade específica em mm (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

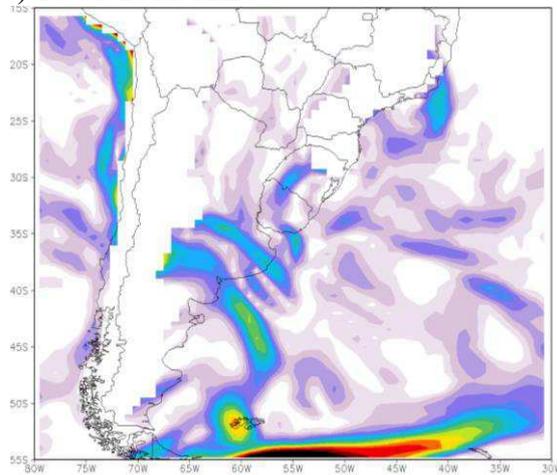
a) 19/01/2011 00Z



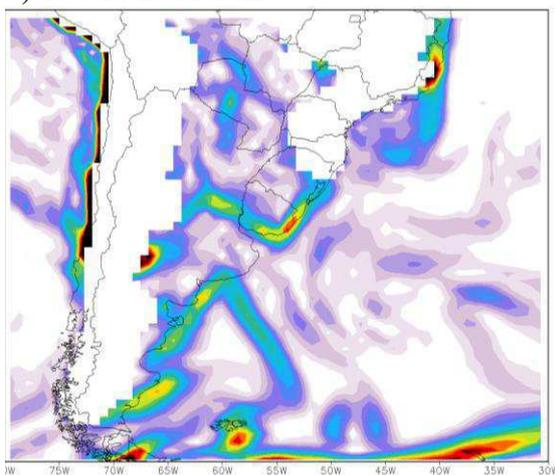
b) 19/01/2011 06Z



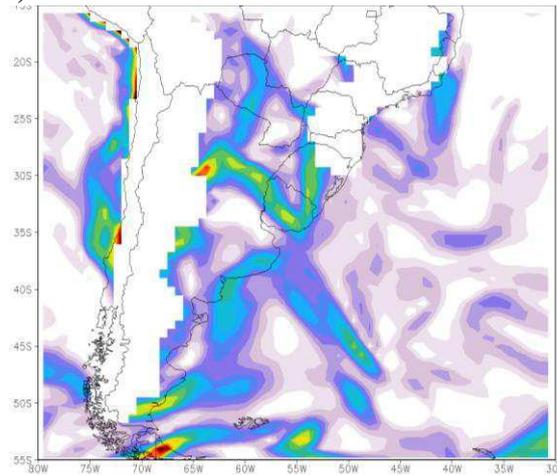
c) 19/01/2011 12Z



d) 19/01/2011 18Z



e) 20/01/2011 00Z



f) 20/01/2011 06Z

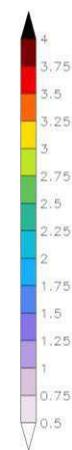
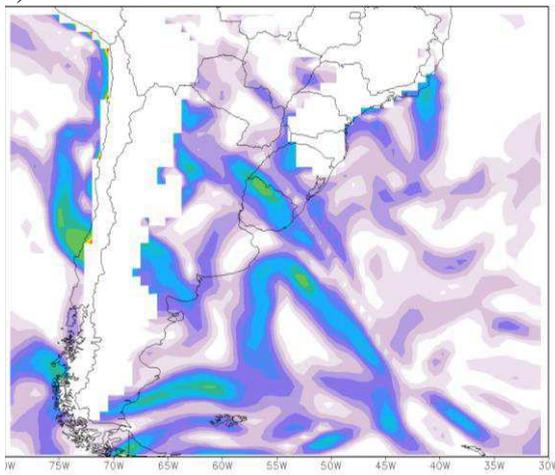
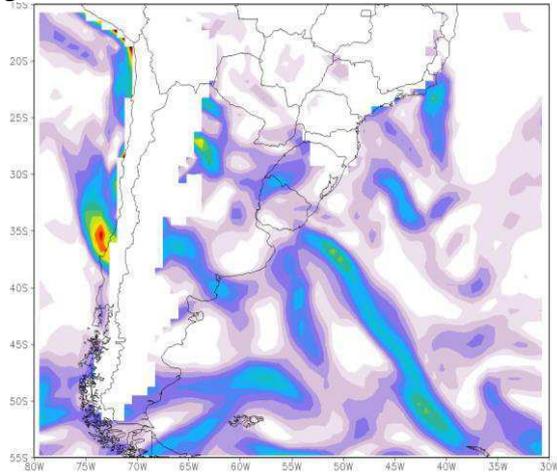
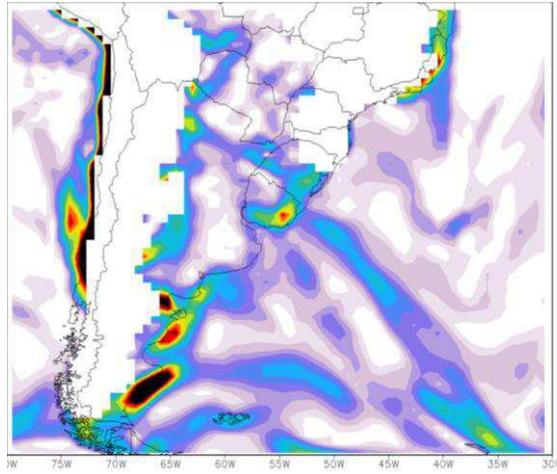


Figura 34: Magnitude do gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/100\text{Km}$). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

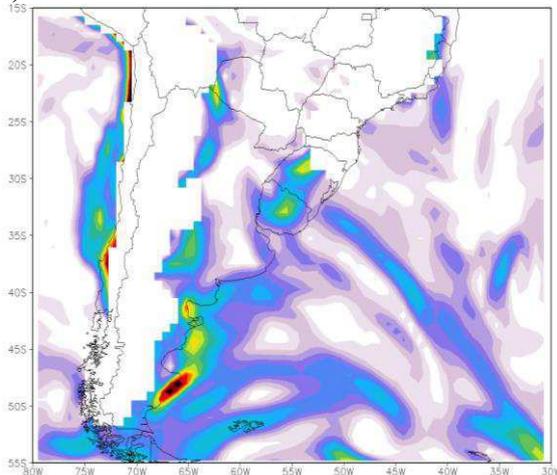
g) 20/01/2011 12Z



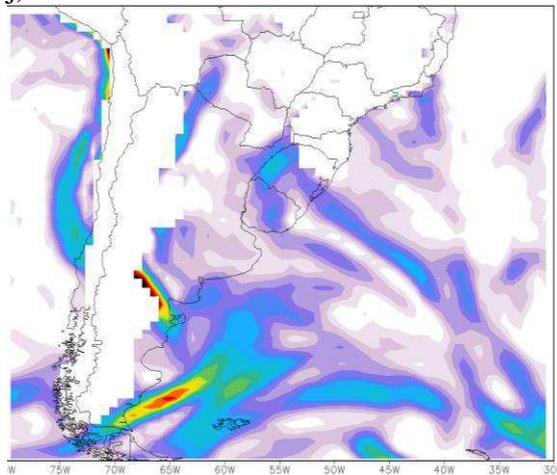
h) 20/01/2011 18Z



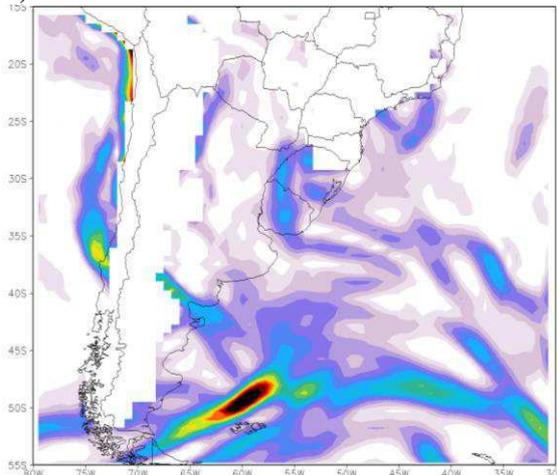
i) 21/01/2011 00Z



j) 21/01/2011 06Z



k) 21/01/2011 12Z



l) 21/01/2011 18Z

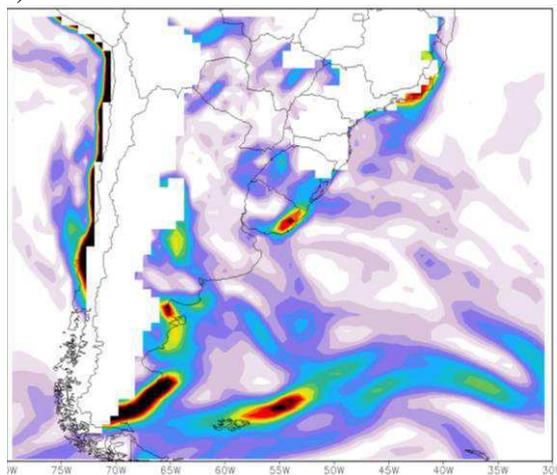
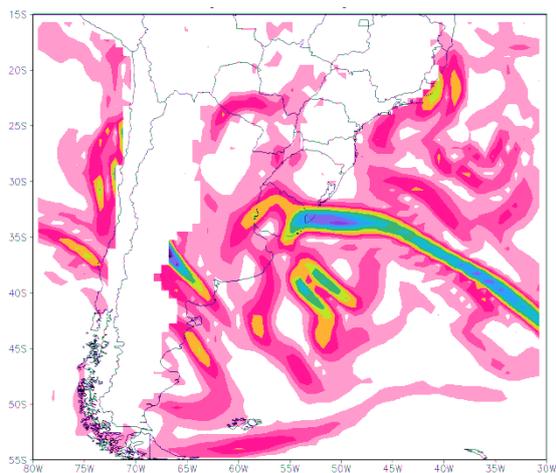
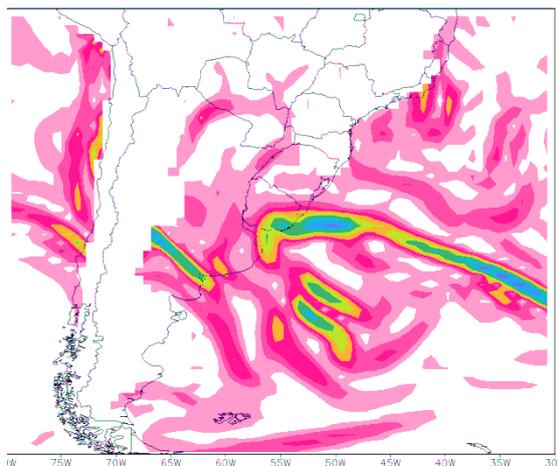


Figura 34 continuação: Magnitude do gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/100\text{Km}$). Em 925hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

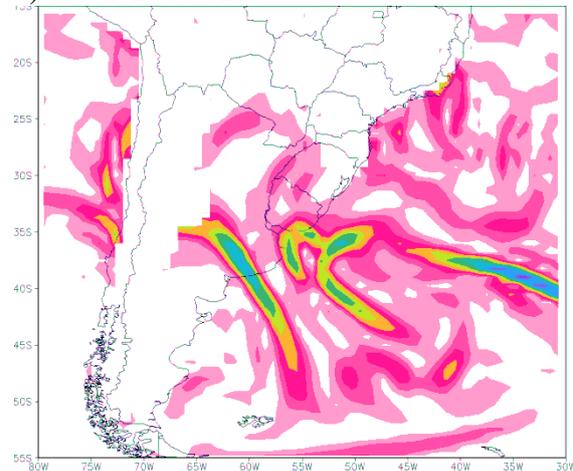
a) 19/01/2011 00Z



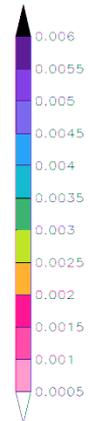
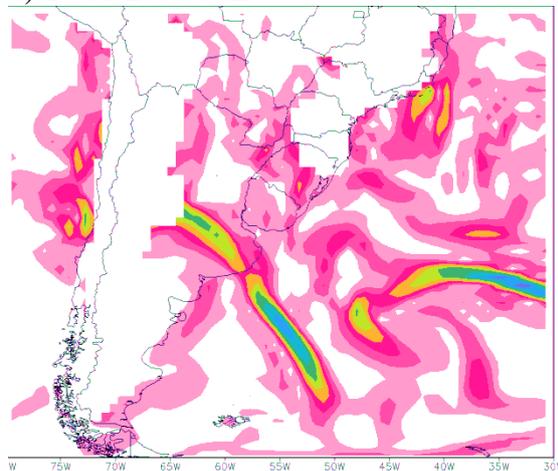
b) 19/01/2011 06Z



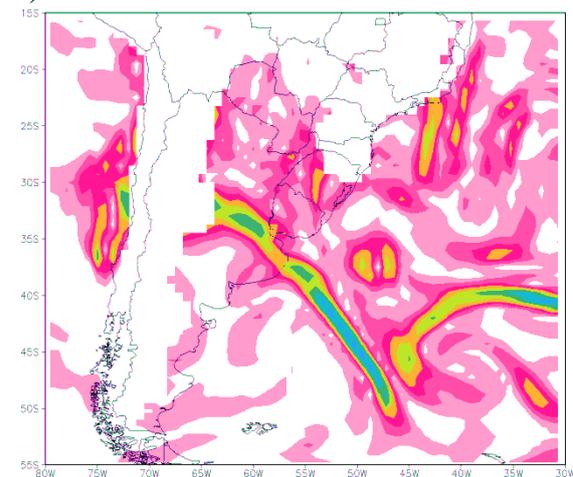
c) 19/01/2011 12Z



d) 19/01/2011 18Z



e) 20/01/2011 00Z



f) 20/01/2011 06Z

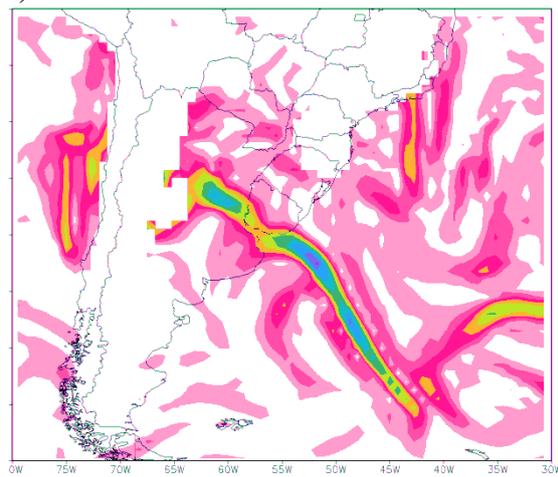
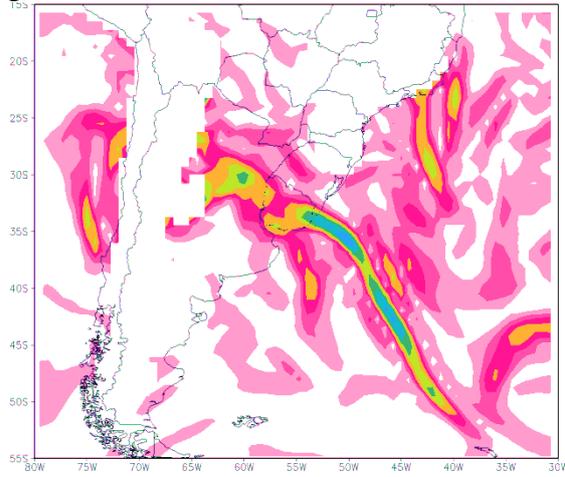
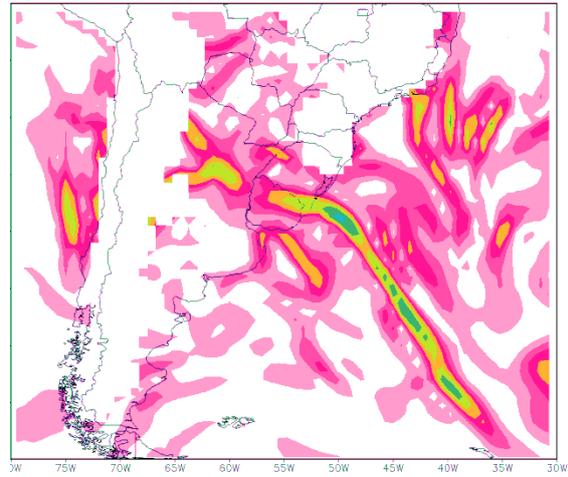


Figura 35: Magnitude do gradiente de umidade ($\text{g/Kg} \cdot 100\text{Km}$). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

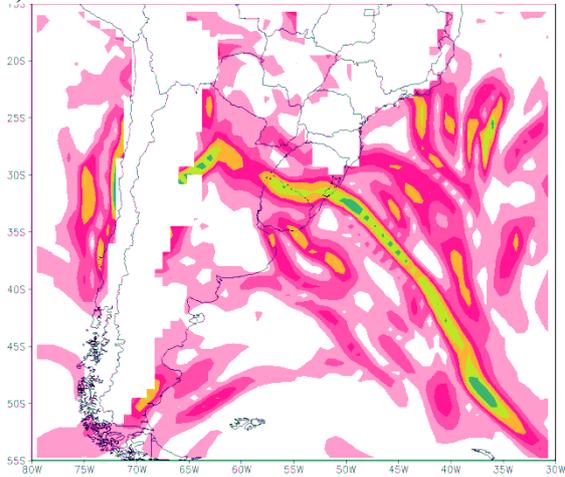
g) 20/01/2011 12Z



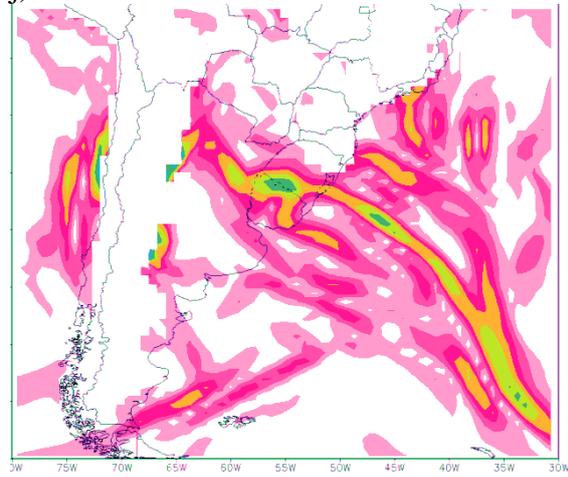
h) 20/01/2011 18Z



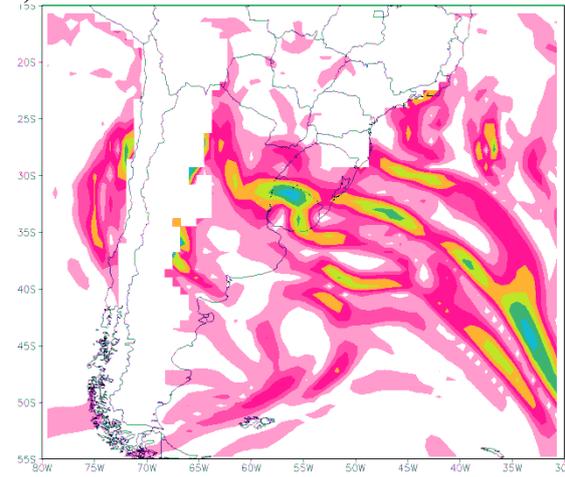
i) 21/01/2011 00Z



j) 21/01/2011 06Z



k) 21/01/2011 12Z



l) 21/01/2011 18Z

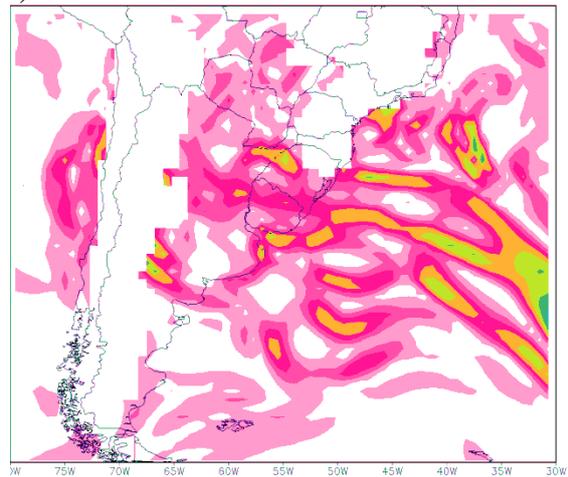
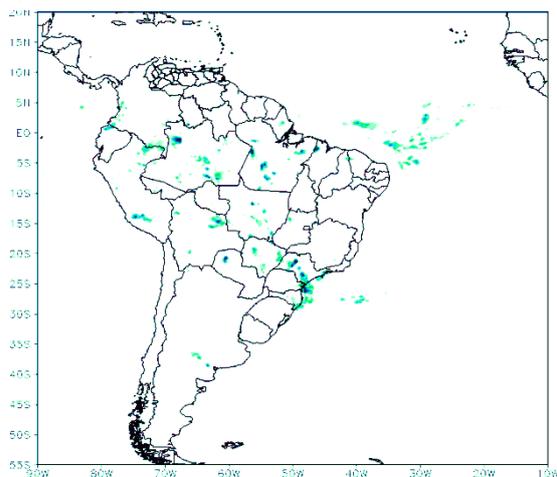
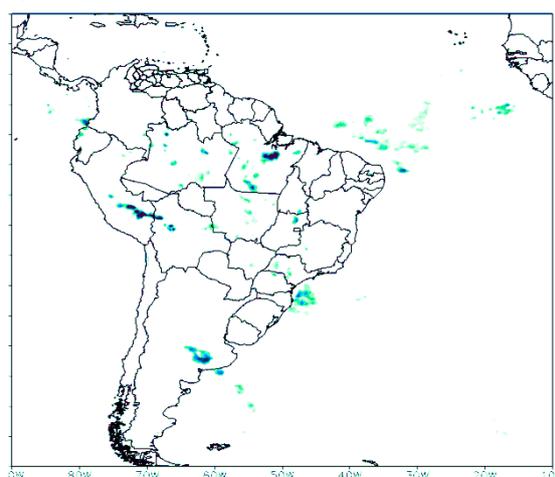


Figura 35 continuação: Magnitude do gradiente de umidade ($\text{g/Kg} \cdot 100\text{Km}$). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

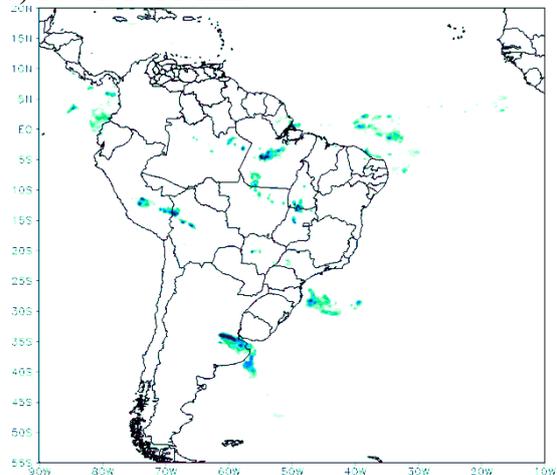
a) 19/01/2011 00Z



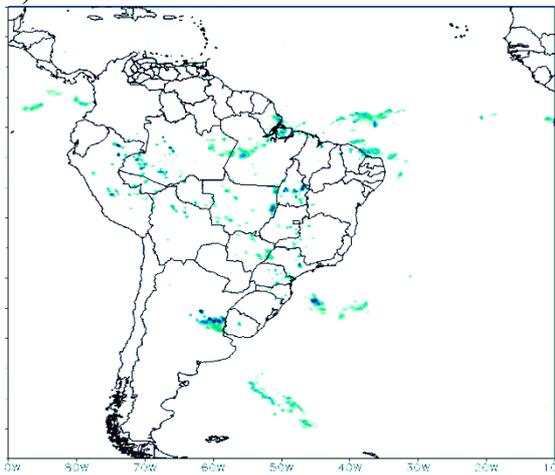
b) 19/01/2011 06Z



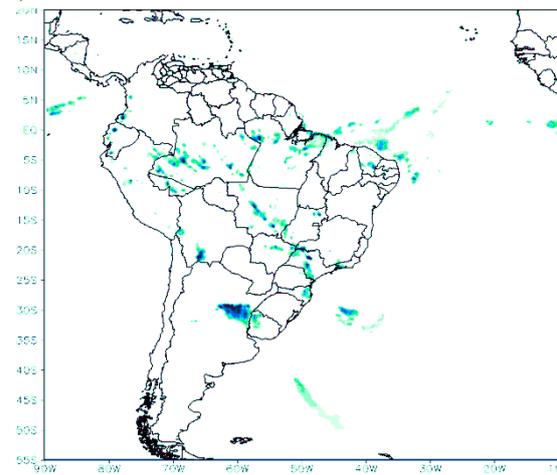
c) 19/01/2011 12Z



d) 19/01/2011 18Z



e) 20/01/2011 00Z



f) 20/01/2011 06Z

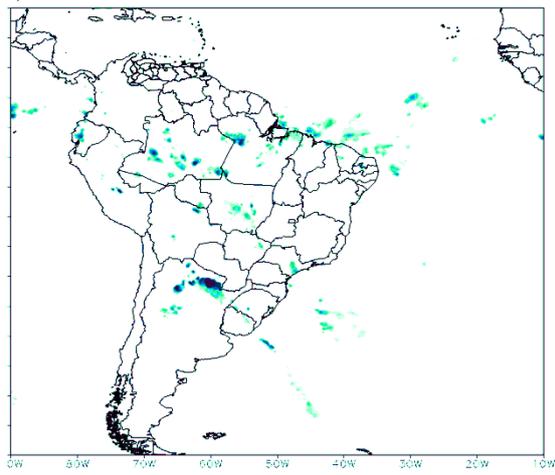
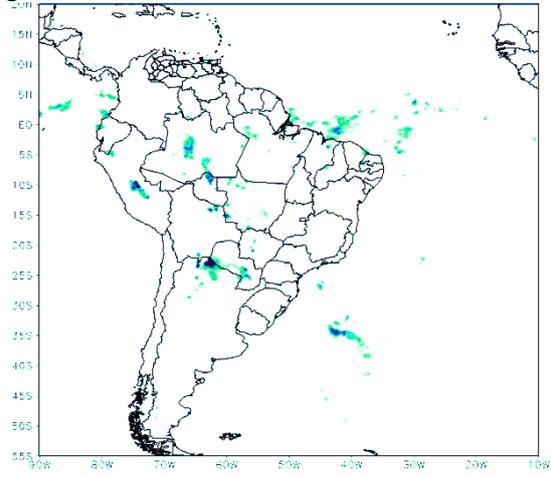
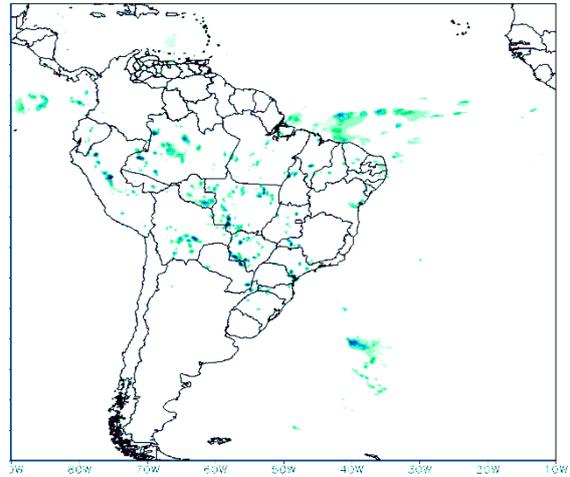


Figura 36: Precipitação acumulada (mm) de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora

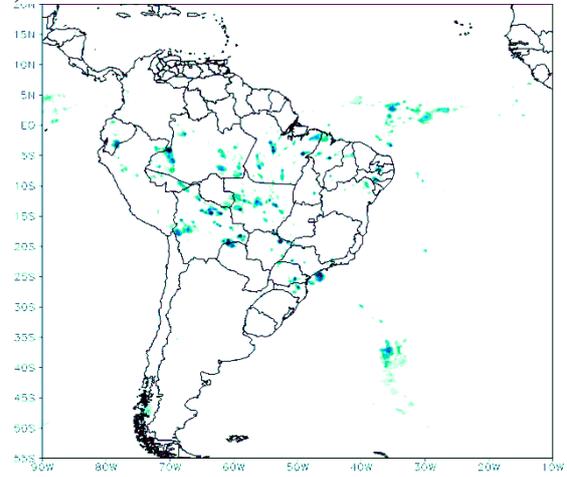
g) 20/01/2011 12Z



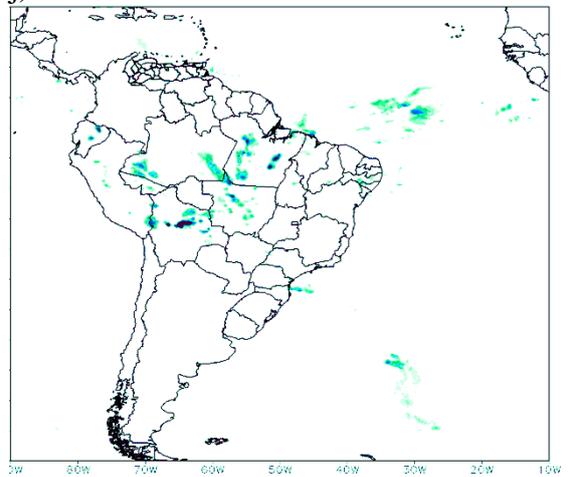
h) 20/01/2011 18Z



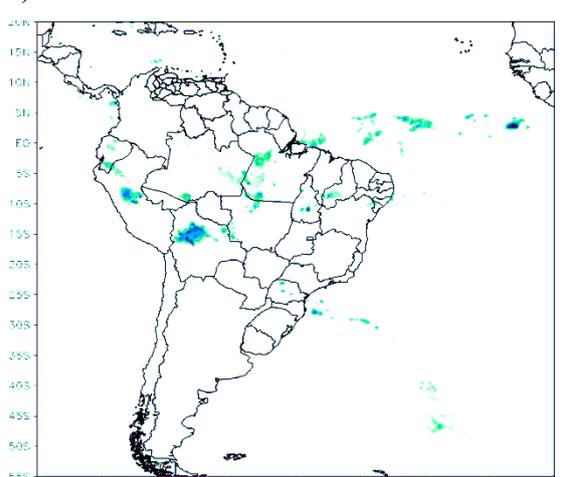
i) 21/01/2011 00Z



j) 21/01/2011 06Z



k) 21/01/2011 12Z



l) 21/01/2011 18Z

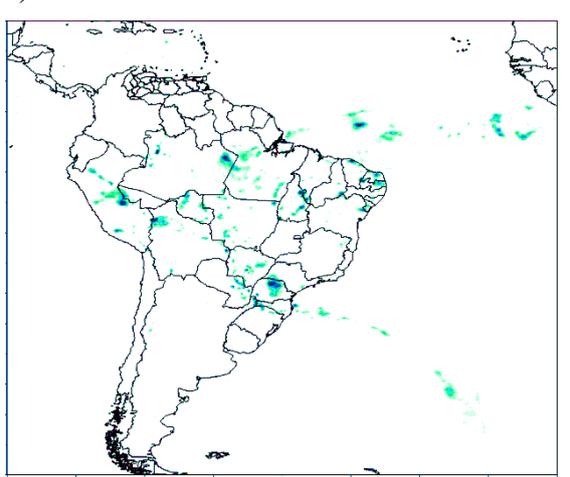


Figura 36 continuação: Precipitação acumulada (mm) de 6 horas. A cada 6 horas. Fonte: Autora

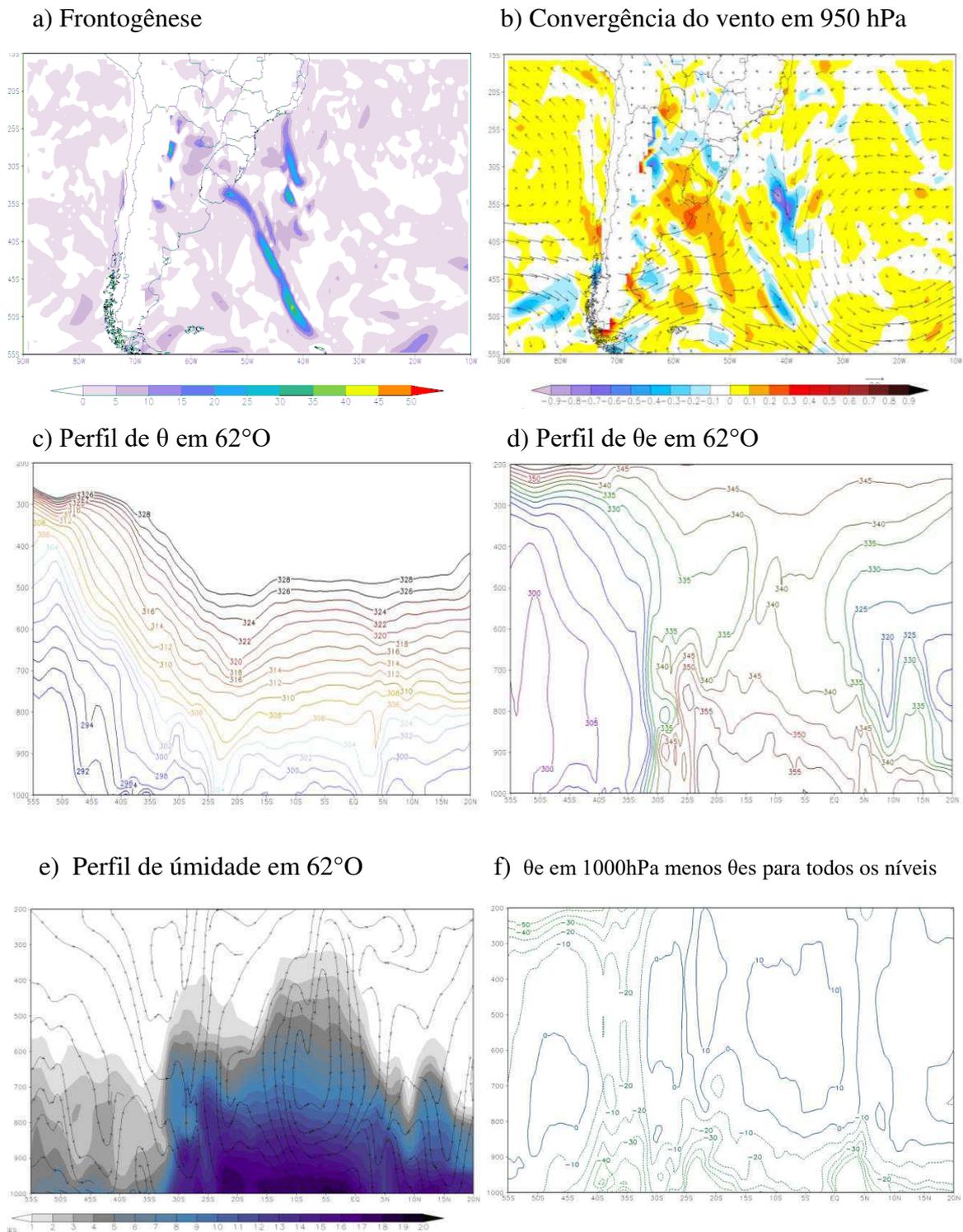


Figura 37: a) Frontogênese por deformação em temperatura potencial equivalente ($\text{K}/100\text{km}^*\text{dia}$) b) convergência do vento (valores negativos), para 925hPA c) Perfil de θ d) perfil de θ_e e) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). f) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de 62°O , e para 06Z do dia 20/01/2011. Fonte: autora.

5.4 Casos relacionados ao estudo de Rocha (2018)

Os próximos dois casos foram escolhidos a partir dos estudos de Rocha (2018), que explorou a existência de duas categorias de ciclo diurno para a Baixa do Noroeste da Argentina, um fraco e outro intenso. Aquele estudo considera as diferenças entre um caso de cada categoria, considerando suas características sinóticas, o transporte de umidade que produzem e as chuvas subtropicais. Uma revisão dos resultados daquele trabalho foi apresentada no tópico 3.5 deste documento, embora o transporte meridional de umidade para o sul tenha sido muito mais intenso no caso com ciclo diurno forte, a taxa da precipitação alimentada por este transporte foi mais intensa no outro caso, com ciclo diurno fraco. O que se propõe agora é complementar aquela análise, considerando um período mais longo para cada caso, 72h ao invés de 36h, a evolução da intensidade dos gradientes de umidade e temperatura, assim como perfis que representam diferentes aspectos da instabilidade atmosférica, e perfis de umidade.

5.4.1 BNOA caso 1: forte ciclo diurno.

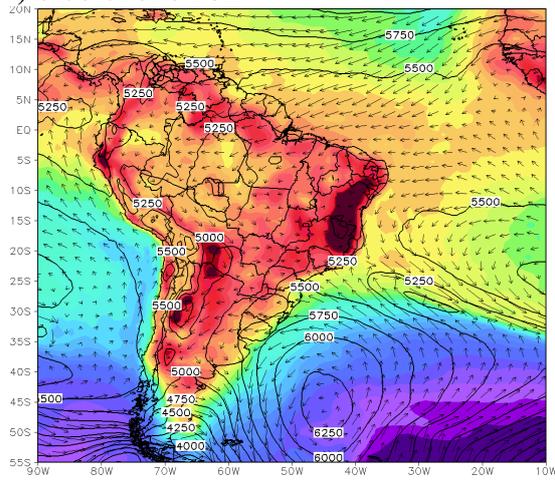
Em 18Z02 a massa de ar quente ocupa praticamente todo o continente atingindo valores aproximadamente de 32°C, a variação acentuada de temperatura sobre o continente está entre 50°S e 45°S, porem no Oceano a variação acontece entre 25°S e 20°S. (Figura 38 a). O campo de umidade específica apresenta algumas semelhanças e diferenças com relação ao campo de temperatura, que são importantes para a compreensão do evento (Figura 39). Em primeiro lugar, assim como no campo de temperatura, é possível observar que a transição dos trópicos muito úmidos para a massa de ar extratropical seca ocorre em latitudes mais altas sobre o continente do que sobre o oceano adjacente (Figura 38). Além disso, embora haja intensa variação da umidade específica em torno de 40°S durante todo o evento (Figura 39), é possível identificar também uma região de transição mais extensa e menos abrupta entre as massas tropical e extratropical, aproximadamente entre 40°S e 30°S. Esta é uma região que recebe a confluência dos escoamentos vindos da Amazônia e do Atlântico Subtropical. O escoamento vindo da Amazônia é mais úmido do que aquele vindo do oceano, e a variação na intensidade do entranhamento entre esses dois escoamentos afeta muito os valores de umidade específica na faixa subtropical continental. Durante o transcorrer do evento, o escoamento atingindo os subtropicos torna-se principalmente Amazônico (Figura 39 d e e), o que umedece muito a faixa entre 30°S e 40°S.

Embora este evento não seja uma incursão de ar frio, é interessante observar a

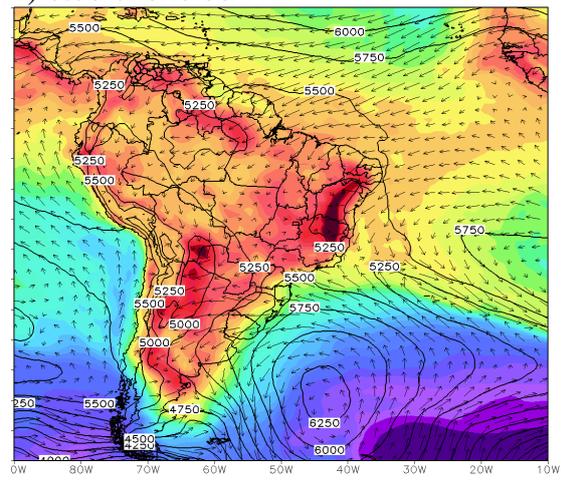
magnitude do gradiente de temperatura no sul do continente com essa mesma magnitude nos casos de incursões. O módulo do gradiente de temperatura fica entre 0 e $1,5^{\circ}\text{C}$ a cada 100/km durante todo o evento (Figura 40). O gradiente de umidade assume valores acima $0,006 \text{ g/Kg} \cdot 100\text{Km}$, sobre o continente, até 18Z do dia 3. Nos horários subsequentes a intensidade do gradiente se reduz, não passando $0,005 \text{ g/Kg} \cdot 100\text{Km}$. Isso é consequência tanto de um maior entranhamento de ar do Atlântico subtropical quanto da passagem de sistemas transientes, cuja circulação leva à penetração de ar extratropical nos subtrópicos.

A precipitação as 12Z do dia 3 (Figura 42 d) apresenta taxas de aproximadamente 30 mm/6h, entre as latitudes 36°S e 33°S e 65°O , que volta a se intensificar 18 horas depois (Figura 42 g). Observando a Figura 42 f é possível ver que a chuva acontece onde tem pouca inibição convectiva, e apresenta instabilidade potencial (Figura 43 d), o perfil de temperatura potencial (Figura 43 c) apresenta-se neutro até aproximadamente 925hPa. Rocha (2018) mostra que para a chuva nesse horário existe alta taxa de convergência do transporte de umidade integrado na vertical. A Figura 43 e mostra a fronteira entre o ar que é umidificado (35°S) pelo escoamento de norte.

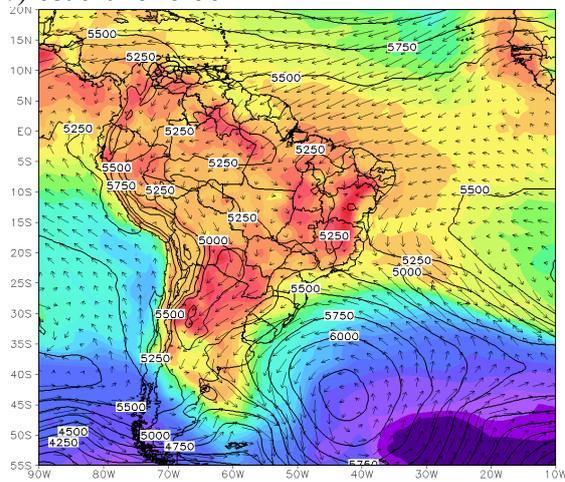
a) 02/01/2016 18Z



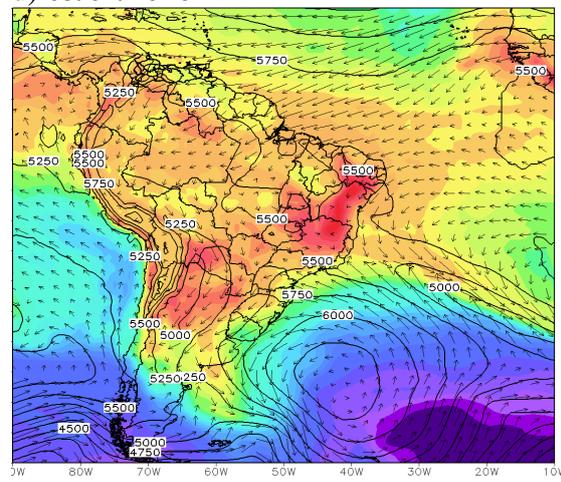
b) 03/01/2016 00Z



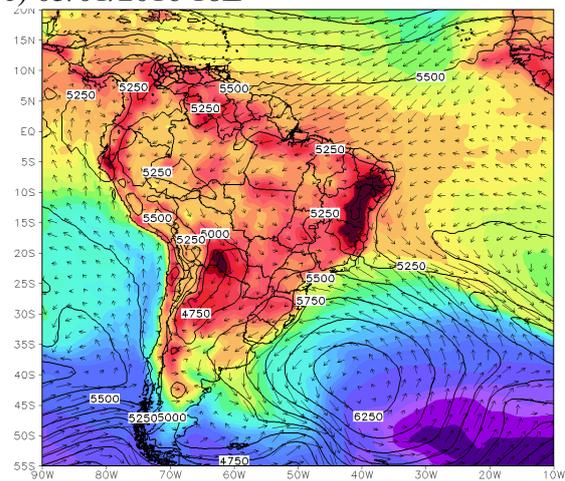
c) 03/01/2016 06Z



d) 03/01/2016 12Z



e) 03/01/2016 18Z



f) 04/01/2016 00Z

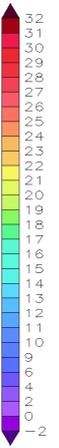
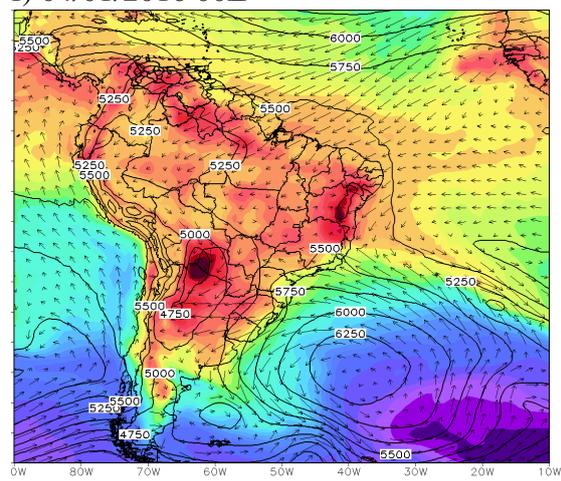
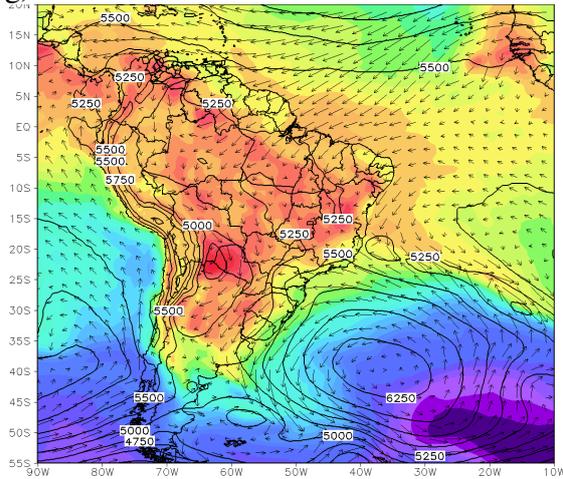
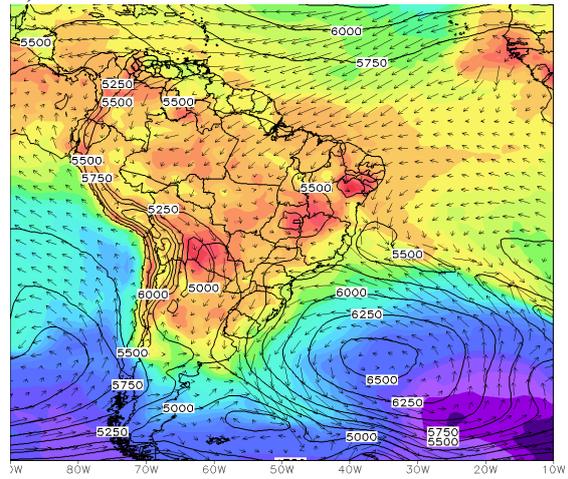


Figura 38: Temperatura em °C (cores), vento (setas m/s) e geopotencial (contornos). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

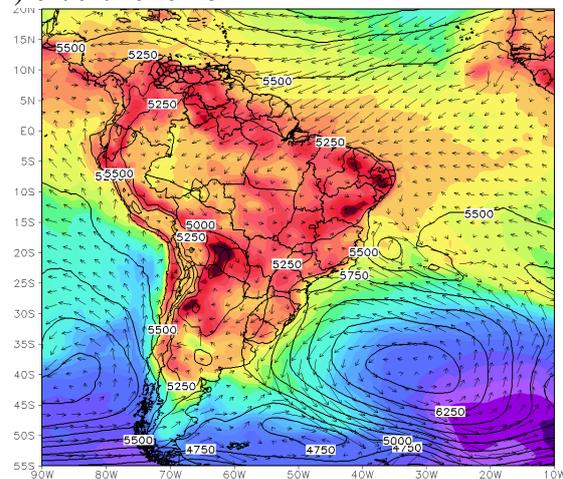
g) 04/01/2016 06Z



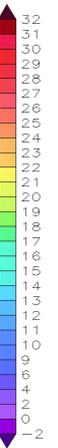
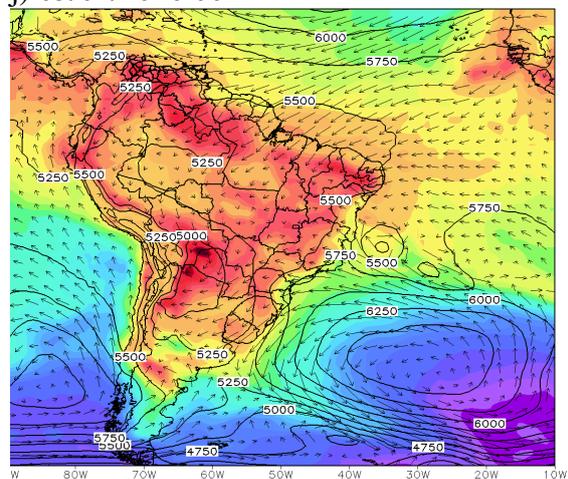
h) 04/01/2016 12Z



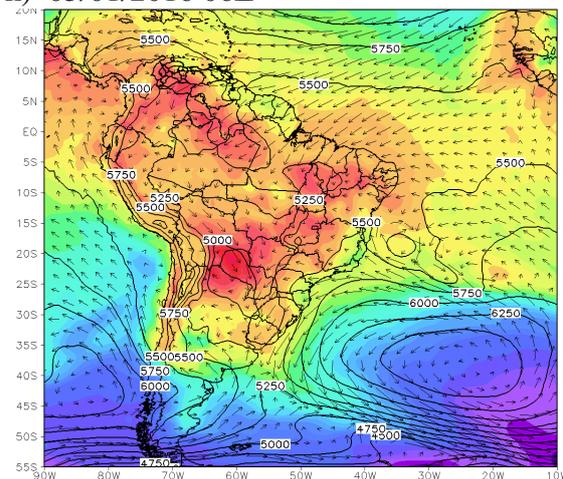
i) 04/01/2016 18Z



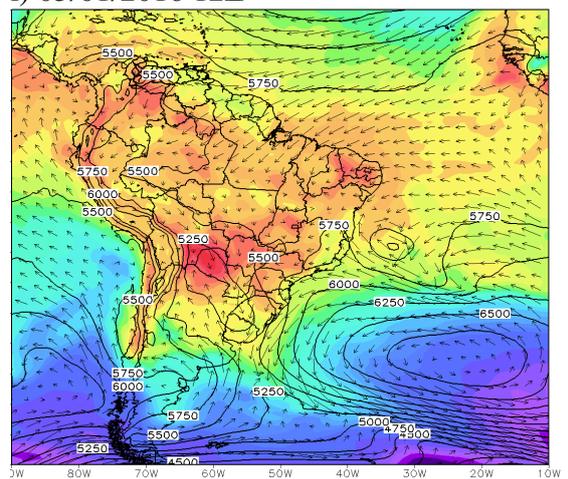
j) 05/01/2016 00Z



k) 05/01/2016 06Z



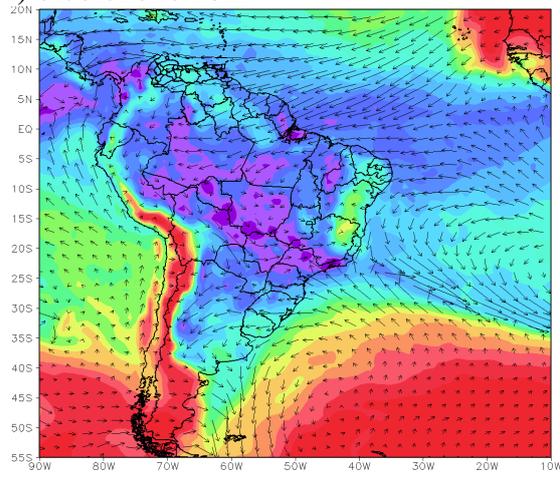
l) 05/01/2016 12Z



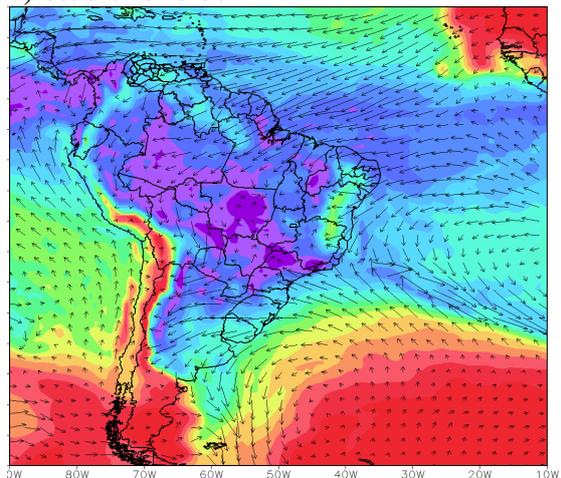
20

Figura 38 continuação: Temperatura em °C (cores), vento em m/s (setas) e geopotencial (contornos). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

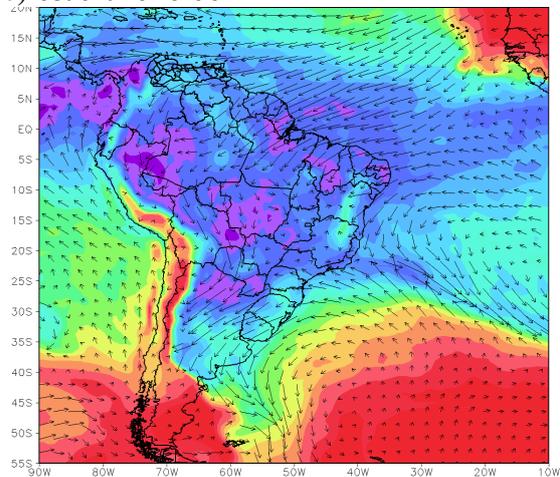
a) 02/01/2016 18Z



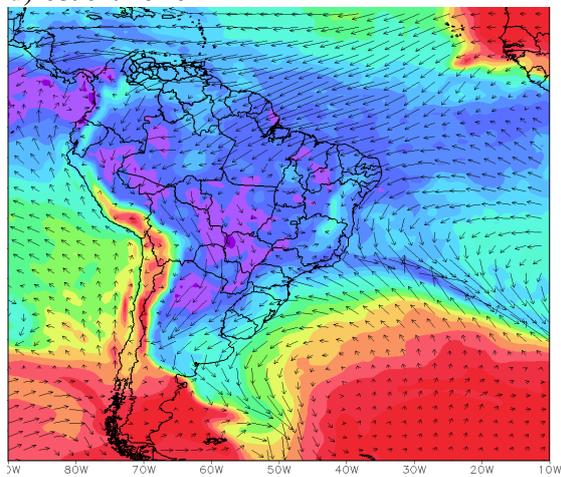
b) 03/01/2016 00Z



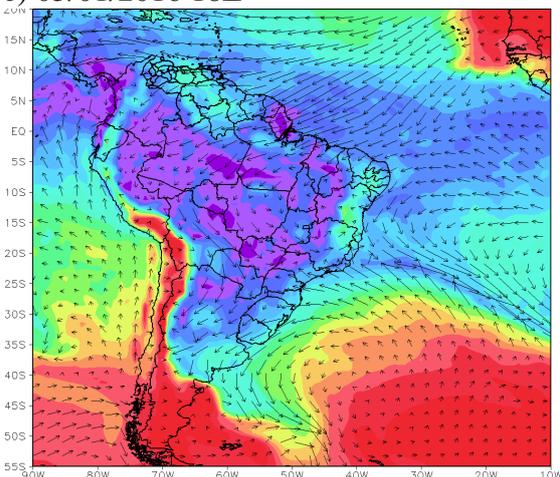
c) 03/01/2016 06Z



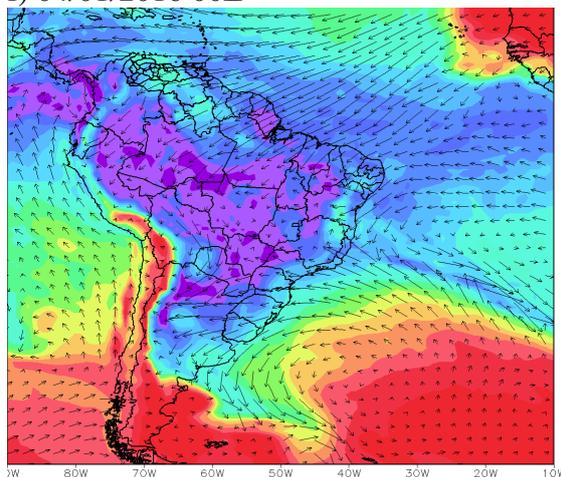
d) 03/01/2016 12Z



e) 03/01/2016 18Z



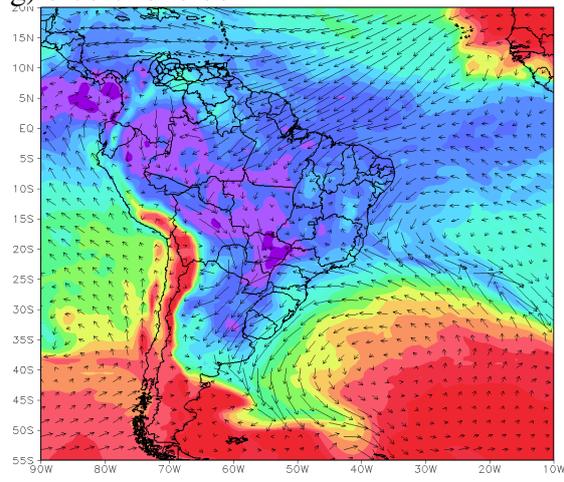
f) 04/01/2016 00Z



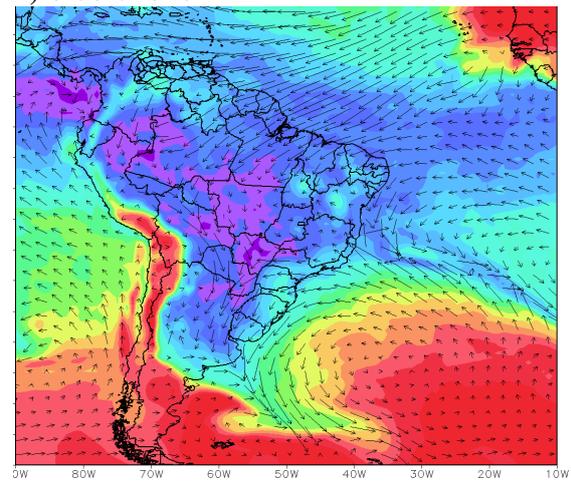
0.2

Figura 39: Umidade específica em g/Kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

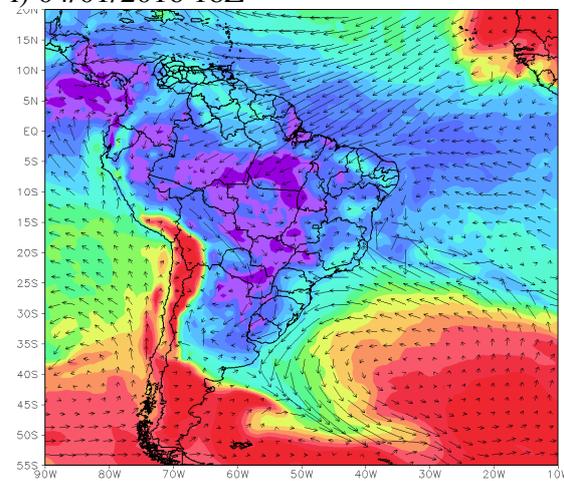
g) 04/01/2016 06Z



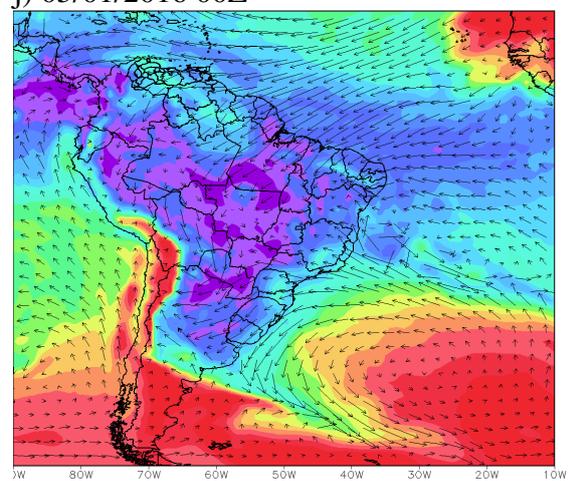
h) 04/01/2016 12Z



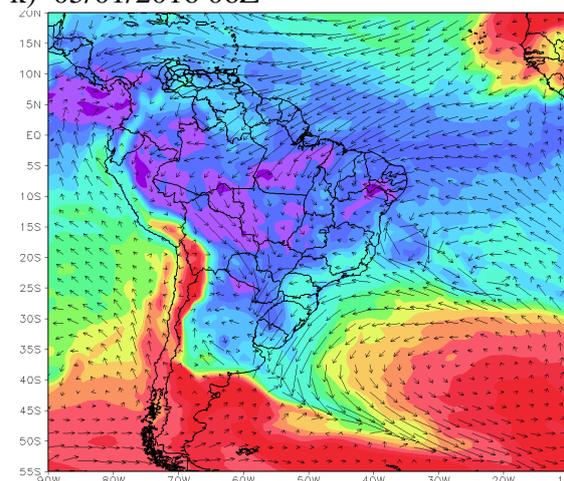
i) 04/01/2016 18Z



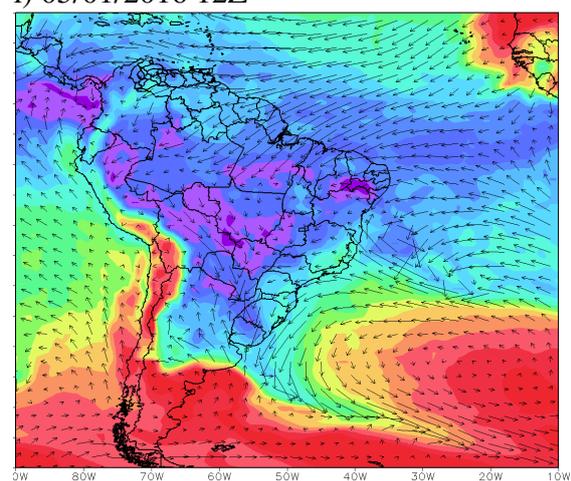
j) 05/01/2016 00Z



k) 05/01/2016 06Z



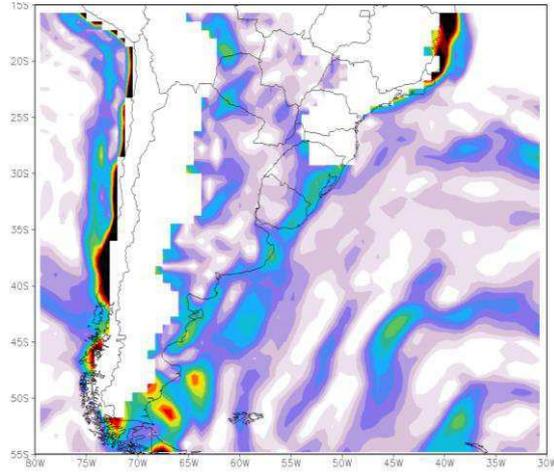
l) 05/01/2016 12Z



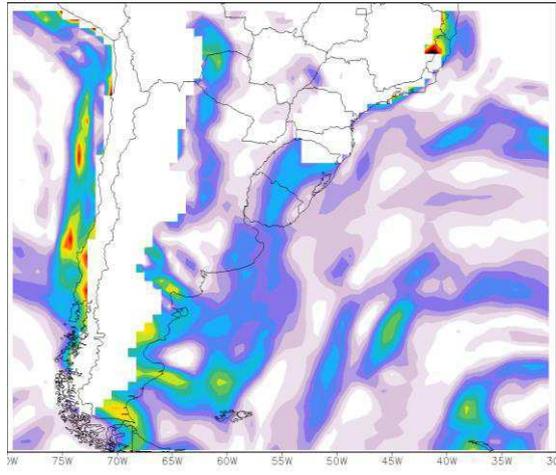
0.2

Figura 39 continuação: Umidade específica g/Kg/100Km (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

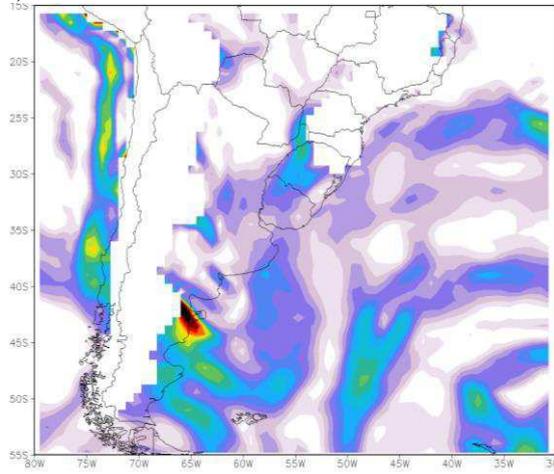
a) 02/01/2016 18Z



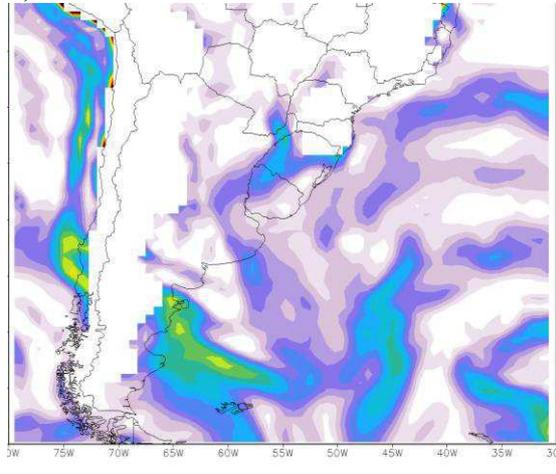
b) 03/01/2016 00Z



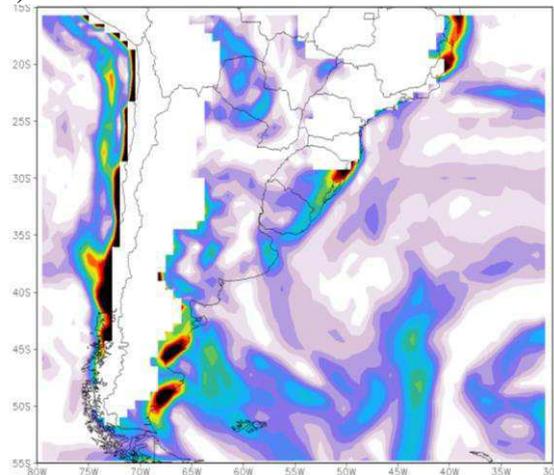
c) 03/01/2016 06Z



d) 03/01/2016 12Z



e) 03/01/2016 18Z



f) 04/01/2016 00Z

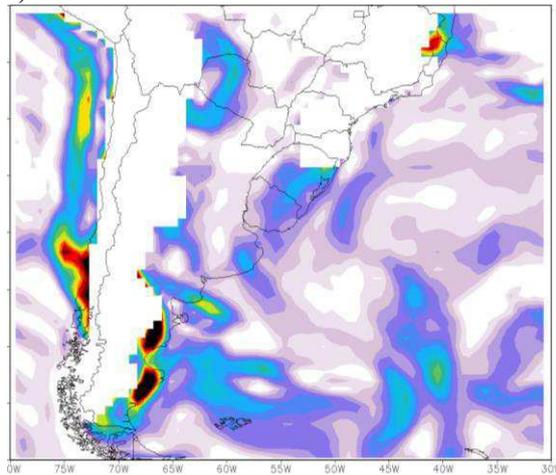
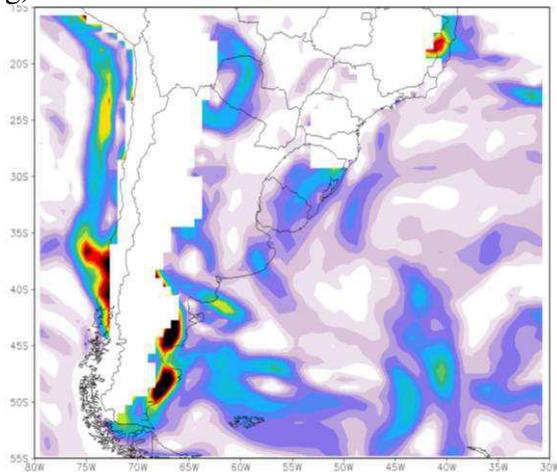
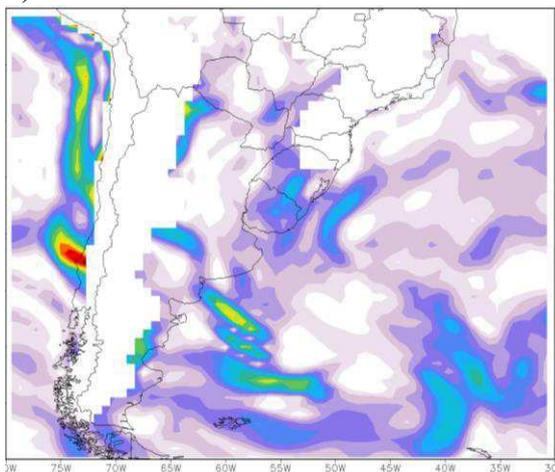


Figura 40: Magnitude do gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/100\text{Km}$). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.

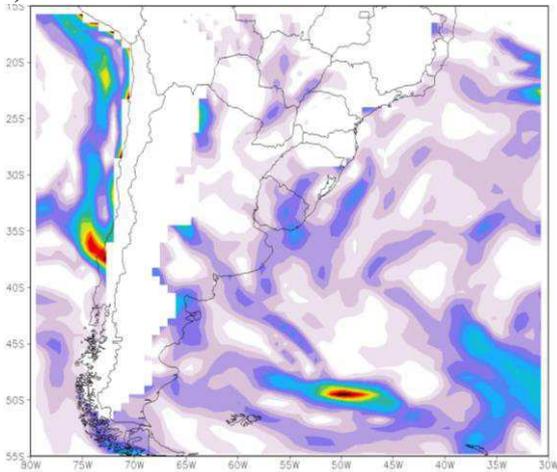
g) 04/01/2016 06Z



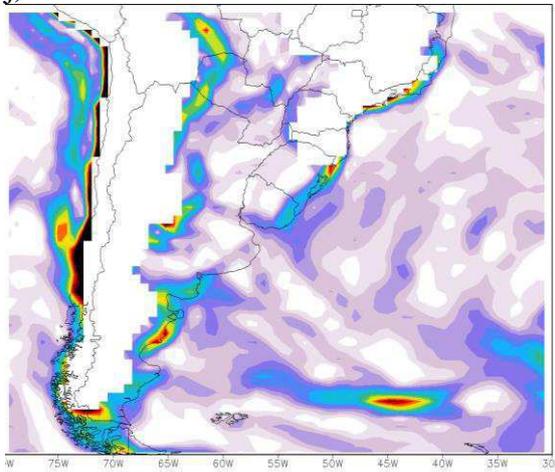
h) 04/01/2016 12Z



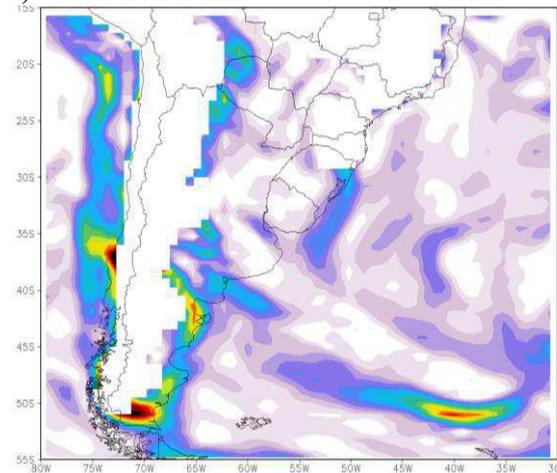
i) 04/01/2016 18Z



j) 05/01/2016 00Z



k) 05/01/2016 06Z



l) 05/01/2016 12Z

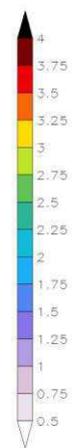
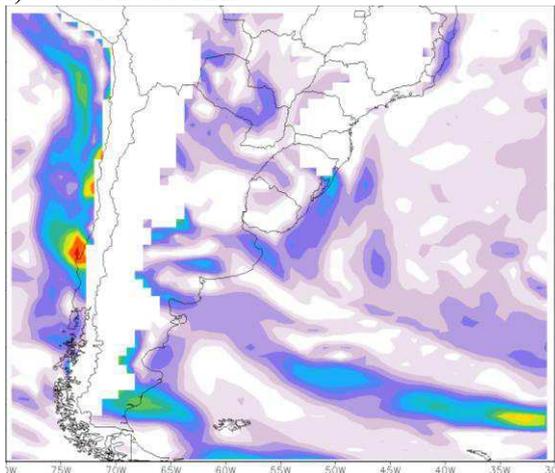
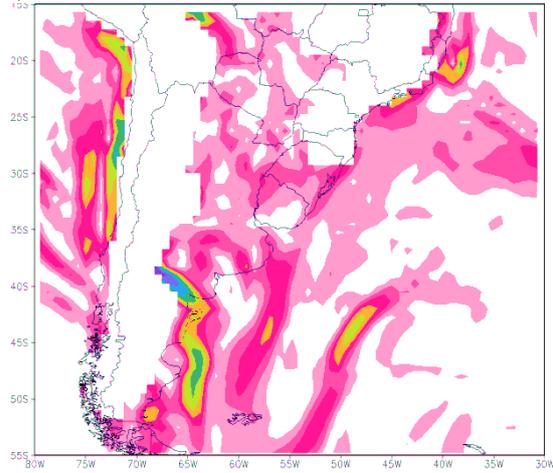
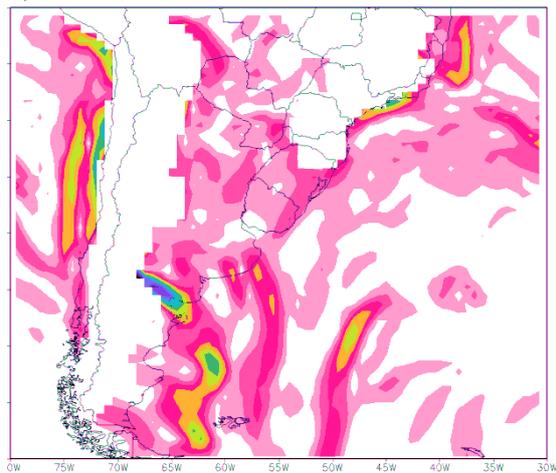


Figura 40 continuação: Magnitude do gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/100\text{Km}$). Em 950 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora.

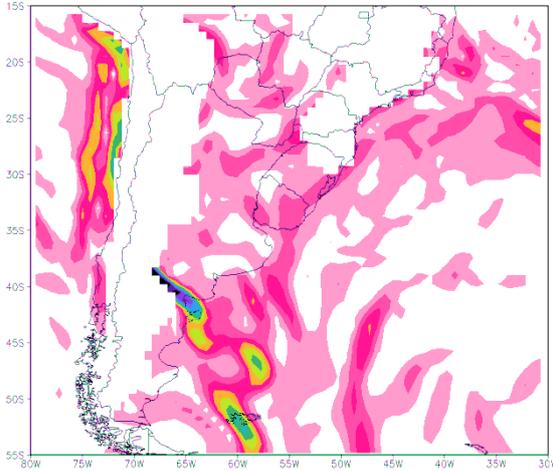
a) 02/01/2016 18Z



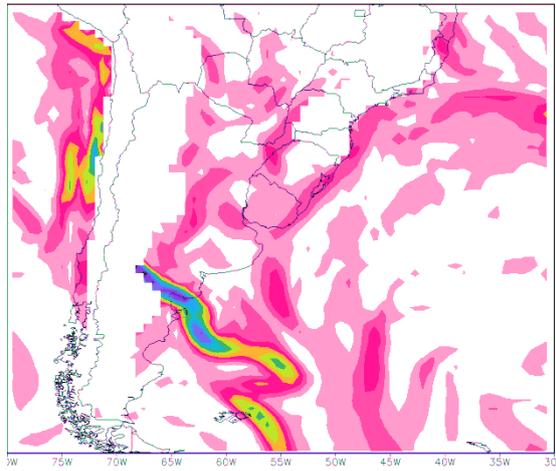
b) 03/01/2016 00Z



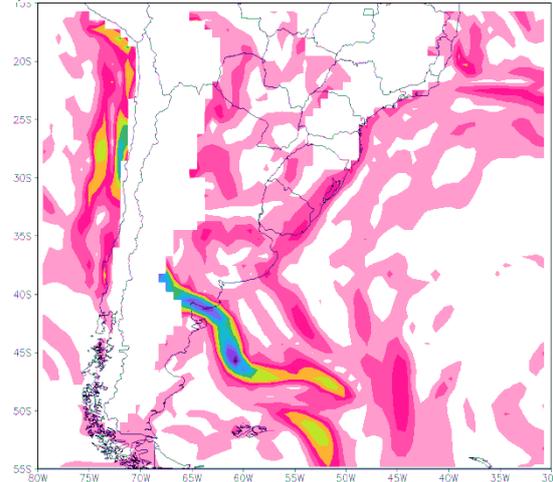
c) 03/01/2016 06Z



d) 03/01/2016 12Z



e) 03/01/2016 18Z



f) 04/01/2016 00Z

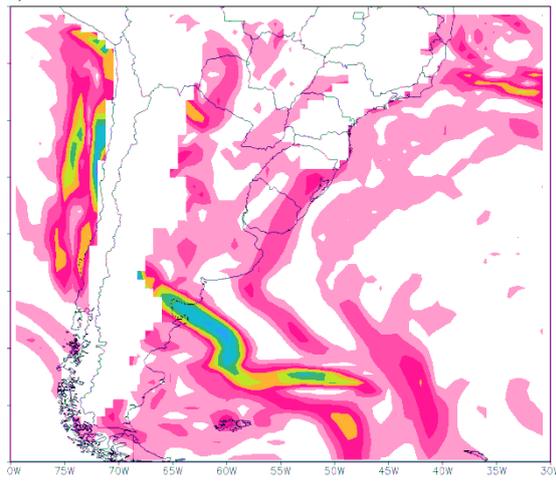
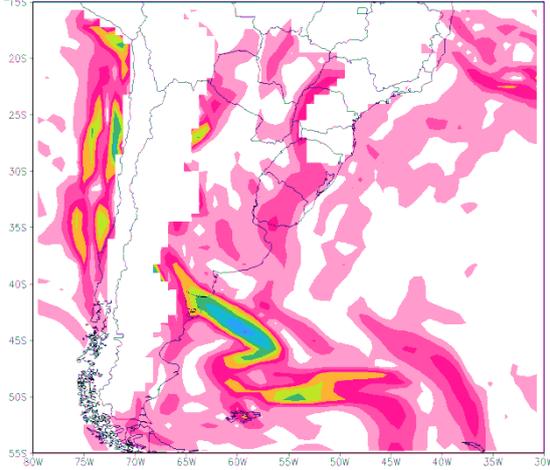
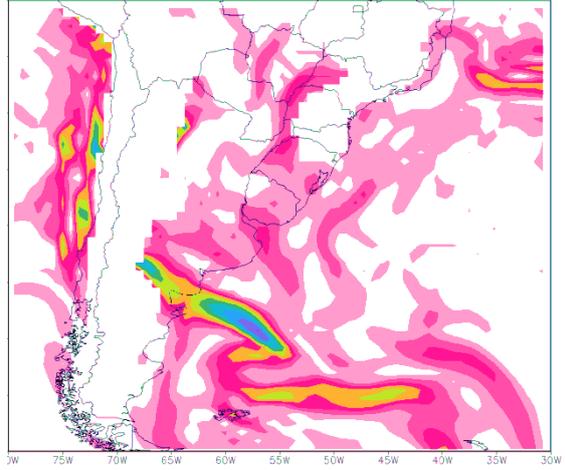


Figura 41: Magnitude do gradiente de umidade (g/Kg/100Km). Em 950 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

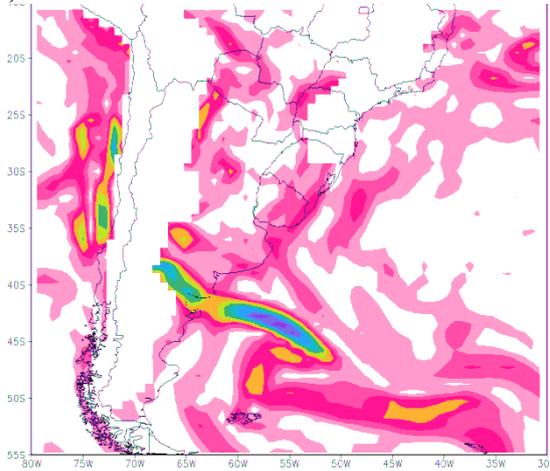
g) 04/01/2016 06Z



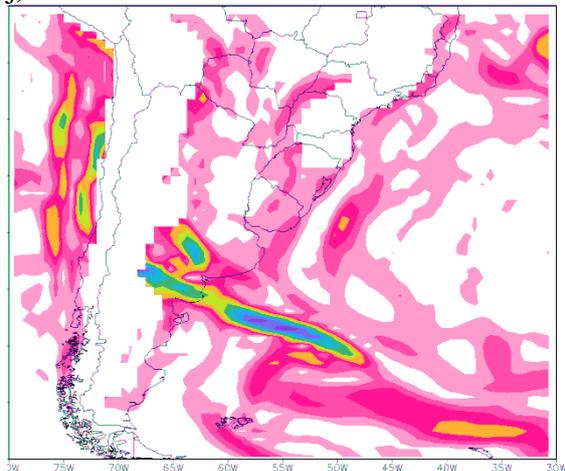
h) 04/01/2016 12Z



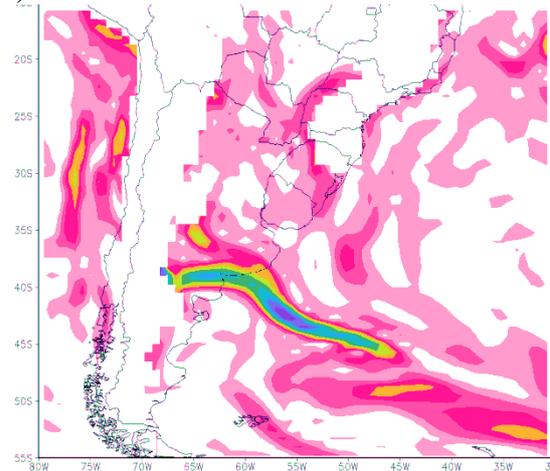
i) 04/01/2016 18Z



j) 05/01/2016 00Z



k) 05/01/2016 06Z



l) 05/01/2016 12Z

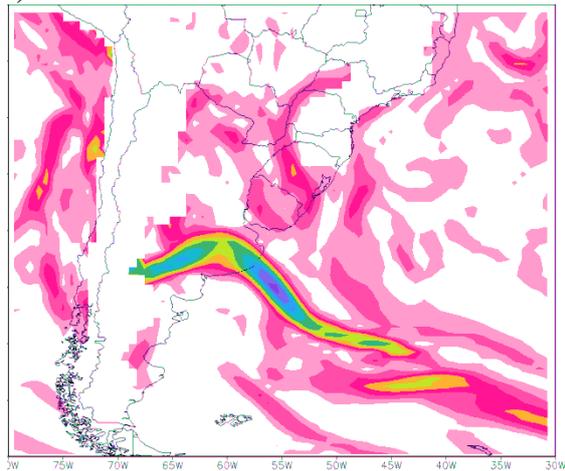


Figura 41 continuação: Magnitude do gradiente de umidade. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

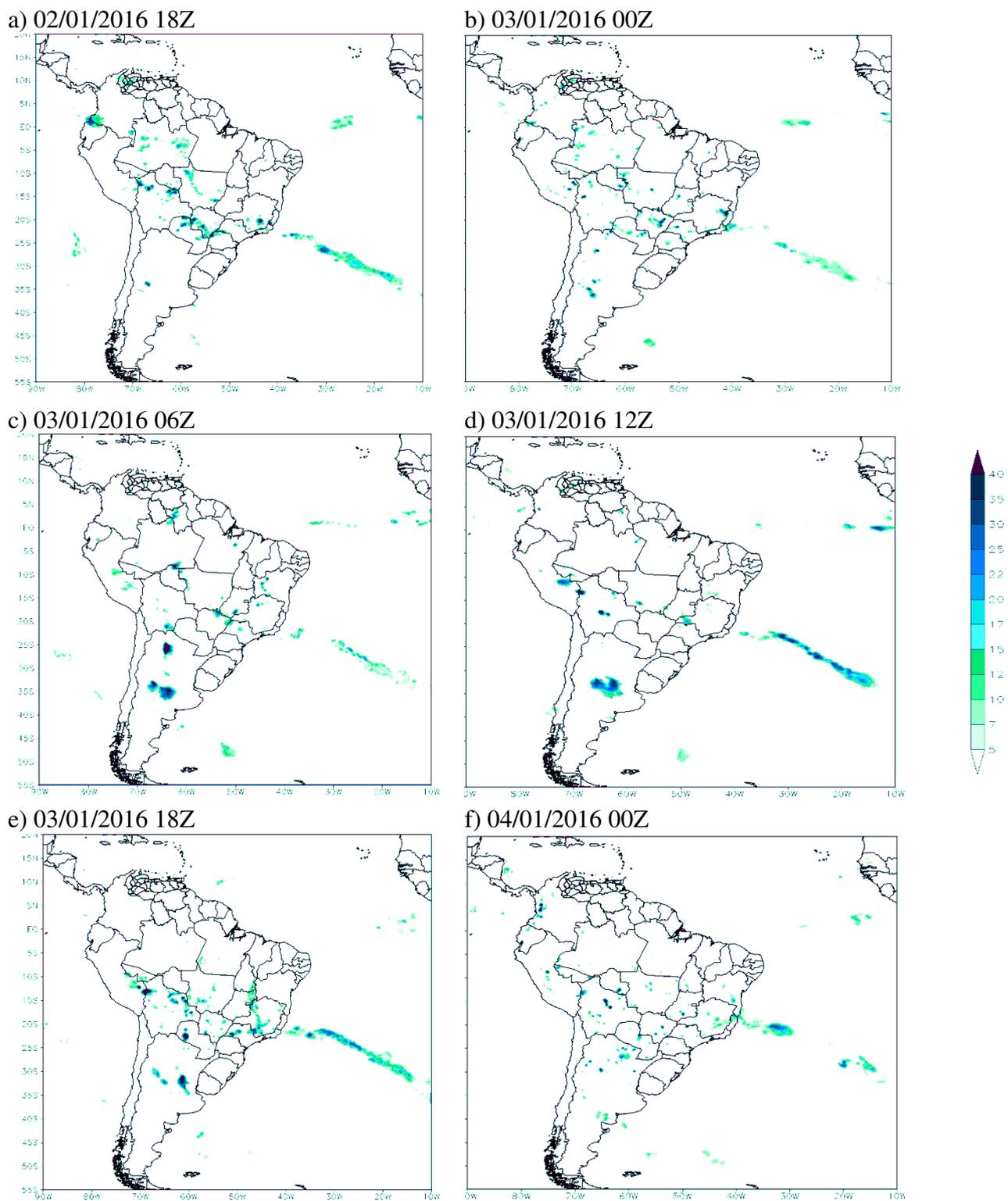


Figura 42: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

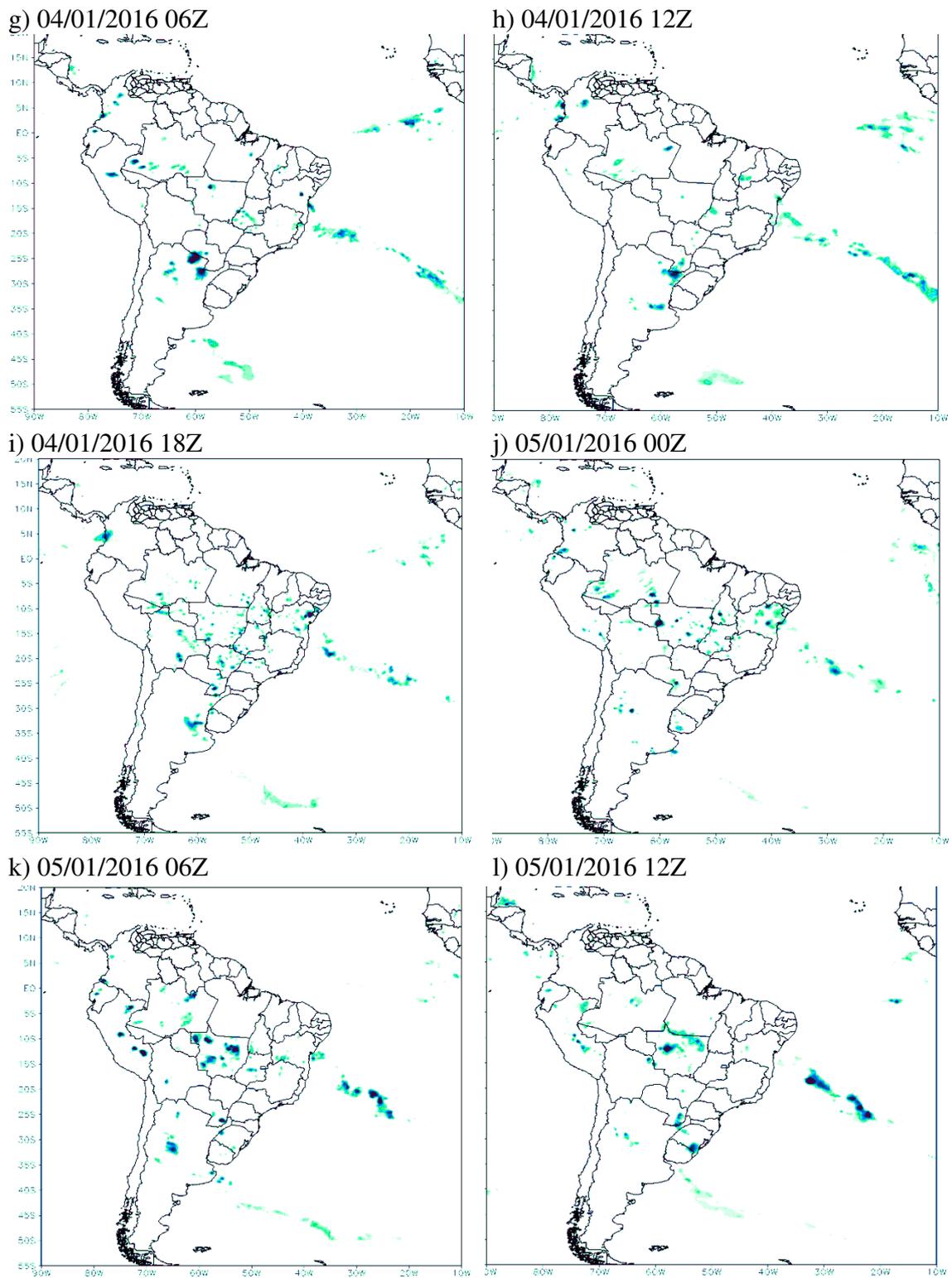


Figura 42 continuação: Precipitação acumulada de 6 horas em mm. Em 925 hPa. A cada 6 horas.
 Fonte: Autora

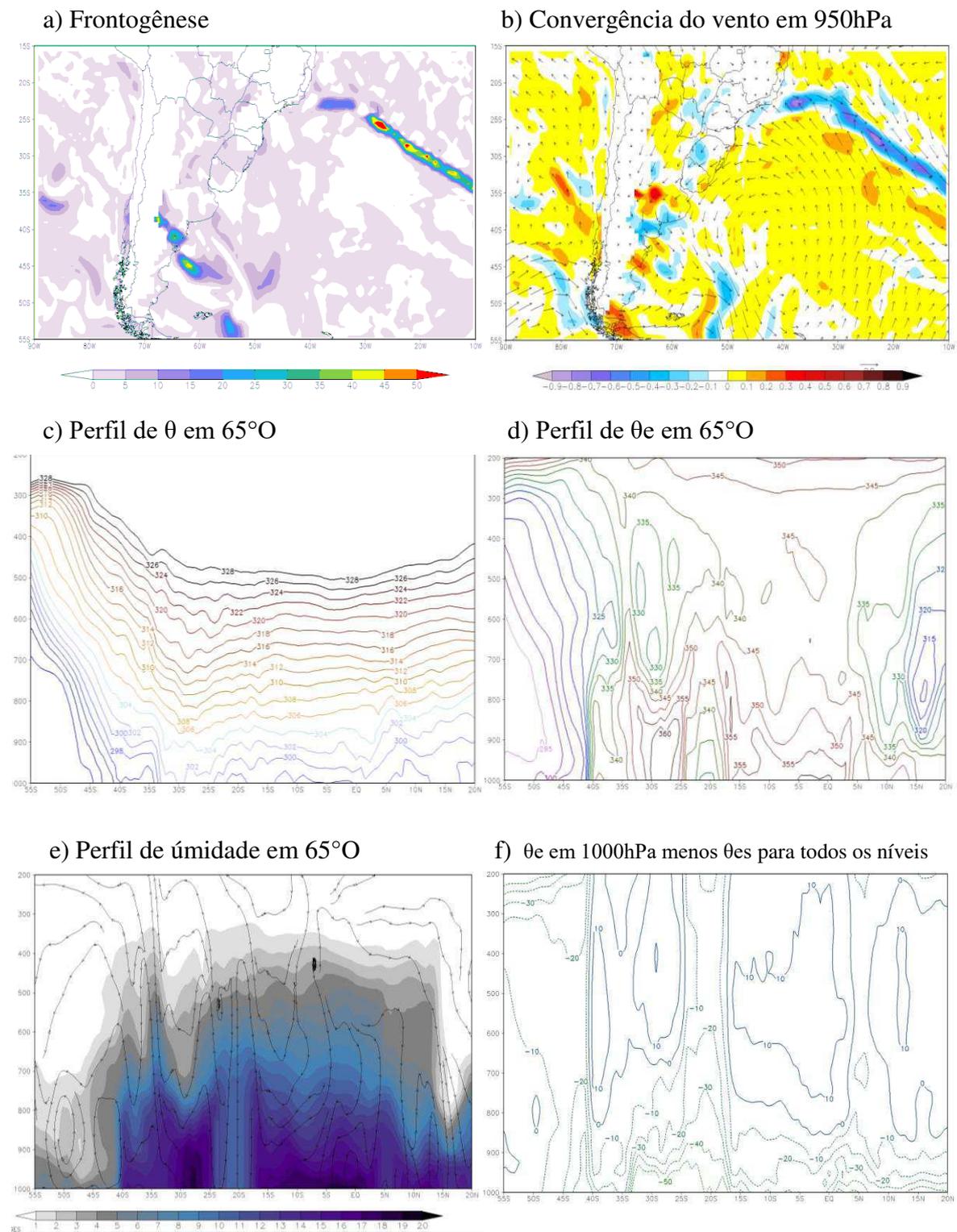


Figura 43: a) Frontogênese por deformação em temperatura potencial equivalente ($\text{K}/100\text{km}^2/\text{dia}$) b) convergência do vento (valores negativos), para 925hPA c) Perfil de θ d) perfil de θ_e e) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). f) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de 65°O , e para 12Z do dia 03/01/2016. Fonte: autora.

5.4.2 BNOA caso 2: fraco ciclo diurno; seguido por incursão de ar frio.

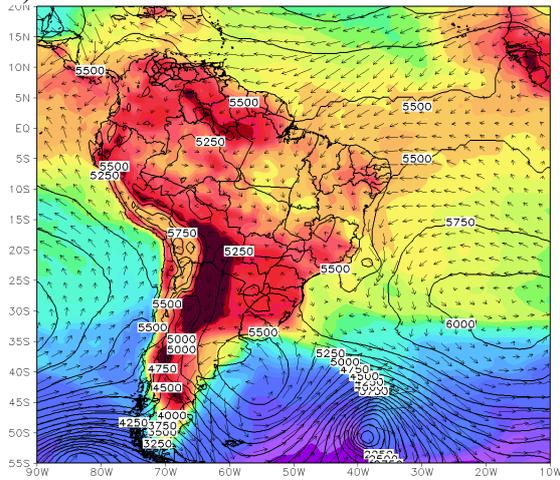
Este caso foi o segundo estudado por Rocha (2018), caracterizado como uma BNOA de fraco ciclo diurno. Aquele autor analisou as primeiras 36h, neste trabalho foram incluídas também às 36h subsequentes, resultando no período entre 18Z do dia 23 e 12Z do dia 26 de janeiro de 2016.

A massa de ar tropical quente se estende até o sul da América do Sul, com grande aquecimento nos subtrópicos a leste dos Andes, onde as temperaturas entre 35°S e 15°S ultrapassam 32°C (Figura 44). O campo de umidade mostra uma peculiaridade importante: um forte ressecamento entre 18°S e 32°S aproximadamente, no horário inicial (18Z do dia 23) (Figura 45 a). Isto se deve a uma forte incursão de ar seco ocorrida nos dias anteriores (não mostrado). Doze horas depois, às 06Z do dia 24 (Figura 44 c), o escoamento a leste dos Andes adquire forte componente de norte, desde os trópicos até os subtrópicos. Com isso, a massa de ar tropical úmida avança gradualmente, chegando próximo de 30°S em 00Z do dia 26 o escoamento persiste até 12Z do dia 26, a fronteira das massas de ar úmida e seca regride a medida que a incursão avança.

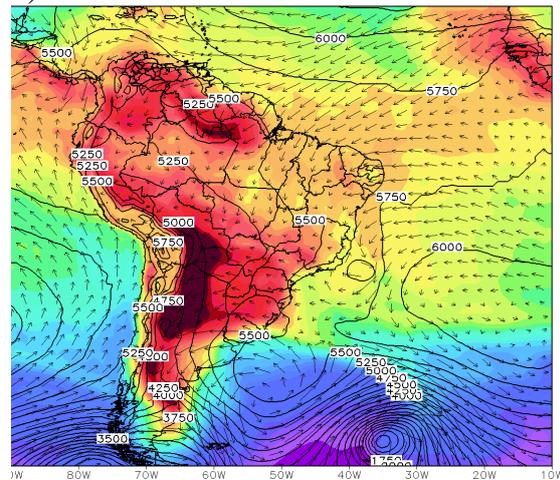
A magnitude do gradiente de temperatura se intensifica quando a incursão subtropical começa as 12Z do dia 24 (Figura 46 e 47 d) atingindo valores maiores que 4°C/100Km, aproximadamente em 36°S, 12 horas depois (Figura 46 g) o magnitude do gradiente de temperatura diminuiu a medida que a incursão é enfraquecida e dissipada (Figura 47). A incursão de ar frio produz uma frente em umidade. Porém não é uma frente intensa devido às condições de ressecamento pré-estabelecida no continente. O gradiente de umidade relacionados à incursão não passa de 0,004 g/Kg*100Km, diminuindo também a medida que a incursão é dissipada. O ressecamento de norte persiste até encontrar a massa de ar úmido, quando a incursão atinge 30°S tem taxa de chuva mais alta. A Figura 49 e mostra a fronteira dessas massas de ar para a longitude de 65°O. A precipitação relacionada à incursão começa as 18Z do dia 23 (Figura 48 a) atingindo taxas bem pequenas (15 mm/6h), se intensifica as 06Z do dia seguinte (Figura 48 c) porém com características estratiformes, atingindo taxas de 35 mm/6h, entre 40°S e 35°S.

Rocha (2018) mostra o campo de convergência do transporte de umidade integrado na vertical bastante intenso e compõe o campo de CAPE, que coincide com a chuva nesse horário e local (Figura 48 c). Observando as Figuras 49 (c, d e f) é possível ver que na longitude que intercepta a chuva existe um comportamento de instabilidade potencial e inibição convectiva fraca.

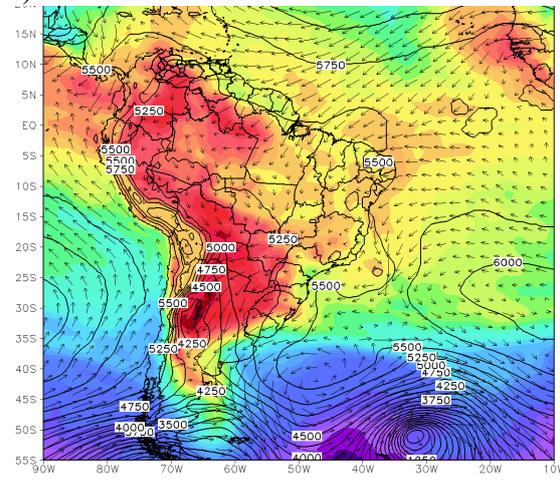
a) 23/01/2016 18Z



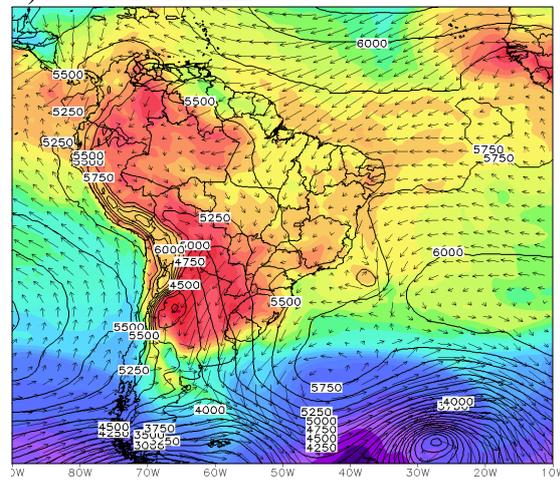
b) 24/01/2016 00Z



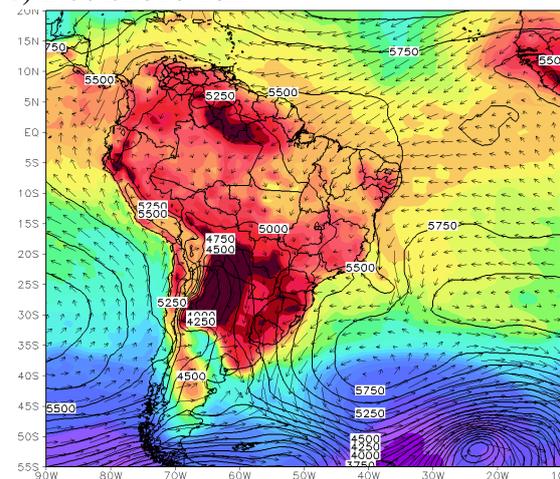
c) 24/01/2016 06Z



d) 24/01/2016 12Z



e) 24/01/2016 18Z



f) 24/01/2016 00Z

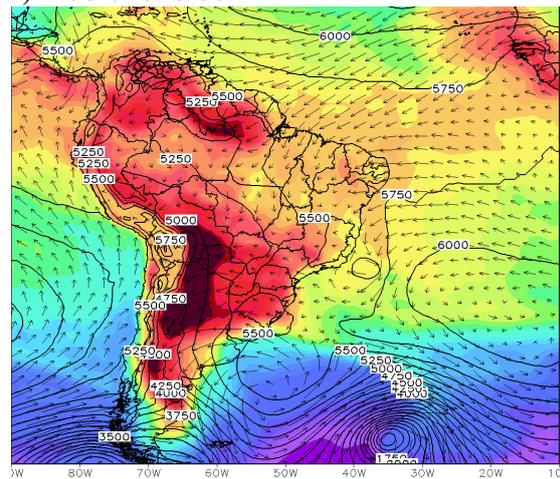
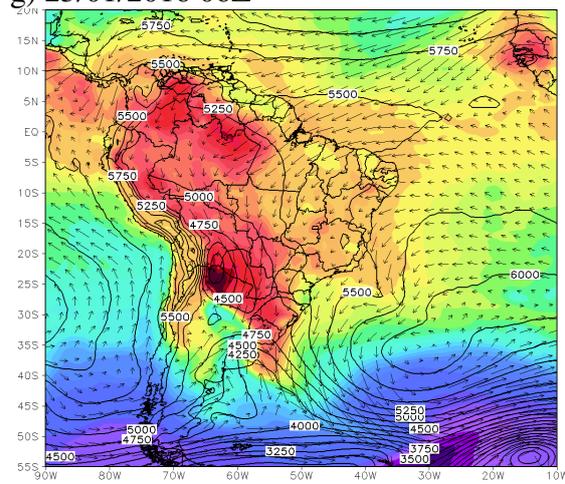
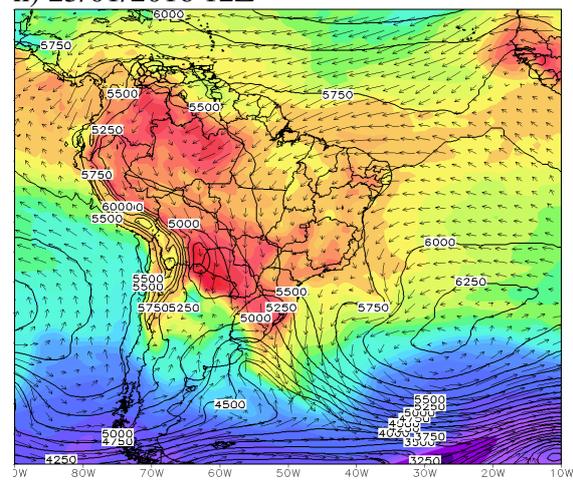


Figura 44: Temperatura em °C (cores), vento m/s (setas) e geopotencial (contornos). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

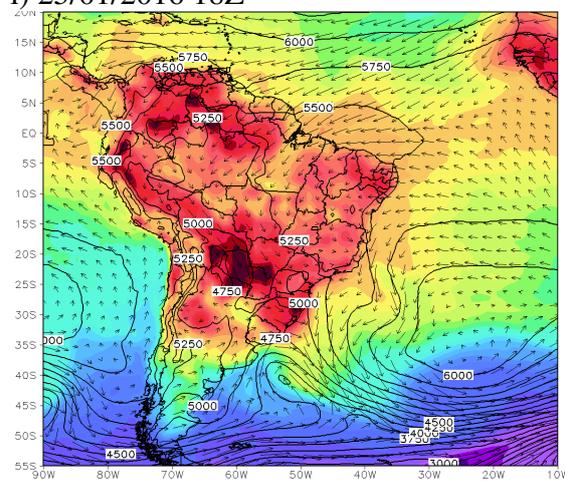
g) 25/01/2016 06Z



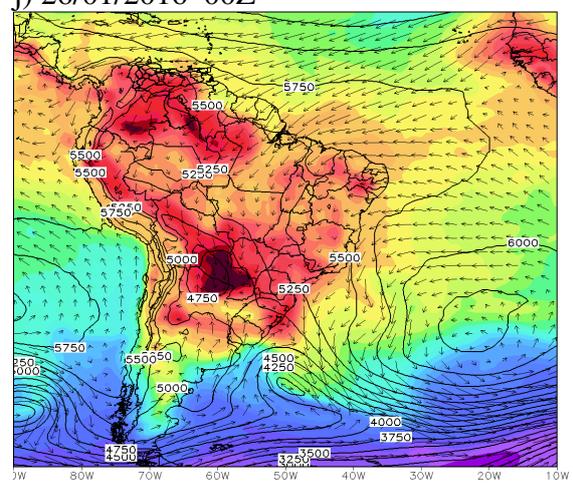
h) 25/01/2016 12Z



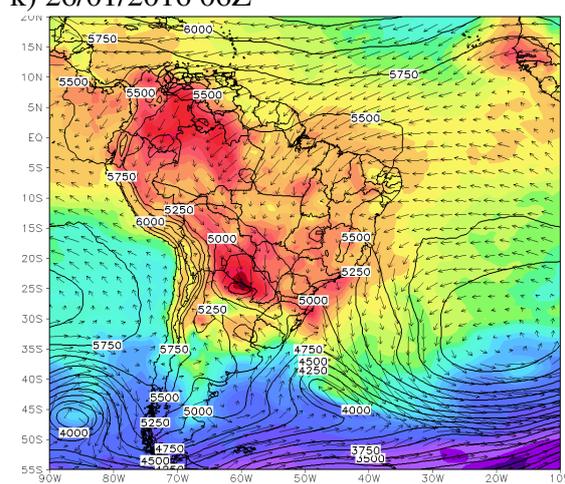
i) 25/01/2016 18Z



j) 26/01/2016 00Z



k) 26/01/2016 06Z



l) 26/01/2016 12Z

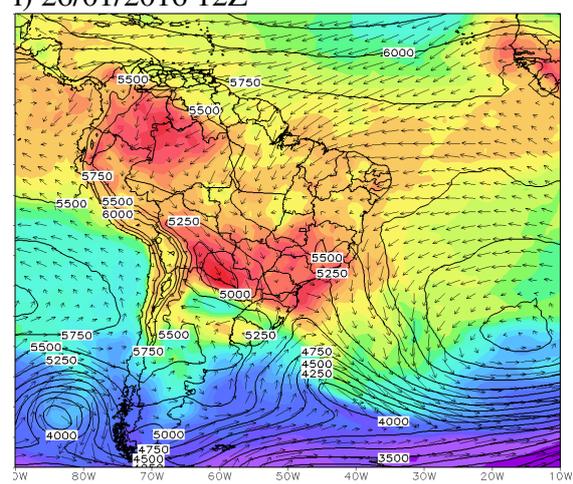
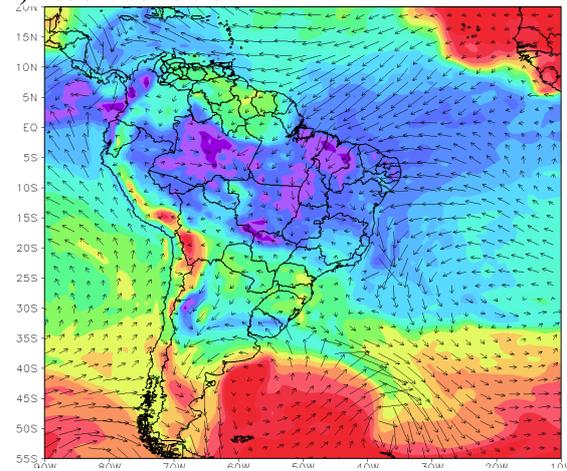
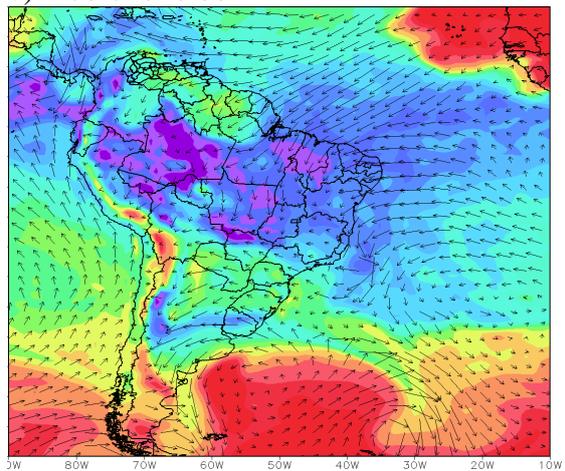


Figura 44 continuação: Temperatura em °C (cores), vento (setas m/s) e geopotencial (contornos). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

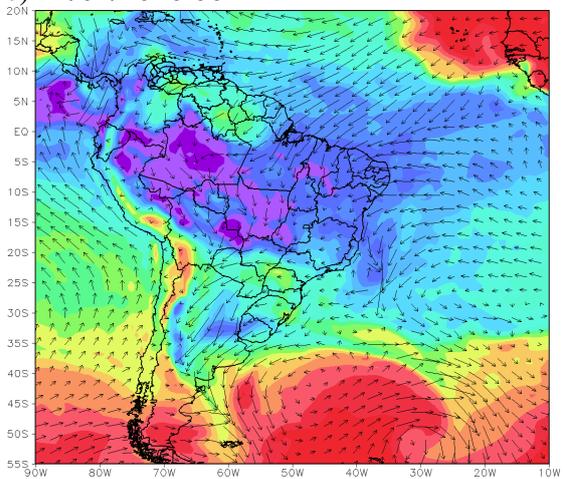
a) 23/01/2016 18Z



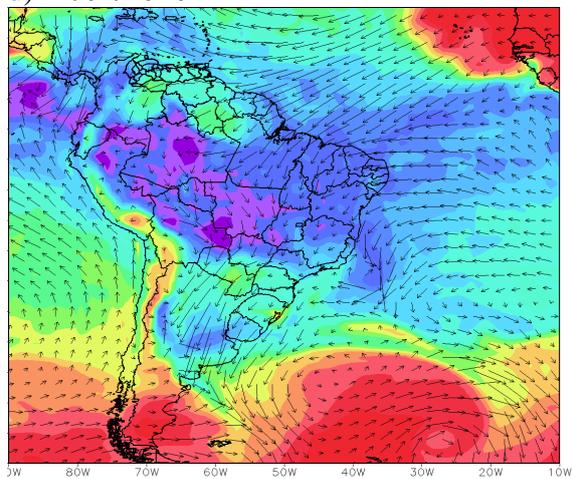
b) 24/01/2016 00Z



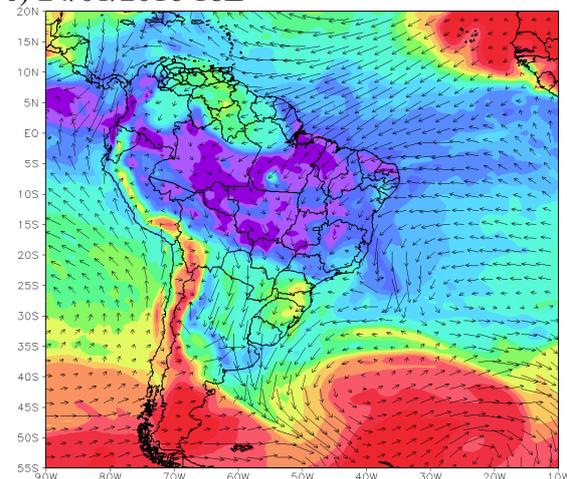
c) 24/01/2016 06Z



d) 24/01/2016 12Z



e) 24/01/2016 18Z



f) 25/01/2016 00Z

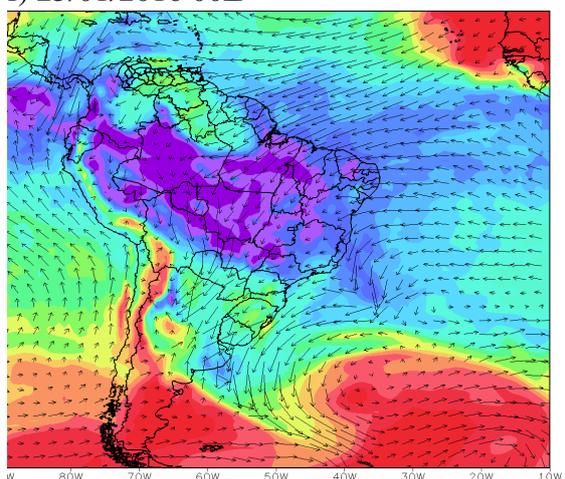
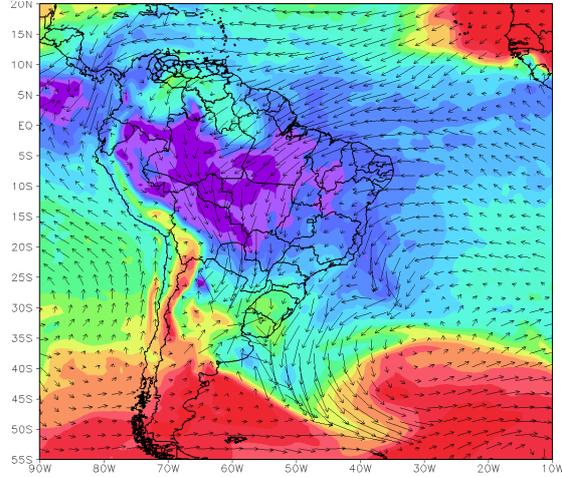
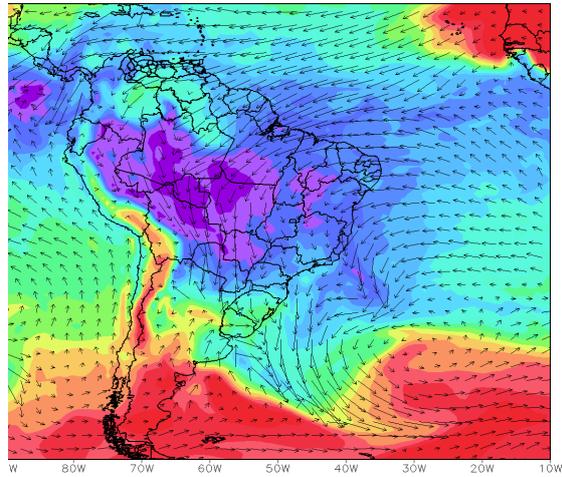


Figura 45: Umidade específica em g/Kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

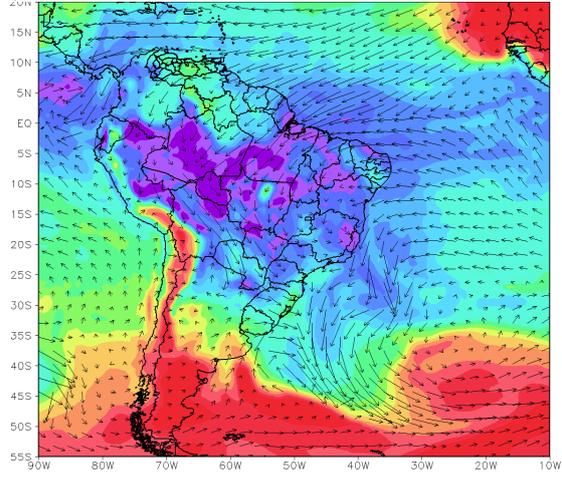
g) 25/01/2016 06Z



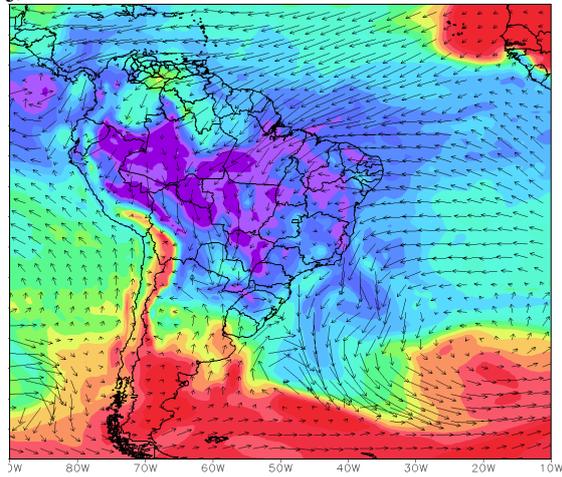
h) 25/01/2016 12Z



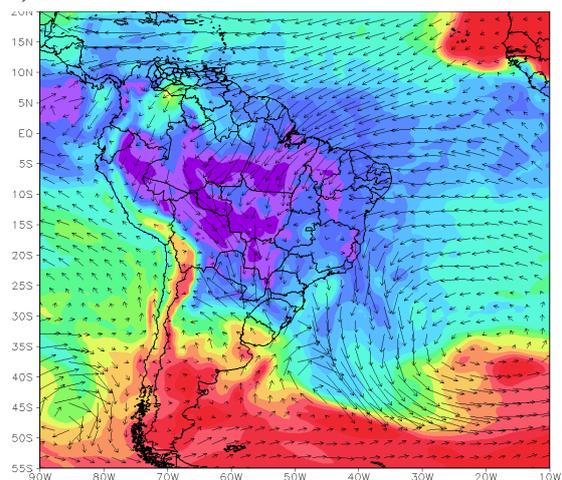
i) 25/01/2016 18Z



j) 26/01/2016 00Z



k) 26/01/2016 06Z



l) 26/01/2016 12Z

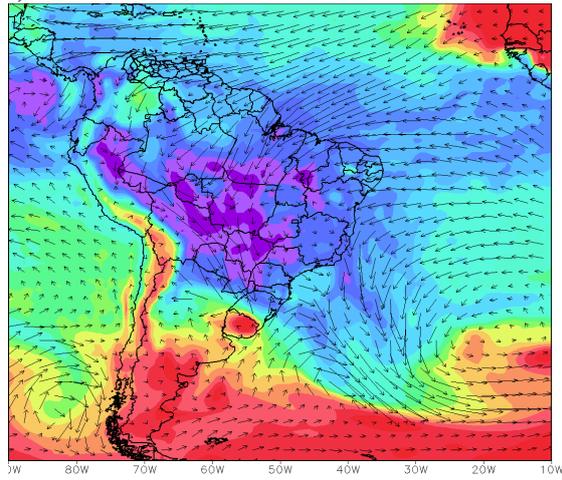
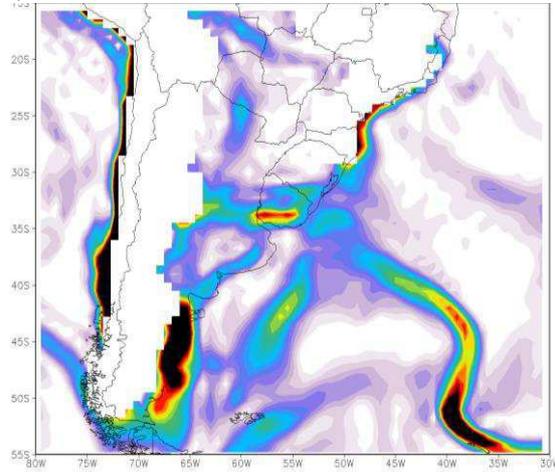
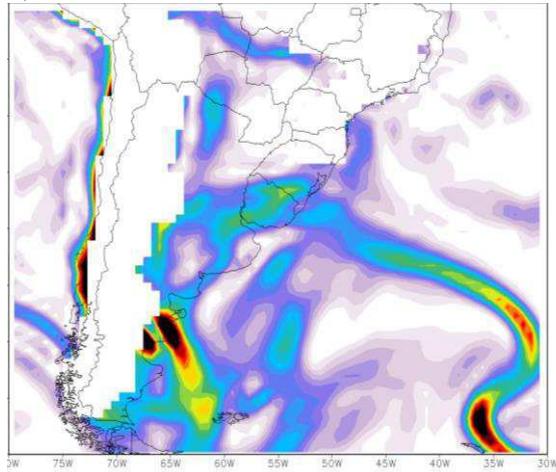


Figura 45 continuação: Umidade específica em g/Kg (cores) e escoamento de umidade (setas). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

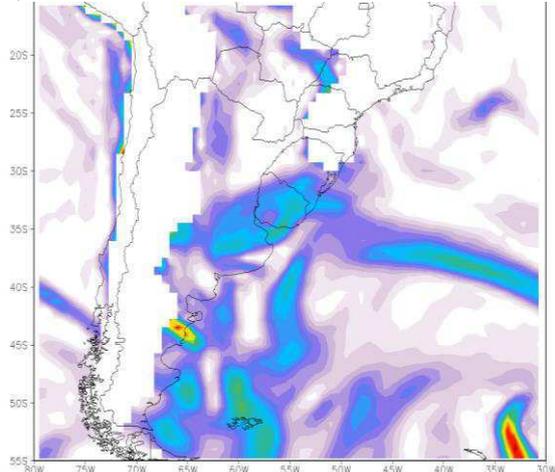
a) 23/01/2016 18Z



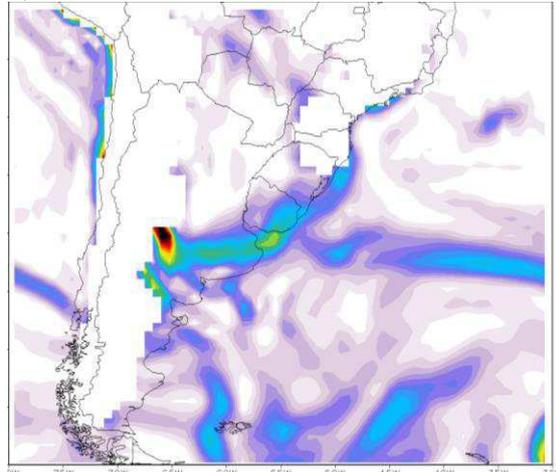
b) 24/01/2016 00Z



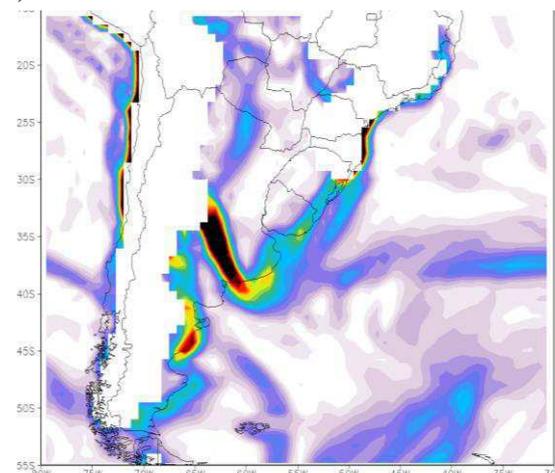
c) 24/01/2016 06Z



d) 24/01/2016 12Z



e) 24/01/2016 18Z



f) 25/01/2016 00Z

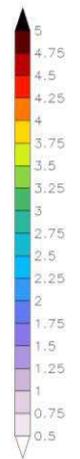
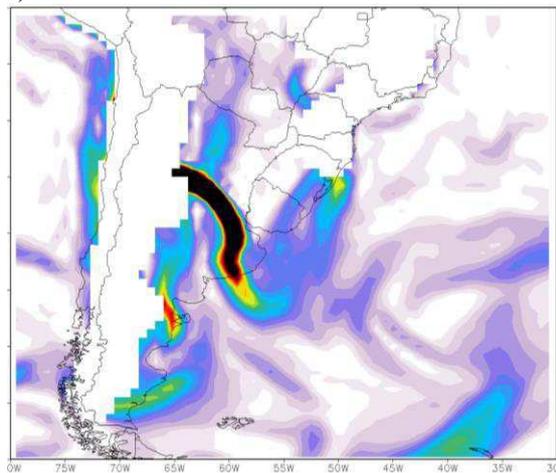
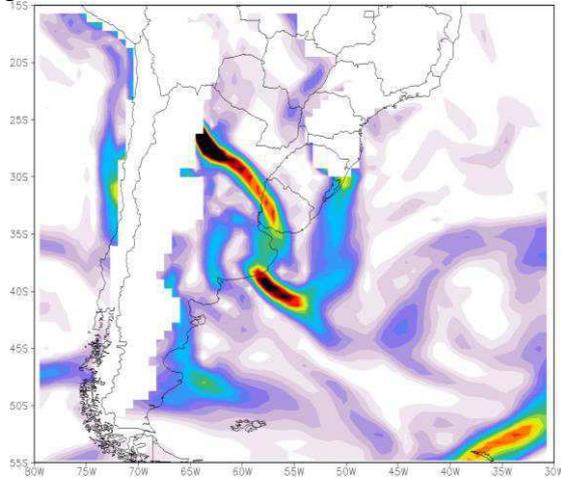
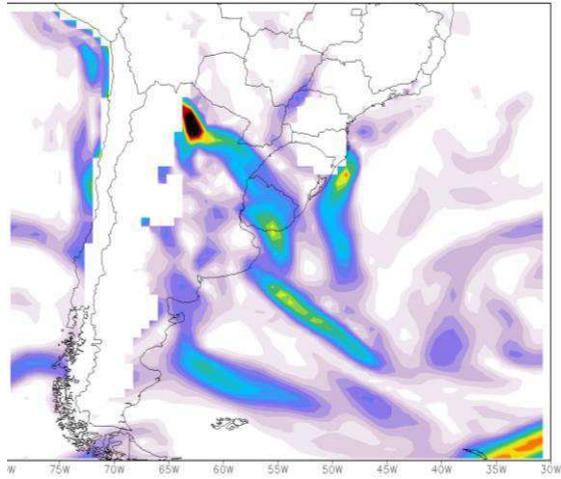


Figura 46: Magnitude do gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/100\text{Km}$). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

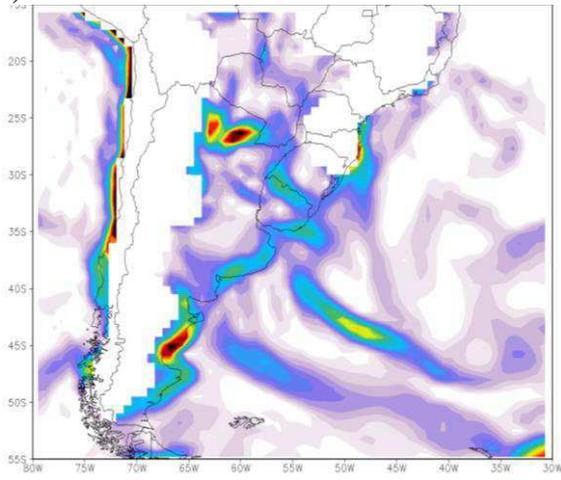
g) 25/01/2016 06Z



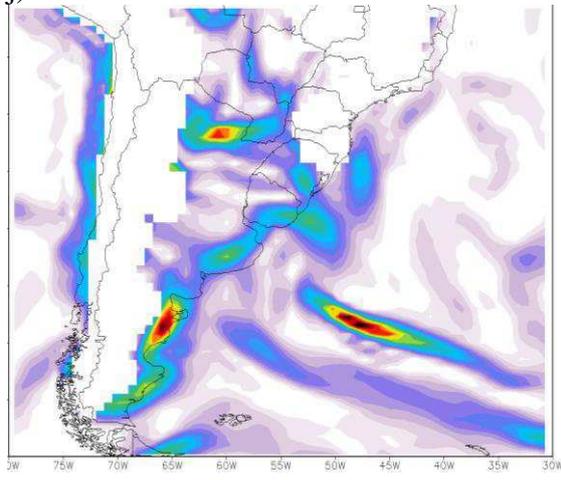
h) 25/01/2016 12Z



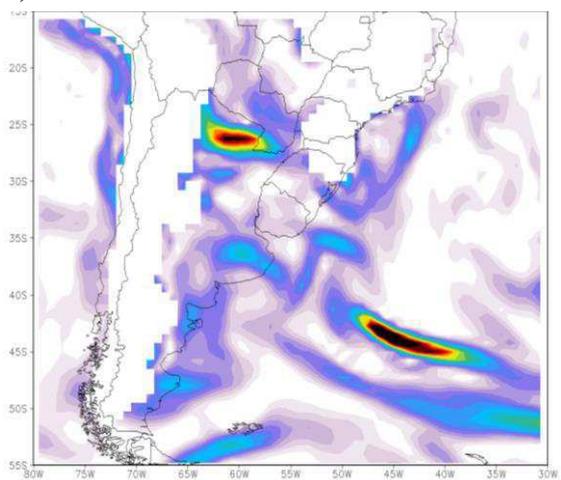
i) 25/01/2016 18Z



j) 26/01/2016 00Z



k) 26/01/2016 06Z



l) 26/01/2016 06Z

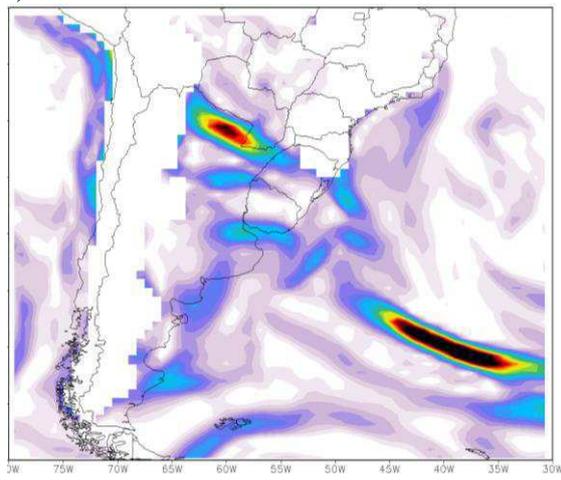
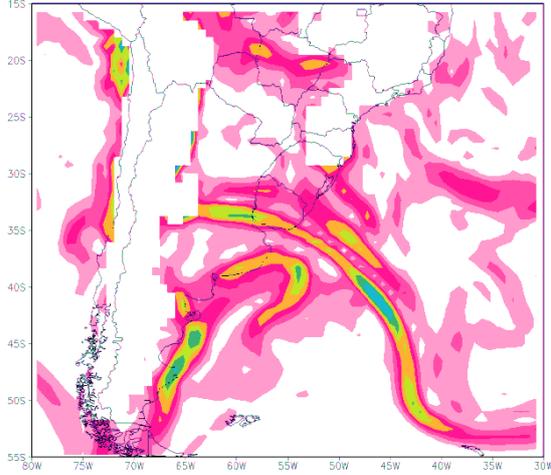
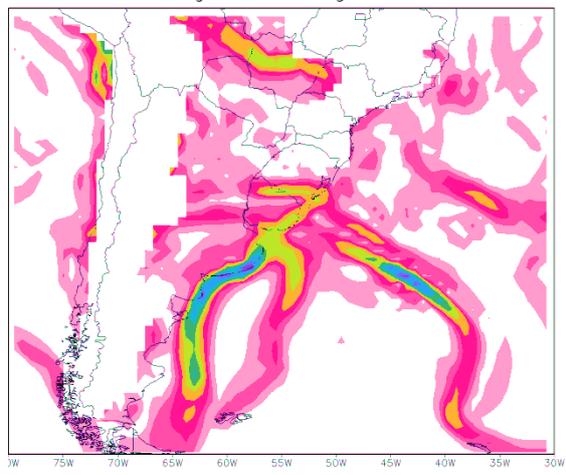


Figura 46 continuação: Magnitude do gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/100\text{Km}$). Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

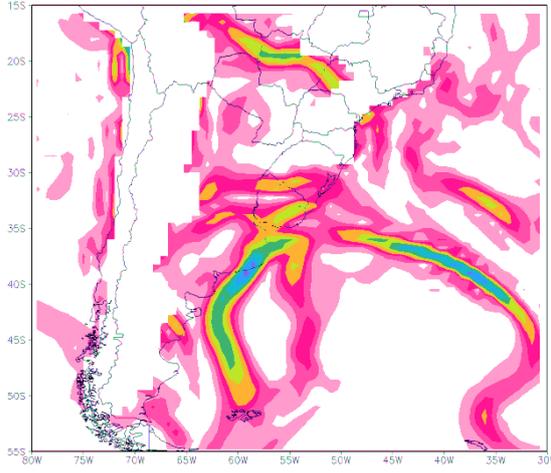
a) 23/01/2016 18Z



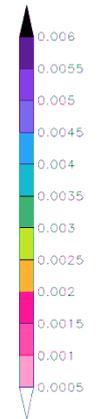
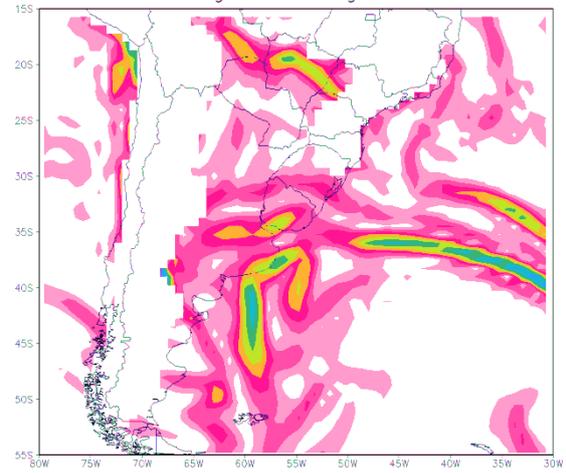
b) 24/01/2016 00Z



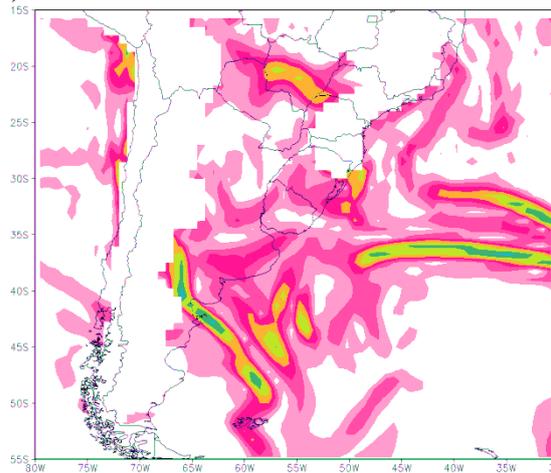
c) 24/01/2016 06Z



d) 24/01/2016 12Z



e) 24/01/2016 18Z



f) 25/01/2016 00Z

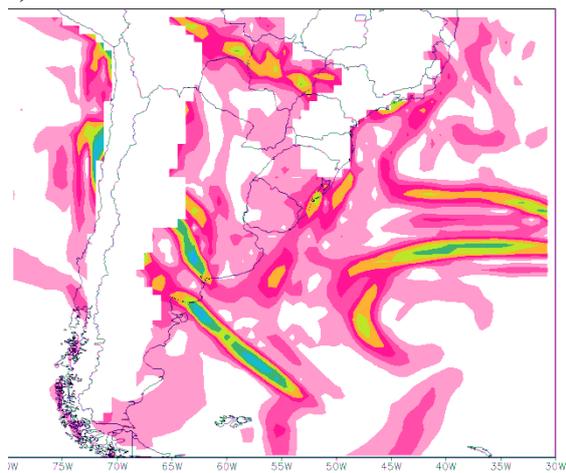
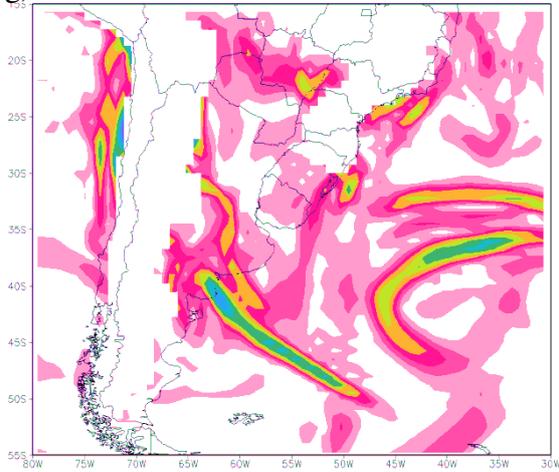
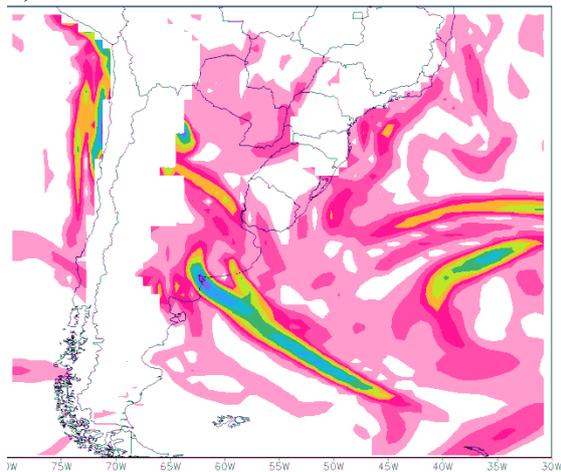


Figura 47: Magnitude do gradiente de umidade em $\text{g/Kg} \cdot 100\text{Km}$. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

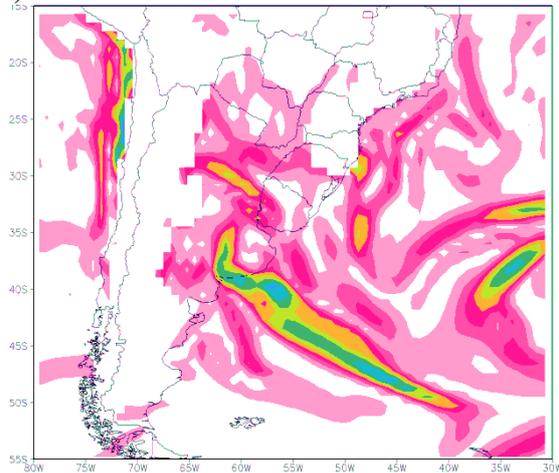
g) 25/01/2016 06Z



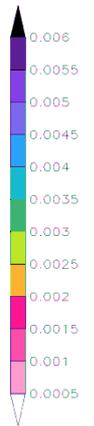
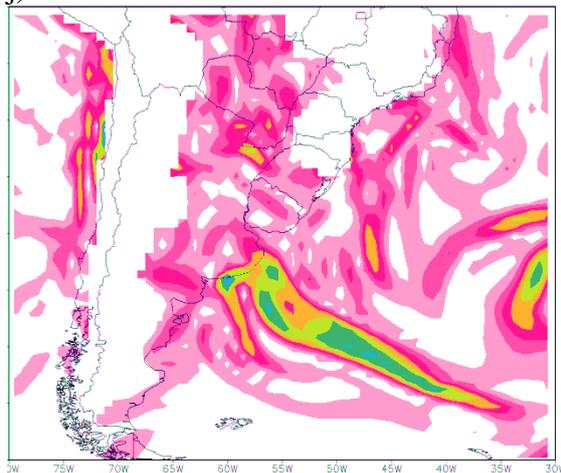
h) 25/01/2016 12Z



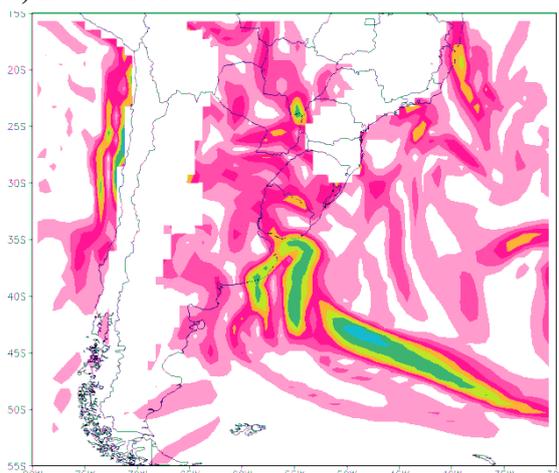
i) 25/01/2016 18Z



j) 26/01/2016 00Z



k) 26/01/2016 06Z



l) 26/01/2016 12Z

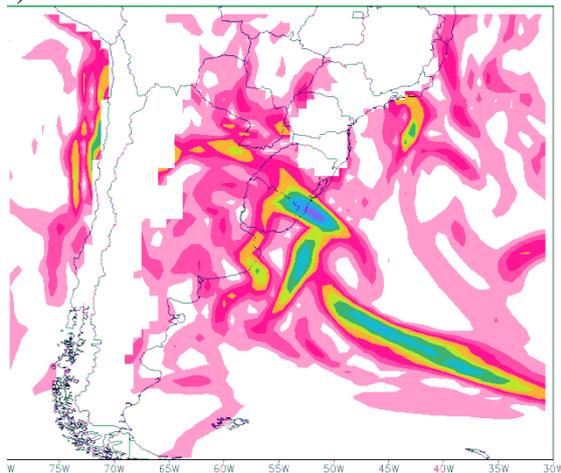
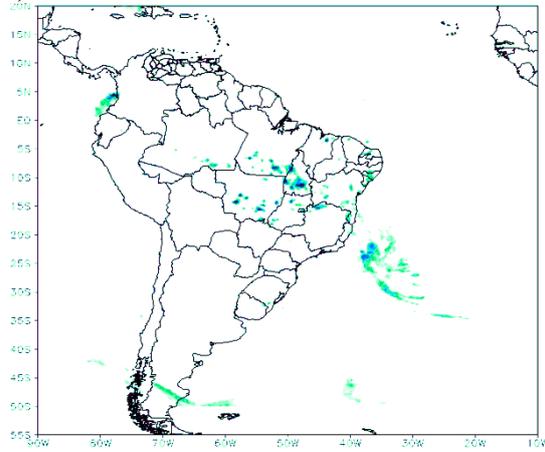
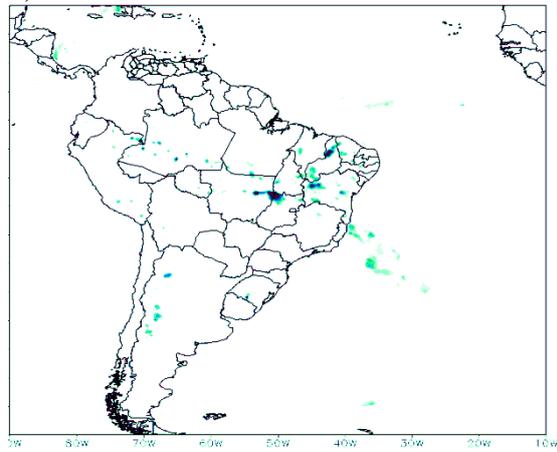


Figura 47 continuação: Magnitude do gradiente de umidade em $g/Kg*100Km$. Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

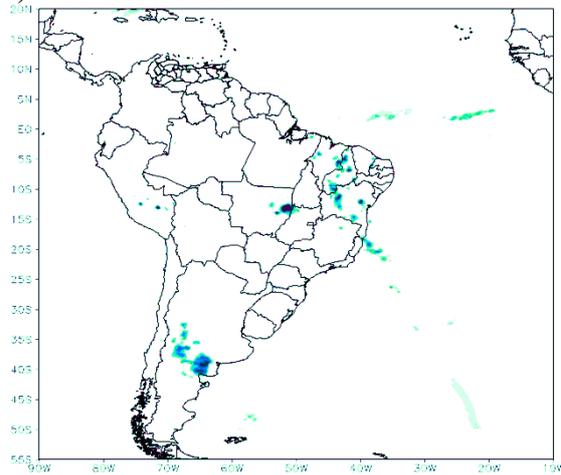
a) 23/01/2016 18Z



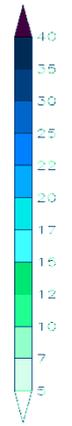
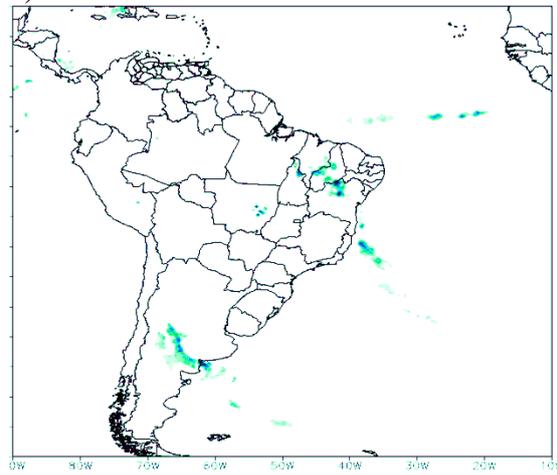
b) 24/01/2016 00Z



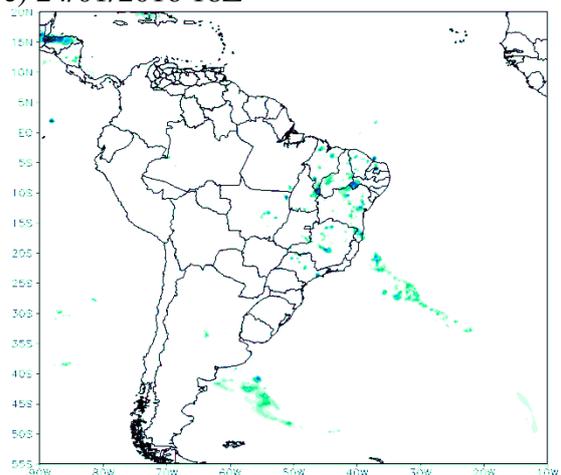
c) 24/01/2016 06Z



d) 24/01/2016 12Z



e) 24/01/2016 18Z



f) 25/01/2016 00Z

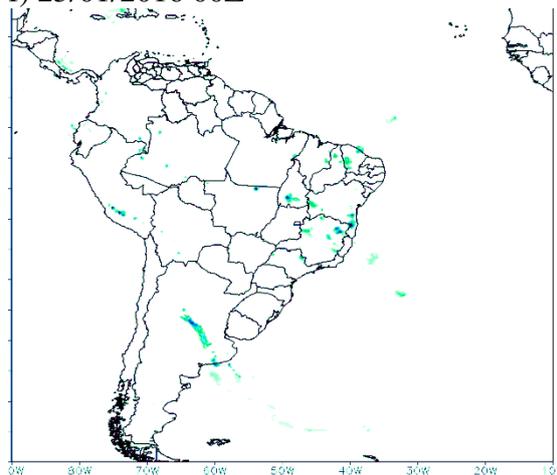
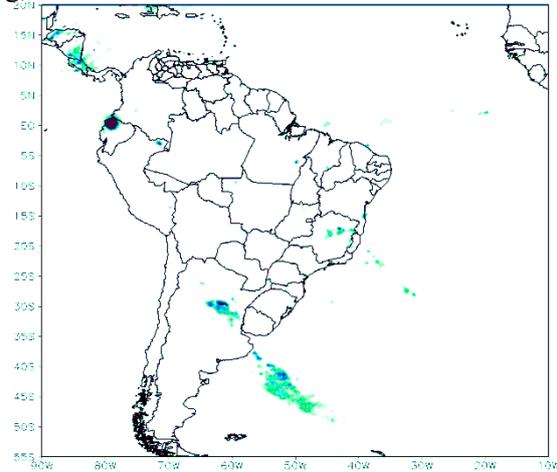
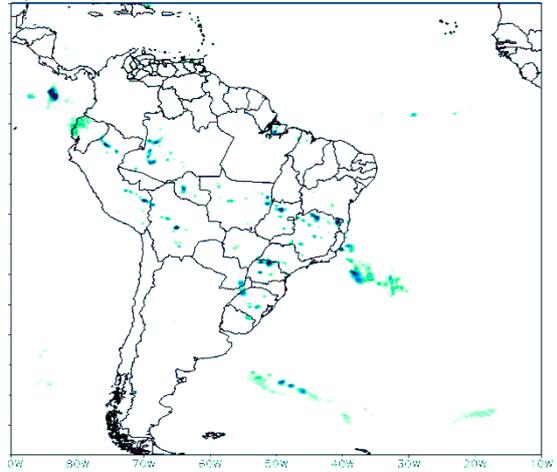


Figura 48: Precipitação acumulada em mm de 6 horas . Em 925 hPa. A cada 6 horas. Fonte: Autora

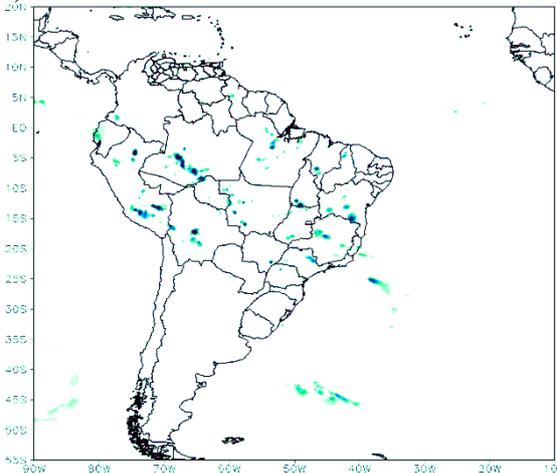
g) 25/01/2016 06Z



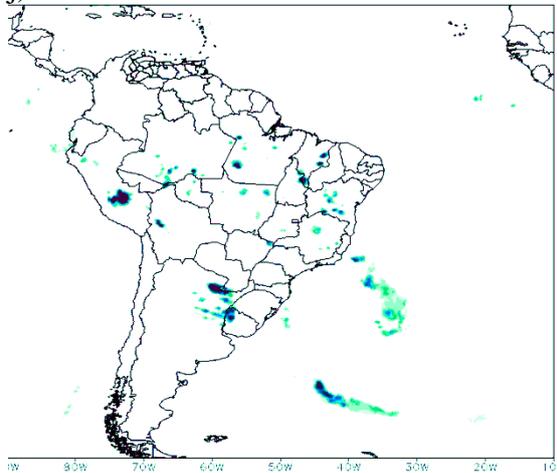
h) 25/01/2016 12Z



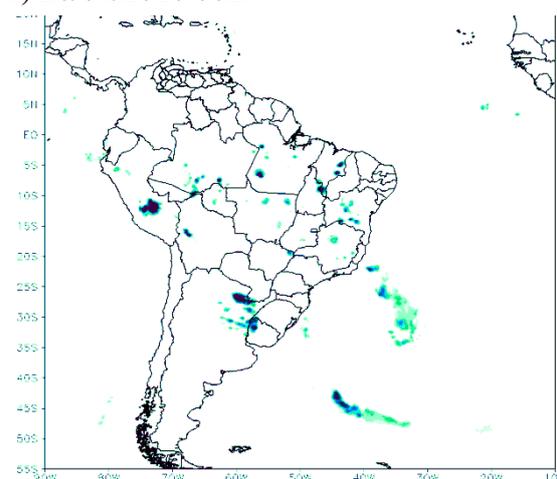
i) 25/01/2016 18Z



j) 26/01/2016 00Z



k) 26/01/2016 06Z



l) 26/01/2016 12Z

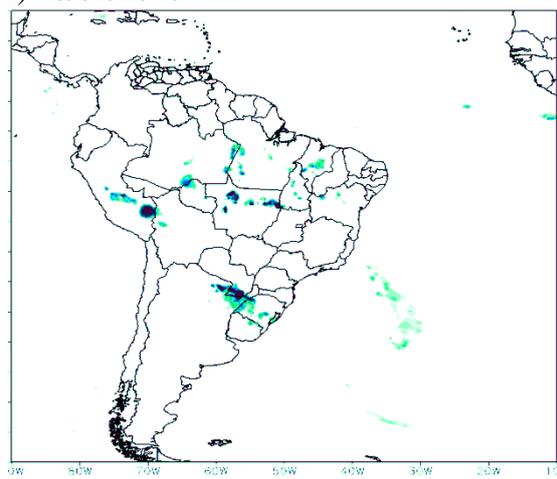
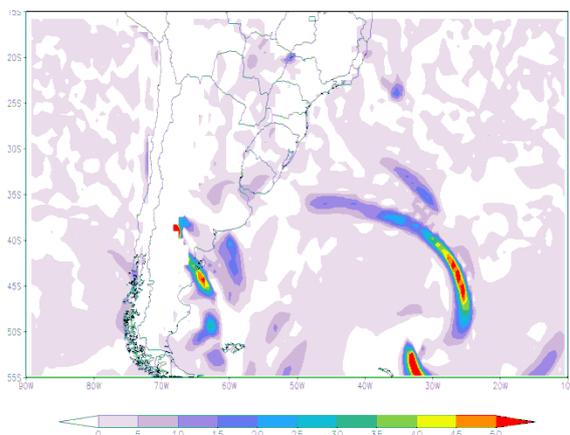


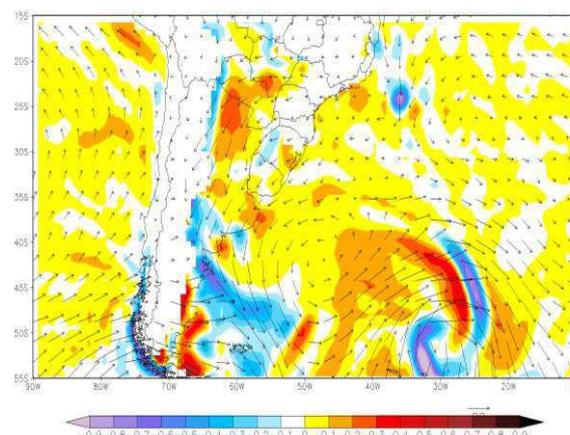
Figura 48 continuação: Precipitação acumulada em mm de 6 horas. Em 925 hPa. A cada 6 horas.

Fonte: Autora

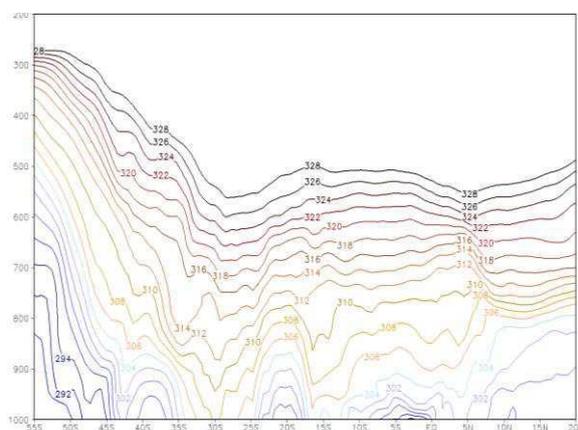
a) Frontogênese



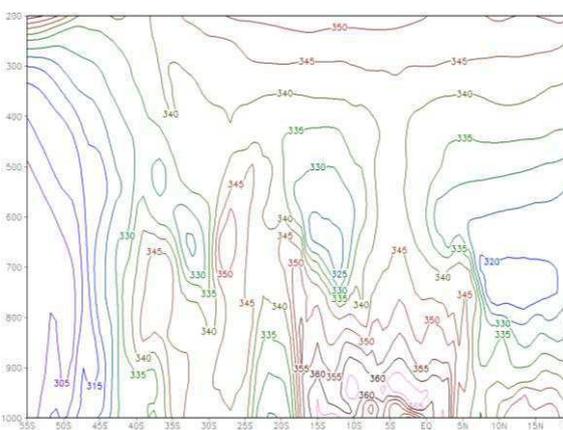
b) Convergência do vento em 950 hPa



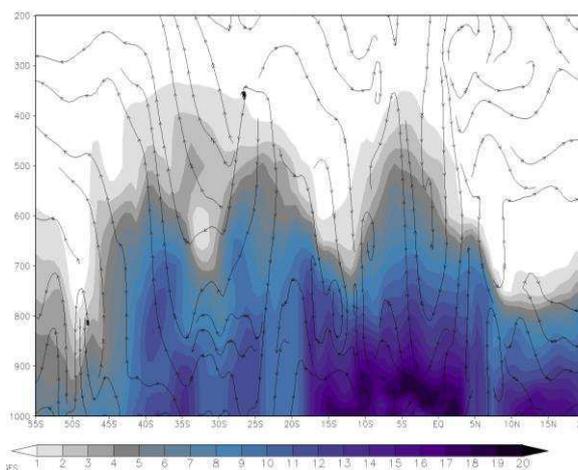
c) Perfil de θ em 62°O



d) Perfil de θ_e em 62°O



e) Perfil de umidade em 62°O



f) θ_e em 1000hPa menos θ_{es} para todos os níveis

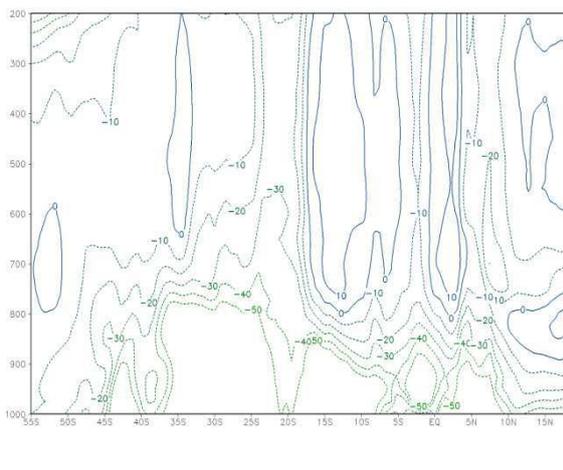


Figura 49: a) Frontogênese por deformação em temperatura potencial equivalente ($K/100km*dia$) b) convergência do vento (valores negativos) para 925hPa. c) Perfil de θ d) perfil de θ_e e) perfil de umidade específica e movimento do vento em m/s (setas). f) Perfil de CAPE e CINE, todos para a longitude de 65°O, e para 06Z do dia 24/01/2016. Fonte: autora.

6 – CONCLUSÕES

Cinco diferentes casos de distúrbios sinóticos no continente sul-americano foram considerados neste estudo.

O caso híbrido, apresenta uma banda de nebulosidade ocasionada por dois sistemas diferentes. Essa nebulosidade acaba que se dividindo em duas porções, uma subtropical e outra extratropical e são observadas condições atmosféricas diferentes entre elas. Uma das principais diferenças observadas, além do comportamento dos gradientes de temperatura e de umidade, foi a intensidade da inibição convectiva sendo mais forte até 900 hPa, com a presença de CAPE a partir desse nível, na poção subtropical e moderada em toda a troposfera na massa de ar extratropical. Mostrando que apenas chuva estratiforme é possível nos extratropicos, já nos subtrópicos existe a possibilidade de disparar chuva convectiva, isso se existir um mecanismo de forçamento para vencer a inibição convectiva de baixos níveis.

Nos dois casos de incursão desenvolvidos em janeiro de 2011, ambos causados pela passagem de uma alta transiente, apresentam um comportamento do módulo dos gradientes de temperatura e umidade expressivos à medida que a incursão avança para os subtrópicos. Na primeira incursão (7 a 10 de Janeiro de 2011) os módulos dos gradientes são máximos no início do período quando a incursão está por volta de 43°S, quando atinge a latitude de 31°S o módulo do gradiente de temperatura se desintensifica em 2°C/100Km diferentemente do gradiente de umidade que se intensifica em três vezes quando atinge 23°S quando o campo de magnitude do gradiente de temperatura quase não mostra perturbação. Na segunda incursão (19 a 21 de Janeiro de 2011) por mais que os módulos de gradientes não tenham sido tão fortes como os da primeira o comportamento de intensificação do gradiente de umidade e desintensificação do gradiente de temperatura à medida que a incursão avança é mantido. Foi observado também que as precipitações relacionadas às incursões ocorrem em faixas onde a inibição convectiva existe e o mecanismo que possibilita isso é a convergência que promove a ascensão do ar.

Os casos escolhidos a partir dos estudos de Rocha (2018), que relatou a existência de ciclo diurno fraco e forte da Baixa do Noroeste da Argentina, mostra que o Caso 1 – forte ciclo diurno (2 a 5 de Janeiro de 2015) não é uma incursão de ar frio, porem existe uma semelhança entre a magnitude do gradiente de temperatura no sul do continente desse caso com os casos de incursões, entretanto difere perante a inexistência da intensificação do gradiente de umidade. No caso 2 – fraco ciclo diurno (23 a 26 de Janeiro de 2016) que é uma incursão de ar frio apresenta o gradiente de temperatura bastante intenso no sexto horário

observado (00Z do dia 25) e respeita o comportamento já visto nos outros casos, a medida que a incursão avança para menores latitudes esse gradiente se desintensifica. O gradiente de temperatura, no entanto é reprimido pela condição de ressecamento pré-estabelecida no continente, então esse caso, diferentemente dos outros, não pode ser considerado uma frente em umidade. Foi observado também, nesses dois períodos de tempo analisado, que nas longitudes escolhidas para análise que interceptam a precipitação mostram que são formadas em áreas em que existe inibição convectiva que pode ser vencida pela convergência do vento, e do transporte de umidade, onde a sua existência foi relatada por Rocha (2018).

Em resumo foi possível verificar que os movimentos horizontais do ar em escala sinótica alteram a distribuição da instabilidade na mesoescala e na escala subsinótica. Nos subtropicais e extratropicais esta alteração se dá principalmente pela advecção da massa de ar tropical úmida para sul, mas também pela convergência de transporte de umidade integrado na vertical. Comportamentos contrastantes foram observados entre as magnitudes da temperatura horizontal e os gradientes de umidade. Enquanto o gradiente de temperatura enfraquece o gradiente de umidade se intensifica a medida que atingem os subtropicais. Os casos de incursão de ar frio considerados neste estudo então podem ser classificados em frentes em umidade quando atingem latitudes subtropicais. Além disso, são frentes em CAPE. Do lado subtropical da frente em CAPE há valores altos de inibição convectiva nos baixos níveis. A chuva ocorre onde a convergência, promovida pelo encontro das massas tropical e extratropical fornece o mecanismo de levantamento de ar para vencer a inibição convectiva.

Uma hipótese a ser usada para pesquisas futuras é a divisão das massas de ar que agem na América do Sul podendo ter três categorias: Tropical, com a presença de CAPE e fraca inibição convectiva; Subtropical, com a presença de CAPE e inibição convectiva alta nos baixos níveis; e Extratropical com ausência de CAPE, inibição convectiva moderada em toda a camada, a não ser quando existe CAPE produzida pela convergência de vento.

Como sugestão para futuras investigações, tem-se:

- Analisar uma série temporal de frentes e incursões (de diferentes tipos e localidades) – entre 20 e 25 anos – para ampliação dos resultados já obtidos.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRAUT, J. M. Frentes e Frontogêneses no Verão: **Aspectos Geométricos, Dinâmicos e Impactos sobre as Chuvas nos Subtrópicos da América do Sul**. Tese de Doutorado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 179 pp., 2008.
- ARRAUT, J. M.; BARBOSA, H. M. J. Large scale features associated with strong frontogenesis in equivalent potential temperature in the South American subtropics east of the Andes. **Advances in Geosciences**, v. 22, p. 73-78, 13 outubro 2009.
- ARRAUT, J. M.; SATYAMURTY, P.; ARRAUT, J. L. **The Argentinean Col, Separatrices, Frontogenesis and Rainfall in the South American Summer**. In Prep. *Monthly Weather Review*, 2017.
- BLUESTEIN, H. B. **Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes**. New York: Oxford University Press, 1992.
- BLUESTEIS, H. B. **Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes**. . New York: Oxford University Press, 1993.
- BOLTON, D. **The Computation of Equivalent Potential Temperature**. *Monthly Weather Review*, v. 108, p. 1046-1053, Julho 1980.
- CARVALHO, L. M. V., JONES, C., LIEBMANN, B. Extreme Precipitation Events in Southeaster South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 15, p. 2377-2394, 2002.
- CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Frentes Frias no Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. D. A.; FERREIRA, N. J.; da SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 9, 463 pp. 2009.
- FIGUEROA, S.; SATYAMURTY, P.; SILVA DIAS, P. L. Simulations of the summer circulation over the South American region with an Eta coordinate. **J. Atmos. Sci.**, n. 52, p. 1573–1584, 1995.
- FORTUNE, M. A.; KOUSKY, V. Two Severe Freezes in Brazil: Precursors and Synoptic Evolution. **Monthly Weather Review**, v. 111, p.181 – 196. 1983.
- GARREAUD, R. D. Cold Air Incursions over Subtropical South America: Mean Structure and Dynamics. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 2544-2559, julho 2000.
- GARREAUD, R. D.; WALLACE, J. M. Summertime Incursions of Midlatitude Air into Subtropical and Tropical. **Monthly Weather Review**, v. 126, p. 2713-2733, outubro 1998.
- HOLTON, J. R. **An Introduction to Dynamical Meteorology**. 3ª. ed. [S.l.]: Academic Press, 1992, 511 pp.

KODAMA, Y.-M. Large-scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ), Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 70, p. 813–835, 1992.

KODAMA, Y.-M. Roles of the Atmospheric Heat Sources in Maintaining the Subtropical Convergence Zones: an Aqua-Planet GCM Study. **Journal of The Atmospheric Sciences**, v. 56, p. 4032 – 4049. Dez 1999.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, p.1142–1153, 1979.

LUPO, A. R.; NOCERA, J.J.; BOSART, L. F.; HOFFMAN, E. G.; KNIGHT, D. J. South American Cold Surges: Types, Composites, and Case Studies. **Monthly Weather Review**. American Meteorological Society. p.1021 – 1041. 2001.

MARENGO, J.; CORNEJO, A.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C.; SEA, W. Cold Surges in Tropical and Extratropical South America: The Strong Event in June 1994. **Monthly Weather Review**, v. 125, p. 2759-2786, novembro 1997.

MATTOS, L. F. **Frontogênese na América do Sul e precursores de friagem no estado de São Paulo**. 2003. 213 p. Tese Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003.

MYRES, V. A. A Cold front invasion of Southern Venezuela. *Mom. Wea. Ver.*, 92, 513 – 521. In. FORTUNE, M. A.; KOUSKY, V. Two Severe Freezes in Brazil: Precursors and Synoptic Evolution. **Monthly Weather Review**, v. 111, p.181 – 196. 1964.

NINOMIYA, B. K. Characteristics of Baiu Front as a Predominant Subtropical Front in the Summer Northern Hemisphere. **Journal of Meteorological Society of Japan** , v. 62, p. 880-893, Dezembro 1984.

NOBRE, C. **Ainda sobre a Zona de Convergência do Atlântico Sul: a importância do Oceano Atlântico**. *Climanálise*, v. 3, n. 4, p. 30-35, abr. 1988.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia**. Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos, 1986.

PARMENTER, F. C. A southern hemisphere cold front passage at the equator. **Bulletin of the American Met. Soc.**, v. 57, n. 12, p. 1435–1440, 1976.

PETTERSEN, S. Weather analysis and forecasting. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 1956. In SATYAMURTY, P.; MATTOS, L. F. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 1355, 1989.

ROCHA, M R. A Baixa do Noroeste Argentino e a Sela da Argentina: interação com o transporte de umidade e com sistemas convectivos. Campina Grande, 2018.

QUADRO, L. F. M.: **Estudo de Episódios de ZCAS sobre a América do Sul**. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, 1-90, 1993.

SATYAMURTY, P. **Rudimentos de Meteorologia Dinâmica**. São José dos Campos. Agosto, 2004

SATYAMURTY, P.; MATTOS, L. F. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 1355, 1989.

SATYAMURTY, P.; RAO, V. B. **Zona de convergência do Atlântico Sul**. *Climanálise*, 3 (3) : 31-35-, Março 1988.

SELUCHI, M. E.; BEU, C; ANDRADE, K. E. Características das Frentes Frias Causadoras de Chuvas Intensas no Leste de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, 25-37, 2017

SELUCHI, M. E.; GARREAUD, R. D. Campos médios e processos físicos associados ao ciclo de vida da Baixa do Chaco. **Revista Brasileira Meteorologia** vol.27 no.4 São Paulo Dec. 2012

SELUCHI, M. E.; NORTE, F. A.; SATYAMURTY, P.; CHOU, S. C. Analysis of Three Situations of the Foehn Effect over the Andes (Zonda Wind) Using the Eta–CPTEC Regional Model. **Weather and Forecasting**, v. 18, p. 481-501, junho 2003a.

SILVA DIAS, P. L., CAPLAN, P., KOUKY, V. E: **As chuvas intensas de fevereiro de 1988: Circulação global e previsibilidade**. In: Anais do V Congresso Brasileiro de Meteorologia, V.2,p.IX, 6-10, 1988.

SILVA DIAS, P. L., ETCHICHURY, P., SCOBAR, J., PEREIRA FILHO, A. J., SATYAMURTI, P., SILVA DIAS, M. A. F., GRAMMELSABACHER, I.: **As chuvas de março de 1991 na região de São Paulo**. IN: *Climanálise*, V.6, 5,44-59. 1991

SILVA DIAS, P. L.; KASAHARA, A. **Teleconnections and interactions among vertical modes. International conference on Geophysics fluid Dynamics with Special Emphasis on El Niño, 1**. INPE. São José dos Campos, 13 – 17, julho, 1987. In In. QUADRO, L. F. M.: **Estudo de Episódios de ZCAS sobre a América do Sul**. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, p.1-90, 1993.

STRETEN, N. A. **Some characteristics of the satelliteobserved bands of persistent cloudiness over the Southern Hemisphere**. *Monthly Weather Review*, v. 101, n. 6, p. 486-495, 1973. In. QUADRO, L. F. M.: **Estudo de Episódios de ZCAS sobre a América do Sul**. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, p.1-90, 1993.

TALJAARD, J. J. Topics: synoptic meteorology of the Southern Hemisphere. **Meteor. Monographs**, v. 13, n. 35, p. 129-213, 1972.

VIANELLO, R. L; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, UFV, 448p. 1991.