

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto



Tese de Doutorado

Estudo de Ciclogêneses Explosivas no Atlântico Sul

Vilson Dias de Avila

Porto Alegre-RS

2018

VILSON DIAS DE AVILA

ESTUDO DE CICLOGÊNESES EXPLOSIVAS NO ATLÂNTICO SUL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto e Meteorologia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul como um dos requisitos para obtenção do grau de doutor em Sensoriamento Remoto, na área de concentração em Ciências Atmosféricas.

Orientadora: Prof. Dra. Rita de Cássia Marques Alves

Co-orientador: Prof. Dr. André Becker Nunes

PORTO ALEGRE-RS

2018

Aos nossos pais, a quem devemos tudo!

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela iluminação, proteção e amparo em todos os momentos, e pelas aspirações e inspirações;

Aos meus pais (in memoriam);

À Prof^a. Rita de Cássia Marques Alves pela orientação, pelo constante apoio nas horas difíceis, pelo fomento a busca e difusão do conhecimento através da participação em todos os eventos relacionados, pelo valor que conseguiu agregar ao PPGSR, ao CEPSRM e a UFRGS com sua labuta, seu prestígio, e o que isto significa em termos de oportunidade para pesquisadores e pós-graduandos, e pela preciosa amizade em todos os momentos;

Ao Prof. André Becker Nunes pela orientação, dedicação, paciência, apoio e preciosa amizade;

Ao PPGSR, ao CEPSRM e a UFRGS, pelos recursos e pelas estruturas oferecidas;

Aos colegas e amigos: Bruno, Caaren, Ludmila, Ricardo, Ana Paula e Paola, que participaram comigo desta jornada, pelo apoio, pelo carinho, pela sólida amizade, e pelos momentos lindos que compartilhamos e levaremos em nossos corações para toda a vida;

Aos professores do PPGSR pelas suas contribuições;

A Gabriel Münchow e à Eliana Klering, pela constante presença, pelas importantes contribuições que deram a todos nós, sempre prontos a ajudar generosa e desprendidamente com muita competência, e sobretudo pela amizade incondicional;

Ao Prof. Mateus da Silva Teixeira pelo tempo e esforço despendidos com boa vontade para me ajudar com a parte computacional da energética e programas de rastreamento automático;

Ao Prof. Glauber Mariano pela ajuda e incentivo;

Aos colegas da UFPEL pelo estímulo e auxílio para a busca de especialização em nível de doutorado;

À UFPEL pelo afastamento concedido para a realização do doutoramento;

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para que eu pudesse chegar até aqui.

RESUMO

AVILA, Vilson Dias. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, agosto de 2018. **Estudo de Ciclogêneses Explosivas no Atlântico Sul**. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rita de Cássia Marques Alves. Co-orientador: Prof. Dr. André Becker Nunes

O objetivo deste trabalho foi estudar casos de ciclogênese explosiva no sul do oceano Atlântico, tendo em conta que estes fenômenos são potencialmente perigosos por causa dos ventos fortes, precipitação intensa e redução da visibilidade decorrentes do aumento muito rápido do gradiente horizontal de pressão. Espera-se que os resultados deste trabalho, proporcionando um incremento dos conhecimentos sobre estes fenômenos, venham contribuir para a previsão dos mesmos. Para tal, foram utilizados os dados de reanálise do MERRA-2, bem como imagens do satélite GOES-13, no Canal 3 do Vapor d'água. Foram detectados os casos de ocorrência de ciclogêneses explosivas, ou seja, aqueles casos em que ocorreu uma taxa de aprofundamento da pressão central de pelo menos um Bergeron (queda de 1hPa/h durante 24 horas), para o período compreendido entre os anos de 2012 e 2016, e classificados segundo a intensidade pelo critério de Sanders. Foi detectado um número bem maior de ciclones comparado com outras literaturas, provavelmente por causa da melhor qualidade dos dados de reanálises de alta resolução e pela inspeção direta destes dados, mas com resultados semelhantes no que se refere a detecção de mais casos no inverno e média de apenas dois casos fortes por ano. Foram selecionados casos de inverno e de verão segundo a intensidade para comparação, bem como um ocorrido na primavera que apresentou características muito especiais de ciclone subtropical. Foi verificado que em todos os casos ocorre anomalia da tropopausa dinâmica com intrusão de ar seco com altos valores de vorticidade potencial da estratosfera na região de formação do ciclone. Foi observado também, que a ciclogênese tende a ocorrer quando ocorre confluência, seguida de difluência, dos jatos polar e subtropical sobre o sul da América do Sul ou do oceano Atlântico, com a geração de um jet streak (máximo de velocidade do vento na corrente de jato) na região onde os jatos confluem e o ciclone em superfície formando-se na saída deste jet streak, já na direita desta saída, ou tendendo para a direita na sequência, ou seja, para o lado polar do jato, o qual tem circulação ciclônica. A intensidade da ciclogênese está associada com a perturbação dos jatos traduzida como forte ondulação, de origem baroclínica, e envolvendo uma interação do escoamento anticiclônico em altos níveis no lado equatorial do jato subtropical, com o escoamento ciclônico em altos níveis no lado polar do jato polar, tendo como resultado desta interação a confluência destes jatos sobre o sul da América do Sul, com energia potencial e cinética sendo tomada de um dos jatos pelo outro ao difluir. Além disso, observa-se que o escoamento de ar quente e úmido proveniente da Amazônia contribui para os desenvolvimentos explosivos. A totalidade dos casos estudados neste trabalho indicaram que os ciclones explosivos desenvolvem-se segundo o modelo conceitual de Shapiro e Keyser (1990).

Palavras-chave: ciclone bomba, tropopausa dinâmica, vorticidade potencial

ABSTRACT

AVILA, Vilson Dias. Federal University of Rio Grande do Sul, august, 2018. **Explosive Cyclogenesis over South Atlantic Study**. Supervisor: Prof. DSc. Rita de Cássia Marques Alves. Joint supervisor: Prof. DSc. André Becker Nunes

The objective of this work was to study explosive cyclogenesis cases in the south of Atlantic Ocean taking into account that these phenomena are potentially dangerous due to the strong winds, intense precipitation and reduced visibility caused by the very fast increase of the horizontal pressure gradient. It is expected that the results of this work providing an increment of the knowledge about this phenomena contribute to their forecasting. Reanalysis data from MERRA-2, as well as GOES-13 imagery of the channel 3 watervapour were used in this work. Explosive cyclogenesis cases were detected when a surface pressure deepening rate of at least one Bergeron (drop of 1 hPa/h during 24 hours) was reached for the period of 2012 to 2016 years. Then the cases were classified by Sanders intensity criterion. The number of detected cases were higher compared to other literature probably by the superior quality of the high resolution reanalysis data and direct inspection of these data. Otherwise the results were similar referring to the detection of more cases in the winter and an average of only two strong cases by year. Cases of winter and summer with different intensities were selected for comparison, as well as a spring case that presented special features of subtropical cyclone. It was found that in all cases occurs in the region where the cyclone develops a dynamic tropopause anomaly with intrusion of ozone rich stratospheric air with high values of potential vorticity. It was also observed that the cyclogenesis tend to take place when occurs diffluence followed by diffluence of the polar and subtropical jet streams over the south region of South America or Atlantic Ocean with the generation of a jet streak in the confluence region and the surface cyclone developing in the exit region of that jet streak in the right side since the beginning or in the sequence, that is to the polar side of the polar jet stream where the circulation is cyclonic. The cyclogenesis intensity was associated with the baroclinic originated jet streams perturbation in the form of enhanced undulation and comprehends an interaction of the high level anticyclonic flow in the equatorial side of the subtropical jet stream with the high level cyclonic circulation in the polar side of the polar jet stream resulting in confluence of the jet streams over the south region of South America with one of the jet streams taking potential and kinetic energy from the other in the diffluence region. In addition it was observed that the hot and humid air flow from Amazon forest contributes to the explosive development of the cyclones. All the cases studied in this work indicated that the explosive cyclones develop following the Shapiro and Keyser (1990) conceptual model.

Key-words: Bomb cyclone, dynamic tropopause, potential vorticity

SUMÁRIO

Lista de Figuras	7
1. Introdução.....	17
2. Revisão Bibliográfica.....	19
2.1 Ciclogênese.....	19
2.3 Ciclogênese Explosiva.....	22
2.4 Tropopausa Dinâmica (TD).....	23
2.5 Imagens de Satélite no canal do vapor d'água	25
2.6 Fluxos de Calor.....	26
2.7 Energética	27
2.8 Ciclogênese Explosiva na América do Sul.....	28
3. Material e Métodos.....	30
4. Resultados	32
4.1 Caso 03/01/2014 – Verão - Forte	39
4.2 Caso 12/02/2014 - Verão - Moderado	55
4.3 Caso de 15/01/2014 – Verão - Fraco	69
4.4 Caso 01/07/2012 – Inverno - Fraco (em alta latitude).....	83
4.5 Caso de 10/07/2012 - Inverno - Fraco (em latitude mais baixa)	97
4.6 Caso 13/07/2012 00Z – Inverno - Moderado	111
4.7 Caso 30/07/2012 06Z – Inverno - Forte	127
4.8 Caso de 01/10/2014 – Primavera - Forte	141
4.9 Síntese.....	155
5. Conclusões	156
6. Referências Bibliográficas	158
Apêndice A.....	164

Lista de Figuras

Figura 1 - Distribuição anual das isolinhas de frequência de ciclogêneses (Fonte: Gan e Rao, 1991)	21
Figura 2 - Densidade de ciclogêneses no verão. (Fonte: Reboita, 2010).	22
Figura 3 – Imagem do Satélite GOES 13, no canal 3, correspondente ao vapor d'água, do dia 03/01/2014, às 00 Z.	25
Figura 4 - (a) Número (linhas) e frequência (barras) mensal de Ciclones Explosivos identificados através dos métodos TNA_c e TNA_r . A escala no eixo vertical do gráfico é adimensional para a representatividade do número mensal de Ciclones Explosivos e em % para a representatividade da frequência mensal. (b) Frequência em % de ocorrência por faixa de valores de TNA_r . (Fonte: Bittencourt et al., 2013).....	29
Figura 5 – Gráficos mostrando a distribuição dos casos de ciclogênese segundo a intensidade para o período 2012-2016.	38
Figura 6 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em cores). a) 03/01/2014 00Z, b) 03/01/2014 06Z, c) 03/01/2014 12Z, d) 03/01/2014 18Z, e) 04/01/2014 00Z, f) PNMM 04/01/2014 00Z e trajetória.....	40
Figura 7 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU. a) 40°S, 03/01/2014 00z; b) 42°S, 03/01/2014 06Z; c) 45°S, 03/01/2014 12Z; d) 48°S, 03/01/2014 18Z, e) 50°S, 04/01/2014 00Z.....	41
Figura 8 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 03/01/2014 06Z, (c) 03/01/2014 12Z, (e) 03/01/2014 18Z, (g) 04/01/2014 00Z, e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 03/01/2014 06Z, (d) 03/01/2014 12Z, (f) 03/01/2014 18Z, (h) 04/01/2014 00Z.	43
Figura 9 – Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores. a) 03/01/2014 00Z, b) 03/01/2014 06Z, c) 03/01/2014 12Z, d) 03/01/2014 18Z, e) 04/01/2014 00Z.	44
Figura 10 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 03/01/2014 00Z, b) 03/01/2014 06Z, c) 03/01/2014 12Z, d) 03/01/2014 18Z, e) 04/01/2014 00Z.	45
Figura 11 - Secções verticais de EPV menor ou igual a -1,5 PVU (contornos) e tendência do Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 40°S, 03/01/2014 00z; b) 42°S, 03/01/2014 06Z; c) 45°S, 03/01/2014 12Z; d) 48°S, 03/01/2014 18Z, e) 50°S, 04/01/2014 00Z.....	46
Figura 12 - Secção vertical, EPV maior ou igual, em módulo, a 1,5 PVU (contornos) e Velocidade Vertical Ômega (cores). a) 40°S, 03/01/2014 00z; b) 42°S, 03/01/2014 06Z; c) 45°S, 03/01/2014 12Z; d) 48°S, 03/01/2014 18Z, e) 50°S, 04/01/2014 00Z.	47
Figura 13 - Secção vertical, EPV maior ou igual, em módulo, a 1,5 PVU (contornos) e Umidade relativa (cores): a) 40°S, 03/01/2014 00z; b) 42°S, 03/01/2014 06Z; c) 45°S, 03/01/2014 12Z; d) 48°S, 03/01/2014 18Z, e) 50°S, 04/01/2014 00Z.	48
Figura 14 - Campo de PNMM (contorno) e fluxo de calor latente em W m^{-2} (sombreado). (a) 03/01/2014 00Z, (b) 03/01/2014 06Z, (c) 03/01/2014 12Z, (d) 03/01/2014 18Z, (e) 04/01/2014 00Z.	50
Figura 15 - Campo de PNMM (contorno) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta em W m^{-2} (sombreado em cores). (a) 03/01/2014 00Z, (b) 03/01/2014 06Z, (c) 03/01/2014 12Z, (d) 03/01/2014 18Z, (e) 04/01/2014 00Z.	51

Figura 16 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 03/01/2014 00Z, b) 03/01/2014 06Z, c) 03/01/2014 12Z, d) 03/01/2014 18Z, e) 04/01/2014 00Z, f) 04/01/2014 12Z .	52
Figura 17 – Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 03/01/2014 00Z, b) 03/01/2014 06Z, c) 03/01/2014 12Z, d) 03/01/2014 18Z, e) 04/01/2014 00Z, f) 04/01/2014 12Z .	53
Figura 18 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 03/01/2014 00Z, b) 03/01/2014 06Z, c) 03/01/2014 12Z, d) 03/01/2014 18Z, e) 04/01/2014 00Z, f) 04/01/2014 12Z .	54
Figura 19 - Pressão ao nível médio do mar (contornos coloridos) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em preto). a) 12/02/2014 12Z, b) 12/02/2014 18Z, c) 13/02/2014 00Z, d) 13/02/2014 06Z, e) 13/02/2014 12Z, f) PNMM 13/02/2014 12Z e trajetória.	56
Figura 20 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU: a) 50°S, 12/02/2014 12z; b) 50°S, 12/02/2014 18Z; c) 51°S, 13/02/2014 00Z; d) 52°S, 13/02/2014 06Z, e) 53°S, 13/02/2014 12Z.	57
Figura 21 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 12/02/2014 18Z, (c) 13/02/2014 00Z, (e) 13/02/2014 06Z, (g) 13/02/2014 12Z, e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} m^2 s^{-1} K kg^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 12/02/2014 18Z, (d) 13/02/2014 00Z, (f) 13/02/2014 06Z, (h) 13/02/2014 12Z.	58
Figura 22 – Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 12/02/2014 12Z, b) 12/02/2014 18Z, c) 13/02/2014 00Z, d) 13/02/2014 06Z, e) 13/02/2014 12Z.	59
Figura 23 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 12/02/2014 12Z, b) 12/02/2014 18Z, c) 13/02/2014 00Z, d) 13/02/2014 06Z, e) 13/02/2014 12Z.	60
Figura 24 - Secções verticais de EPV menor ou igual a -1,5 PVU (contornos) e tendência do Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado. a) 50°S, 12/02/2014 12z; b) 50°S, 12/02/2014 18Z; c) 51°S, 13/02/2014 00Z; d) 52°S, 13/02/2014 06Z, e) 53°S, 13/02/2014 12Z.	61
Figura 25 - Secção vertical, EPV maior ou igual, em módulo, a 1,5 PVU (contornos) e Velocidade Vertical Omega (cores), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado. a) 50°S, 12/02/2014 12z; b) 50°S, 12/02/2014 18Z; c) 51°S, 13/02/2014 00Z; d) 52°S, 13/02/2014 06Z, e) 53°S, 13/02/2014 12Z.	62
Figura 26 - Secção vertical, EPV maior ou igual, em módulo, a 1,5 PVU (contornos) e Umidade relativa (cores) nas latitudes em que o ciclone esteve localizado. a) 50°S, 12/02/2014 12z; b) 50°S, 12/02/2014 18Z; c) 51°S, 13/02/2014 00Z; d) 52°S, 13/02/2014 06Z, e) 53°S, 13/02/2014 12Z.	63
Figura 27 - Campo de PNMM (contorno) e fluxo de calor latente em $W m^{-2}$ (sombreado). Dia 12/02/2014: a)12Z, b)18Z, e dia 13/02/2014: c)00Z, d)06Z, e)12Z.	64
Figura 28 - Campo de PNMM (contorno) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta em Wm^{-2} (sombreado). Dia 12/02/2014: a)12Z, b)18Z, e dia 13/02/2014: c)00Z, d)06Z, e)12Z.	65
Figura 29 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. Dia 12/02/2014: a)12Z, b)18Z, dia 13/02/2014: c)00Z, d)06Z, e)12Z, e dia 14/02/2014: f)00Z.	66
Figura 30 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. Dia 12/02/2014: a)12Z, b)18Z, dia 13/02/2014: c)00Z, d)06Z, e)12Z, e dia 14/02/2014: f)00Z.	67

Figura 31 – Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. Dia 12/02/2014: a)12Z, b)18Z, dia 13/02/2014: c)00Z, d)06Z, e)12Z, e dia 14/02/2014: f)00Z.	68
Figura 32 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em cores). a) 15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z, f) PNMM 16/01/2014 00Z e trajetória.	70
Figura 33 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU: a) 51°S, 15/01/2014 00z; b) 52°S, 15/01/2014 06Z; c) 53°S, 15/01/2014 12Z; d) 54°S, 15/01/2014 18Z, e) 54°S, 16/01/2014 00Z.	71
Figura 34 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 15/01/2014 06Z, (c) 15/01/2014 12Z, (e) 15/01/2014 18Z, (g) 16/01/2014 00Z, e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 15/01/2014 06Z, (d) 15/01/2014 12Z, (f) 15/01/2014 18Z, (h) 15/01/2014 00Z.	72
Figura 35 – Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z.	73
Figura 36 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z.	74
Figura 37 - Secções verticais de EPV menor ou igual a -1,5 PVU (contornos) e tendência do Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 51°S, 15/01/2014 00z; b) 52°S, 15/01/2014 06Z; c) 53°S, 15/01/2014 12Z; d) 54°S, 15/01/2014 18Z, e) 54°S, 16/01/2014 00Z.	75
Figura 38 - Secções verticais de EPV menor ou igual a -1,5 PVU (contornos) e Velocidade vertical omega (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 51°S, 15/01/2014 00z; b) 52°S, 15/01/2014 06Z; c) 53°S, 15/01/2014 12Z; d) 54°S, 15/01/2014 18Z, e) 54°S, 16/01/2014 00Z.	76
Figura 39 - Secções verticais de EPV menor ou igual a -1,5 PVU (contornos) e umidade relativa (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 51°S, 15/01/2014 00z; b) 52°S, 15/01/2014 06Z; c) 53°S, 15/01/2014 12Z; d) 54°S, 15/01/2014 18Z, e) 54°S, 16/01/2014 00Z.	77
Figura 40 - Campo de PNMM (contorno) e fluxo de calor latente em W m^{-2} (sombreado), a)15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z.	78
Figura 41 - Campo de PNMM (contorno) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta em W m^{-2} (sombreado), a)15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z.	79
Figura 42 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a)15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z, f) 16/01/2014 12Z.	80
Figura 43 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. a)15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z, f) 16/01/2014 12Z.	81
Figura 44 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM.	82
Figura 45 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em cores). a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z, f) PNMM 02/07/2012 18Z e trajetória.	84

Figura 46 – Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 50°S, 01/07/2012 18z; b) 52°S, 02/07/2012 00Z; c) 53°S, 02/07/2012 06Z; d) 54°S, 02/07/2012 12Z, e) 54°S, 02/07/2012 18Z.	85
Figura 47 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 02/07/2012 00Z, (c) 02/07/2012 06Z, (e) 02/07/2012 12Z, (g) 02/07/2012 18Z, e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 02/07/2012 00Z, (d) 02/07/2012 06Z, (f) 02/07/2012 12Z, (h) 02/07/2012 18Z.	86
Figura 48 - Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z.	87
Figura 49 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z.	88
Figura 50 - Secções verticais de EPV menor ou igual a -1,5 PVU (contornos) e tendência do Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 50°S, 01/07/2012 18z; b) 52°S, 02/07/2012 00Z; c) 53°S, 02/07/2012 06Z; d) 54°S, 02/07/2012 12Z, e) 54°S, 02/07/2012 18Z.	89
Figura 51 - Secções verticais de EPV menor ou igual a -1,5 PVU (contornos) e velocidade vertical Omega (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 50°S, 01/07/2012 18z; b) 52°S, 02/07/2012 00Z; c) 53°S, 02/07/2012 06Z; d) 54°S, 02/07/2012 12Z, e) 54°S, 02/07/2012 18Z.	90
Figura 52 - Secções verticais de EPV menor ou igual a -1,5 PVU (contornos) e umidade relativa (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 50°S, 01/07/2012 18z; b) 52°S, 02/07/2012 00Z; c) 53°S, 02/07/2012 06Z; d) 54°S, 02/07/2012 12Z, e) 54°S, 02/07/2012 18Z.	91
Figura 53 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor latente (sombreado em cores, Wm^{-2}). a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z.	92
Figura 54 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta (sombreado em cores, Wm^{-2}). a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z.	93
Figura 55 – Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z, f) 03/07/2012 06Z.	94
Figura 56 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z, f) 03/07/2012 06Z.	95
Figura 57 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z, f) 03/07/2012 06Z.	96
Figura 58 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em cores). a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z, f) PNMM 11/07/2012 12Z e trajetória.	98
Figura 59 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 42°S, 10/07/2012 12Z, b) 44°S, 10/07/2012 18Z, c) 47.5°S, 11/07/2012 00Z, d) 50°S, 11/07/2012 06Z, e) 53°S, 11/07/2012 12Z.	99

Figura 60 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 10/07/2012 18Z, (c) 11/07/2012 00Z, (e) 11/07/2012 06Z, (g) 11/07/2012 12Z, e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 10/07/2012 18Z, (d) 11/07/2012 00Z, (f) 11/07/2012 06Z, (h) 11/07/2012 12Z.	100
Figura 61 - Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z.	101
Figura 62 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z.	102
Figura 63 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e tendência de Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 42°S, 10/07/2012 12Z, b) 44°S, 10/07/2012 18Z, c) 47.5°S, 11/07/2012 00Z, d) 50°S, 11/07/2012 06Z, e) 53°S, 11/07/2012 12Z.	103
Figura 64 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU e velocidade vertical Omega, nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 42°S, 10/07/2012 12Z, b) 44°S, 10/07/2012 18Z, c) 47.5°S, 11/07/2012 00Z, d) 50°S, 11/07/2012 06Z, e) 53°S, 11/07/2012 12Z.	104
Figura 65 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU e umidade relativa nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 42°S, 10/07/2012 12Z, b) 44°S, 10/07/2012 18Z, c) 47.5°S, 11/07/2012 00Z, d) 50°S, 11/07/2012 06Z, e) 53°S, 11/07/2012 12Z.	105
Figura 66 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor latente (sombreado em cores, Wm^{-2}). a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z.	106
Figura 67 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta (sombreado em cores, Wm^{-2}). a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z.	107
Figura 68 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z, e) 12/07/2012 00Z.	108
Figura 69 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z, e) 12/07/2012 00Z.	109
Figura 70 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM.	110
Figura 71 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta (sombreado em cores). a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z, f) PNMM 14/07/2012 00Z e trajetória.	113
Figura 72 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 33°S, 13/07/2012 00Z, b) 36°S, 13/07/2012 06Z, c) 38°S, 13/07/2012 12Z, d) 42°S, 13/07/2012 18Z, e) 44°S, 14/07/2012 00Z.	114
Figura 73 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 13/07/2012 06Z, (c) 13/07/2012 12Z, (e) 13/07/2012 18Z, (g) 14/07/2012 00Z, e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 13/07/2012 06Z, (d) 13/07/2012 12Z, (f) 13/07/2012 18Z, (h) 14/07/2012 00Z.	115

Figura 74 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e advecção de temperatura (sombreado em cores): a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 12Z, c) 13/07/2012 18Z, d) 14/07/2012 00Z, e) 14/07/2012 12Z, f) 14/07/2012 18Z.	116
Figura 75 – Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z.	117
Figura 76 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z.....	118
Figura 77 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e tendência de Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 33°S, 13/07/2012 00Z; b) 36°S,13/07/2012 06Z, c) 38°S, 13/07/2012 12Z; d) 42°S, 13/07/2012 18Z; e) 44°S, 14/07/2012 00Z.	119
Figura 78 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e velocidade vertical omega (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 33°S, 13/07/2012 00Z; b) 36°S,13/07/2012 06Z, c) 38°S, 13/07/2012 12Z; d) 42°S, 13/07/2012 18Z; e) 44°S, 14/07/2012 00Z.	120
Figura 79 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e umidade relativa (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 33°S, 13/07/2012 00Z; b) 36°S,13/07/2012 06Z, c) 38°S, 13/07/2012 12Z; d) 42°S, 13/07/2012 18Z; e) 44°S, 14/07/2012 00Z.	121
Figura 80 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor latente (sombreado em cores, Wm^{-2}): a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z.	122
Figura 81 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta (sombreado em cores, Wm^{-2}): a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z.....	123
Figura 82 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z, f) 14/07/2012 12Z.	124
Figura 83 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z, f) 14/07/2012 12Z.	125
Figura 84 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z, f) 14/07/2012 12Z.	126
Figura 85 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em cores). a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z, f) PNMM 31/07/2012 06Z e trajetória.	128
Figura 86 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 40°S, 30/07/2012 06Z; b) 45°S, 30/07/2012 12Z; c) 48°S, 30/07/2012 18Z; d) 52°S, 31/07/2012 00Z, e) 56°S, 31/07/2012 06Z.	129
Figura 87 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 30/07/2012 12Z, (c) 30/07/2012 18Z, (e) 31/07/2012 00Z, (g) 31/07/2012 06Z; e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} m^2 s^{-1} K kg^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 30/07/2012 12Z, (d) 30/07/2012 18Z, (f) 31/07/2012 00Z, (h) 31/07/2012 06Z.	130

Figura 88 - de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z.	131
Figura 89 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z.	132
Figura 90 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e tendência de Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 40°S, 30/07/2012 06Z; b) 45°S, 30/07/2012 12Z; c) 48°S, 30/07/2012 18Z; d) 52°S, 31/07/2012 00Z, e) 56°S, 31/07/2012 06Z.	133
Figura 91 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e velocidade vertical Omega (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 40°S, 30/07/2012 06Z; b) 45°S, 30/07/2012 12Z; c) 48°S, 30/07/2012 18Z; d) 52°S, 31/07/2012 00Z, e) 56°S, 31/07/2012 06Z.	134
Figura 92 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e umidade relativa (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 40°S, 30/07/2012 06Z; b) 45°S, 30/07/2012 12Z; c) 48°S, 30/07/2012 18Z; d) 52°S, 31/07/2012 00Z, e) 56°S, 31/07/2012 06Z.	135
Figura 93 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor latente (sombreado em cores, Wm^{-2}): a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z.	136
Figura 94 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta (sombreado em cores, Wm^{-2}): a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z.	137
Figura 95 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z, f) 31/07/2012 18Z.	138
Figura 96 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z, f) 31/07/2012 18Z.	139
Figura 97 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z, f) 31/07/2012 18Z.	140
Figura 98 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em cores): a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z, f) PNMM 02/10/2014 12Z e trajetória.	142
Figura 99 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 32°S, 01/10/2014 12Z; b) 34°S, 01/10/2014 18Z; c) 37°S, 02/10/2014 00Z; d) 38°S, 02/10/2014 06Z, e) 40°S, 02/10/2014 12Z.	143
Figura 100 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 01/10/2014 18Z; (c) 02/10/2014 00Z; (e) 02/10/2014 06Z, (g) 02/10/2014 12Z; e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} m^2 s^{-1} K kg^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 01/10/2014 18Z; (d) 02/10/2014 00Z; (f) 02/10/2014 06Z, (h) 02/10/2014 12Z.	144
Figura 101 - Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z.	145
Figura 102 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z.	146

Figura 103 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e tendência de Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 32°S, 01/10/2014 12Z; b) 34°S, 01/10/2014 18Z; c) 37°S, 02/10/2014 00Z; d) 38°S, 02/10/2014 06Z, e) 40°S, 02/10/2014 12Z.	147
Figura 104 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e velocidade vertical omega (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 32°S, 01/10/2014 12Z; b) 34°S, 01/10/2014 18Z; c) 37°S, 02/10/2014 00Z; d) 38°S, 02/10/2014 06Z, e) 40°S, 02/10/2014 12Z.	148
Figura 105 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e umidade relativa (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 32°S, 01/10/2014 12Z; b) 34°S, 01/10/2014 18Z; c) 37°S, 02/10/2014 00Z; d) 38°S, 02/10/2014 06Z, e) 40°S, 02/10/2014 12Z.	149
Figura 106 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor latente (sombreado em cores, Wm^{-2}): a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z.	150
Figura 107 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta (sombreado em cores, Wm^{-2}): a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z.	151
Figura 108 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z, f) 03/10/2014 00Z.	152
Figura 109 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z, f) 03/10/2014 00Z.	153
Figura 110 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z, f) 03/10/2014 00Z.	154

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Variáveis provenientes das reanálises do MERRA-2 utilizadas no trabalho.....	30
Tabela 2 - Ciclones Explosivos ocorridos em 2012	33
Tabela 3 - Ciclones Explosivos ocorridos em 2013	34
Tabela 4 - Ciclones Explosivos ocorridos em 2014	35
Tabela 5 - Ciclones Explosivos ocorridos em 2015	36
Tabela 6 - Ciclones Explosivos ocorridos em 2016	37

Lista de Acrônimos e Abreviações

ATD - Anomalia da Tropopausa Dinâmica
B - Bergeron
CE - Ciclone Explosivo
CLP - Camada Limite Planetária
CTO – Coluna Total de Ozônio
DSA - Divisão de Satélites Ambientais
ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENF - El Niño Forte
ENfr - El Niño fraco
ENM – El Niño Moderado
ENMF - El Niño Muito Forte
ENSO - El Niño/Southern Oscillation (El Niño/Oscilação Sul)
EPV – Vorticidade Potencial de Ertel (Ertel Potential Vorticity)
GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite
GRADS - Grid Analysis and Display System
GSFC - Goddard Space Flight Center
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KE – Energia Cinética (Kinetic Energy)
LNF – La Niña Forte
LNfr - La Niña fraca
LNM - La Niña Moderada
LNMF - La Niña Muito Forte
MERRA - Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications
N – Neutro (ENSO Neutro)
NASA - National Aeronautics and Space Administration
NCAR - National Center for Atmospheric Research
NCEP - National Centers for Environmental Prediction
PNMM – Pressão ao Nível Médio do Mar
PVU – Unidade de Vorticidade Potencial (Potential Vorticity Unity)
SLP – Surface Level Pressure (o mesmo que PNMM)
TD – Tropopausa Dinâmica
TNA – Taxa Normalizada de Aprofundamento
TSM – Temperatura da Superfície do Mar
UFLXKE – Fluxo zonal de energia cinética integrado na vertical
VFLXKE - Fluxo meridional de energia cinética integrado na vertical
Z – Zulu (Hora Mundial)

1. Introdução

A parte sul da América do Sul é atingida por diversos tipos de sistemas meteorológicos transientes, tais como sistemas frontais, ciclones, linhas de instabilidade, sistemas convectivos de mesoescala, complexos convectivos de mesoescala e tornados.

Em geral, na ausência de anomalias climáticas, o sul do Brasil, Paraguai e Uruguai, possui um regime de precipitações praticamente homogêneo, com precipitações territorialmente bem distribuídas ao longo do ano, com totais anuais elevados (Reboita et al., 2010), o que favorece as culturas agrícolas, o extrativismo vegetal, as atividades pecuárias, e a produção de energia hidrelétrica como é o caso da Usina Hidrelétrica de Itaipu, uma das maiores do mundo, que aproveita os recursos hídricos do Rio Paraná e fornece energia elétrica para o Brasil e para o Paraguai.

O tempo e o clima no sul da América do Sul são fortemente influenciados pela ocorrência de Ciclones Extratropicais desde que este tipo de sistema meteorológico transiente e seus sistemas frontais são os que mais atingem esta região, mantendo o regime de precipitação abundante e bem distribuído espacial e temporalmente, como mencionado anteriormente.

Dentre os Ciclones Extratropicais, há um tipo especial que se desenvolve muito rápida e intensamente em termos de aprofundamento da pressão central na superfície, frequentemente referido como “Ciclone Bomba”, mais conhecido como “Ciclone explosivo”, ou ainda “Ciclone de Costa Leste”. Estes ciclones geram tempo severo, e podem causar sérias ameaças em regiões próximas à costa, tanto em terra como no mar.

Os Ciclones Explosivos são potencialmente destrutivos e muito difíceis de prever, devido principalmente à rapidez com que ocorre o aprofundamento do campo da pressão em superfície, à falta de dados de observações meteorológicas sobre o mar e à falta de conhecimento suficiente dos fatores dinâmicos e termodinâmicos que determinam a sua ocorrência. Destas características decorre a necessidade de

estudos para aumentar o conhecimento a respeito dos mesmos, que é a motivação deste trabalho.

O objetivo geral deste trabalho foi estudar casos de ciclogênese explosiva, com ênfase para aqueles classificados como fortes, para obter informações dos mecanismos que determinam o aprofundamento rápido dos mesmos, as quais servirão para contribuir com a implementação de modelos e procedimentos para proporcionar uma efetiva previsão deste fenômeno.

Como, em geral, estes fenômenos estão associados às anomalias da tropopausa, um dos propósitos foi o estudo das mesmas. Cabe colocar que o estudo destas anomalias, além da importância que tem para a ciclogênese estudada aqui, é importante também para estudos de qualidade do ar desde que elas são responsáveis, também, por variações apreciáveis na Coluna Total do Ozônio (CTO) pela intrusão na troposfera, de ar rico em Ozônio proveniente da estratosfera, visto que o Ozônio na estratosfera é benéfico por filtrar os raios ultra-violeta em sua formação, mas na troposfera ele é um poluente.

Os objetivos específicos são:

- Detecção e identificação de ciclones explosivos com taxa de aprofundamento da pressão à superfície igual ou maior a 1,0 Bergeron (B);
- Seleção de casos segundo a intensidade;
- Exame das Anomalias da Tropopausa Dinâmica (ATD) dos casos selecionados:
 - Através da Vorticidade Potencial de Ertel;
 - Através de imagens de satélite no canal do vapor d'água;
- Análise de acoplamento da EPV com outros campos variáveis meteorológicos;
- Análise da intrusão de ar proveniente da estratosfera;
- Comparação de casos de ciclogênese explosiva segundo a intensidade do aprofundamento da pressão central em superfície e a estação do ano.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Ciclogênese

Ciclogênese é um termo que, geralmente, se refere ao desenvolvimento de perturbações atmosféricas em escala sinótica, e enfatiza o papel da vorticidade relativa no desenvolvimento de sistemas desta escala (Holton, 1992).

Estritamente, o termo se refere ao desenvolvimento ou intensificação de um ciclone (centro de baixa pressão, ou simplesmente “baixa”), sendo que na grande escala têm circulação ciclônica, ou seja, de acordo com a rotação da Terra.

No hemisfério Norte foram realizados muitos estudos sobre a ciclogênese e o movimento dos ciclones, sendo que o primeiro modelo conceitual foi concebido por Bjerkness (1919), Bjerkness e Solberg (1922), seguido de trabalhos como os de Sutcliffe (1947), Pettersen (1956), Palmén & Newton (1969), entre outros, sendo que na última década do século XX surgiu um modelo adicional proposto por Shapiro e Kayser (1990).

Os ciclones são classificados segundo a região de formação e características inerentes às condições predominantes nestas regiões como tropicais (Palmén, 1956; Gray, 1968), e extratropicais (Bjerkness, 1919; Bjerkness e Solberg, 1922), podendo ser também subtropicais (Gray, 1968; Hart, 2003). Por exemplo, na grande escala ciclones tropicais formam-se devido ao calor latente conduzido por atividades convectivas e são de núcleo quente, enquanto ciclones extratropicais (Pettersen e Smebye, 1971), formam-se como ondas ao longo de frentes ou então a partir de um cavado pré-existente a sotavento de montanhas antes de se ocluir mais tarde como ciclones de núcleo frio. Os subtropicais começam como tropicais ou extratropicais e sofrem transição de um tipo para outro.

2.2 Ciclogênese na América do Sul

Na América do Sul, poucos estudos haviam sido realizados até 1990 (e.g. Talajaard, 1967; Necco, 1982; Satyamurty et al., 1990), os quais apresentaram conclusões discrepantes devido ao fato de que Necco (1982) utilizou apenas um ano de dados, enquanto Satyamurty et al. (1990) utilizaram dois anos de dados de superfície, baseando-se, principalmente, em imagens de satélite, as quais não permitem o delineamento do nível da ciclogênese.

A fim de elucidar o verdadeiro comportamento da ciclogênese, Gan e Rao (1991), realizaram um cálculo da frequência da ciclogênese em superfície sobre a América do Sul utilizando dez anos de dados (1979-1988). Da observação dos 1091 casos ocorridos neste período, eles descobriram que a frequência da ciclogênese é maior no inverno, concordando com Necco (1982) e discordando de Satyamurty et al. (1990), sendo esta frequência máxima no mês de maio e mínima no mês de dezembro. Além da variação sazonal da frequência da ciclogênese, eles encontraram variação interanual, com as maiores frequências em anos de El Niño, nos quais a atmosfera inferior apresenta um número de Richardson menor, o qual é uma razão entre o termo de flutuabilidade e o termo de cisalhamento vertical do escoamento, tal que valores menores que zero indicam favorecimento de movimentos verticais ascendentes, favorecendo a instabilidade baroclínica. Encontraram, também, variação espacial com destaque para duas regiões de preferência para a ocorrência de ciclogênese (Figura 1).

Das duas regiões ciclogênicas identificadas por Gan e Rao (1991), uma está localizada, aproximadamente, no Uruguai, onde a frequência é maior no inverno, associada à influência dos Andes e à instabilidade baroclínica, e a outra, próximo do Golfo de São Matias na Argentina, onde a frequência é maior no verão, associada apenas à instabilidade baroclínica do escoamento de oeste.

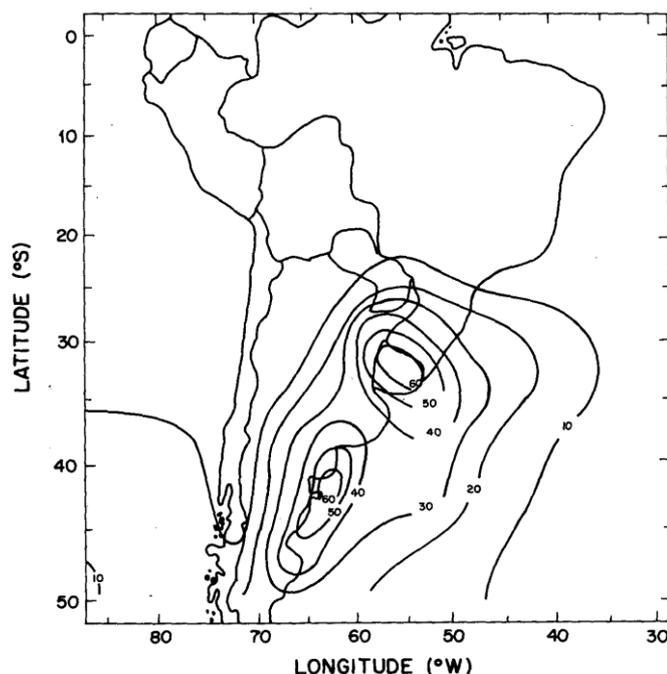


Figura 1 - Distribuição anual das isolinhas de frequência de ciclogêneses (Fonte: Gan e Rao, 1991)

Na última década do século XX, foram desenvolvidos esquemas automáticos para detecção e rastreamento de ciclones e anticiclones extratropicais, cujos algoritmos servem para detectar mínimos e máximos em campos de pressão ou geopotencial próximo da superfície, utilizando dados oriundos de reanálises com diferentes resoluções temporais e espaciais. Neste tipo de abordagem, é válido mencionar os trabalhos de Murray e Simmonds (1991), Sinclair (1995), Blender et al. (1997) e Trigo et al. (1999).

Sinclair (1995), utilizando quinze anos de dados de reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), bem como Simmonds e Keay (2000), utilizando dados de reanálises do *National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), obtiveram resultados que mostraram concordância, confirmando aqueles obtidos por Gan e Rao (1991).

Posteriormente, outros estudos mostraram a existência de outras regiões ciclogênicas na América do Sul, sendo que Hoskins e Hodges (2005), e também Reboita et al. (2005, 2010) descobriram uma terceira região ciclogênica abrangendo a costa leste, ao sul e sudeste do Brasil (Figura 2), a qual apresentou uma maior frequência de eventos no verão, cujas causas precisam ainda ser investigadas.

Allen et al. (2010) encontraram, também, uma outra região ciclogênica no extremo sul da América do Sul.

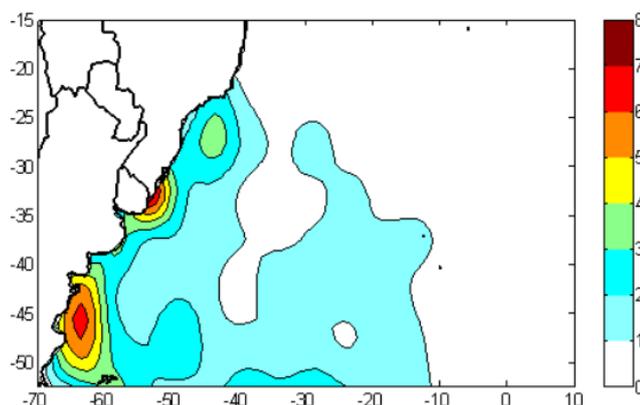


Figura 2 - Densidade de ciclogêneses no verão. (Fonte: Reboita, 2010).

2.3 Ciclogênese Explosiva

Dentre os ciclones extratropicais destaca-se um tipo de ciclone que é caracterizado por um aprofundamento muito rápido da pressão à superfície, o que gera um gradiente horizontal de pressão intenso, dando origem a tempo muito severo. Este processo, chamado de “Bombogênese” (Bluestein, 1993; Sanders e Gyakum, 1980), “Ciclogênese Explosiva”, ou ainda “Ciclogênese de Costa Leste” é caracterizado por um aprofundamento da pressão à superfície de 1 Bergeron (queda de 1 hPa/hora, em um período de 24 horas, para uma latitude de 60°).

De forma mais geral, a taxa de aprofundamento em Bergeron (B) deve ser corrigida em função da latitude (Equação 1):

$$1 B = [24 \text{ hPa} \left(\frac{\sin \varphi}{\sin 60^\circ} \right)] / \text{dia} \quad (1)$$

Onde B e φ correspondem a Bergeron e latitude, respectivamente.

Segundo Sanders e Gyakum (1980), os ciclones explosivos produzem grandes quantidades de precipitação, gerando ventos fortes, ondas altas e pouca visibilidade.

Estes estão incluídos entre os eventos mais severos que afetam regiões costeiras com altas densidades demográficas e, também, oceanos abertos. Eles constituem um problema de previsão do tempo cuja importância é fundamental, pois a capacidade de prever estes eventos é ainda limitada pela escassez de dados meteorológicos sobre os oceanos e pela falta de conhecimento sobre a física destes fenômenos.

Dois casos muito famosos foram estudados por Uccellini (1985, 1986), entre outros autores. Um ocorreu entre 9 e 11 de setembro de 1978 no Atlântico Norte, a oeste de Atlantic City, New Jersey e foi denominado de “Queen Elisabeth II Cyclone” (Gyakum, 1983a, 1983b), cujo desenvolvimento pode ser documentado em dois estágios: O primeiro consistindo do surgimento da baixa ao longo de uma outra baixa rasa pré-existente em uma zona hiperbaroclínica em fase de intensificação, e o segundo estágio foi a ciclogênese explosiva com convecção profunda e os ventos comparáveis aos de um furacão, exibindo características de um ciclone tropical, com núcleo quente e forma de olho no centro. Outro caso muito famoso ocorreu entre 17 e 19 de fevereiro de 1979 na costa leste dos Estados Unidos e foi chamado de “President’s Day Cyclone” (Bosart, 1981; Bosart e Lin, 1984; Whitaker et al., 1988), no qual a baixa desenvolveu-se ao longo de uma forte frente em intensificação na superfície, a qual apresentava convecção cumulus significativa associada com ela. Neste último, ocorreu precipitação de neve intensa antes e durante a ciclogênese.

2.4 Tropopausa Dinâmica (TD)

Vários trabalhos, como por exemplo, Hoskins (1985), Uccellini et al. (1985), Wang e Rogers (2001), Avila et al. (2015, 2016), indicam a associação entre as variações da altura da tropopausa com a ocorrência de ciclogênese explosiva em superfície. Foi observado que ocorrem aprofundamentos na tropopausa, frequentemente referidos como “dobras da tropopausa”, os quais são marcantes em casos de ciclogênese explosiva. Em alguns trabalhos, como por exemplo, em Santurette e Georgiev (2005), foi mostrado que a superfície de 1,5 PVU (unidade de Vorticidade

Potencial, do inglês: Potential Vorticity Unit) é representativa da chamada “tropopausa dinâmica”, embora alguns outros trabalhos considerem o valor de 1,0 PVU (e.g., Bithell et al., 1999) ou 2,0 PVU (e.g., Cau et al., 2007), lembrando que no Hemisfério Sul valores negativos de vorticidade potencial representam vorticidade ciclônica. Na meteorologia, é comum a análise de vorticidade potencial através dos campos de vorticidade potencial de Ertel (Schubert, 2004; Hoskins, 1985) (Equação 2). É esperado, portanto, que em condições neutras, i.e., sem a presença de cavados em altos níveis, nas latitudes extratropicais a tropopausa identificada pela vorticidade potencial com valor de 1,5 PVU (em que $1 \text{ PVU} = 1 \times 10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) situe-se, aproximadamente, no nível de 200 hPa. Desta forma, espera-se que em algum estágio do ciclo de vida do ciclone explosivo, valores de 1,5 PVU sejam encontrados em níveis inferiores.

$$EPV = \alpha \zeta_a \cdot \nabla \theta \quad (2)$$

Onde EPV é a vorticidade potencial de Ertel, α é o volume específico, ζ_a é a vorticidade absoluta e θ é a temperatura potencial.

Como todas as formulações de vorticidade potencial, a Vorticidade Potencial de Ertel (Equação 1) é, em essência, um produto da vorticidade absoluta pelo parâmetro de estabilidade estática. Assim, em módulo, ela tem valores menores do que 1 PVU na troposfera, alcançando cerca de 1,5 PVU na tropopausa, e valores acima de 2 PVU na estratosfera, tendendo a crescer com a altura devido a grande estabilidade estática desta camada, a qual é proporcionada pelo perfil de aumento da temperatura com a altura decorrente da absorção de radiação ultravioleta para a formação da camada de ozônio.

As dobras da tropopausa quando determinadas através do valor da EPV de 1,5 PVU, são chamadas de Anomalias da Tropopausa Dinâmica (ATD), o que decorre do fato de que a tropopausa normalmente fica entre 200 e 100 hPa, enquanto que no caso de ocorrência de dobras, estas alcançam abaixo do nível de 500 hPa. Isto implica em um desvio da média que justifica qualquer critério de anomalia (Santurette e Georgiev, 2005).

2.5 Imagens de Satélite no canal do vapor d'água

As imagens do satélite meteorológico no canal do vapor d'água (canal 3) indicam a distribuição do vapor d'água na atmosfera. Onde existe umidade, as imagens são claras mostrando brilho, enquanto regiões de ar seco apresentam-se escuras. Assim, estas imagens apresentam extensas áreas escuras sobre os centros de alta pressão e regiões polares, onde o ar é seco. Elas são muito úteis para o reconhecimento das dobras da tropopausa, mostrando-as como línguas escuras que indicam a intrusão de ar seco proveniente da estratosfera, como se pode ver na Figura 3, onde aparecem as regiões escuras correspondentes aos centros de alta pressão do Pacífico, do Atlântico, e também uma faixa estreita orientada de noroeste para sudeste, indicando um forte gradiente horizontal de umidade indicando uma intrusão de ar seco estratosférico através de uma dobra da tropopausa, cruzando a Argentina, ao sul do Uruguai.

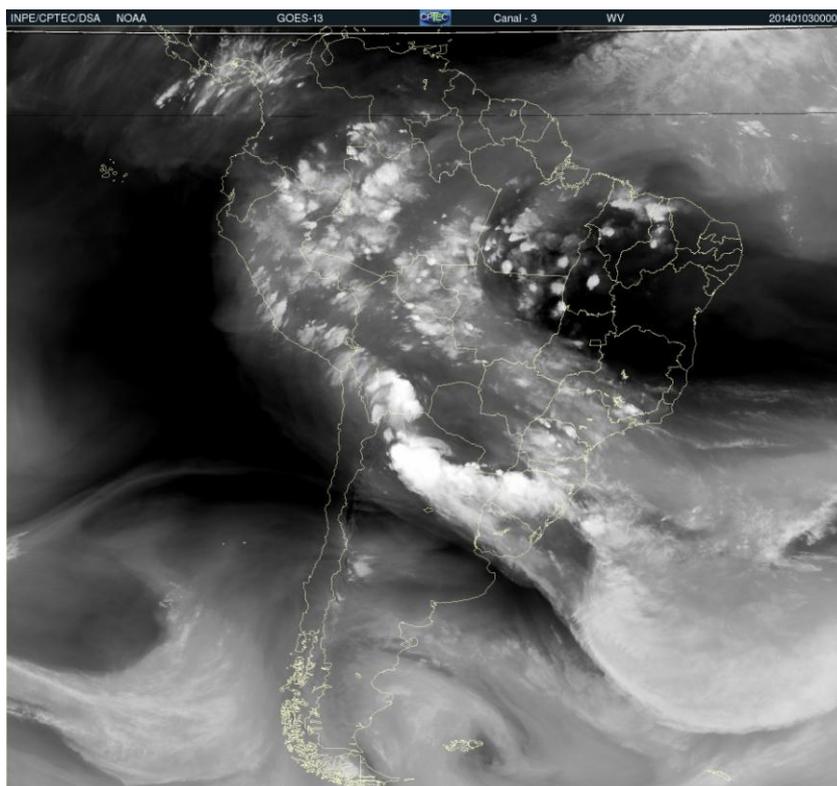


Figura 3 – Imagem do Satélite GOES 13, no canal 3, correspondente ao vapor d'água, do dia 03/01/2014, às 00 Z.

2.6 Fluxos de Calor

Os estudos de Piva (2001), Piva et al. (2008) e Piva et al. (2011), sobre o papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície associado à ciclogênese explosiva, mostraram que o fluxo de calor latente exerce um papel importante no desenvolvimento de ciclones explosivos enquanto o fluxo de calor sensível tem pouca influência.

Oda (2005) estudou a influência da distribuição espacial da TSM (Temperatura da Superfície do Mar) através de simulações numéricas, impondo campos de TSM idealizados e retirando os campos de fluxos de calor latente e sensível à superfície do mar. Seu estudo mostrou que os ciclones não seriam favorecidos em seu desenvolvimento por gradientes intensificados de TSM (e.g. confluência das correntes do Brasil e Malvinas), mas que podem ter sua intensificação relacionada com transferência de baroclinia do oceano para a atmosfera em escalas maiores de tempo. Por outro lado, mostrou que em um ambiente baroclínico, os efeitos adiabáticos respondiam pelo desenvolvimento da ciclogênese e os fluxos de calor não tinham importância, enquanto que nos casos em que as forçantes adiabáticas não eram tão acentuadas, os fluxos de calor tiveram papel importante no desenvolvimento da ciclogênese.

Estudos foram realizados por Pezzi et al., (2004, 2005, 2015, 2016a, 2016b) sobre o papel dos processos próximos a superfície envolvendo o gradiente de temperatura da superfície do mar (TSM), os fluxos de calor sensível e latente, bem como a estabilidade da camada limite planetária (CLP), mostrando a importância destes processos também para a ciclogênese, na medida em que os gradientes de TSM aumentam o cisalhamento vertical do vento, a instabilidade favorece os movimentos verticais e os fluxos de calor suprem energia para o ciclone.

2.7 Energética

Pinto (2010) analisou os aspectos dinâmicos da formação de ciclones sobre as regiões ciclogênicas da costa leste da América do Sul, através do ciclo de energia de Lorenz, concluindo que as ciclogêneses da América do Sul podem apresentar características variadas. Por exemplo: dos casos estudados por ele, um ciclone que se formou na região sul/sudeste do Brasil teve como mecanismo principal de crescimento a instabilidade barotrópica, enquanto outro que se formou na região da foz do Rio da Prata tornou-se um ciclone explosivo e ainda outro que se formou na costa sul da Argentina, o qual mais apresentou características de ciclone extratropical, sendo que estes dois últimos tiveram como mecanismo principal de crescimento a instabilidade baroclínica. Este estudo apontou para o fato de que o ciclone formado na região sul/sudeste do Brasil apresentou características híbridas, não devendo ser considerado, estritamente, como ciclone extratropical, mas sim como “ciclone subtropical”.

Black e Pezza (2013), de forma pioneira, analisaram o ciclo energético de Lorenz associado com a ciclogênese explosiva para quatro regiões do Globo com maior atividade explosiva (o nordeste do Pacífico, o norte do Atlântico, o sudoeste do Pacífico e o sul do Atlântico). Estes autores observaram uma robusta assinatura no referido ciclo de energia, no qual conversões anômalas de energia começam 48 horas antes do desenvolvimento explosivo e permanecem fortes por 120 horas, ocorrendo de forma idêntica para as regiões analisadas. E que, embora estas conversões impliquem em crescimento baroclínico clássico, elas não são observadas em ciclones regulares, nos quais estes autores sugerem que o ciclo baroclínico não seja suficientemente vigoroso para deixar uma trilha distinguível na energética ambiental. Os autores relatam ainda que esta descoberta abre uma nova via de exploração do comportamento de tempestades explosivas, baseadas no ambiente de grande escala, podendo proporcionar sua previsão.

No presente trabalho foram utilizados os dados de energia cinética integrados em 42 níveis de pressão na vertical, provenientes das reanálises do MERRA-2, os quais permitem analisar a energia cinética como um campo bidimensional. Deste mesmo conjunto de dados, foram utilizados também os fluxos zonais e meridionais de energia cinética integrados em 73 níveis na vertical, os quais são proporcionais à

energia cinética média zonal e a energia cinética perturbada integrados na vertical (Orlanski e Katzfey, 1991).

2.8 Ciclogênese Explosiva na América do Sul

Para a América do Sul foram feitos alguns estudos, principalmente da climatologia dos ciclones explosivos (e.g. Mendes et al., 2010; Bittencourt et al., 2013), além do estudo sobre o papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície associado à ciclogênese explosiva (Piva, 2001, Piva et al., 2008 e 2011), e alguns outros abordando certas características dinâmicas (Iwabe e Rocha, 2009; Avila et al., 2016)

Bittencourt et al. (2013) apresentaram uma climatologia para os ciclones explosivos na região ciclogênica da América do Sul, utilizando dados de reanálises do NCEP/NCAR de 1957 a 2010 e o esquema automático para detecção e monitoramento de ciclones desenvolvido na Universidade de Melbourne, Austrália (Murray e Simmonds, 1991). Todos os ciclones extratropicais identificados pelo esquema foram submetidos ao método proposto por Sanders e Gyakum (1980) para obter a Taxa Normalizada de Aprofundamento da Pressão Central (TNA), através da qual os ciclones são classificados como explosivos quando esta taxa excede uma unidade (1 Bergeron). A TNA foi calculada de duas maneiras: Primeiro, utilizando o valor da variação da pressão central (TNA_c); Segundo, utilizando a variação da pressão central relativa (TNA_r), a qual é obtida subtraindo-se da pressão central o valor climatológico diário (Lin e Simmonds, 2002). Comparando os resultados obtidos com os dois métodos (Figura 4), Bittencourt et al. (2013) observaram que, dentre os 3483 ciclones extratropicais detectados através do esquema automático, foram classificados como explosivos 144 eventos usando TNA_c e 85 usando TNA_r .

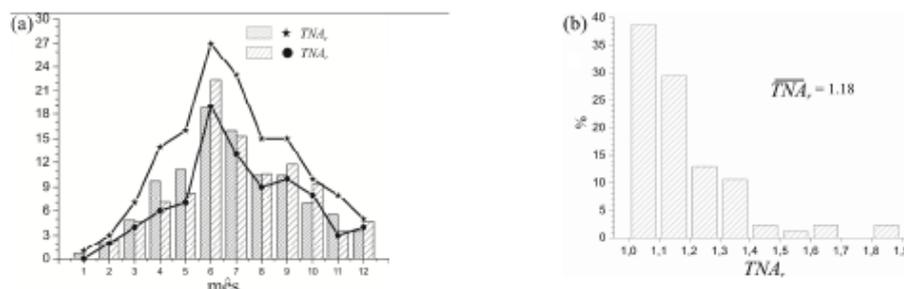


Figura 4 - (a) Número (linhas) e frequência (barras) mensal de Ciclones Explosivos identificados através dos métodos TNA_c e TNA_r . A escala no eixo vertical do gráfico é adimensional para a representatividade do número mensal de Ciclones Explosivos e em % para a representatividade da frequência mensal. (b) Frequência em % de ocorrência por faixa de valores de TNA_r . (Fonte: Bittencourt et al., 2013).

Segundo Bittencourt et al. (2013), na América do Sul, Ciclone Explosivo é um fenômeno raro, com cerca de 4,1 % (utilizando TNA_c) e 2,4 % (utilizando TNA_r), de frequência dentre todos os ciclones que se formam nessa área. Apesar da raridade, a área ciclogênica da América do Sul é considerada a de maior frequência de Ciclones Explosivos do Hemisfério Sul (Allen et al., 2010). Os resultados encontrados nesse estudo concordam com aqueles encontrados por Lim e Simmonds (2002), que utilizaram outra base de dados. A maior frequência de Ciclones Explosivos acontece nos meses mais frios (Junho, Julho e Agosto), com 47,1 % dos casos. Na área deste estudo, os Ciclones Explosivos se formam apenas ao sul de 27 °S e a maioria dos sistemas, 72,9 %, apresentam início da trajetória com desenvolvimento explosivo sobre o oceano. Quase todos os Ciclones Explosivos tiveram deslocamento para sudeste e a velocidade média de 13,8 m s⁻¹, enquanto a velocidade média encontrada por Reboita (2008), utilizando outra metodologia e base de dados, foi de 9 m s⁻¹.

3. Material e Métodos

Para detectar os casos de ciclogênese explosiva foram utilizados os dados de reanálise com resolução de 0.66° de longitude e 0.5° de latitude do *Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications* (MERRA-2) desenvolvido no *Goddard Space Flight Center da National Aeronautics and Space Administration - GSFC/NASA* (Gelaro et al., 2017), conforme a Tabela 1. O domínio espacial foi de 0° à 70°S e de 0° à 90°W. As reanálises do MERRA são empregadas em vários trabalhos, como por exemplo em Quadro et al., 2012, Wei et al., 2013, Avila et al., 2015, 2016 e Cossetin et al., 2016, sendo, também, comparadas com outras reanálises (Kennedy et al., 2011, Hodges et al., 2011, entre outros) ou comparadas com dados de satélite (Posselt et al., 2012, Naud et al., 2014, entre outros).

Tabela 1 – Variáveis provenientes das reanálises do MERRA-2 utilizadas no trabalho.

Nome	Descrição	Unidades
SLP	Pressão ao nível médio do mar (PNMM no texto)	Pa
H	Altura geopotencial	m
U,V	Componentes zonal e meridional da velocidade do vento	m/s
OMEGA	Velocidade vertical em coordenadas isobáricas	Pa/s
T	Temperatura do ar	K
RH	Umidade Relativa	%
EPV	Vorticidade Potencial de Ertel	K m ² /kg s
LH	Fluxo de calor latente a superfície	W/m ²
SH	Fluxo de calor sensível a superfície devido à turbulência	W/m ²
DOXDT_DYN	Tendência de Ozônio devido à dinâmica	Kg/m ² s
KE	Energia cinética integrada na vertical (73 níveis)	J/m ²
UFLXKE	Fluxo zonal de energia cinética integrada na vertical	J/ms
VFLXKE	Fluxo meridional de energia cinética integrada na vertical	J/ms

Nas análises, por conveniência, algumas variáveis são convertidas, tal como a pressão de Pa para hPa.

O período analisado foi desde o ano de 2012 até o ano de 2016.

Foram utilizadas também imagens do satélite GOES-13 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), no Canal 3 do Vapor d'água, obtidas da Divisão de Satélites Ambientais do Instituto de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE).

Em sequência foram efetuados os seguintes procedimentos:

- Plotagem dos dados de PNMM das reanálises do MERRA-2 no GRADS®, nos horários 00Z, 06Z, 12Z e 18Z, no período de 2012-2016;
- Identificação de ciclones explosivos com taxa de aprofundamento da pressão à superfície igual ou maior a 1,0 Bergeron, através do exame visual direto das análises obtidas com o GRADS® e da Equação 1 (repetida aqui):

$$1 B = [24 \text{ hPa} \left(\frac{\sin \varphi}{\sin 60^\circ} \right)] / \text{dia} \quad ;$$

- Seleção de casos segundo a intensidade através do critério de Sanders (1986) com a seguinte classificação:

$$1,0 B \leq \text{Fraco} < 1,3 B$$

$$1,3B \leq \text{Moderado} < 1,8 B$$

$$\text{Forte} \geq 1,8 B$$

- Análise dos campos meteorológicos durante o dia de ocorrência da “Bomba” e de dia-1, dia-2, dia+1 e dia+2 para observação do comportamento das variáveis na atmosfera e na superfície, antes e depois dessa ocorrência;
- Análise da vorticidade potencial de Ertel dos casos selecionados para verificar o comportamento da tropopausa dinâmica e sua relação com o desenvolvimento do ciclone, conforme a já descrita Equação 2 ($EPV = \alpha \zeta_a \cdot \nabla \theta$);
- Análise de acoplamento vertical da EPV com outros campos, tais como velocidade vertical e umidade relativa, e horizontal com geopotencial e PNMM, para obter a relação destas outras variáveis com o desenvolvimento do ciclone;
- Reconhecimento de intrusões de ar estratosférico através de imagens de satélite no canal do vapor d’água e comparação das dobras da tropopausa assim identificadas com aquelas anomalias da tropopausa dinâmica obtidas através da vorticidade potencial;
- Inclusão da tendência de ozônio como um indicador da intrusão de ar estratosférico através das dobras da tropopausa em corroboração com os movimentos verticais;
- Análise das linhas de corrente em 250 hPa e 850 hPa para acompanhar as perturbações dos jatos em altos níveis e o escoamento em baixos níveis;
- Análise da energia cinética integrada verticalmente (73 níveis), bem como os fluxos zonais e meridionais desta energia buscando algum padrão em seu comportamento.

4. Resultados

Os casos de ciclogênese explosiva foram detectados e classificados conforme previsto na metodologia e estão apresentados nas Tabelas de 2 a 6, onde:

Dia – hora -- referem-se ao início do ciclo explosivo de doze horas;

Lat – refere-se a latitude média do deslocamento durante o ciclo explosivo;

Δp 24h – refere-se à queda de pressão durante 24 horas em hPa;

TNA – refere-se à Taxa de Aprofundamento Normalizada em Bergerons;

Intensidade – Classificação segundo o critério de Sanders (1986);

ENSO – Classificação do fenômeno ENSO segundo o Oceanic Niño Index (ONI_NOAA ,2018) como segue:

El Niño Fraco - ENfr

La Niña - LNfr

El Niño Forte - ENF

La Niña Forte - LNF

El Niño Muito Forte - ENMF

La Niña Muito Forte – LNMF

Neutro - N

Com relação ao ENSO, embora o período seja muito curto para conclusões mais consistentes, e que em quase 60% deste período de análise foi neutro, com o maior número de ocorrências de ciclogêneses de todas as intensidades, nota-se que em períodos de La Niña (cerca de 16% do período), os ciclones explosivos registrados foram de intensidade fraca e moderada com La Niña fraca e nenhum caso com La Niña moderada (Não ocorreu La Niña forte no período). Nos períodos de El Niño (cerca de 20% do período considerado), ocorreram ciclogêneses de todas as intensidades associadas indistintamente com todas as intensidades de El Niño.

Tabela 2 - Ciclones Explosivos ocorridos em 2012

Mês	Dia	Hora	Lat	Δp 24h	TNA	Intensidade	ENSO
Janeiro					Nenhum	-----	LNm
Fevereiro	05	00Z	52°S	24	1,09 B	Fraco	LNfr
	12	06Z	58°S	36	1,53B	Moderado	LNfr
	25	12Z	54°S	24	1,07B	Fraco	LNfr
Março	11	12Z	50°S	36	1,69B	Moderado	LNfr
	20	00Z	52°S	32	1,46B	Moderado	LNfr
	26	12Z	54°S	32	1,42B	Moderado	LNfr
Abril	02	06Z	50°S	28	1,31B	Moderado	LNfr
	20	06Z	59°S	24	1,01B	Fraco	LNfr
	24	06Z	44°S	24	1,24B	Fraco	LNfr
Maio					Nenhum	-----	N
Junho	07	12Z	48°S	24	1,35B	Moderado	N
	14	12Z	54°S	28	1,24B	Fraco	N
Julho	01	18Z	52°S	24	1,09B	Fraco	N
	05	12Z	50°S	32	1,50B	Moderado	N
	10	12Z	47°S	24	1,18B	Fraco	N
	13	00Z	38,5°S	24	1,39B	Moderado	N
	19	12Z	39°S	20	1,14B	Fraco	N
	24	06Z	60,5°S	28	1,16B	Fraco	N
	30	06Z	48°S	44	2,13B	Forte	N
Agosto	04	18Z	46°S	28	1,4B	Moderado	N
	12	12Z	48,5°S	24	1,15B	Fraco	N
	18	18Z	46°S	20	1,03B	Fraco	N
	28	00Z	33,5°S	20	1,30B	Moderado	N
Setembro	19	06Z	35°S	16	1,00B	Fraco	N
	25	12Z	57°S	36	1,54B	Moderado	N
Outubro					Nenhum	-----	N
Novembro	21	06Z	60°S	24	1,00B	Fraco	N
Dezembro	07	06Z	40°S	20	1,12B	Fraco	N
	09	12Z	53,5°S	24	1,07B	Fraco	N
	25	12Z	45,5°S	36	1,82B	Forte	N

Tabela 3 - Ciclones Explosivos ocorridos em 2013

Mês	Dia	Hora	Lat	Δp 24h	TNA	Intensidade	ENSO
Janeiro	01	00Z	45°S	28	1,42B	Moderado	N
	26	00Z	48°S	24	1,16B	Fraco	N
Fevereiro	18	06Z	56°S	32	1,39B	Moderado	N
Março	10	12Z	49,5°S	28	1,55B	Moderado	N
	17	18Z	41,5°S	20	1,08B	Fraco	N
	30	06Z	49°S	32	1,52B	Moderado	N
Abril	12	06Z	41°S	20	1,10B	Fraco	N
	21	18Z	66°S	28	1,10B	Fraco	N
	28	12Z	45,5°S	36	1,82B	Forte	N
Maio	14	18Z	53°S	24	1,08B	Fraco	N
	16	06Z	52°S	40	1,83B	Forte	N
	30	18Z	53,5°S	28	1,07B	Fraco	N
Junho	20	18Z	58°S	32	1,36B	Moderado	N
	22	00Z	38°S	24	1,40B	Moderado	N
Julho	13	00Z	45,5°S	20	1,01B	Fraco	N
	14	12Z	47°S	24	1,18B	Fraco	N
Agosto	02	00Z	55°S	24	1,05B	Fraco	N
	05	00Z	39°S	20	1,14B	Fraco	N
	11	00Z	35°S	20	1,25B	Fraco	N
	22	00Z	43°S	24	1,26B	Fraco	N
	29	00Z	49°S	24	1,14B	Fraco	N
	30	12Z	49°S	24	1,14B	Fraco	N
Setembro	17	00Z	36°S	24	1,47B	Moderado	N
Outubro	24	06Z	40°S	28	1,57B	Moderado	N
	27	06Z	34°S	20	1,29B	Fraco	N
Novembro	05	18Z	47°S	24	1,18B	Fraco	N
	13	00Z	43°S	36	1,90B	Forte	N
	22	18Z	52°S	32	1,46B	Moderado	N
	25	06Z	59°S	24	1,01B	Fraco	N
	29	00Z	56°S	24	1,04B	Fraco	N
Dezembro	03	06Z	53°S	24	1,08B	Fraco	N
	07	00Z	57°S	28	1,20B	Fraco	N

Tabela 4 - Ciclones Explosivos ocorridos em 2014

Mês	Dia	Hora	Lat	Δp 24h	TNA	Intensidade	ENSO
Janeiro	03	00Z	46°S	42	2,10B	Forte	N
	15	00Z	53°S	24	1,08B	Fraco	N
Fevereiro	05	12Z	54°S	36	1,60B	Moderado	N
	12	12Z	52°S	30	1,37B	Moderado	N
Março	13	06Z	51°S	24	1,11B	Fraco	N
	15	18Z	46°S	32	1,60B	Moderado	N
	17	12Z	48°S	24	1,16B	Fraco	N
	18	18Z	60°S	24	1,16B	Fraco	N
	31	00Z	54°S	28	1,24B	Fraco	N
Abril	12	06	37°S	36	2,15B	Forte	N
Maio	22	12Z	39°S	28	1,64B	Moderado	N
	23	12Z	54°S	24	1,07B	Fraco	N
Junho	05	18Z	46°S	28	1,40B	Moderado	N
	13	12Z	52°S	28	1,28B	Fraco	N
	17	12Z	45°S	32	1,63B	Moderado	N
Julho	19	06Z	42°S	20	1,07B	Fraco	N
Agosto	07	12Z	45°S	28	1,42B	Moderado	N
	18	12Z	52°S	28	1,28B	Fraco	N
Setembro	24	12Z	46°S	24	1,20B	Fraco	N
Outubro	01	12Z	36°S	32	1,96B	Forte	N
	10	00Z	45°S	24	1,22B	Fraco	N
	30	00Z	54°S	24	1,07B	Fraco	N
Novembro	04	00Z	40°S	24	1,34B	Moderado	N
	08	12Z	50°S	24	1,13B	Fraco	N
	22	00Z	36°S	24	1,47B	Moderado	N
	30	00Z	57°S	36	1,54B	Moderado	N
Dezembro	22	12Z	47°S	28	1,38B	Moderado	ENfr

Tabela 5 - Ciclones Explosivos ocorridos em 2015

Mês	Dia	Hora	Lat	Δp 24h	TNA	Intensidade	ENSO
Janeiro	01	18Z	45°S	20	1,02B	Fraco	ENfr
	15	06Z	46°S	36	1,83B	Forte	ENfr
	16	18Z	58°S	28	1,02B	Fraco	ENfr
	20	00Z	50°S	28	1,31B	Moderado	ENfr
	30	00Z	48,5°S	30	1,44B	Moderado	ENfr
Fevereiro					Nenhum	-----	ENfr
Março	03	12Z	60,5°S	32	1,32B	Moderado	ENfr
	20	18Z	46°S	24	1,20B	Fraco	ENfr
Abril					Nenhum	-----	ENfr
Maio	03	12Z	55°S	28	1,23B	Fraco	ENfr
	08	12Z	53,5°S	28	1,25B	Fraco	ENfr
	27	00Z	55,5°S	28	1,22B	Fraco	ENfr
	31	18Z	55,5°S	24	1,05B	Fraco	ENfr
Junho	02	06Z	40,5°S	24	1,33B	Moderado	ENM
	04	06Z	58°S	24	1,02B	Fraco	ENM
Julho	04	00Z	65°S	36	1,43B	Moderado	ENM
	11	06Z	60°S	24	1,00B	Fraco	ENM
	14	06Z	58°S	32	1,36B	Moderado	ENM
	20	18Z	64°S	28	1,12B	Fraco	ENM
	31	12Z	43°S	36	1,90B	Forte	ENM
Agosto	08	00Z	62,5°S	32	1,30B	Moderado	ENF
	10	00Z	52,5°S	36	1,63B	Moderado	ENF
	14	00Z	42°S	20	1,07B	Fraco	ENF
Setembro	01	18Z	45°S	20	1,02B	Fraco	ENF
	10	00Z	57°S	36	1,54B	Moderado	ENF
	11	12Z	49°S	36	1,72B	Moderado	ENF
Outubro	22	06Z	50,5°S	40	1,87B	Forte	ENMF
	24	18Z	43°S	20	1,58B	Moderado	ENMF
Novembro					Nenhum	-----	ENMF
Dezembro	09	18Z	58,5°S	24	1,01B	Fraco	ENMF

Tabela 6 - Ciclones Explosivos ocorridos em 2016

Mês	Dia	Hora	Lat	Δp 24h	TNA	Intensidade	ENSO
Janeiro	09	18Z	51°S	30	1,39B	Moderado	ENMF
	12	06Z	59°S	24	1,01B	Fraco	ENMF
	15	12Z	50°S	28	1,31B	Moderado	ENMF
	18	00Z	52°S	24	1,09B	Fraco	ENMF
	23	00Z	48,5°S	24	1,15B	Fraco	ENMF
	27	18Z	52°S	28	1,28B	Fraco	ENMF
Fevereiro	02	12Z	45°S	20	1,02B	Fraco	ENMF
	10	18Z	53°S	28	1,28B	Fraco	ENMF
	13	00Z	51°S	24	1,11B	Fraco	ENMF
	24	18Z	50°S	28	1,31B	Moderado	ENMF
Março	18	12Z	65,5°S	36	1,42B	Moderado	ENMF
Abril	04	06Z	61°S	28	1,15B	Fraco	ENF
	08	12Z	60°S	24	1,00B	Fraco	ENF
	10	06Z	52°S	24	1,28B	Fraco	ENF
	16	06Z	60°S	24	1,00B	Fraco	ENF
	21	12Z	56°S	28	1,21B	Fraco	ENF
	24	12Z	55°S	28	1,23B	Fraco	ENF
Maio	02	06Z	46°S	24	1,20B	Fraco	ENM
	06	00Z	54°S	24	1,07B	Fraco	ENM
	11	12Z	35°S	24	1,37B	Moderado	ENM
	15	12Z	60°S	16	1,00B	Fraco	ENM
	18	12Z	60°S	24	1,00B	Fraco	ENM
Junho	06	12Z	43°S	24	1,26B	Fraco	ENfr
	30	00Z	65,5°S	32	1,26B	Fraco	ENfr
Julho	24	18Z	58°S	24	1,02B	Fraco	N
	27	00Z	39,5°S	24	1,36B	Moderado	N
Agosto	02	12Z	48°S	36	1,74B	Moderado	N
	17	18Z	46°S	32	1,60B	Moderado	N
	28	00Z	55,5°S	32	1,40B	Moderado	N
Setembro	13	00Z	37°S	28	1,67B	Moderado	LNfr
Outubro	18	00Z	46,5°S	28	1,39B	Moderado	LNfr
	26	18Z	35°S	24	1,50B	Moderado	LNfr
Novembro	02	18Z	48°S	28	1,56B	Moderado	LNfr
	06	12Z	50°S	24	1,13B	Fraco	LNfr
	09	18Z	45,5°S	28	1,41B	Moderado	LNfr
	18	12Z	52,25°S	32	1,46B	Moderado	LNfr
	30	18Z	48°S	24	1,34B	Moderado	LNfr
Dezembro	10	18Z	44°S	24	1,24B	Fraco	LNfr

Foi encontrado um número expressivo de 152 casos neste período de apenas cinco anos (2012-2016), superando o número de casos encontrados por Bittencourt et al. (2013) que foi de 144 em um período de 54 anos (1957-2010). Cabe ressaltar que para isto contribuiu o exame visual direto das cartas de PNMM, bem como a maior área do domínio e a melhor qualidade dos dados de alta resolução.

No entanto, alguns aspectos concordaram nos dois procedimentos, como por exemplo, a maior ocorrência de casos no inverno e a média de ocorrência de casos fortes como dois por ano, como se pode ver nos gráficos da Figura 5.

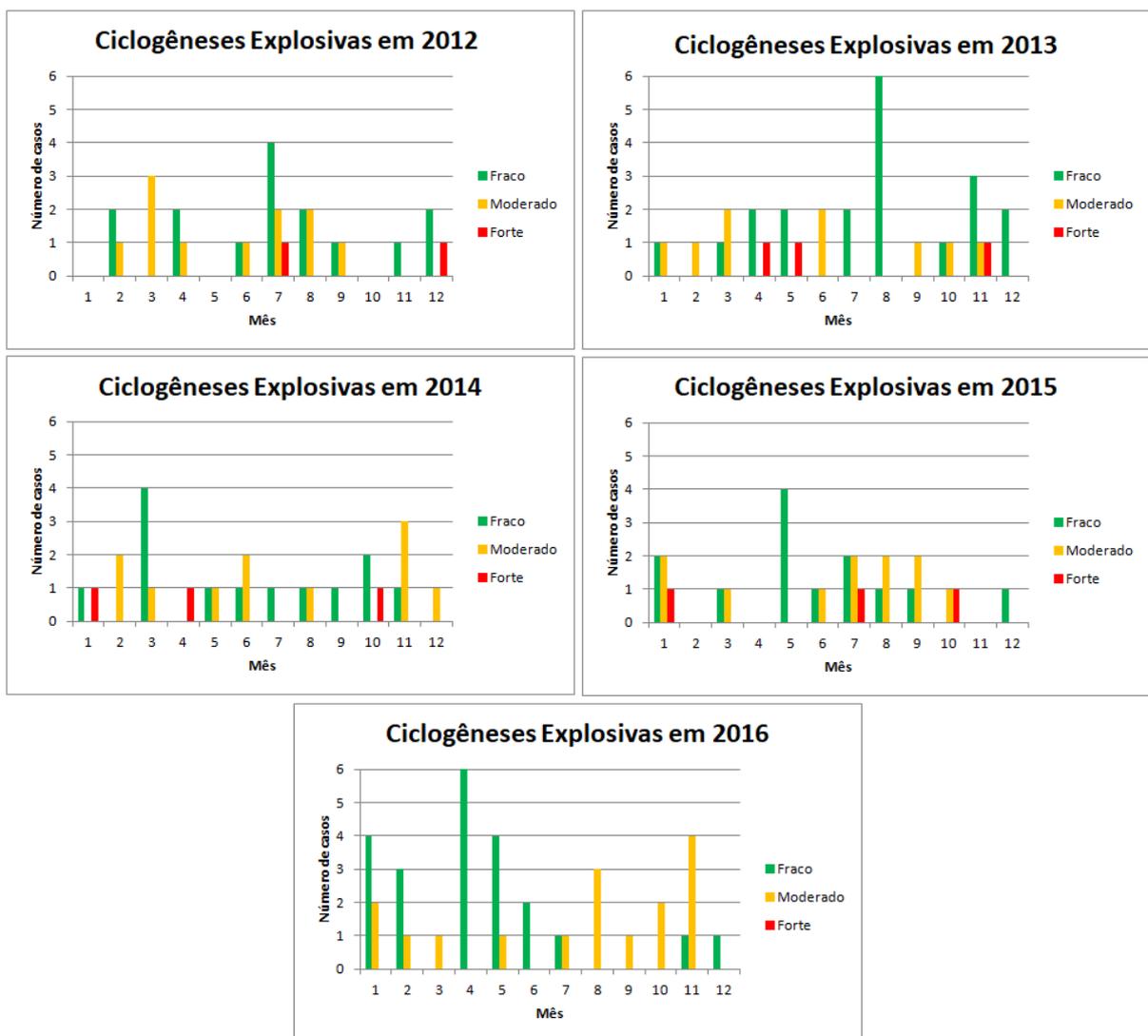


Figura 5 – Gráficos mostrando a distribuição dos casos de ciclogênese segundo a intensidade para o período 2012-2016.

A seguir, foi analisado um caso de cada intensidade para as estações de verão e de inverno, bem como um de primavera que apresentou características muito especiais. Todos os casos selecionados ocorreram em períodos de ENSO neutro.

4.1 Caso 03/01/2014 – Verão - Forte

A frente fria associada a este ciclone causou transtornos no Estado de Santa Catarina com enchentes generalizadas. Por volta das 15h 40min de 03/01/2014, as regiões de Blumenau e Rio do Sul, no Vale do Itajaí, já enfrentavam problemas de falta de energia elétrica por causa da chuva, dos raios, dos ventos fortes que causaram queda de árvores e danos à rede elétrica. Em Blumenau, seis mil unidades consumidoras ficaram sem energia elétrica e na região de Rio do Sul foram 19 mil. As maiores ocorrências foram nas cidades de Camboriú, Gaspar, Luis Alves, Ituporanga, Ibirama e Pouso Redondo (G1_a, 2014).

Nas análises da PNMM (Figura 6a), observa-se, o início do ciclone as 00Z de 03/01/2014, em 40°S, 47°W, com pressão central de 996 hPa, deslocando-se para sudeste até 52°S, 35°W, as 00Z de 04/01/2014, com pressão central de 954 hPa (Figura 6a). Assim, a pressão à superfície diminuiu em 42 hPa durante as 24 horas do dia 03/01/2014, o que para a latitude média do deslocamento (46°S) corresponde a 2,1 Bergeron, classificando esta ciclogênese como explosiva forte (Sanders, 1986). A pressão ainda diminuiu mais em 8 hPa até as 12Z de 04/01/2014. Na mesma figura observa-se, nos contornos de geopotencial em 500 hPa, um cavado frontal entre a Argentina e o Atlântico, cuja circulação ciclônica promove a entrada de ar frio da Antártida no sul do continente.

É observado também, no início do ciclo explosivo (Figura 6a), a defasagem entre o cavado em 500 hPa e o centro de baixa pressão na superfície, típico de um sistema baroclínico em desenvolvimento, com o eixo de cavado inclinado para oeste. Mais ao final deste ciclo esta defasagem desaparece (Figura 6e), com o contorno de altura geopotencial de 5208 m praticamente fechado exatamente sobre o ciclone, indicando o estado de barotropia típico do estágio maduro de um ciclone precedendo a dissipação, embora o aprofundamento da pressão a superfície ainda continue pelas doze horas seguintes (não mostrado aqui), praticamente invertendo a inclinação do eixo de cavado.

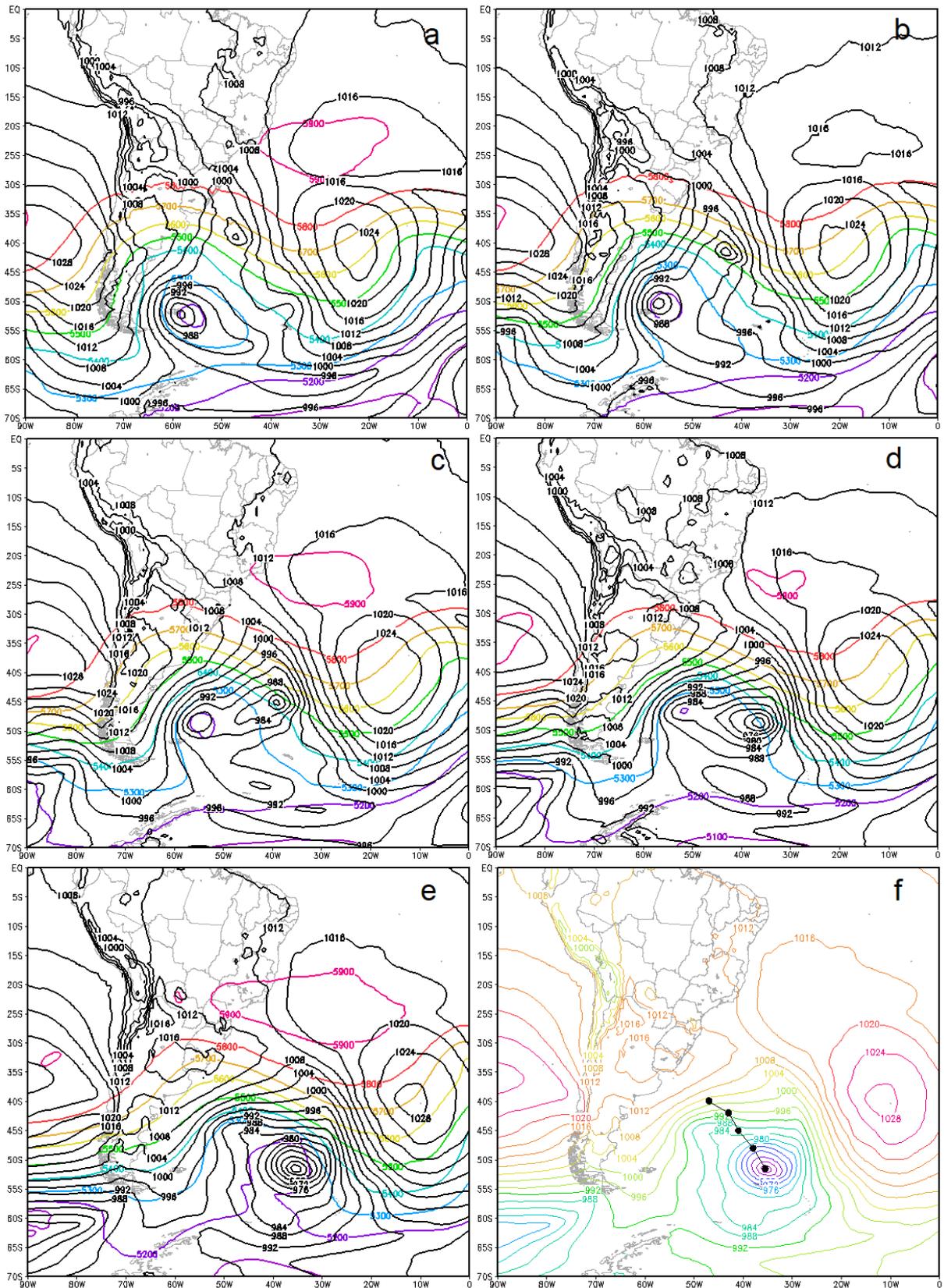


Figura 6 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em cores). a) 03/01/2014 00Z, b) 03/01/2014 06Z, c) 03/01/2014 12Z, d) 03/01/2014 18Z, e) 04/01/2014 00Z, f) PNMM 04/01/2014 00Z e trajetória.

Desde o início, se observa, por meio de seção vertical (Figura 7), valores de Vorticidade Potencial de Ertel maiores (em módulo) do que 1,5 Unidades de Vorticidade Potencial, representativo da Tropopausa Dinâmica (TD) (Santurette e Georgiev, 2005).

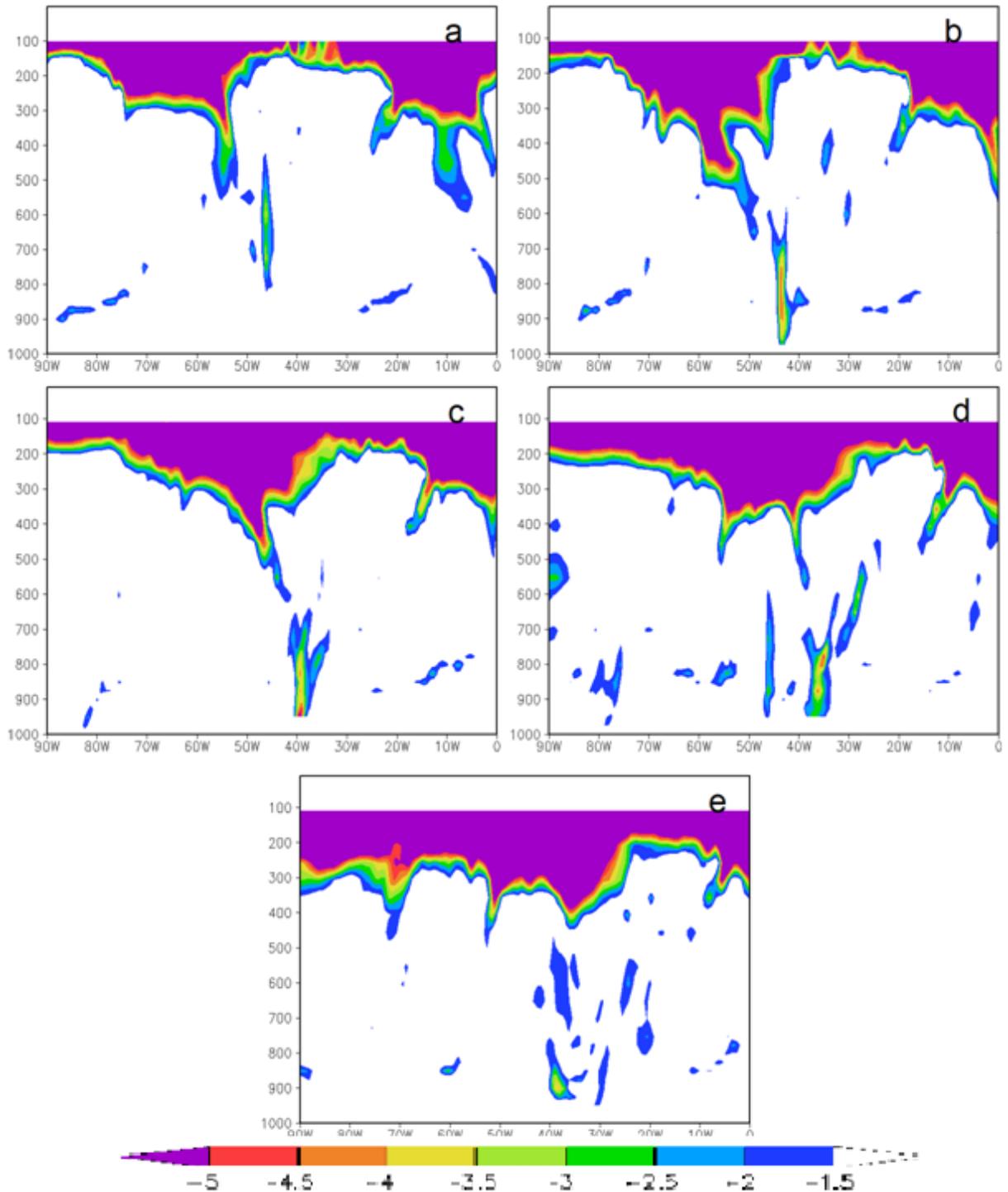


Figura 7 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU. a) 40°S, 03/01/2014 00z; b) 42°S, 03/01/2014 06Z; c) 45°S, 03/01/2014 12Z; d) 48°S, 03/01/2014 18Z, e) 50°S, 04/01/2014 00Z.

Evidenciou-se na Figura 7a uma dobra ou Anomalia da TD (ATD) em 58°W, defasada para oeste em relação ao centro do Ciclone Explosivo em superfície (47°W segundo a Figura 6a). Na Figura 7b já se podia ver um máximo de EPV na superfície em 43°W, o qual se intensificou à medida que o ciclone evoluiu para sudeste, enquanto a dobra chegou a alcançar perto da superfície de 700 hPa..

Na Figura 8(a, c, e, g) são apresentadas as imagens do satélite GOES 13, no canal do vapor d'água, e ao lado a EPV (cores) com a PNMM (contornos), correspondentes aos horários entre 06Z do dia 03 às 00Z do dia 04/01/2014, mostrando que a faixa estreita com um forte gradiente de umidade indicativa de intrusão de ar seco e frio proveniente da estratosfera, visível na imagem de satélite, coincide, perfeitamente, com a posição da intersecção da anomalia da tropopausa dinâmica com o nível de 500 hPa, orientada de noroeste para sudeste, passando pelo sul do Uruguai e se estendendo até o centro do ciclone, concordando com Santurette e Georgiev (2005) e Vaughan et al. (1994).

O campo de EPV em 500 hPa (Figura 8- b, d, f, h) mostra que a ATD localiza-se atrás da frente fria, tendendo a ficar paralela a frente à medida que o sistema se aprofunda, enquanto o ar seco da estratosfera é introduzido e converge para o centro do CE até a seclusão (padrão em que o ar quente que normalmente ascenderia sobre a rampa de ar frio da frente é empurrado pelo ar frio e seco introduzido através da dobra da tropopausa sendo obrigado a voltar enquanto boa parte deste ar quente fica aprisionado abaixo do ar introduzido, só conseguindo ascender através do ar frio de uma forma mais vagarosa do que seria no tradicional processo de oclusão).

Na Figura 9, as linhas de corrente em 250 hPa, com magnitude sombreada em cores, mostram a corrente de jato perturbada, como mostra a forte ondulação, com o escoamento de oeste confluindo sobre o sul da América do Sul e difluindo próximo da costa leste na região onde se formou o ciclone.

Na Figura 10, as linhas de corrente em 850 hPa mostram que houve contribuição do escoamento de ar quente e úmido proveniente da Amazônia para a região do ciclone.

Na Figura 11, os altos valores de Tendência do Ozônio coincidem com a vanguarda da ATD, o que em acordo com as imagens de satélite no canal do vapor d'água, confirma que através desta "dobra", ocorre a intrusão de ar da estratosfera na troposfera conforme definido por Reed (1955).

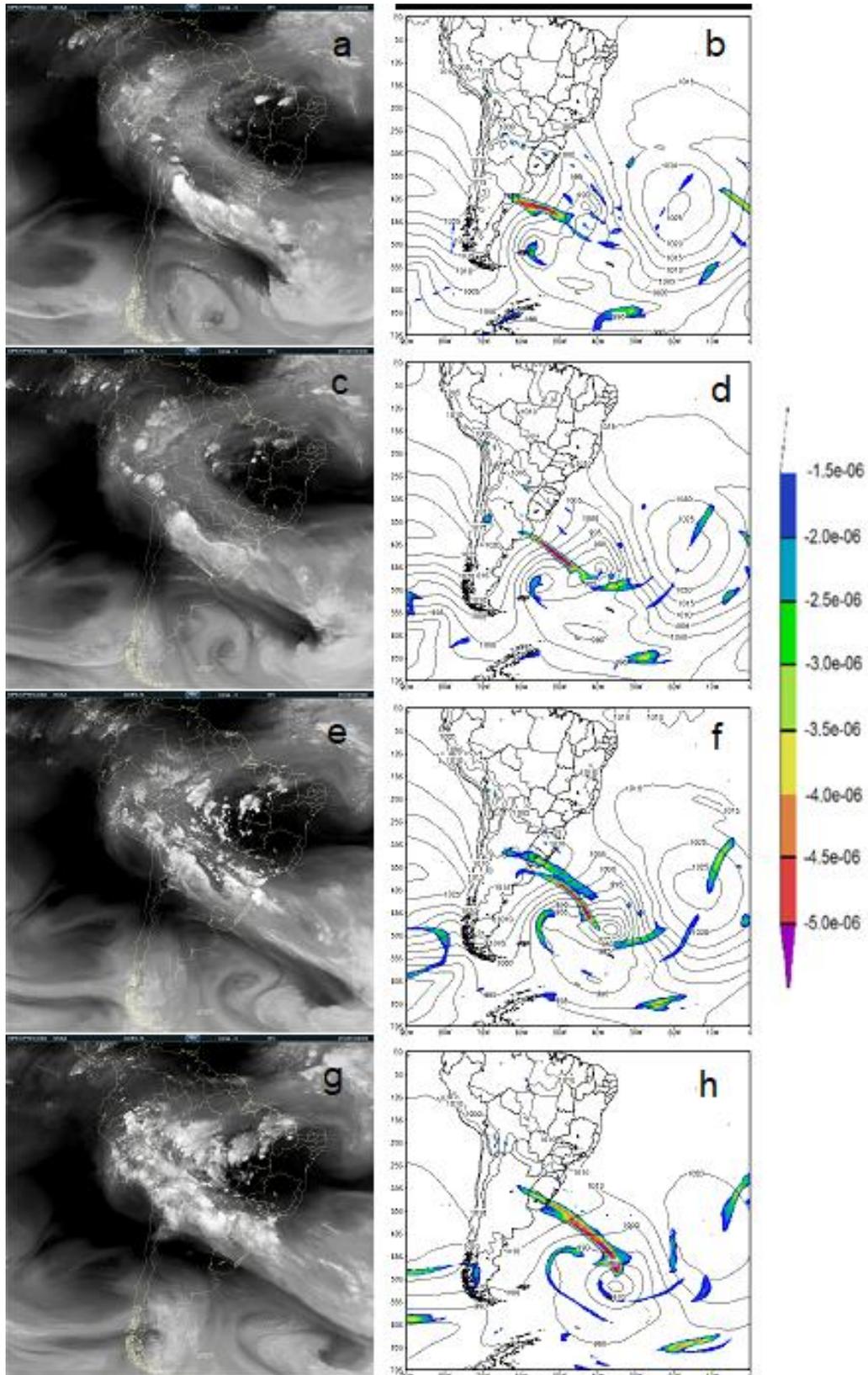


Figura 8 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 03/01/2014 06Z, (c) 03/01/2014 12Z, (e) 03/01/2014 18Z, (g) 04/01/2014 00Z, e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 03/01/2014 06Z, (d) 03/01/2014 12Z, (f) 03/01/2014 18Z, (h) 04/01/2014 00Z.

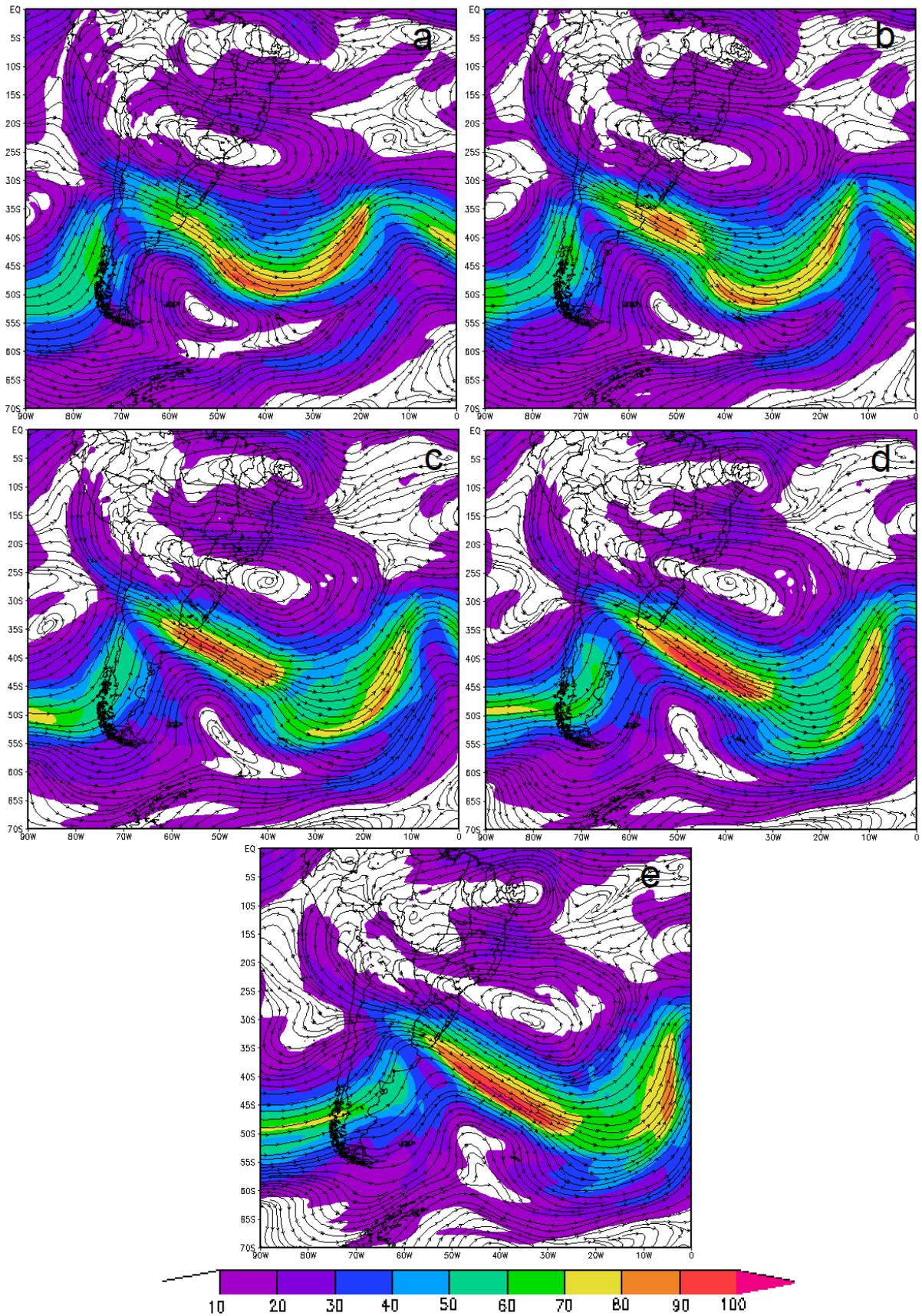


Figura 9 – Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores. a) 03/01/2014 00Z, b) 03/01/2014 06Z, c) 03/01/2014 12Z, d) 03/01/2014 18Z, e) 04/01/2014 00Z.

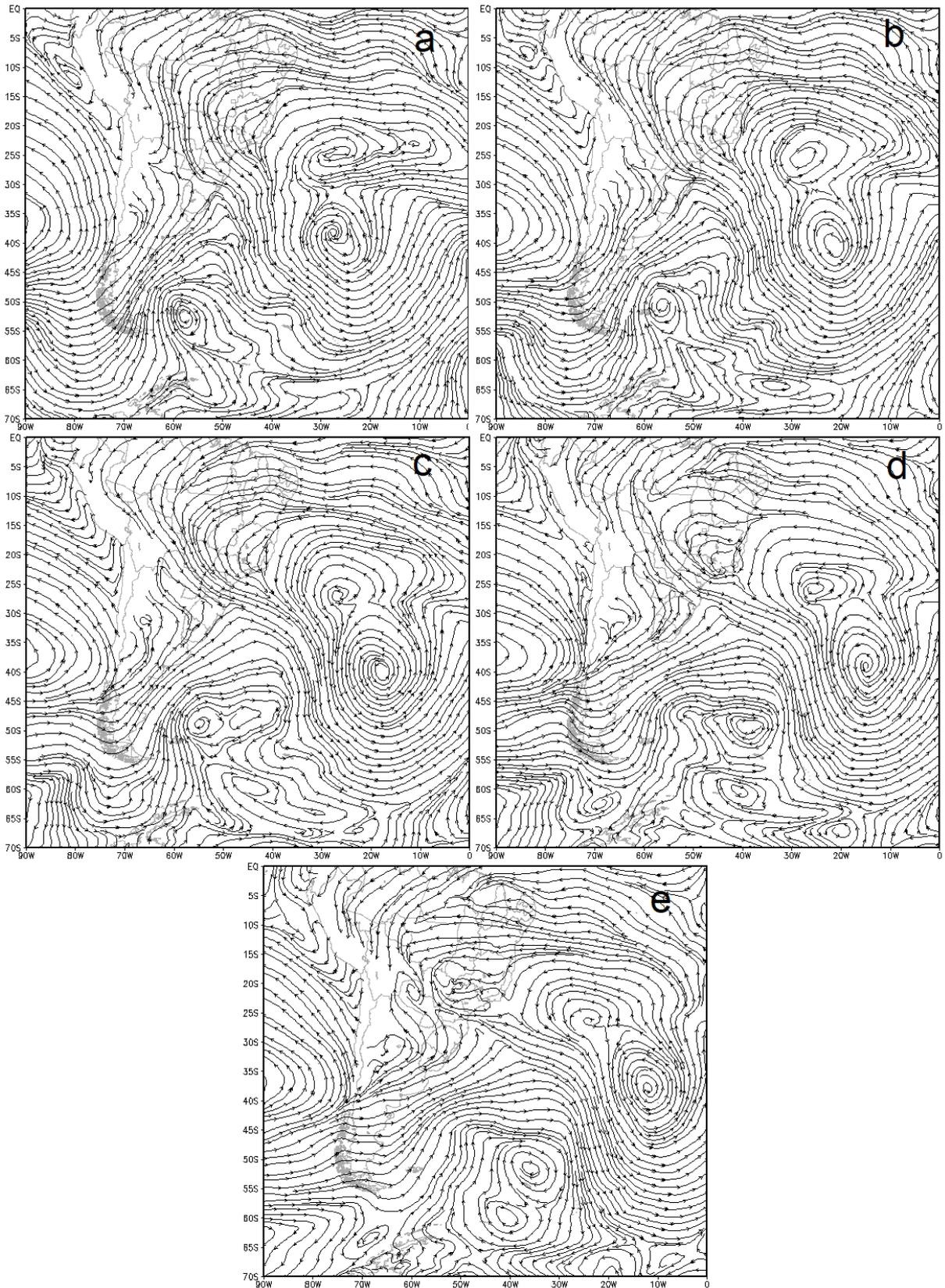


Figura 10 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 03/01/2014 00Z, b) 03/01/2014 06Z, c) 03/01/2014 12Z, d) 03/01/2014 18Z, e) 04/01/2014 00Z.

A oeste, na dobra, o ar introduzido é seco, proveniente da baixa estratosfera, e a leste o ar seco introduzido é rico em ozônio da camada mais acima na estratosfera.

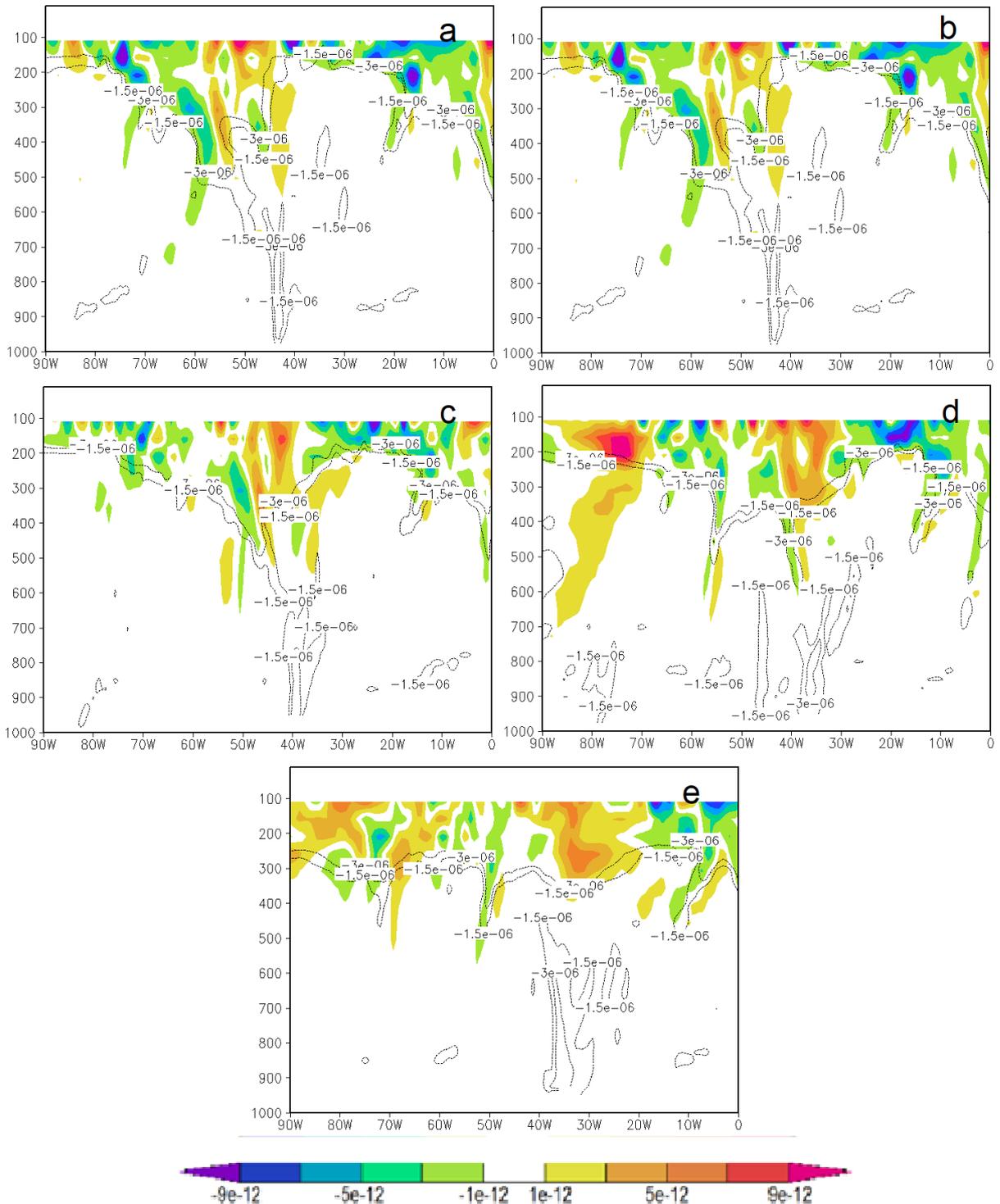


Figura 11 - Seções verticais de EPV menor ou igual a -1,5 PVU (contornos) e tendência do Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 40°S, 03/01/2014 00z; b) 42°S, 03/01/2014 06z; c) 45°S, 03/01/2014 12z; d) 48°S, 03/01/2014 18z, e) 50°S, 04/01/2014 00z.

Este caso apresenta um comportamento muito condizente com a literatura científica (e.g. Santurette e Georgiev, 2005) referente aos padrões de movimento vertical descendente de ar seco da estratosfera a oeste da ATD em 60°W e movimento ascendente de ar úmido a leste 47°W, bem definidos na Figura 12a, 12b e 12c, com os movimentos descendentes a oeste da ATD diminuindo em 12d e 12e.

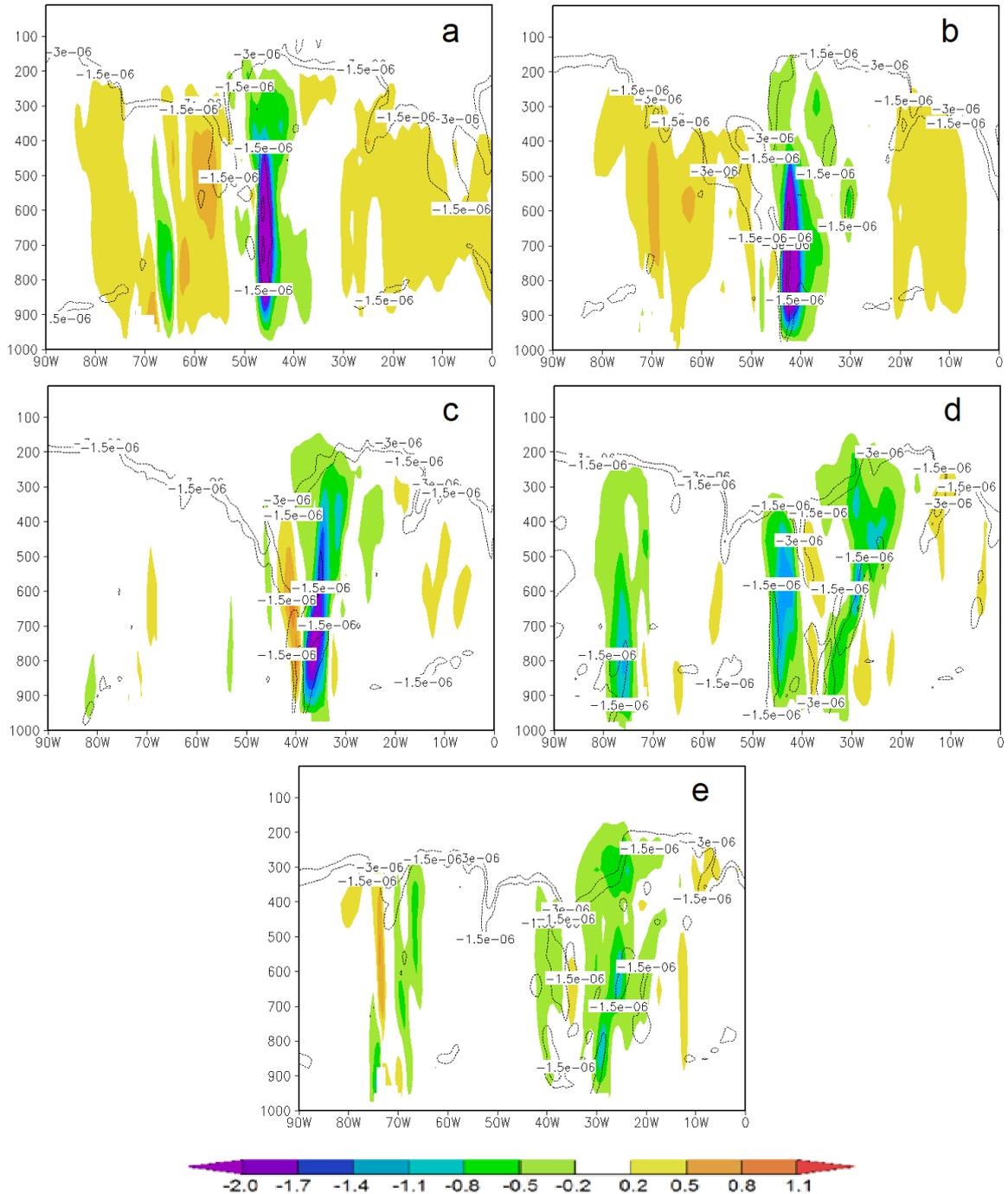


Figura 12 - Secção vertical, EPV maior ou igual, em módulo, a 1,5 PVU (contornos) e Velocidade Vertical Ômega (cores). a) 40°S, 03/01/2014 00z; b) 42°S, 03/01/2014 06z; c) 45°S, 03/01/2014 12z; d) 48°S, 03/01/2014 18z, e) 50°S, 04/01/2014 00z.

Observou-se também (Figura 13) que valores de umidade relativa entre 10 e 20% coincidem exatamente com a EPV de $-1,5$ PVU, servindo como um contorno da TD durante a maior parte do tempo, bem como das regiões de movimento descendente. Nos níveis baixos e nos movimentos ascendentes a umidade relativa é maior.

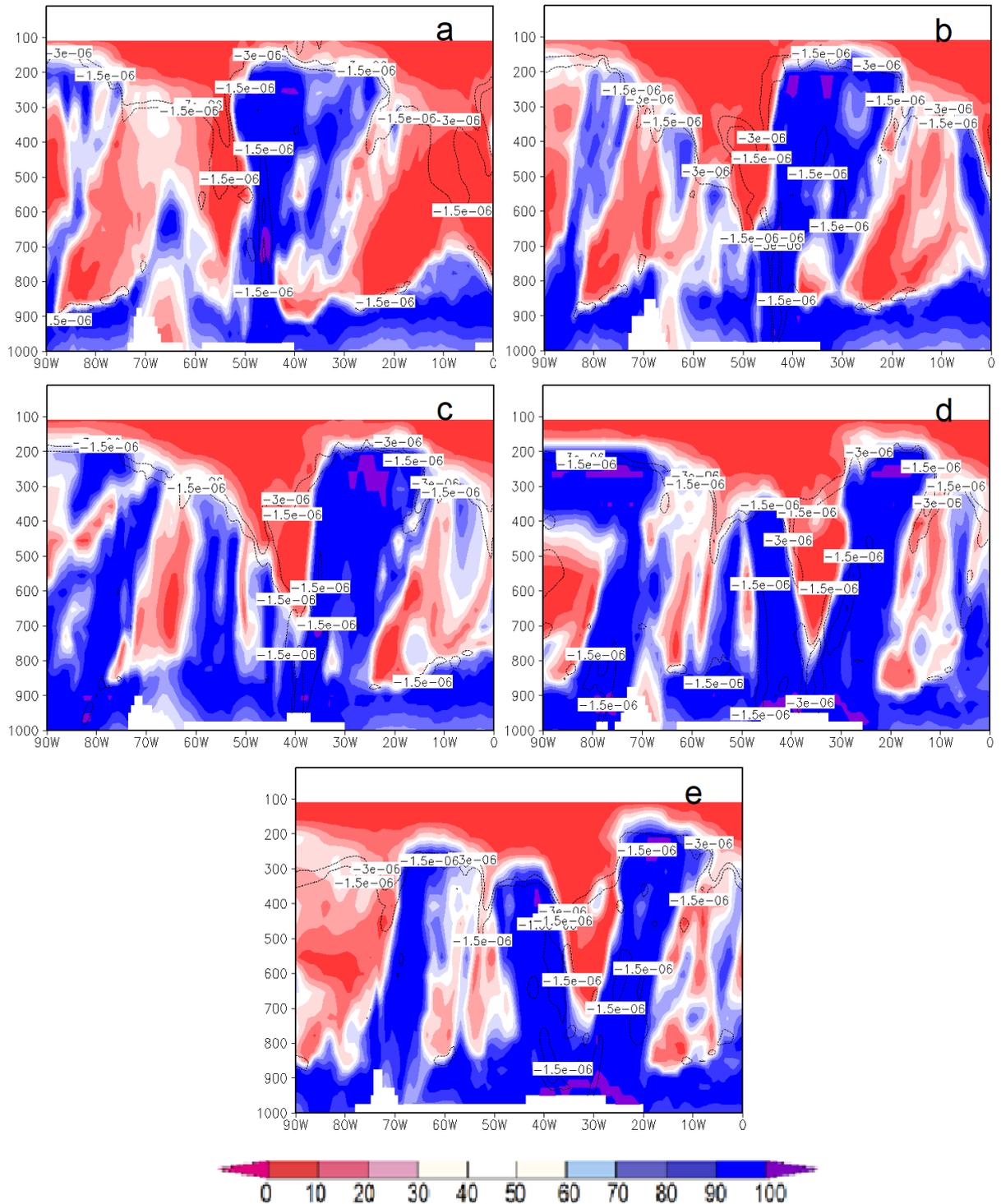


Figura 13 - Seção vertical, EPV maior ou igual, em módulo, a $1,5$ PVU (contornos) e Umidade relativa (cores): a) 40°S , 03/01/2014 00z; b) 42°S , 03/01/2014 06z; c) 45°S , 03/01/2014 12z; d) 48°S , 03/01/2014 18z, e) 50°S , 04/01/2014 00z.

Neste caso, a localização inicial na região da confluência entre a corrente oceânica quente do Brasil e a corrente fria das Malvinas indica que o mecanismo mais influente para a ciclogênese foi a instabilidade baroclínica. Embora clássico do ponto de vista descritivo, este caso foi surpreendente pela sua intensidade, por ter ocorrido em janeiro, mês em que a média climatológica é de apenas um caso, e pela ausência de fluxos de calor sensível de origem turbulenta significativos no início, manifestando-se apenas no final, enquanto os fluxos de calor latente existiram em todo o ciclo na região atrás da frente fria (Figuras 14 e 15). Estes fluxos foram apontados em outros trabalhos (e.g. Piva et al., 2011), por terem influência no desenvolvimento de ciclones explosivos.

Na Figura 16, os valores de energia cinética integrada em 42 níveis de pressão na vertical, destacam a trajetória do jato subtropical, mais deslocado para o sul em função do período sazonal do verão, sendo marcante o aumento destes valores sobre a região onde o ciclone se formou durante todo o ciclo explosivo e nas doze horas subsequentes, enquanto o aprofundamento da pressão central em superfície ocorreu.

Na Figura 17, o fluxo zonal de energia cinética integrado na vertical, o qual compõe a maior parte da energia cinética total e é proporcional à energia do escoamento médio, mostra o mesmo comportamento descrito na Figura 16.

Na Figura 18, o fluxo meridional de energia cinética integrado na vertical, o qual é proporcional a energia cinética da perturbação e, portanto tem valores muito menores do que aqueles do escoamento médio, mostra também um apreciável aumento de seus valores na região do jet streak (máximo de velocidade na corrente de jato) durante o ciclo explosivo e nas doze horas subsequentes.

O aumento da energia cinética, bem como dos fluxos zonais e meridionais desta energia mostram que a evolução baroclínica foi muito vigorosa e que também o estágio barotrópico foi vigoroso com uma boa contribuição dos fluxos de calor latente e sensível nesta etapa do desenvolvimento do ciclone.

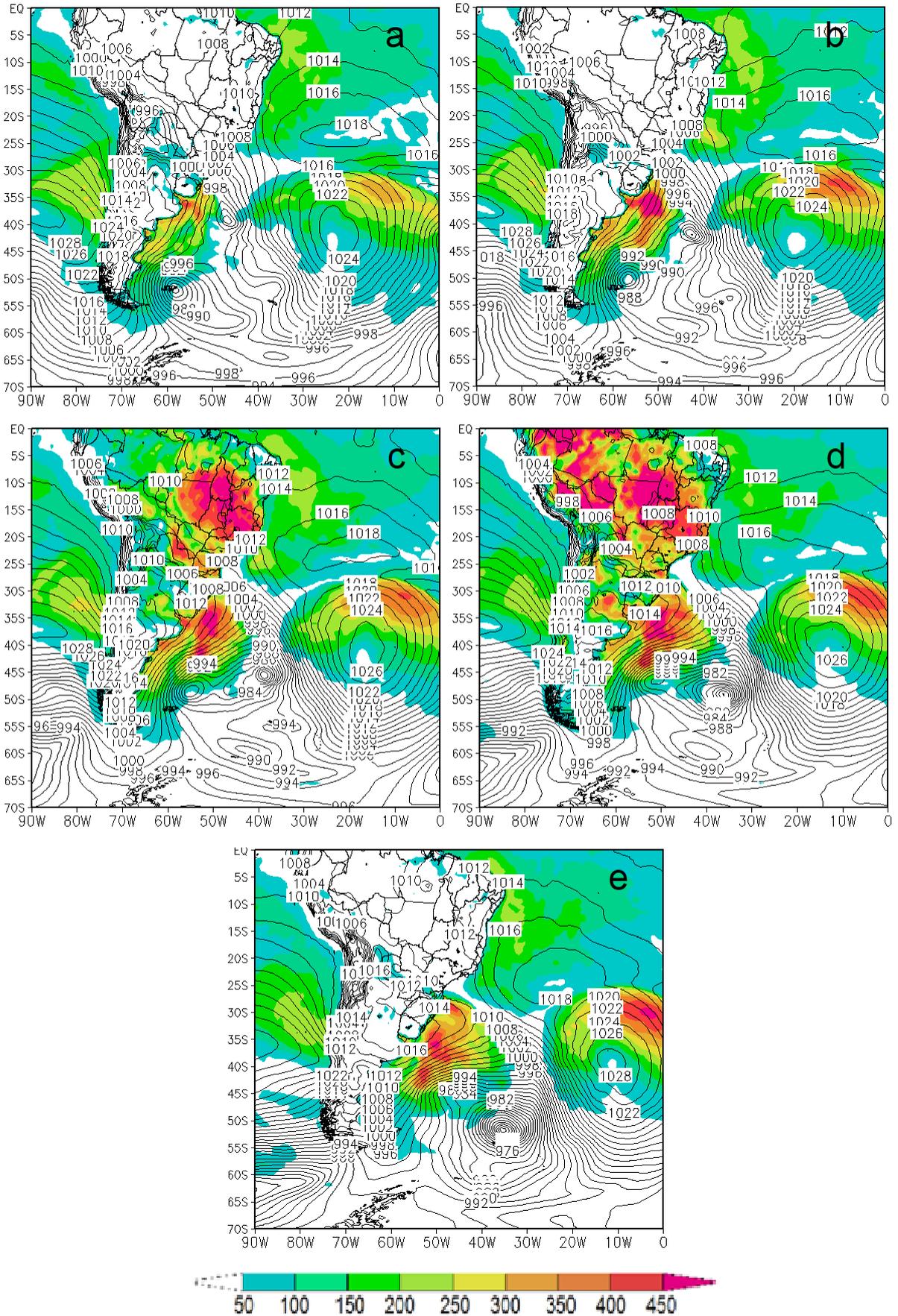


Figura 14 - Campo de PNMM (contorno) e fluxo de calor latente em $W m^{-2}$ (sombreado). (a) 03/01/2014 00Z, (b) 03/01/2014 06Z, (c) 03/01/2014 12Z, (d) 03/01/2014 18Z, (e) 04/01/2014 00Z.

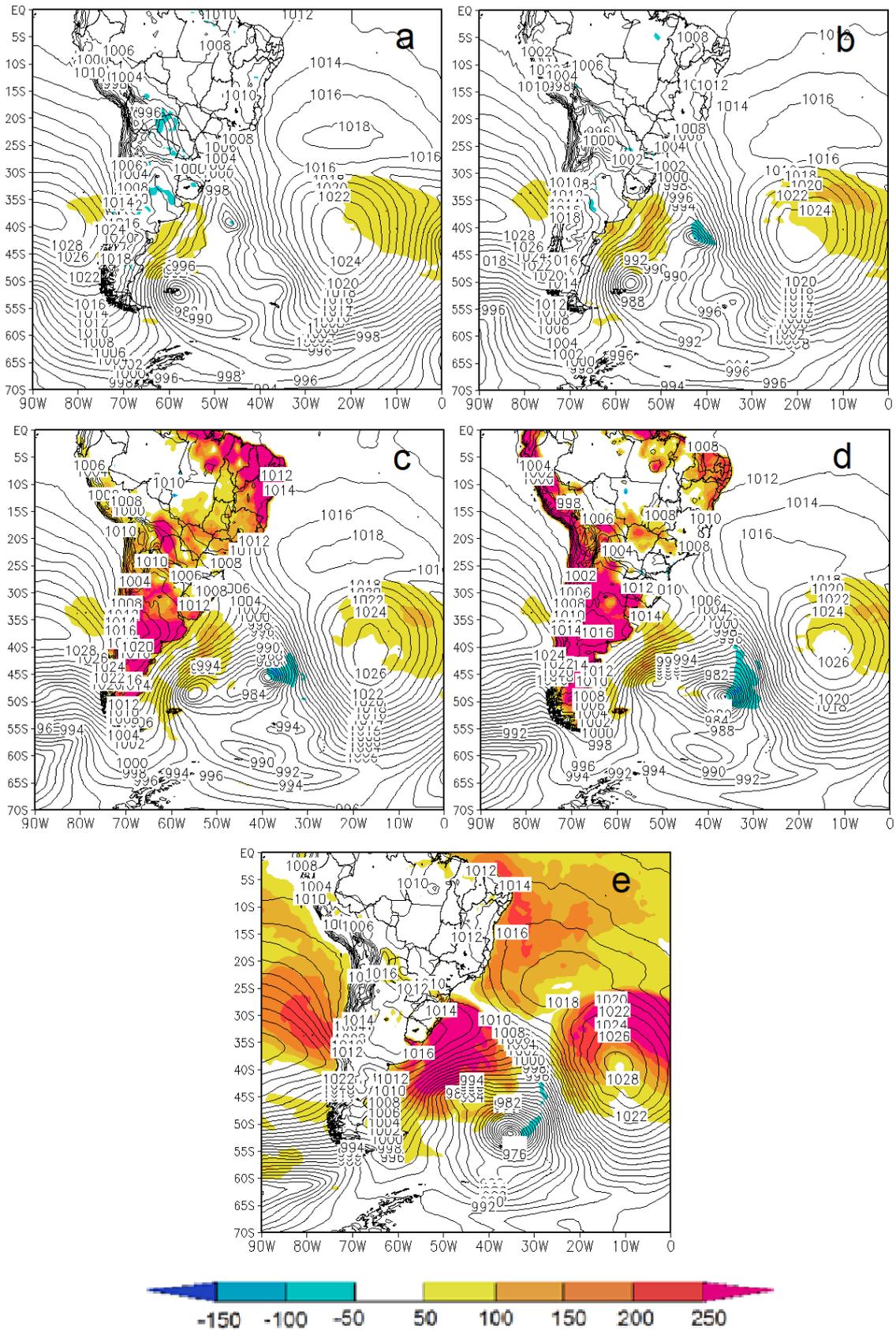


Figura 15 - Campo de PNMM (contorno) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta em $W m^{-2}$ (sombreado em cores). (a) 03/01/2014 00Z, (b) 03/01/2014 06Z, (c) 03/01/2014 12Z, (d) 03/01/2014 18Z, (e) 04/01/2014 00Z.

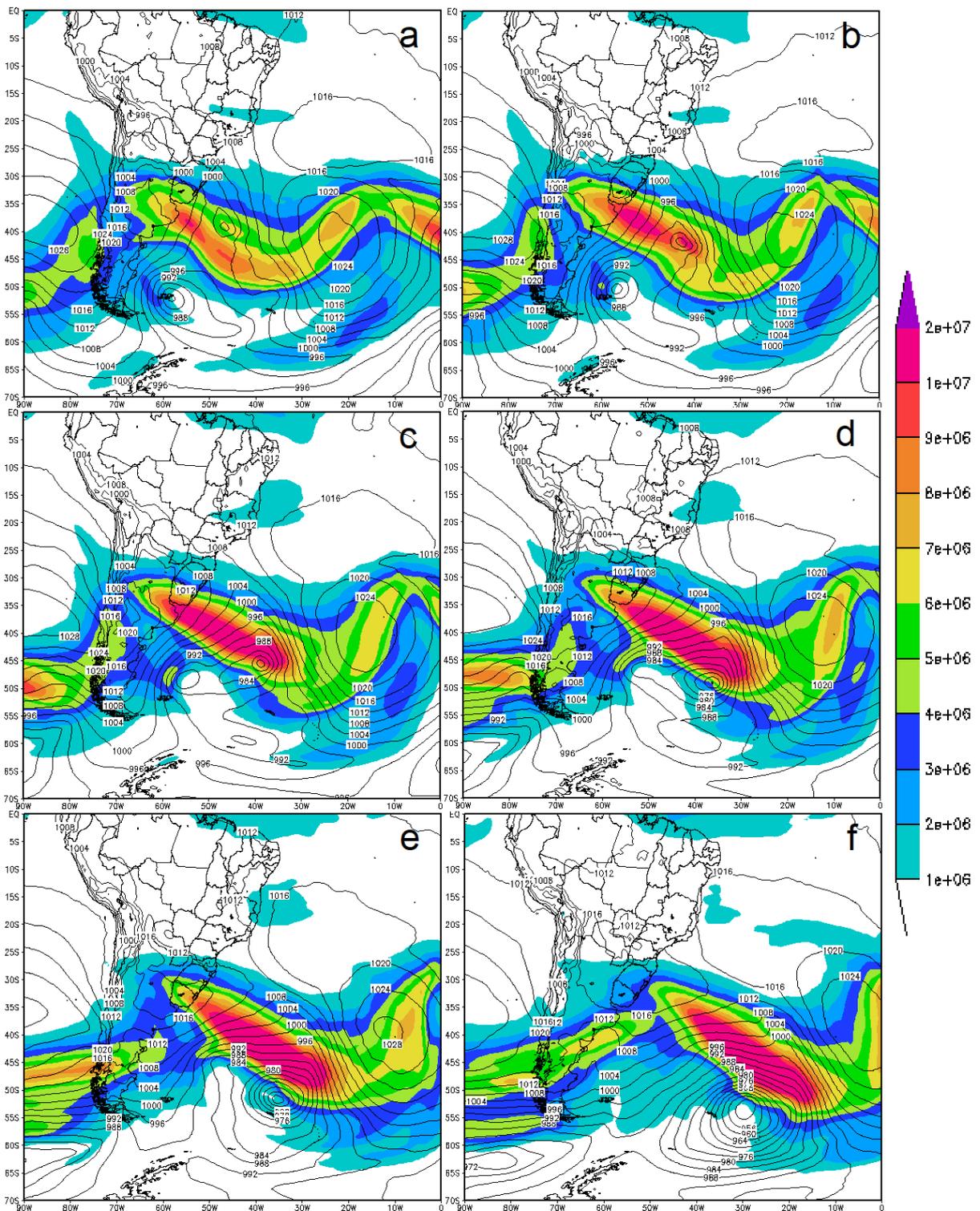


Figura 16 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 03/01/2014 00Z, b) 03/01/2014 06Z, c) 03/01/2014 12Z, d) 03/01/2014 18Z, e) 04/01/2014 00Z, f) 04/01/2014 12Z .

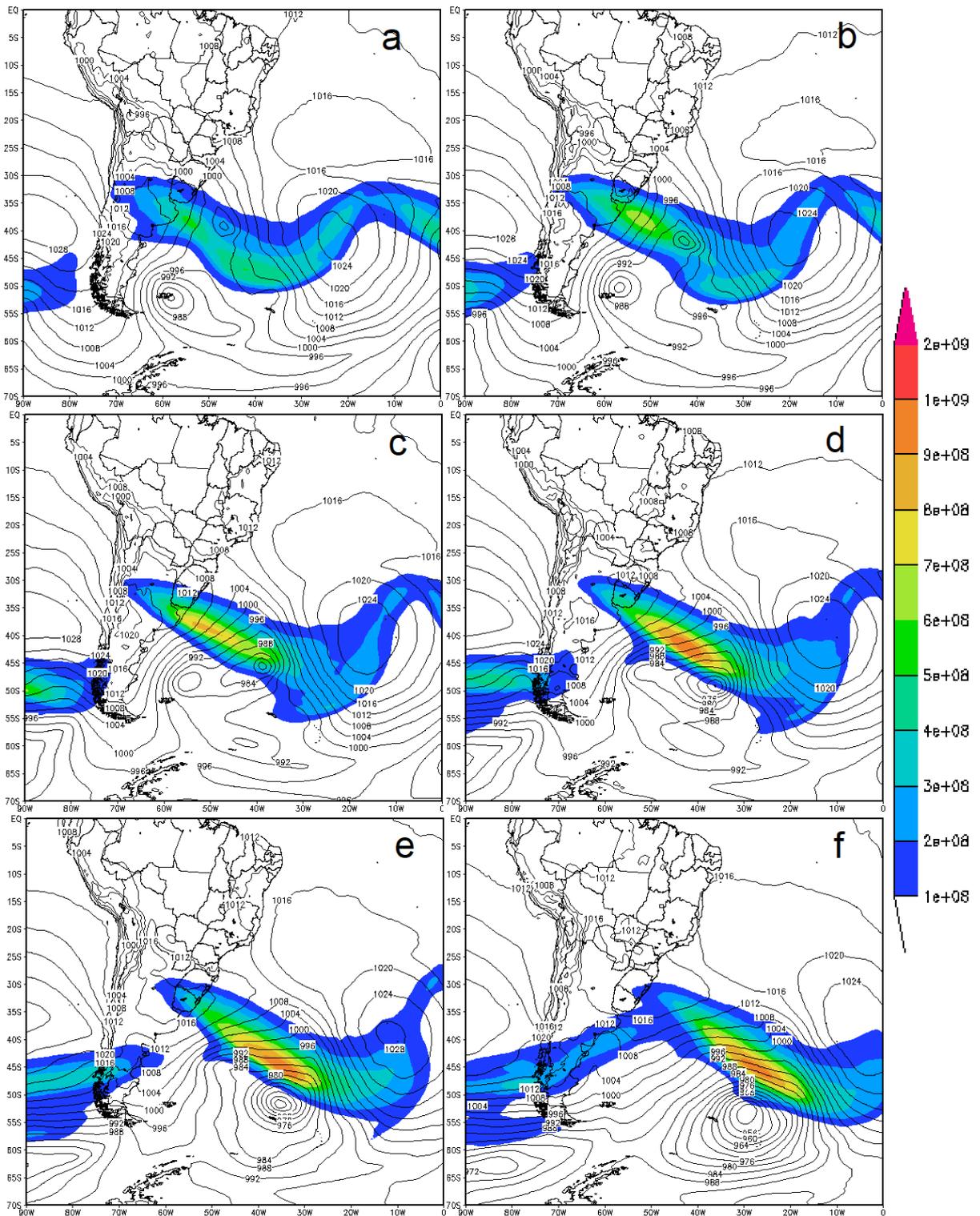


Figura 17 – Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 03/01/2014 00Z, b) 03/01/2014 06Z, c) 03/01/2014 12Z, d) 03/01/2014 18Z, e) 04/01/2014 00Z, f) 04/01/2014 12Z .

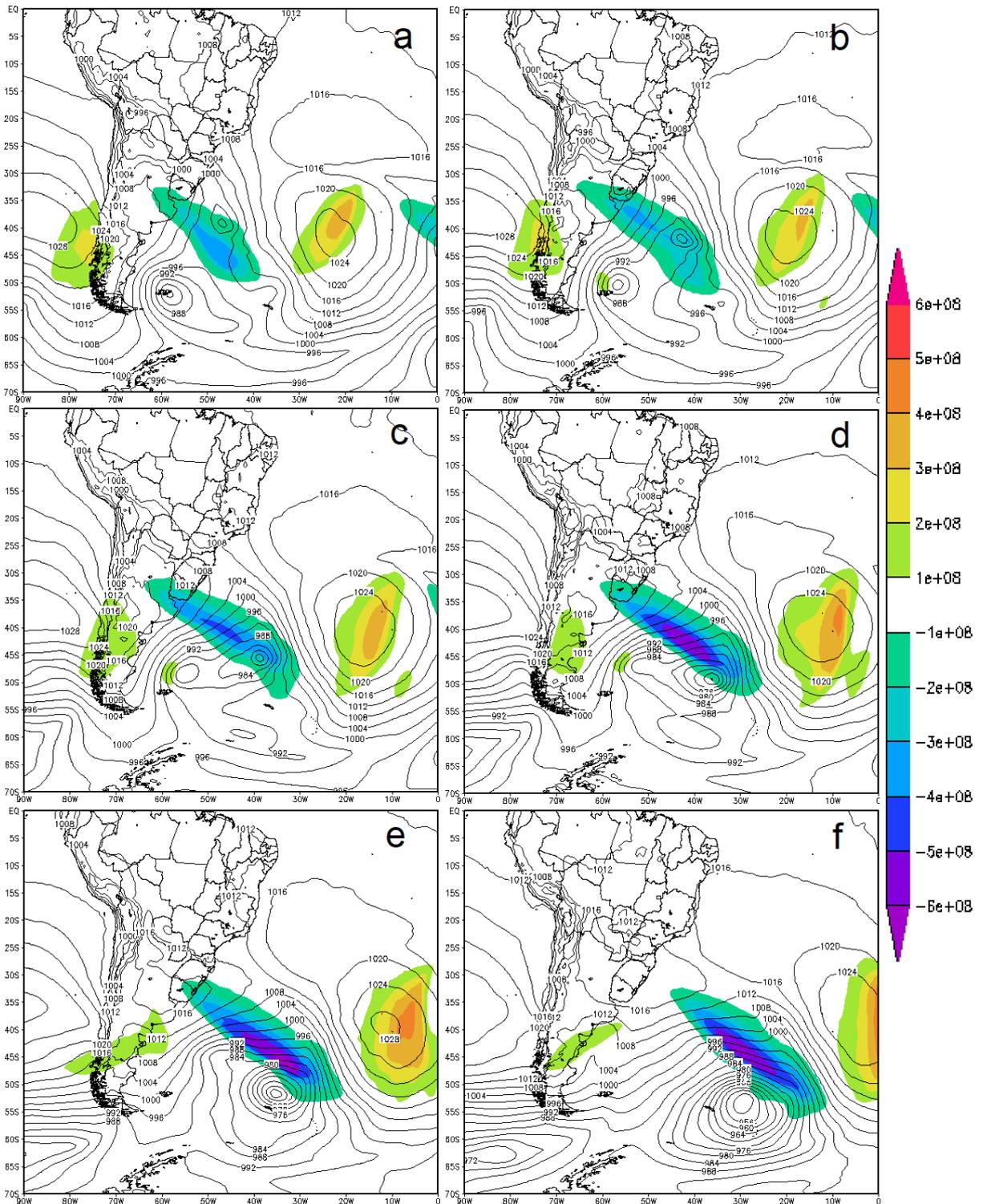


Figura 18 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. a) 03/01/2014 00Z, b) 03/01/2014 06Z, c) 03/01/2014 12Z, d) 03/01/2014 18Z, e) 04/01/2014 00Z, f) 04/01/2014 12Z .

4.2 Caso 12/02/2014 - Verão - Moderado

Em 12/02/2014 foram registrados estragos em prédios, árvores, postes e na rede elétrica em cidades no Vale do Taquari-RS e também no Uruguai (G1_b, 2014).

Como pode ser visto na Figura 19a, este ciclone iniciou seu desenvolvimento explosivo no dia 12/02/2014, as 12Z (Figura 19a), com uma pressão de 988 hPa no centro localizado em 50°S, 37°W, o qual apresentou uma queda de pressão de 30 hPa em 24 horas, enquanto se deslocava para sudeste até as 12Z do dia 13/02/2014 (Figura 19e), quando alcançou 53°S, 21°W com 958 hPa. A TNA calculada para a média destas latitudes (52°) e para esta queda de pressão foi de 1,37 Bergeron, o que classifica este caso como ciclogênese explosiva moderada.

Nesta mesma figura, observa-se através dos contornos de geopotencial em 500 hPa e de PNMM, uma defasagem entre o cavado de ar superior (pouco pronunciado em 62°W) e o centro de baixa pressão na superfície, indicando a baroclinia do sistema pela inclinação do eixo de cavado em direção ao ar mais frio, durante o desenvolvimento da ciclogênese rápida, enquanto no final do ciclo explosivo, o cavado de ar superior e o centro de baixa pressão na superfície estão em fase, indicando o estado de barotropia característico do estado maduro.

A Figura 20a mostra, em secção vertical nas latitudes em que o ciclone se encontrava durante o desenvolvimento do ciclo explosivo, a evolução da anomalia da tropopausa dinâmica, através do campo de EPV com valores maiores (em módulo) do que 1,5 PVU em 42°W, com a consequente resposta na superfície pelo surgimento de um núcleo com altos valores de EPV em 37°W, o qual coincide, na sequência, com as posições ocupadas pelo ciclone em rápido desenvolvimento, indicando que o desenvolvimento esteve associado à referida anomalia da tropopausa dinâmica pela intrusão de ar seco estratosférico proveniente da mesma.

Na Figura 21(a, c, e, g), as imagens de satélite no canal do vapor de água mostram a faixa relativamente estreita com um forte gradiente de umidade, indicando a dobra da tropopausa por onde ocorre a intrusão de ar seco estratosférico com altos valores de EPV no centro do ciclone, conforme mostram os campos de EPV em 500 hPa e PNMM na Figura 21(b, d, f, h).

Na Figura 22, as linhas de corrente em 250 hPa mostram a confluência do escoamento neste nível sobre o sul do continente e difluência sobre o oceano na região onde o ciclone se formou, embora a perturbação não seja forte, e o escoamento da corrente de jato siga quase zonal.

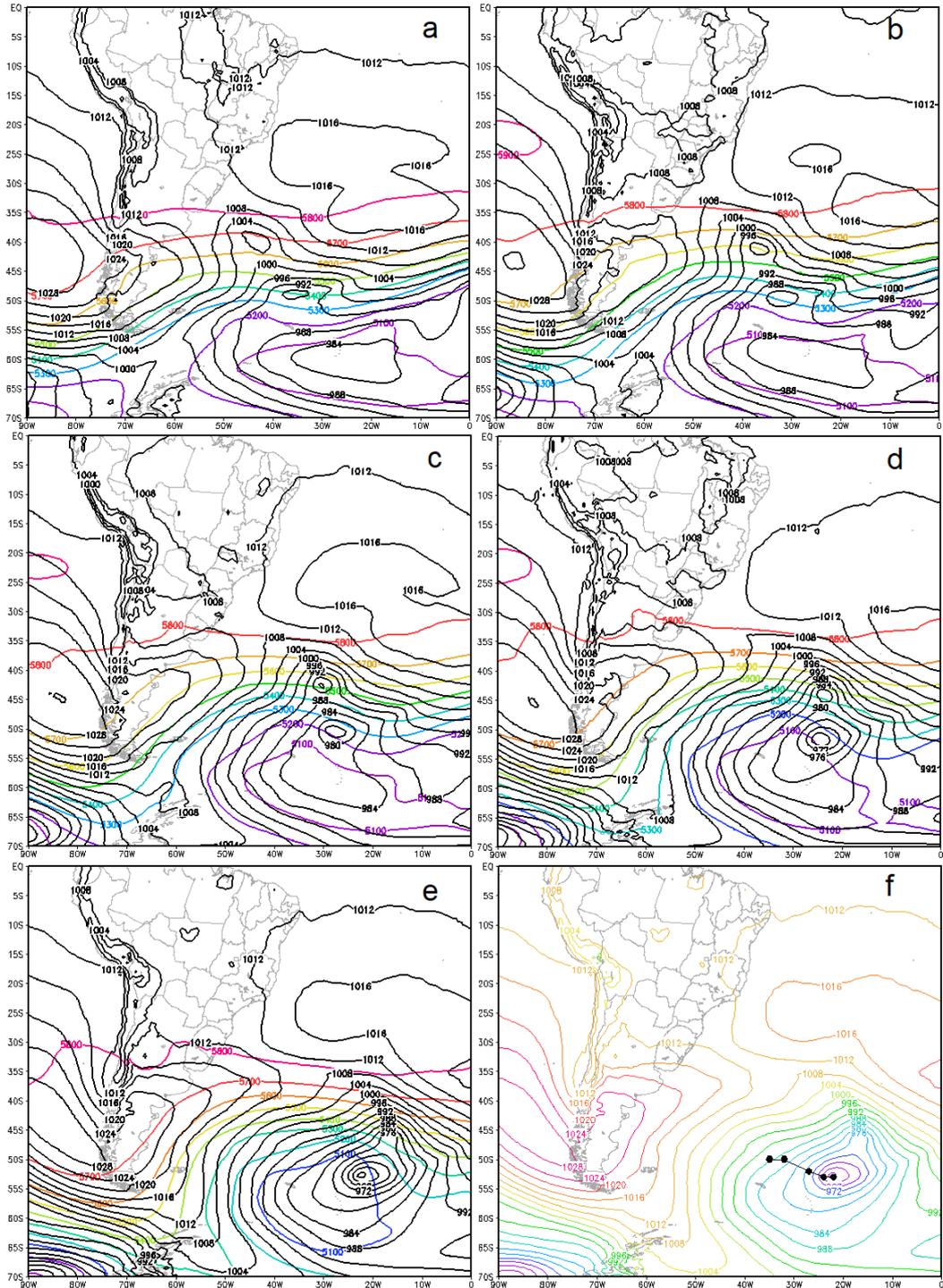


Figura 19 - Pressão ao nível médio do mar (contornos coloridos) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em preto). a) 12/02/2014 12Z, b) 12/02/2014 18Z, c) 13/02/2014 00Z, d) 13/02/2014 06Z, e) 13/02/2014 12Z, f) PNMM 13/02/2014 12Z e trajetória.

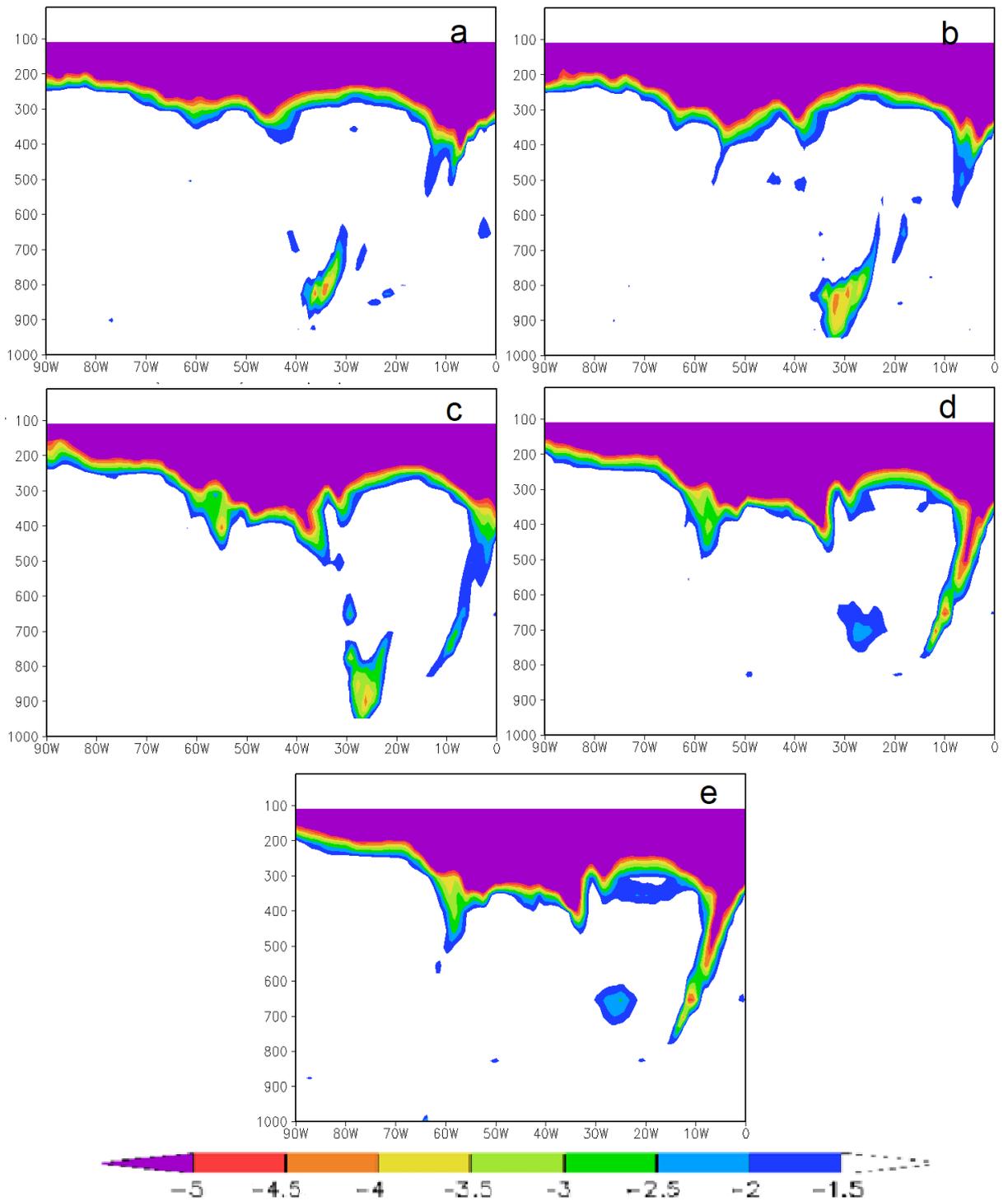


Figura 20 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU: a) 50°S, 12/02/2014 12z; b) 50°S, 12/02/2014 18z; c) 51°S, 13/002/2014 00Z; d) 52°S, 13/02/2014 06Z, e) 53°S, 13/02/2014 12Z.

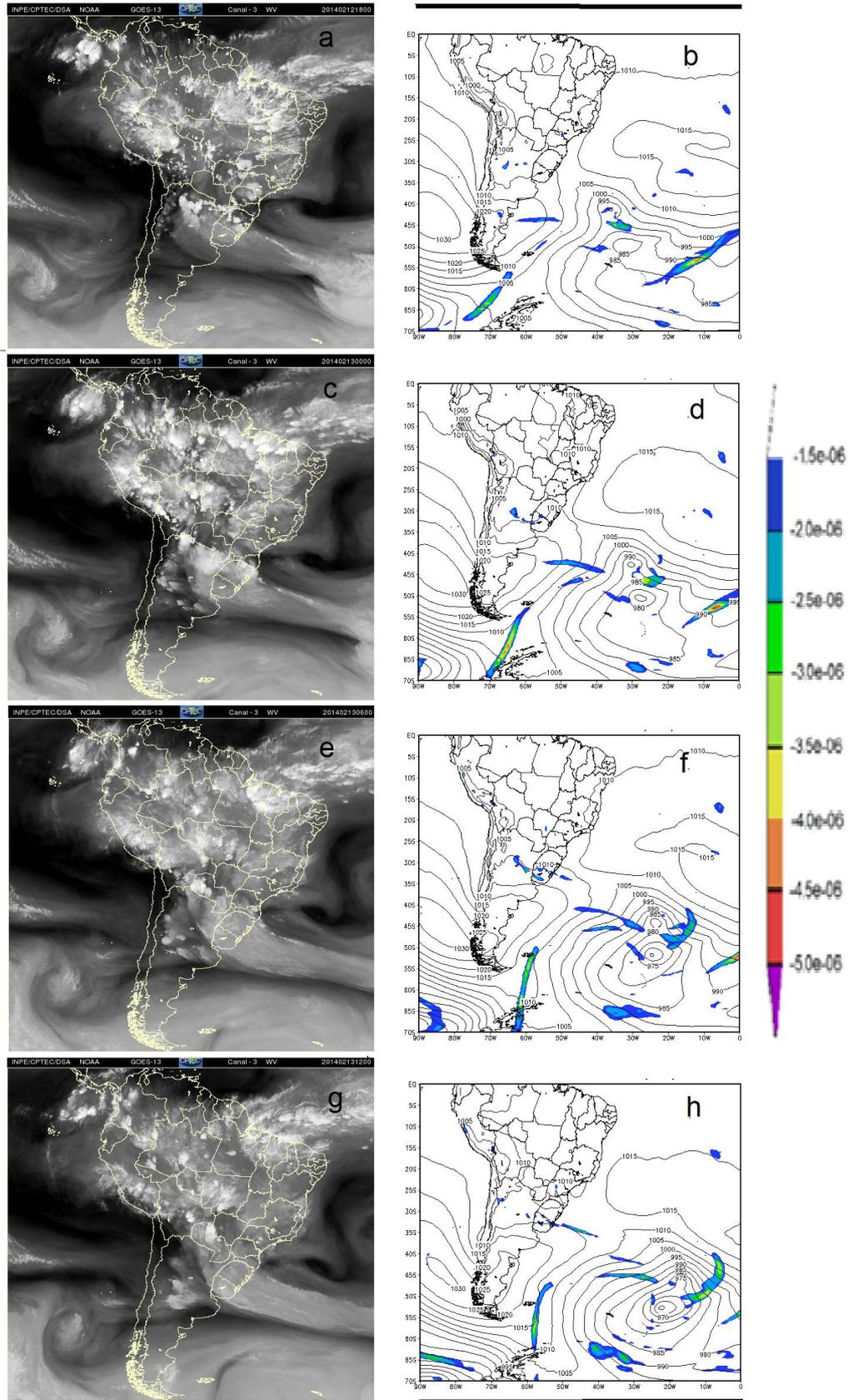


Figura 21 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 12/02/2014 18Z, (c) 13/02/2014 00Z, (e) 13/02/2014 06Z, (g) 13/02/2014 12Z, e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 12/02/2014 18Z, (d) 13/02/2014 00Z, (f) 13/02/2014 06Z, (h) 13/02/2014 12Z.

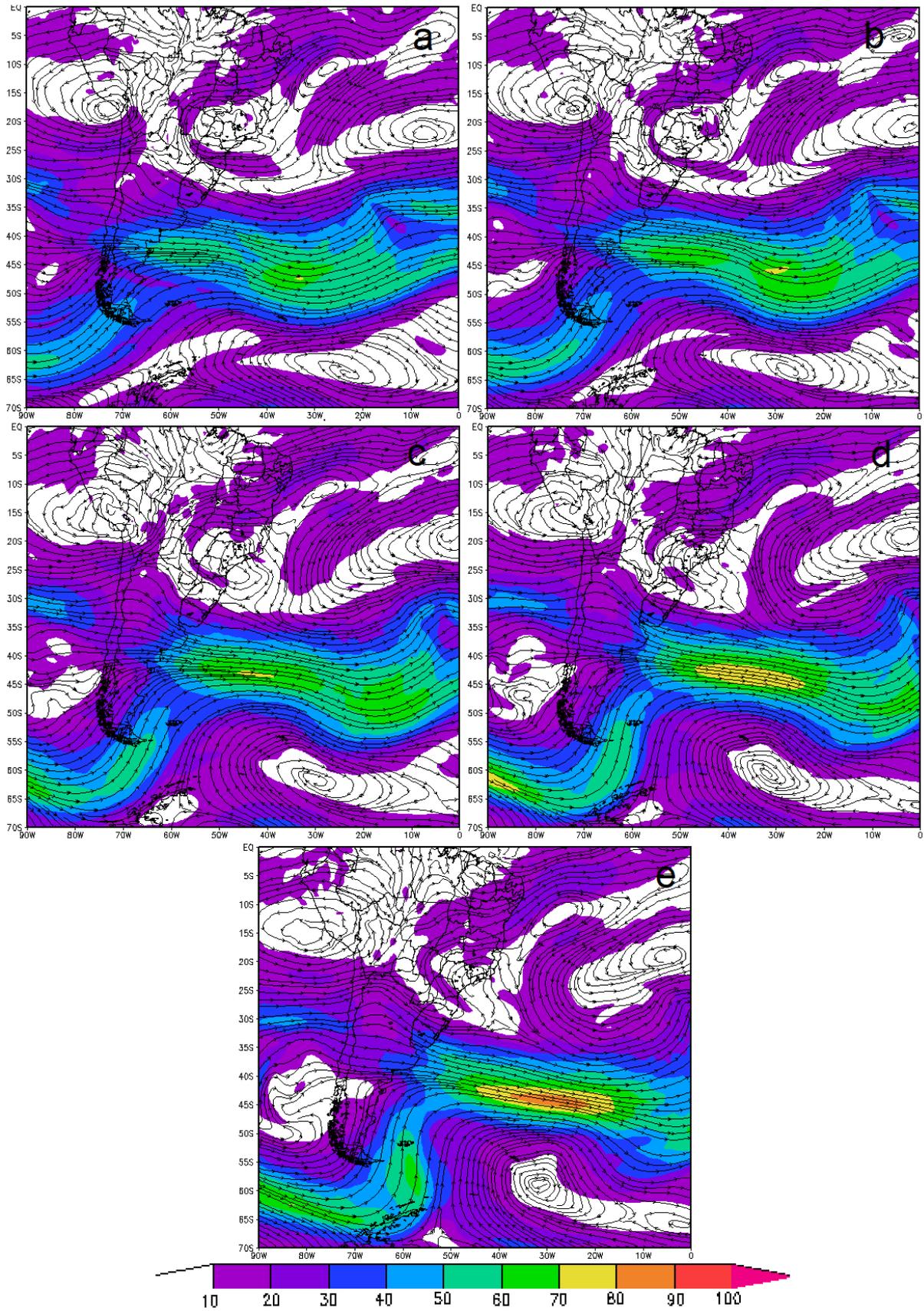


Figura 22 – Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 12/02/2014 12Z, b) 12/02/2014 18Z, c) 13/02/2014 00Z, d) 13/02/2014 06Z, e) 13/02/2014 12Z.

Na Figura 23, as linhas de corrente em 850 hPa mostram que, durante pelo menos a primeira metade do ciclo explosivo, houve o aporte de ar quente e úmido da Amazônia para a região do ciclone.

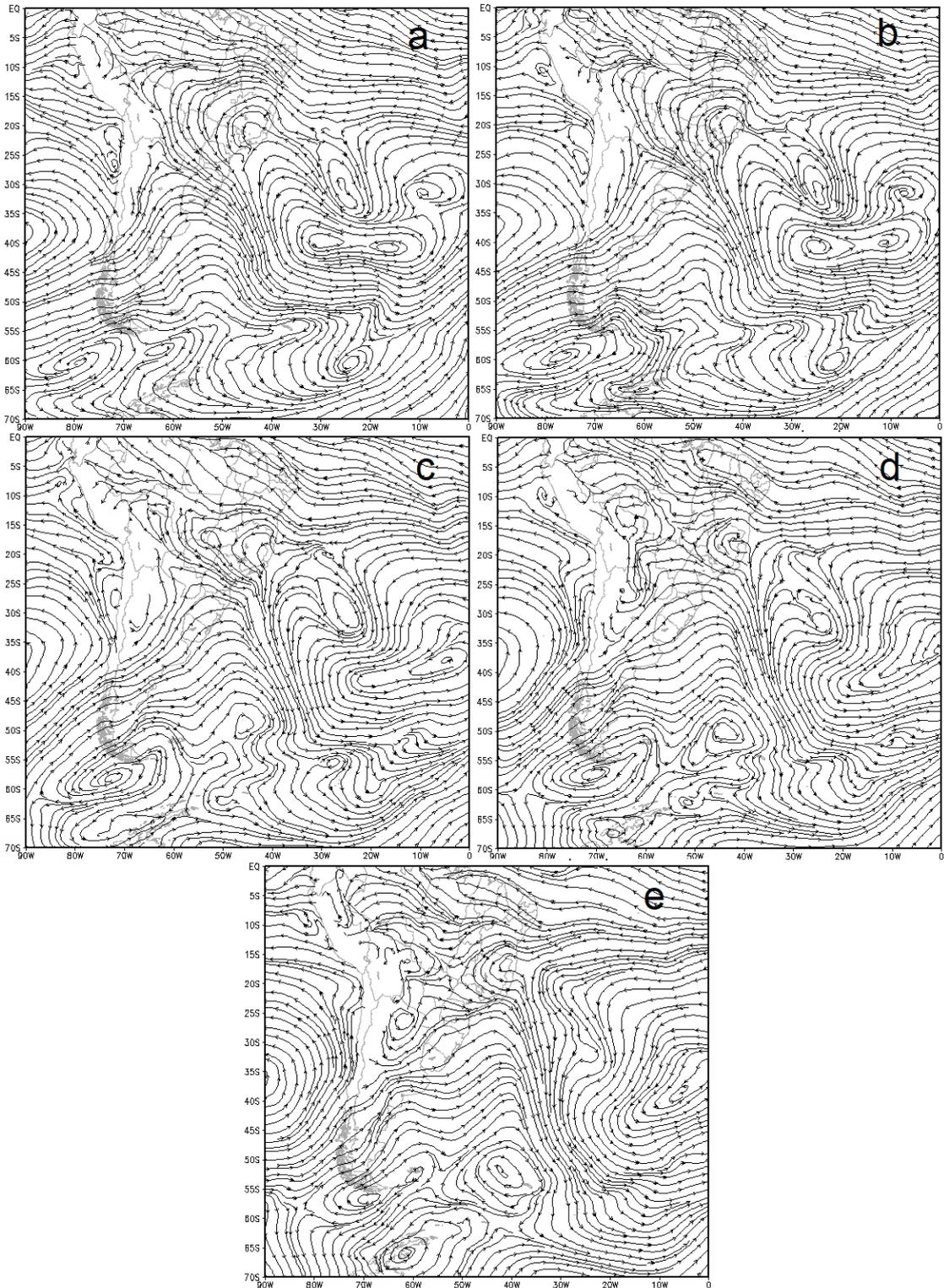


Figura 23 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 12/02/2014 12Z, b) 12/02/2014 18Z, c) 13/02/2014 00Z, d) 13/02/2014 06Z, e) 13/02/2014 12Z.

A tendência do ozônio devido à dinâmica (Figura 24- a, b, c, d, e) mostra o padrão esperado, com tendência positiva no interior da dobra a leste e tendência negativa a oeste.

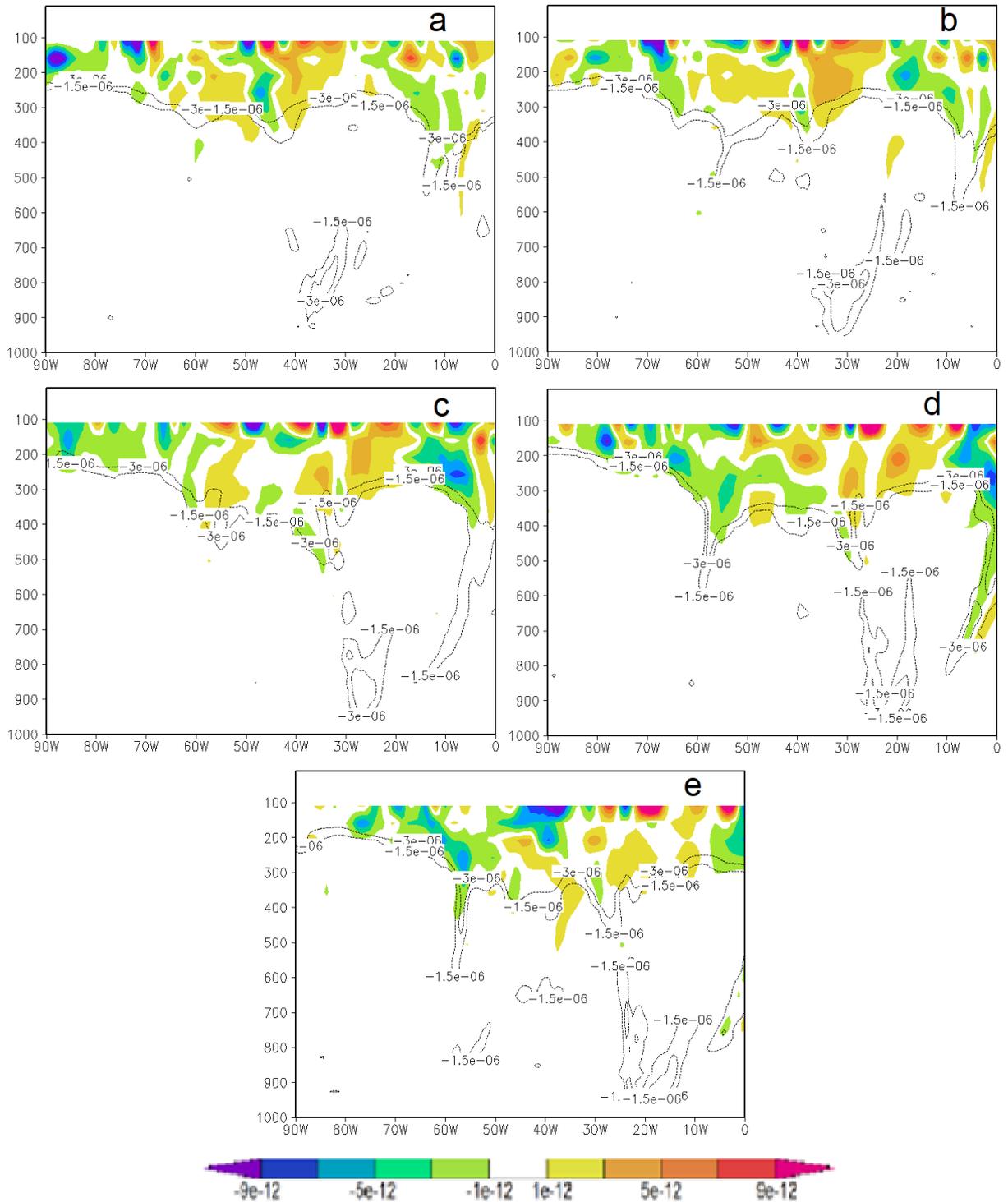


Figura 24 - Secções verticais de EPV menor ou igual a $-1,5$ PVU (contornos) e tendência do Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado. a) 50°S , 12/02/2014 12z; b) 50°S , 12/02/2014 18z; c) 51°S , 13/002/2014 00z; d) 52°S , 13/02/2014 06z, e) 53°S , 13/02/2014 12z.

As secções verticais de EPV acoplada com velocidade vertical (Ω), na Figura 25a, mostram o movimento vertical subsidente a oeste da dobra e ascendente a leste da mesma, com o movimento subsidente desaparecendo na sequência e o movimento ascendente enfraquecendo até o final do ciclo explosivo.

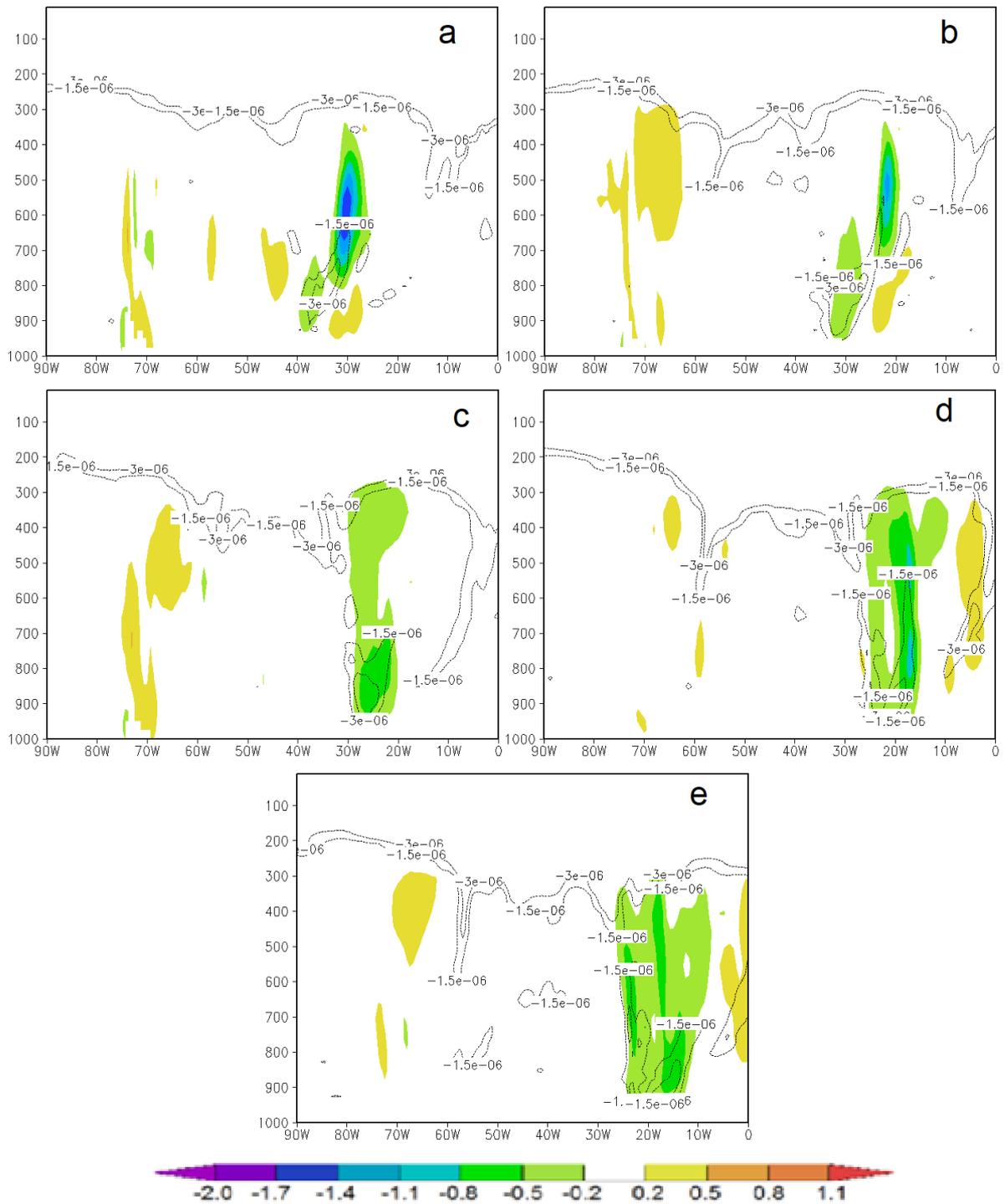


Figura 25 - Secção vertical, EPV maior ou igual, em módulo, a 1,5 PVU (contornos) e Velocidade Vertical Ω (cores), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado. a) 50°S, 12/02/2014 12z; b) 50°S, 12/02/2014 18z; c) 51°S, 13/02/2014 00z; d) 52°S, 13/02/2014 06z, e) 53°S, 13/02/2014 12z.

Na Figura 26, as secções verticais latitudinais mostram os valores de umidade relativa entre 10% e 20% acompanhando os contornos de -1,5 PVU, ou seja, a tropopausa dinâmica, e das regiões onde ocorre movimento subsidente. Nos níveis inferiores e regiões de movimento ascendente o ar tem cerca de 80% de umidade relativa.

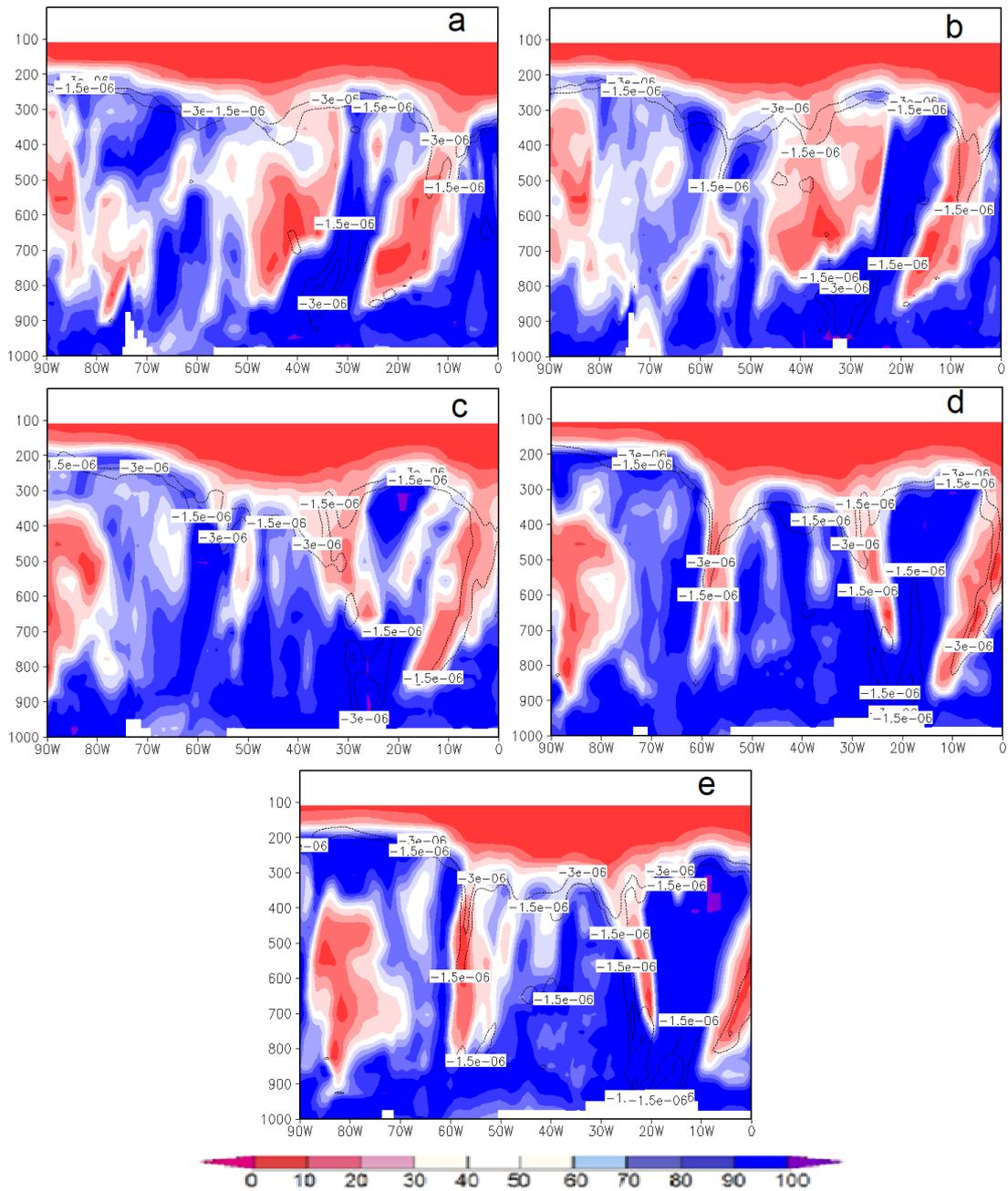


Figura 26 - Secção vertical, EPV maior ou igual, em módulo, a 1,5 PVU (contornos) e Umidade relativa (cores) nas latitudes em que o ciclone esteve localizado. a) 50°S, 12/02/2014 12z; b) 50°S, 12/02/2014 18Z; c) 51°S, 13/02/2014 00Z; d) 52°S, 13/02/2014 06Z, e) 53°S, 13/02/2014 12Z.

A Figura 27 mostra que o fluxo de calor latente esteve presente e aumentou na região atrás da frente fria devido à diferença de temperatura entre o ar e a água que proporcionou transporte de calor e umidade para a atmosfera.

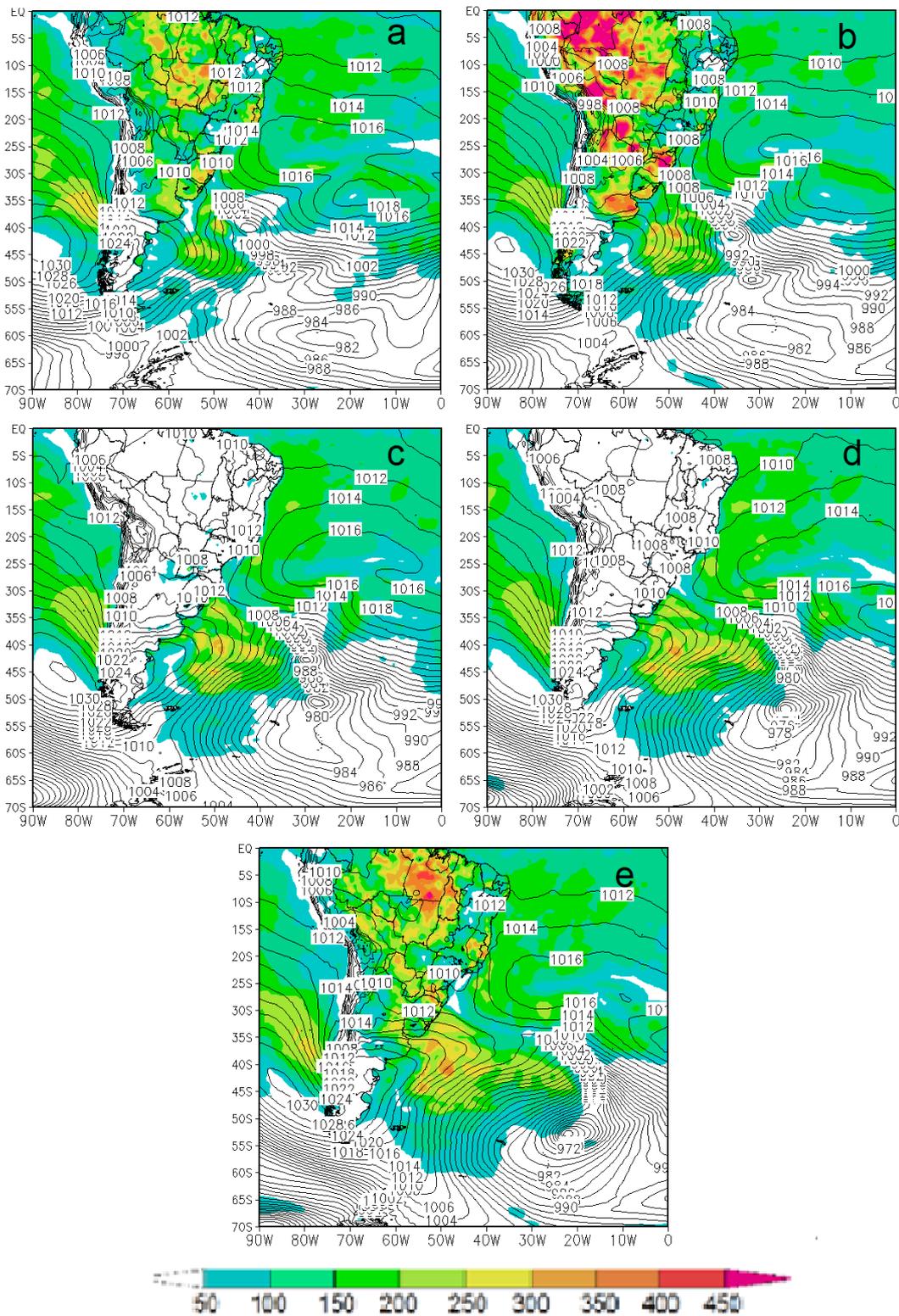


Figura 27 - Campo de PNMM (contorno) e fluxo de calor latente em $W m^{-2}$ (sombreado). Dia 12/02/2014: a)12Z, b)18Z, e dia 13/02/2014: c)00Z, d)06Z, e)12Z.

A Figura 28 mostra que o fluxo de calor sensível esteve presente e também aumentou na região atrás da frente fria independentemente do ciclo diurno. Neste caso, tanto o fluxo de calor sensível devido à turbulência como o fluxo de calor latente tiveram importância na manutenção do sistema na fase barotrópica prolongando sua duração.

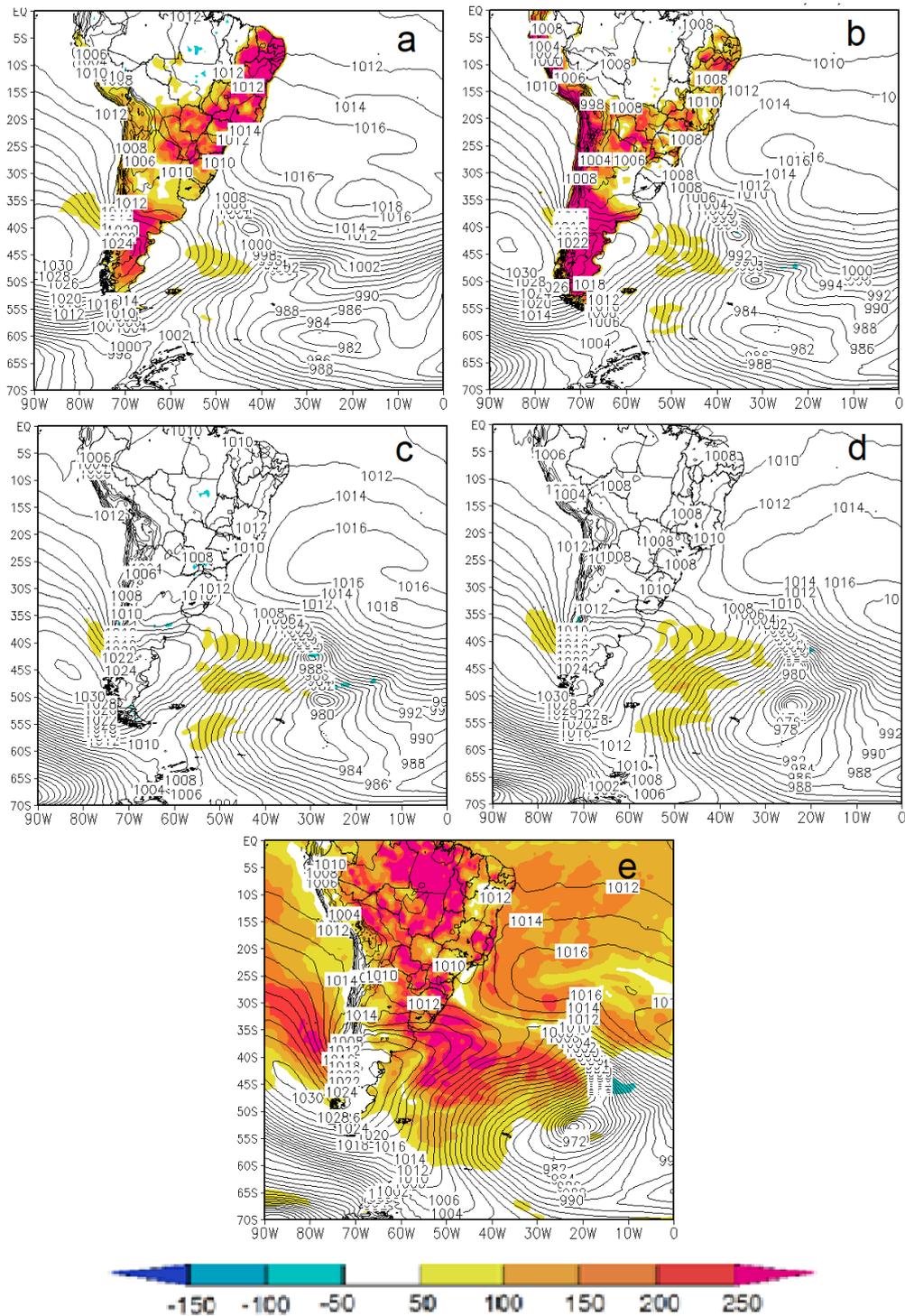


Figura 28 - Campo de PNMM (contorno) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta em Wm^{-2} (sombreado). Dia 12/02/2014: a)12Z, b)18Z, e dia 13/02/2014: c)00Z, d)06Z, e)12Z.

As Figuras 29c e d mostram um grande crescimento da energia cinética após a metade do ciclo explosivo, o mesmo se verificando no fluxo zonal de energia cinética na Figura 30. Já o fluxo meridional de energia cinética (Figura 31) apresenta valores muito pequenos, o que indica, até pela sua orientação, que o desenvolvimento foi devido quase exclusivamente à intensificação do escoamento médio.

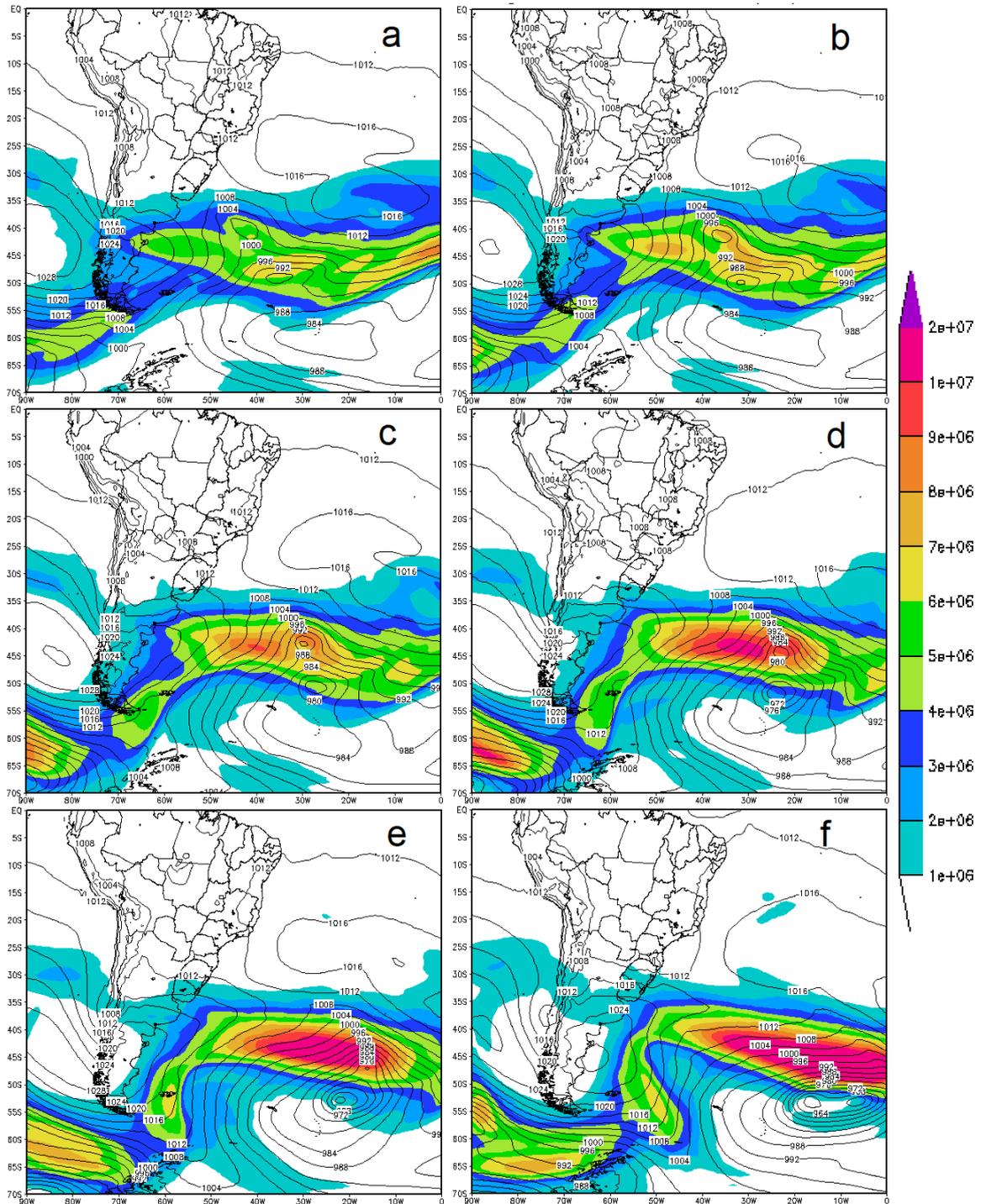


Figura 29 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. Dia 12/02/2014: a)12Z, b)18Z, dia 13/02/2014: c)00Z, d)06Z, e)12Z, e dia 14/02/2014: f)00Z.

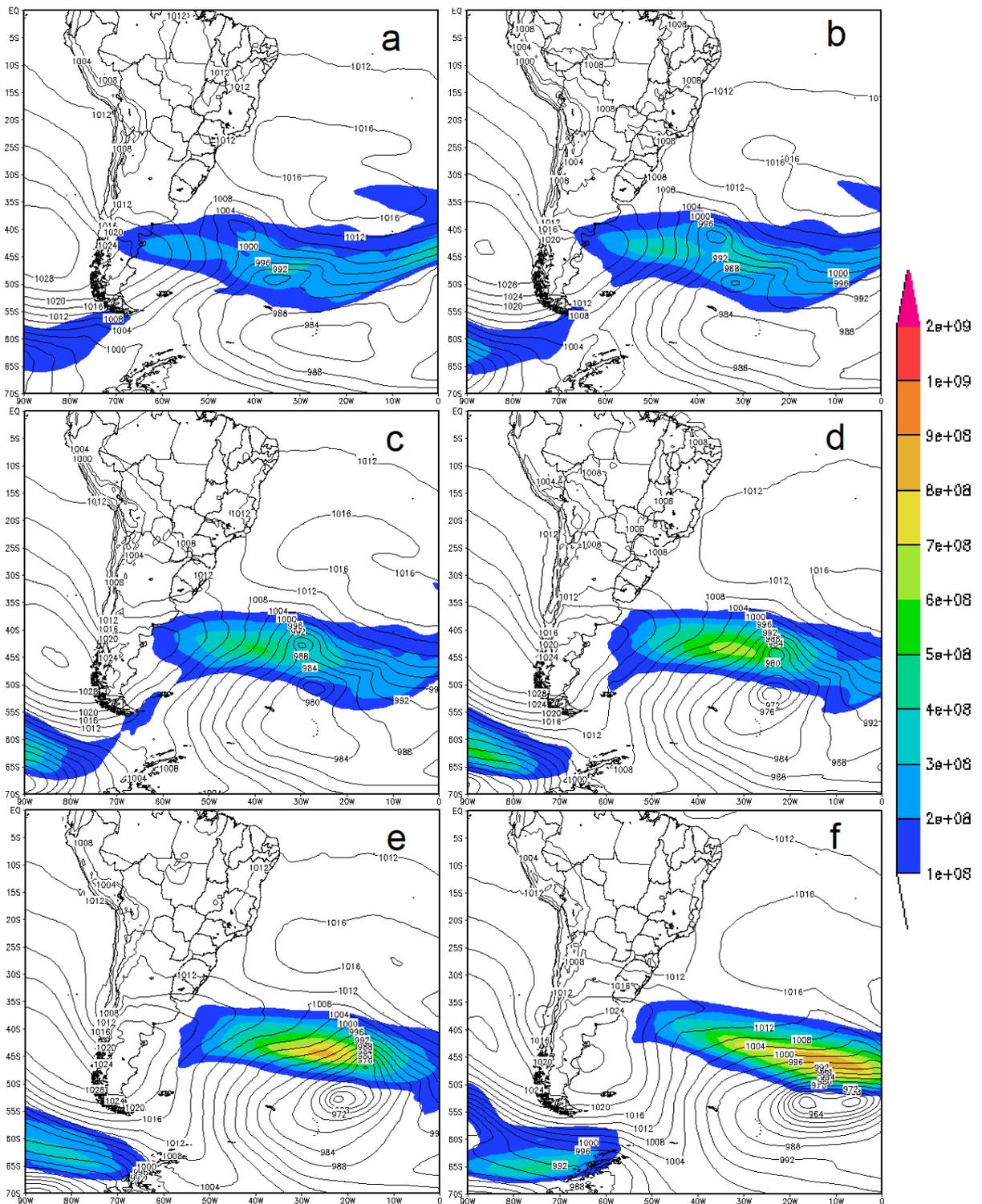


Figura 30 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. Dia 12/02/2014: a)12Z, b)18Z, dia 13/02/2014: c)00Z, d)06Z, e)12Z, e dia 14/02/2014: f)00Z.

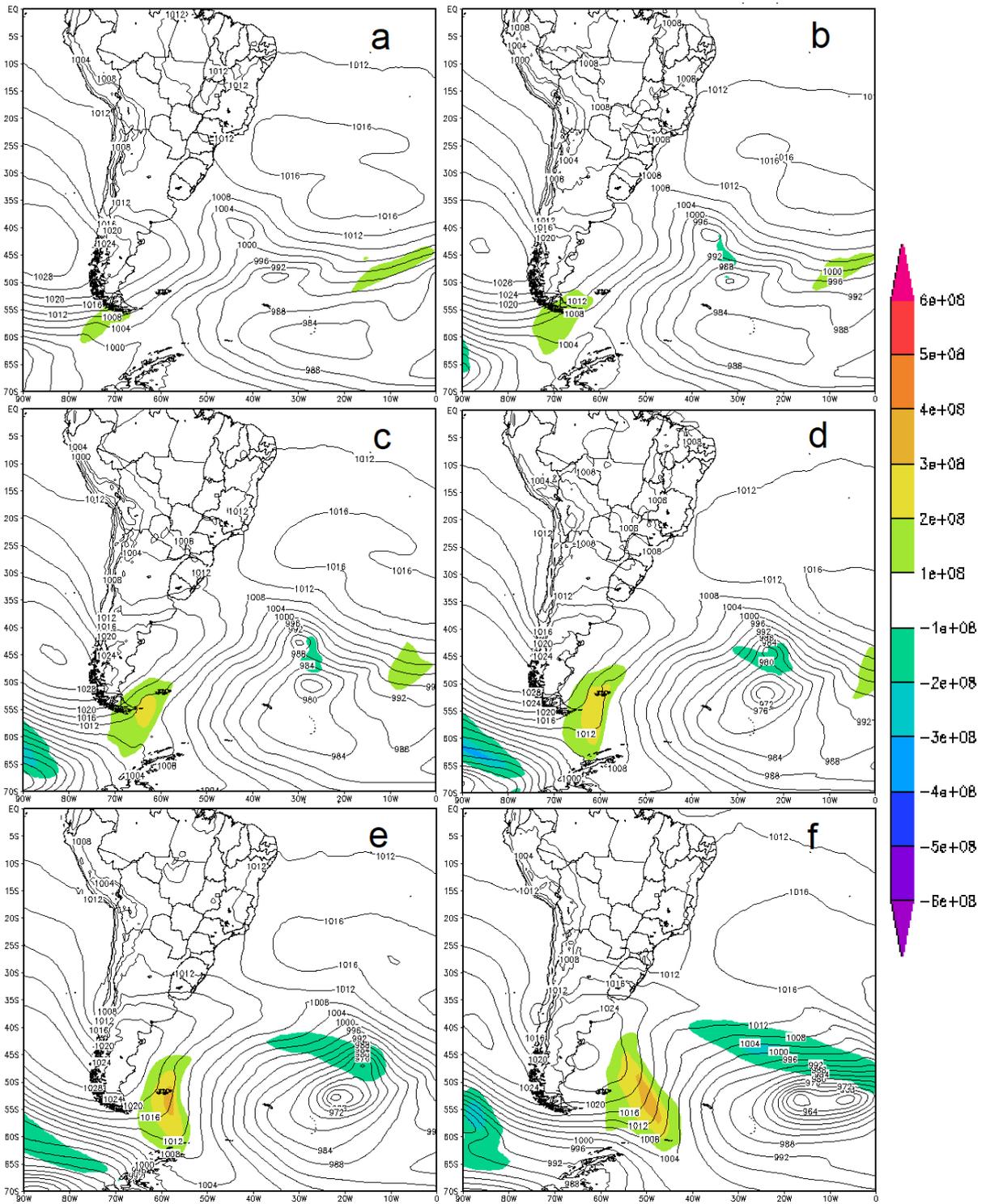


Figura 31 – Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. Dia 12/02/2014: a)12Z, b)18Z, dia 13/02/2014: c)00Z, d)06Z, e)12Z, e dia 14/02/2014: f)00Z.

4.3 Caso de 15/01/2014 – Verão - Fraco

Este ciclone que atingiu o estado de Santa Catarina (G1_c, 2014) iniciou seu desenvolvimento explosivo (Figura 32a) no dia 15/01/2014, as 00Z, com uma pressão de 992 hPa no centro localizado em 51°S, 56°W, o qual apresentou uma queda de pressão de 24 hPa em 24 horas, enquanto se deslocava para sudeste até as 00Z do dia 16/01/2014 (Figura 32e) quando alcançou 55°S, 42°W com 968 hPa. A TNA calculada para a média destas latitudes (53°), e para esta queda de pressão foi de 1,08 Bergeron, o que classifica este caso como ciclogênese explosiva fraca.

Na mesma Figura 32a, observa-se através dos contornos de geopotencial em 500 hPa e de PNMM, uma pequena defasagem entre o cavado de ar superior e o centro de baixa pressão na superfície, indicando fraca baroclinia do sistema com pouca inclinação do eixo de cavado durante o desenvolvimento do ciclone, enquanto que ao final do ciclo explosivo (Figura 32e), o cavado de ar superior alcança o centro de baixa pressão na superfície ficando em fase, indicando a barotropia do estágio maduro.

Na Figura 33, as secções verticais nas latitudes em que o ciclone se encontrava durante o desenvolvimento do ciclo explosivo, mostram a evolução da anomalia da tropopausa dinâmica, através do campo de EPV com valores maiores (em módulo) do que 1,5 PVU, com a consequente resposta na superfície pelo surgimento de um núcleo com altos valores de EPV, o qual coincide com as posições ocupadas pelo ciclone em rápido desenvolvimento (conforme mostrado na Figura 32), indicando que o desenvolvimento do ciclone esteve associado à referida anomalia da tropopausa dinâmica pela intrusão de ar seco estratosférico proveniente da mesma.

Na Figura 34(a, c, e, g), as imagens de satélite no canal do vapor de água mostram a faixa muito estreita com um forte gradiente de umidade, correspondente a dobra da tropopausa por onde ocorre a intrusão de ar seco estratosférico com altos valores de EPV no centro do ciclone, com orientação quase zonal conforme mostram os campos de EPV em 500 hPa e PNMM na Figura 34(b, d, f, h).

As linhas de corrente em 250 hPa (Figura 35) mostram que neste caso também houve confluência do escoamento dos jatos no Pacífico e sobre o continente com difluência na região onde se formou o ciclone na costa leste no extremo sul da America do Sul, sendo que na difluência o jato subtropical assume uma componente

retrógrada, com conseqüente perda de energia. Observa-se um comportamento similar aos outros casos citados, com diferenças em posição inicial e final, intensidade da perturbação da tropopausa e trajetória do núcleo de pressão central.

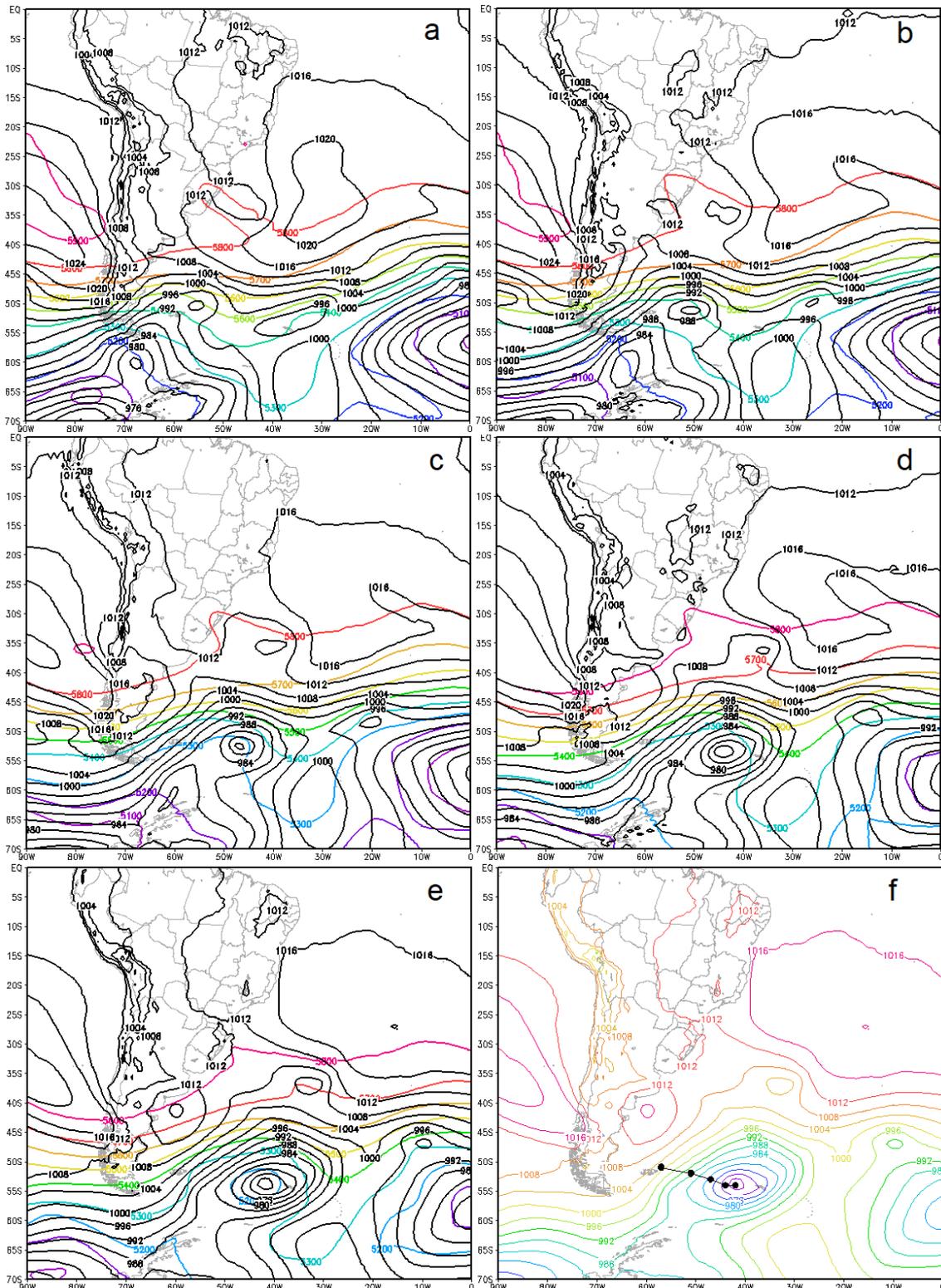


Figura 32 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em cores). a) 15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z, f) PNMM 16/01/2014 00Z e trajetória.

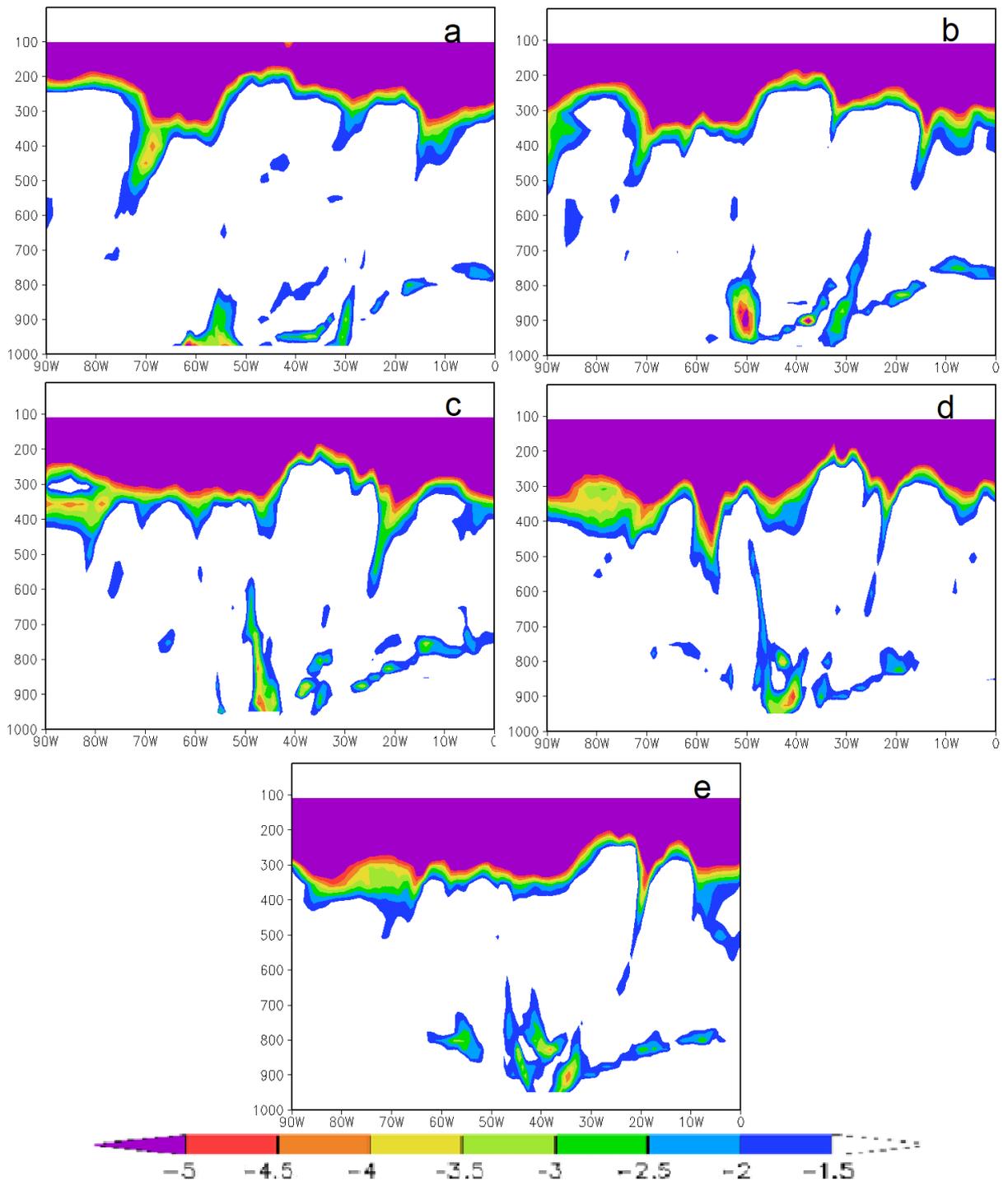


Figura 33 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU: a) 51°S, 15/01/2014 00z; b) 52°S, 15/01/2014 06z; c) 53°S, 15/01/2014 12z; d) 54°S, 15/01/2014 18z, e) 54°S, 16/01/2014 00z.

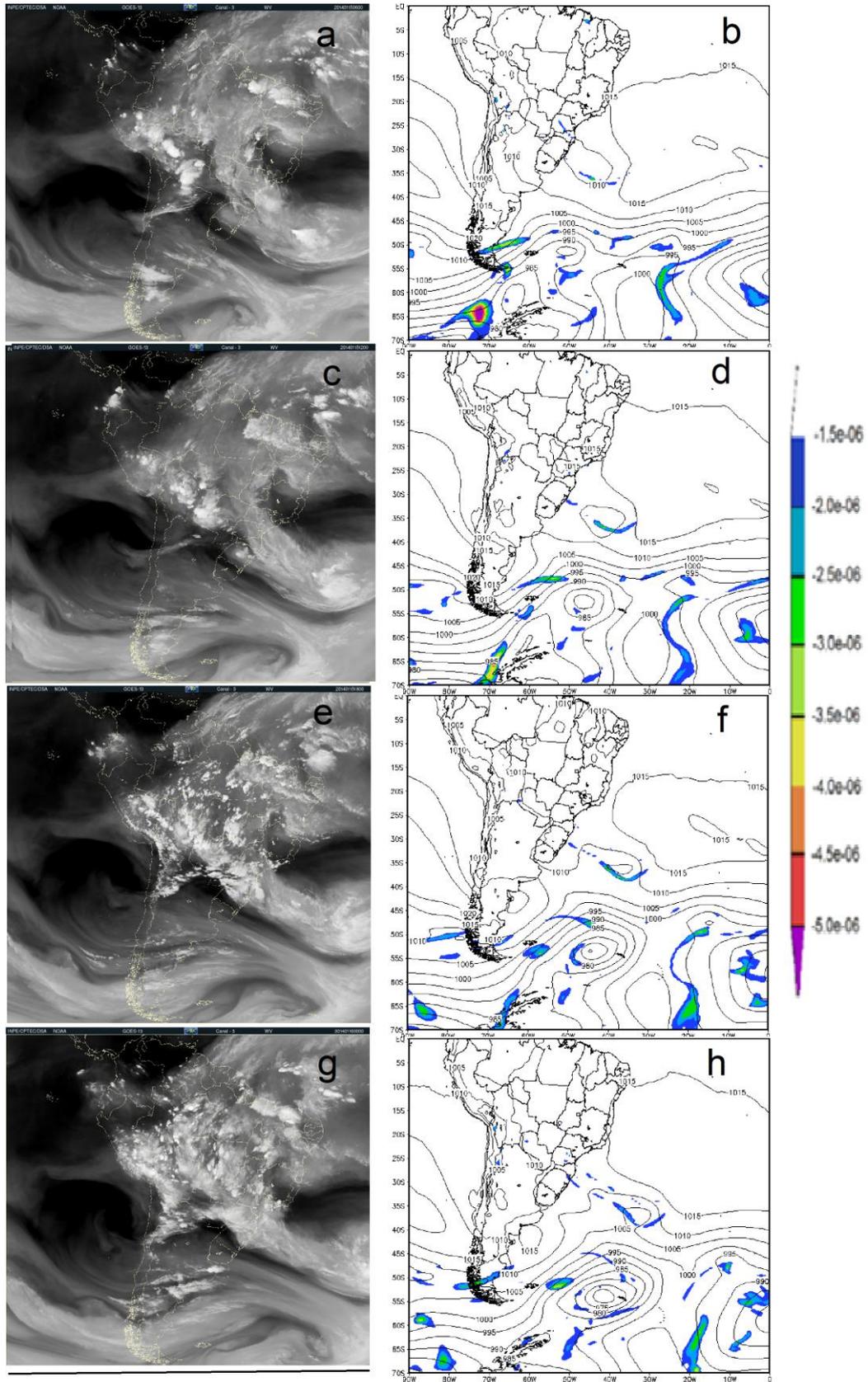


Figura 34 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 15/01/2014 06Z, (c) 15/01/2014 12Z, (e) 15/01/2014 18Z, (g) 16/01/2014 00Z, e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 15/01/2014 06Z, (d) 15/01/2014 12Z, (f) 15/01/2014 18Z, (h) 15/01/2014 00Z.

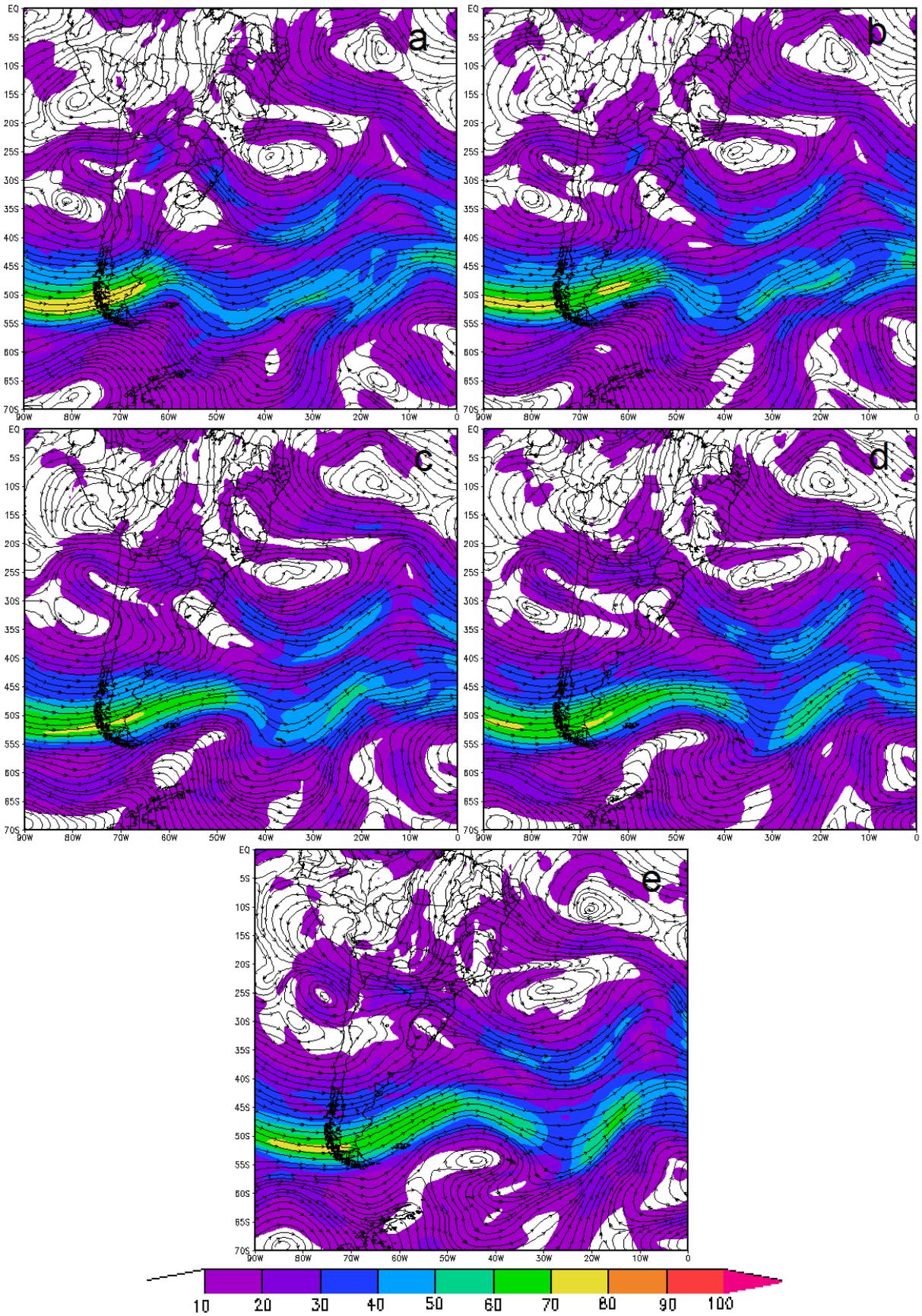


Figura 35 – Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z.

As linhas de corrente em 850 hPa (Figura 36) mostram que, neste caso, o escoamento de ar quente e úmido da Amazônia não alcança a região do ciclone.

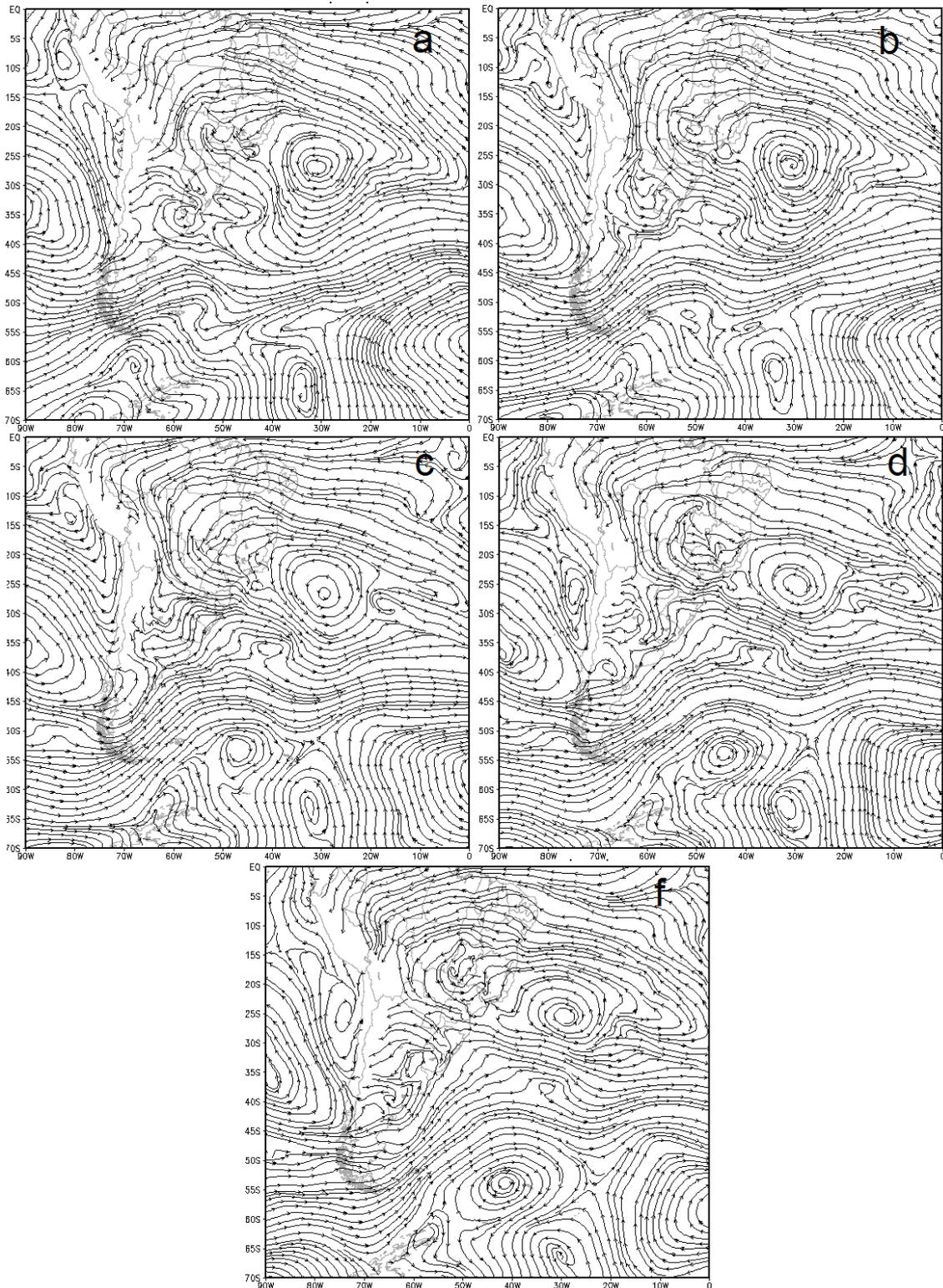


Figura 36 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z.

Nas secções verticais da Figura 37, assim como nos outros casos, observam-se tendências de ozônio negativas no interior da dobra da tropopausa a oeste e positivas a oeste, embora menos profundas que no caso de 03/01/2014.

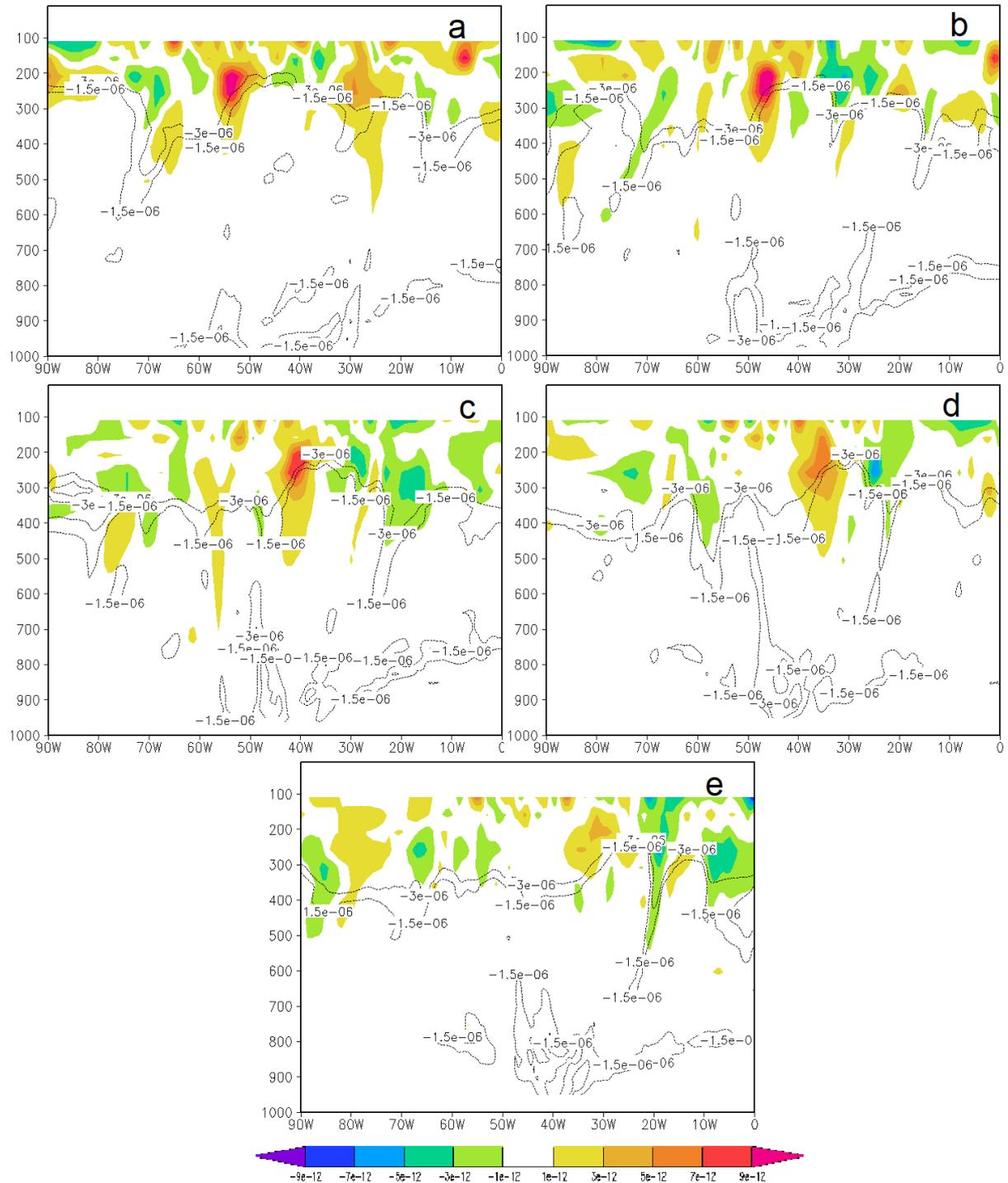


Figura 37 - Secções verticais de EPV menor ou igual a $-1,5$ PVU (contornos) e tendência do Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 51°S, 15/01/2014 00z; b) 52°S, 15/01/2014 06z; c) 53°S, 15/01/2014 12z; d) 54°S, 15/01/2014 18z, e) 54°S, 16/01/2014 00z.

Nas secções verticais da Figura 38, assim como nos outros casos, observam-se movimentos subsidentes a oeste da dobra da tropopausa e movimentos ascendentes a leste, embora menos abrangentes e intensos do que nos outros casos apresentados até aqui.

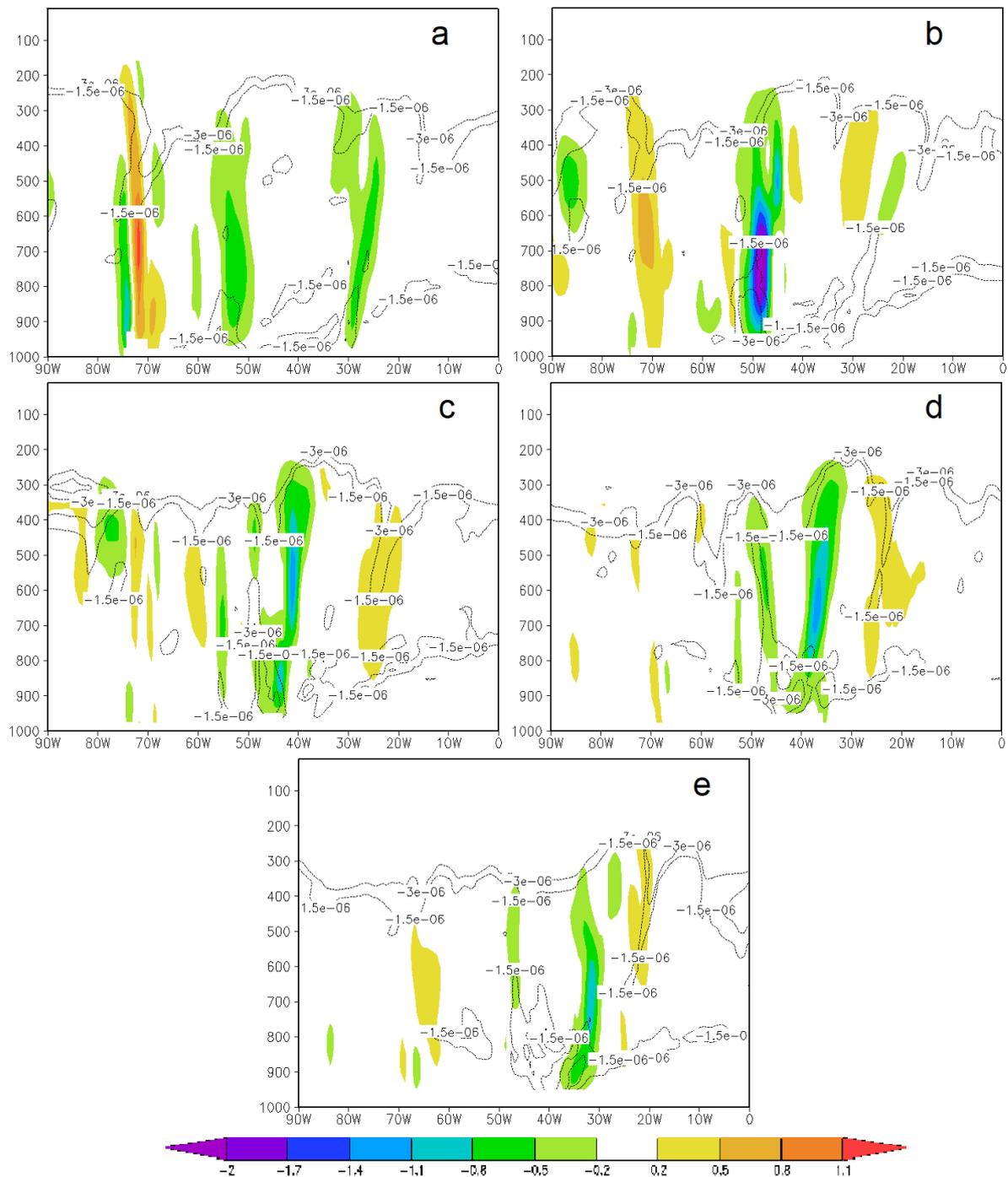


Figura 38 - Secções verticais de EPV menor ou igual a $-1,5$ PVU (contornos) e Velocidade vertical omega (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 51°S , 15/01/2014 00z; b) 52°S , 15/01/2014 06Z; c) 53°S , 15/01/2014 12Z; d) 54°S , 15/01/2014 18Z, e) 54°S , 16/01/2014 00Z.

As secções verticais da Figura 39 mostram os perfis de umidade relativa maior em azul próximo a superfície e nas partes onde o movimento é ascendente e em tons de rosa, valores correspondentes a umidade relativa entre 10-20%, na tropopausa dinâmica e nas partes de movimento subsidente.

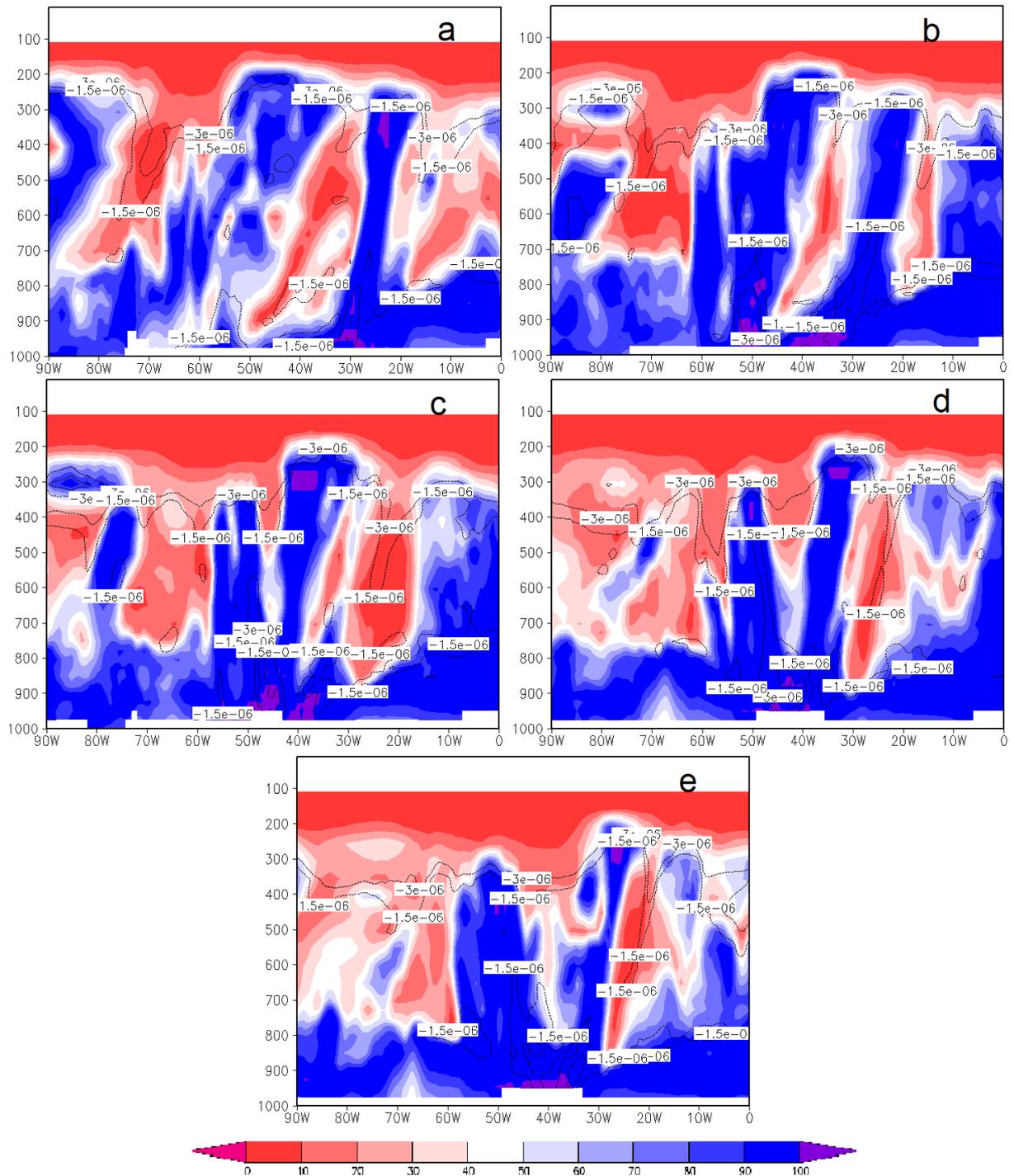


Figura 39 - Secções verticais de EPV menor ou igual a $-1,5$ PVU (contornos) e umidade relativa (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 51°S , 15/01/2014 00z; b) 52°S , 15/01/2014 06z; c) 53°S , 15/01/2014 12z; d) 54°S , 15/01/2014 18z, e) 54°S , 16/01/2014 00z.

Nas Figuras 40 e 41, o s fluxos de calor latente aparecem no setor do ar frio, como usualmente, mas é notável a ausência quase total de fluxos de calor sensível de origem turbulenta.

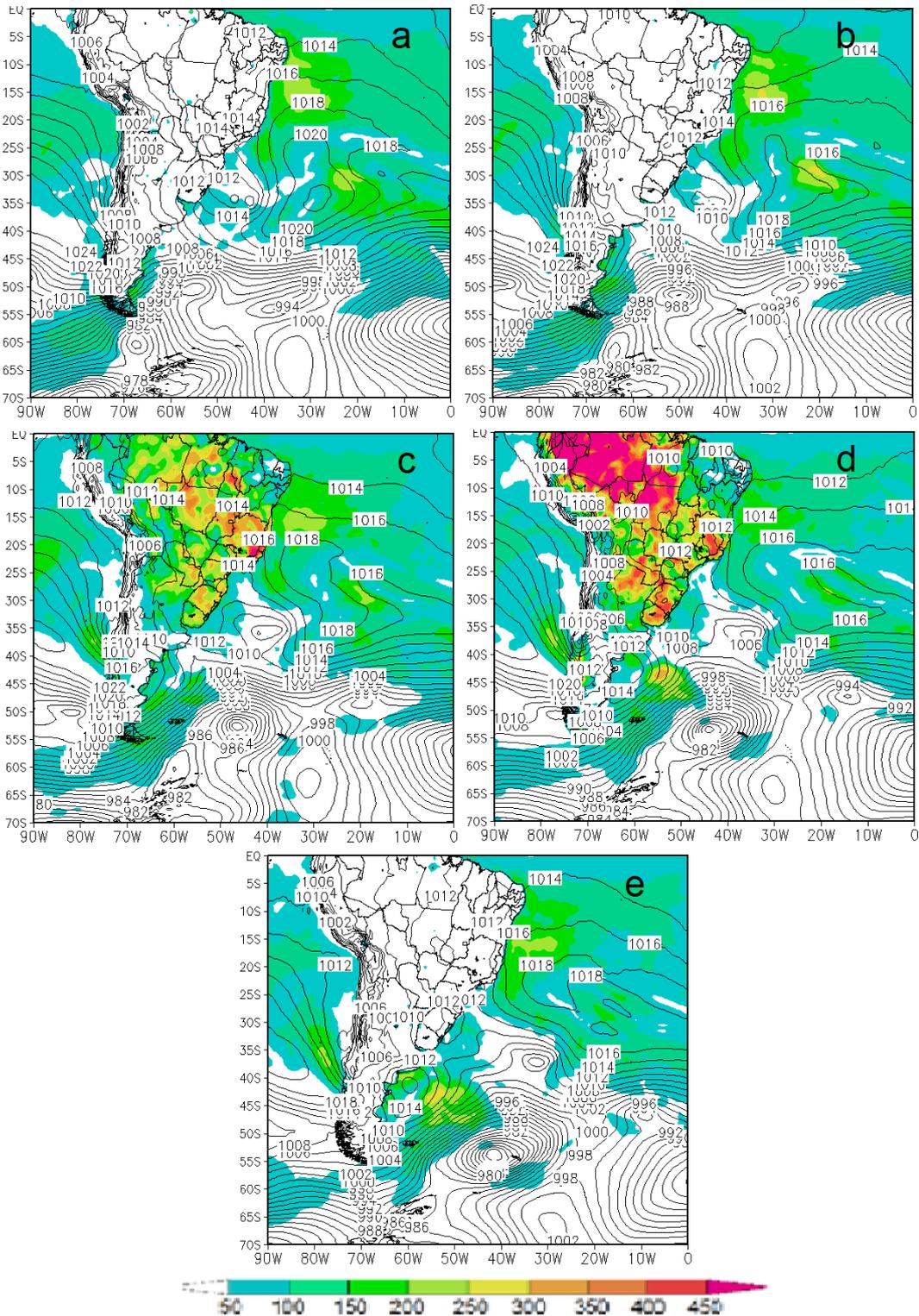


Figura 40 - Campo de PNMM (contorno) e fluxo de calor latente em $W m^{-2}$ (sombreado), a) 15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z.

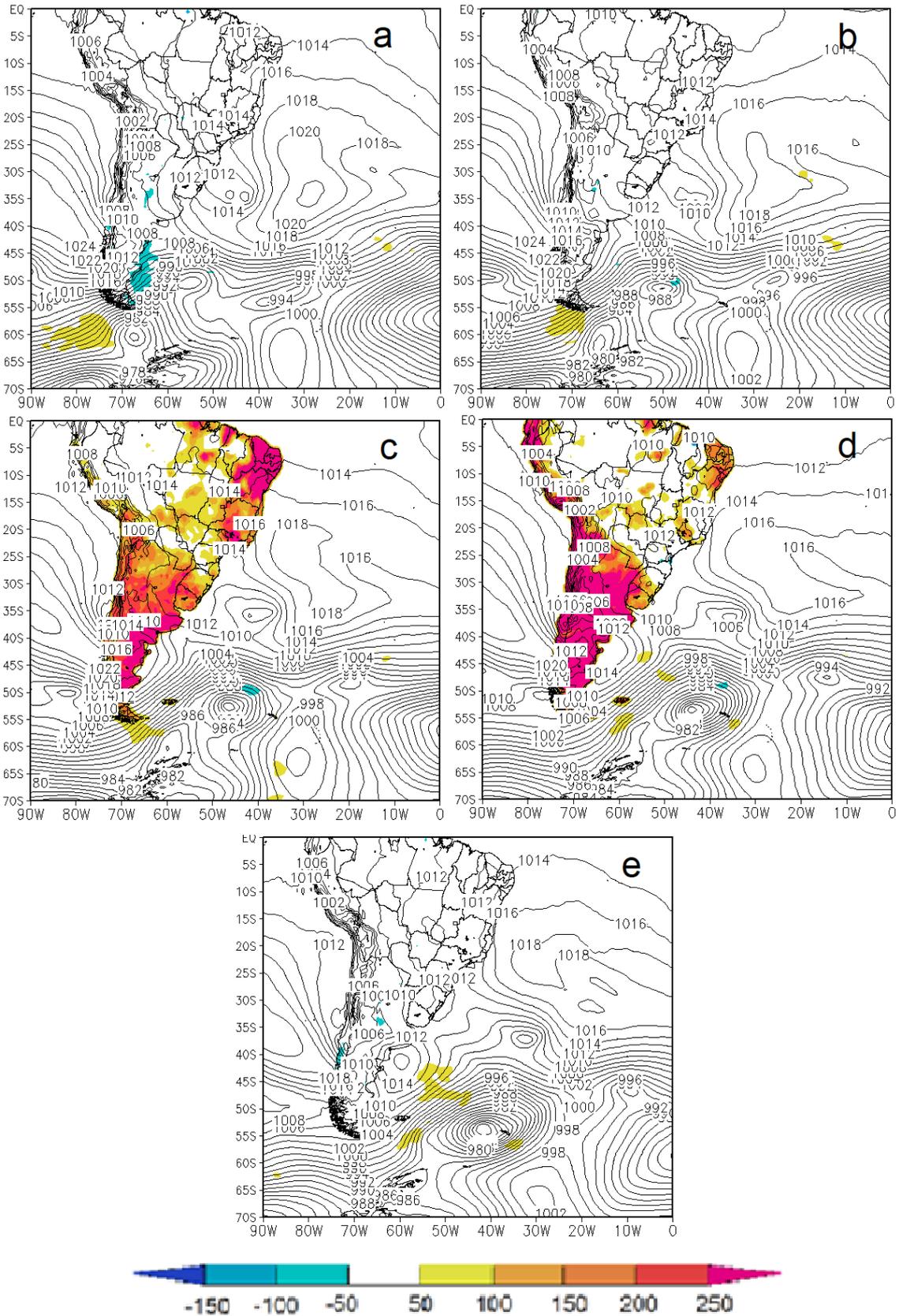


Figura 41 - Campo de PNMM (contorno) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta em $W m^{-2}$ (sombreado), a) 15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z.

A energia cinética atmosférica integrada na vertical (Figura 42) mostra altos valores na região do jet streak próximo ao centro do ciclone, os quais vão diminuindo à medida que o ciclone se desenvolve, evidenciando um jato quase zonal, o mesmo acontecendo com o fluxo zonal de energia cinética (Figura 43).

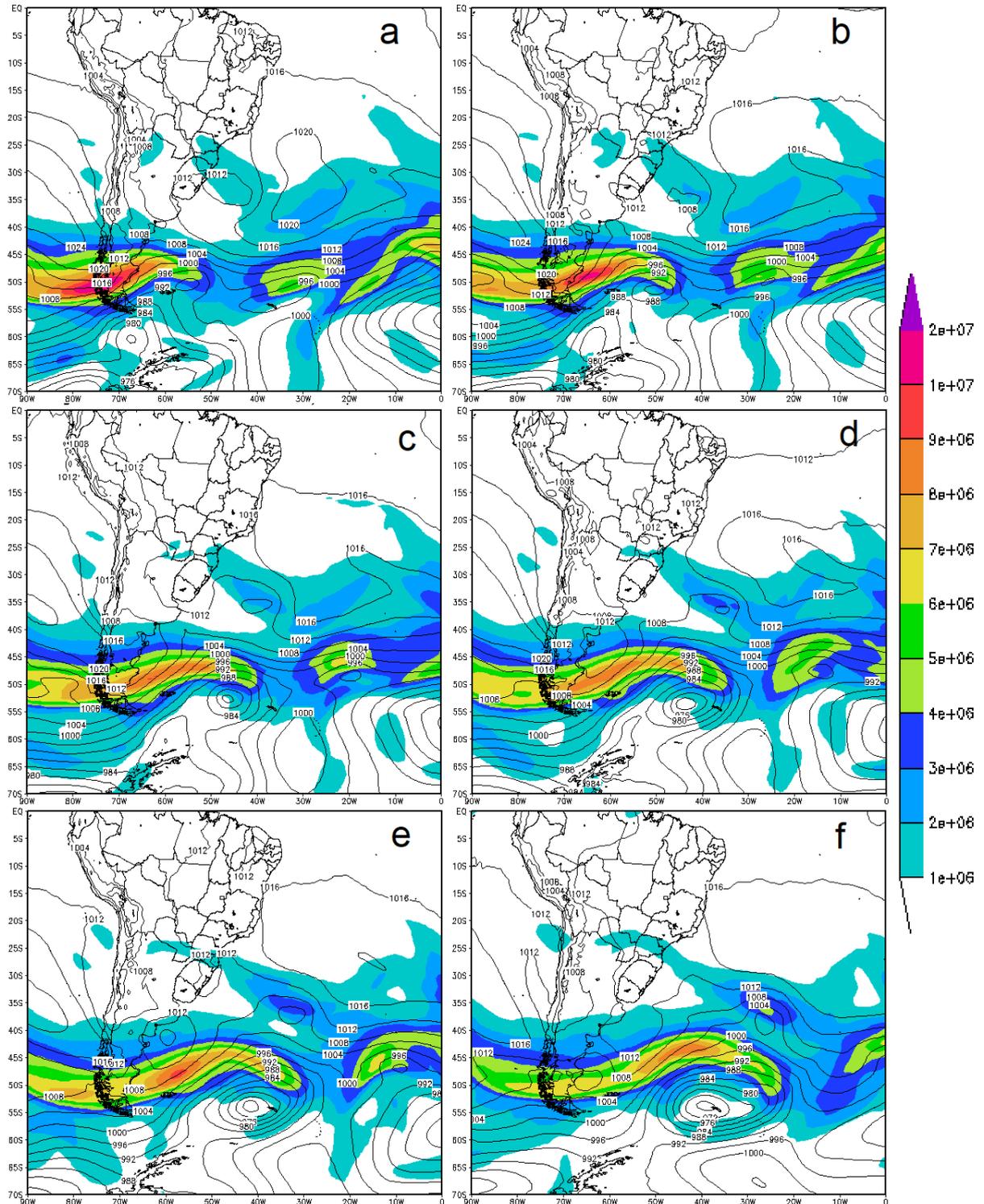


Figura 42 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z, f) 16/01/2014 12Z.

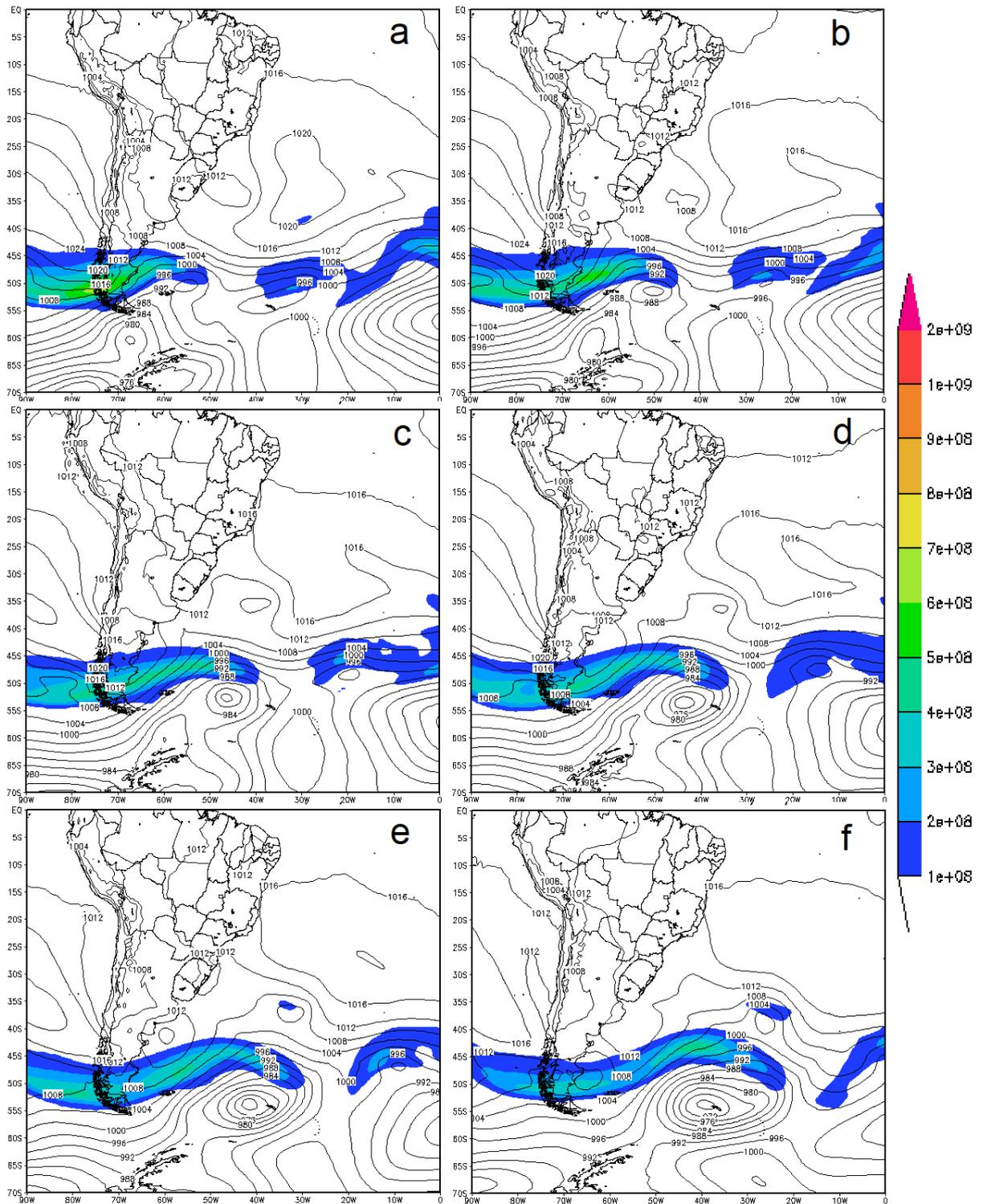


Figura 43 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z, f) 16/01/2014 12Z.

Em contraposição, o fluxo meridional de energia cinética (Figura 44), inicialmente inexistente na região do ciclone, surge timidamente e aumenta em extensão até o final do desenvolvimento explosivo, porém com baixo valor.

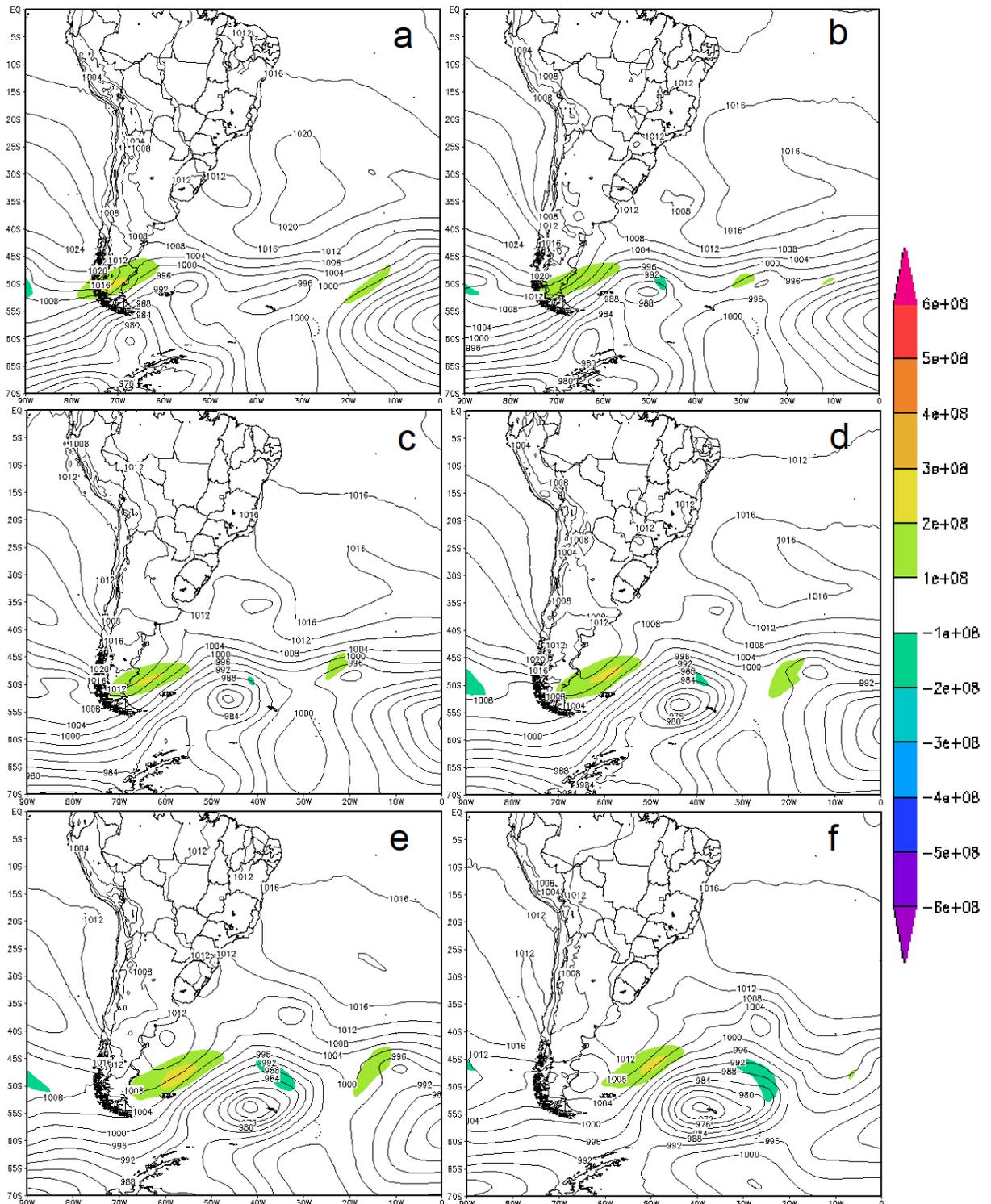


Figura 44 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. a) 15/01/2014 00Z, b) 15/01/2014 06Z, c) 15/01/2014 12Z, d) 15/01/2014 18Z, e) 16/01/2014 00Z, f) 16/01/2014 12Z.

4.4 Caso 01/07/2012 – Inverno - Fraco (em alta latitude)

Este ciclone iniciou seu ciclo de desenvolvimento explosivo em 01/07/2012, às 18Z, em 50°S-61°W (praticamente sobre as ilhas Malvinas), com uma pressão central de 984 hPa, deslocando-se até 54°S-40°W, onde alcançou uma pressão central de 960 hPa. A TNA calculada para esta queda de 24 hPa em 24 horas para esta latitude média de 52°S foi de 1,09 B, o que classifica este ciclone como explosivo fraco.

Este ciclone começou em uma latitude relativamente alta, próximo ao extremo sul do continente, com uma perturbação baroclínica pequena (Figura 45a) e fraca ondulação do jato, tendendo logo a ficar barotrópico.

As secções verticais de EPV (Figura 46) mostram que na tropopausa dinâmica, embora perturbada, a anomalia não foi vigorosa, não mostrando resposta notável próximo a superfície durante todo o ciclo explosivo.

Em contraste, nas imagens de satélite (Figura 47- a,c,e,g) são evidentes as dobras na tropopausa identificadas pelas longas faixas escuras correspondentes a intrusões de ar seco da estratosfera com altos valores de EPV como se pode verificar nos contornos sombreados em cores de EPV em 500 hPa (Figura 47- b,d,f,h).

A Figura 48 mostra as linhas de corrente em 250 hPa, nas quais pode se ver que o escoamento de altos níveis conflui sobre o extremo sul do continente reforçando o jet streak do jato subtropical, e diflui sobre o mar relativamente próximo à costa leste, na região de formação do ciclone.

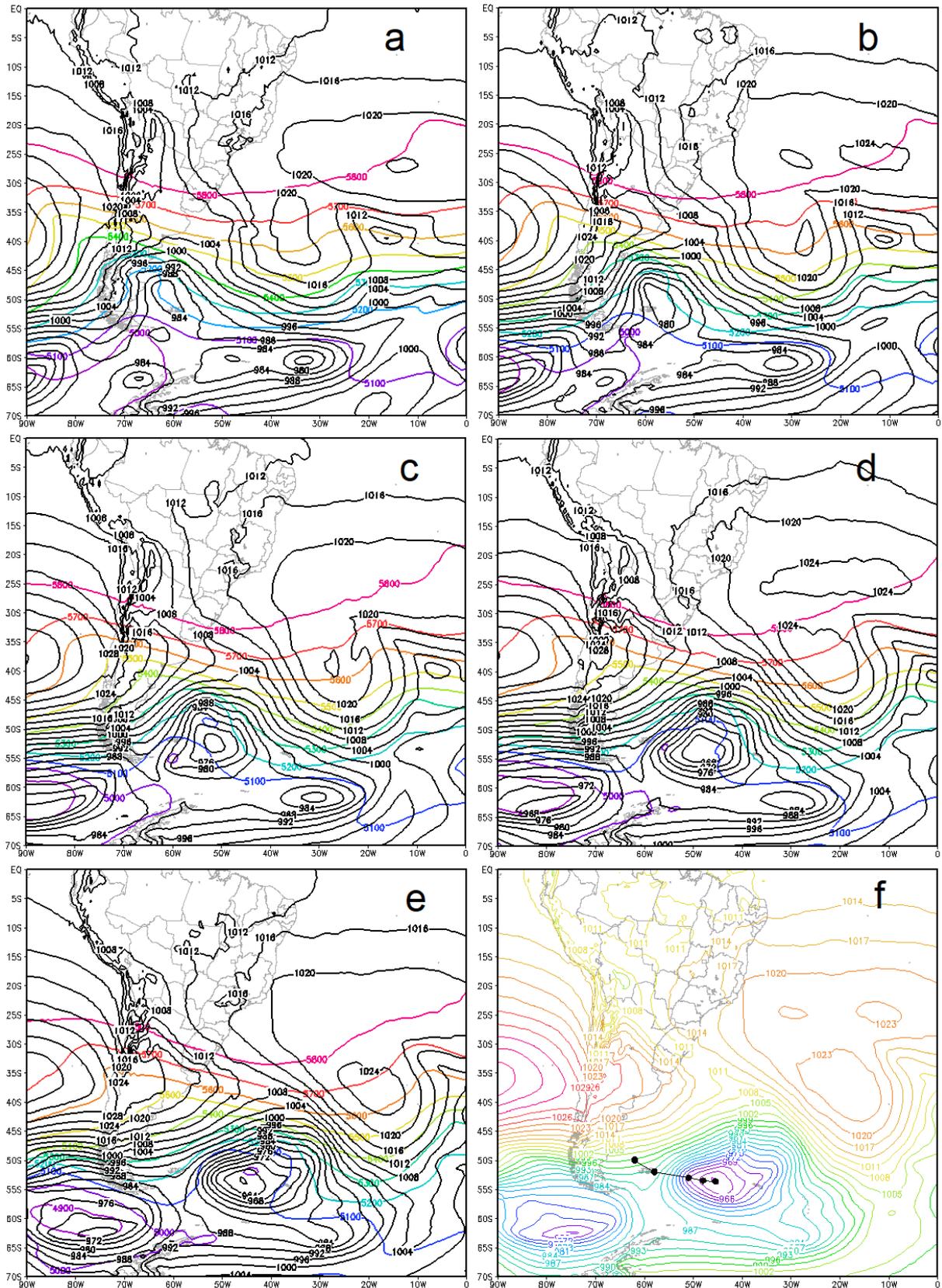


Figura 45 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em cores). a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z, f) PNMM 02/07/2012 18Z e trajetória.

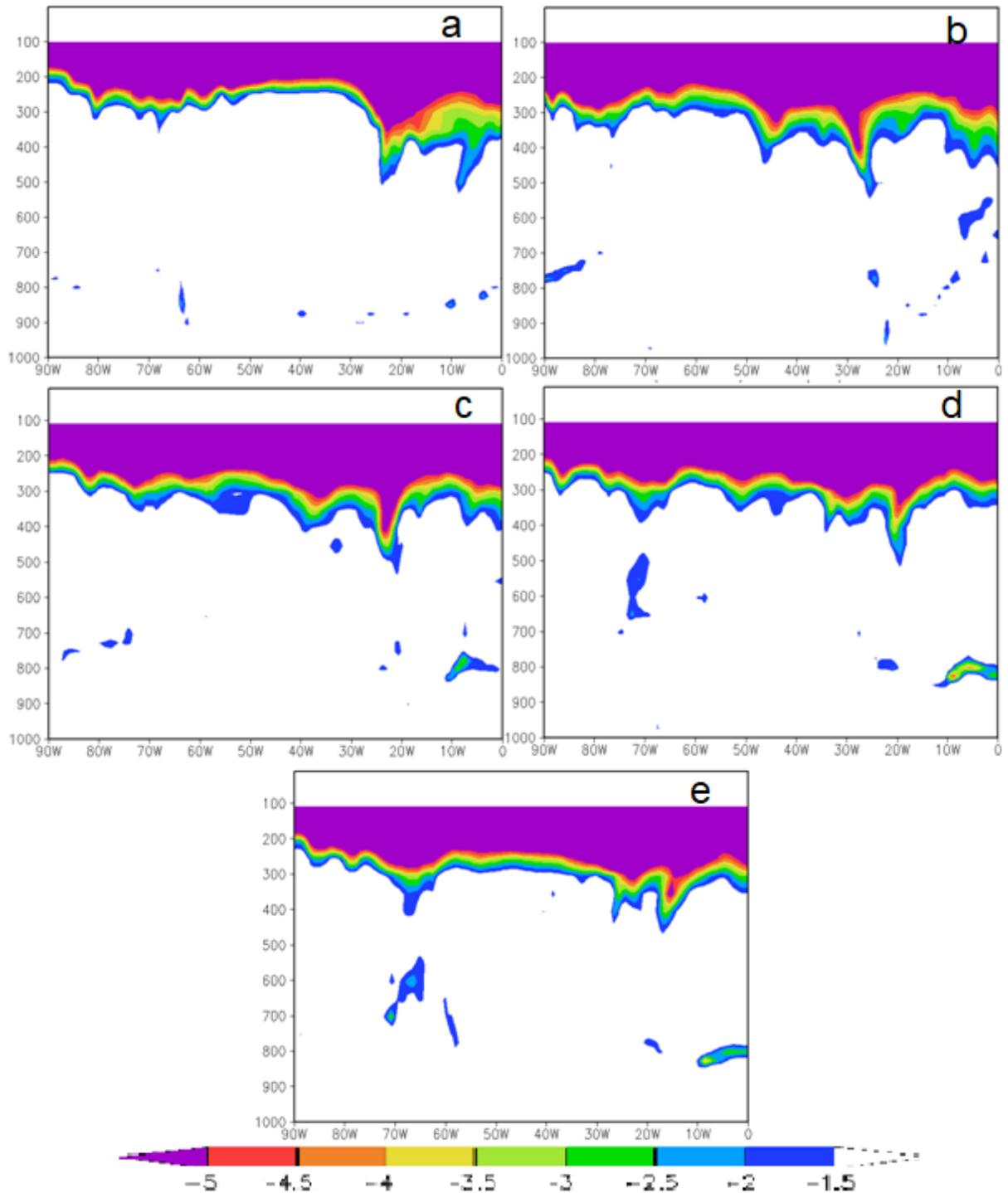


Figura 46 – Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 50°S, 01/07/2012 18z; b) 52°S, 02/07/2012 00z; c) 53°S, 02/07/2012 06z; d) 54°S, 02/07/2012 12z, e) 54°S, 02/07/2012 18z.

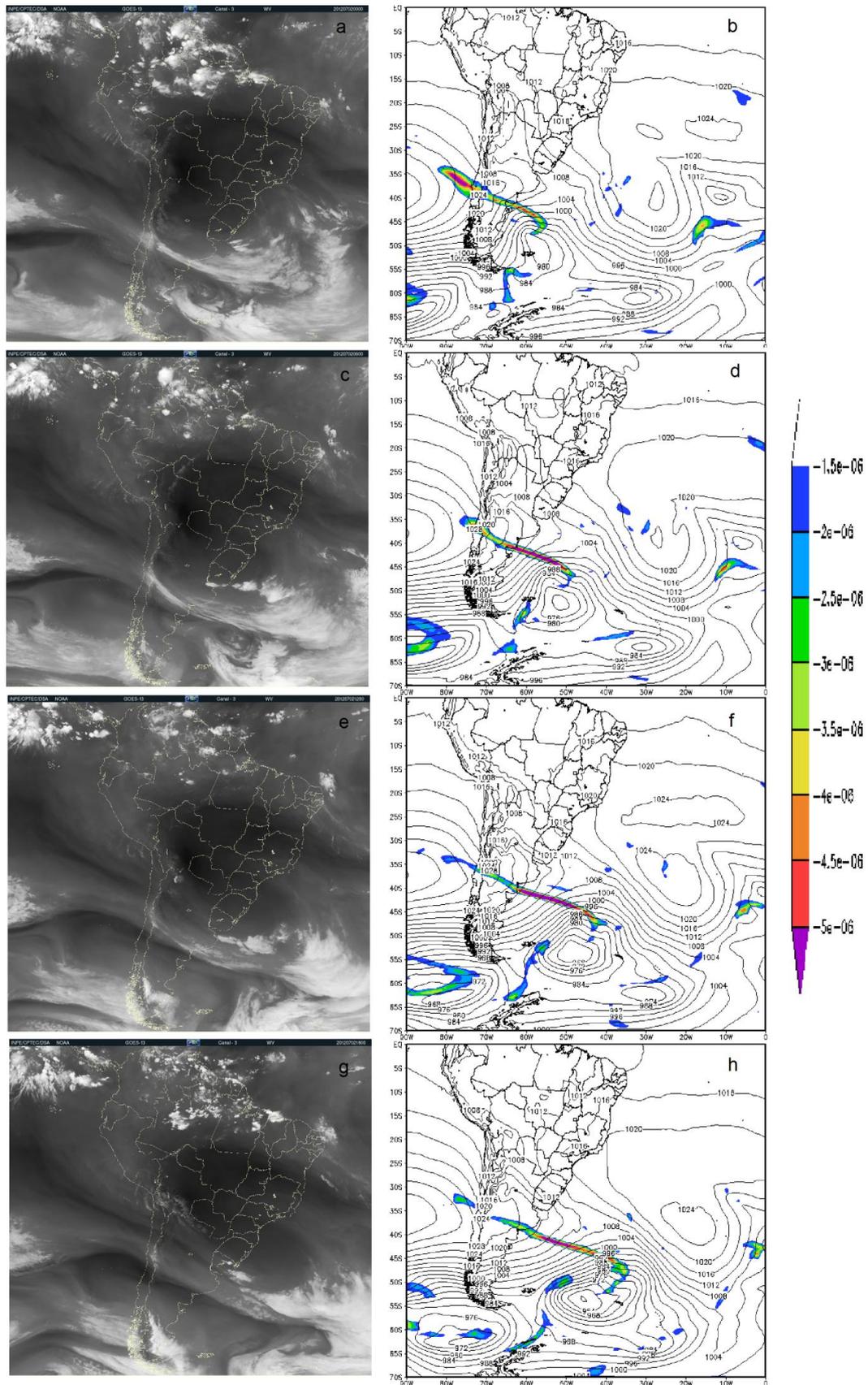


Figura 47 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 02/07/2012 00Z, (c) 02/07/2012 06Z, (e) 02/07/2012 12Z, (g) 02/07/2012 18Z, e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 02/07/2012 00Z, (d) 02/07/2012 06Z, (f) 02/07/2012 12Z, (h) 02/07/2012 18Z.

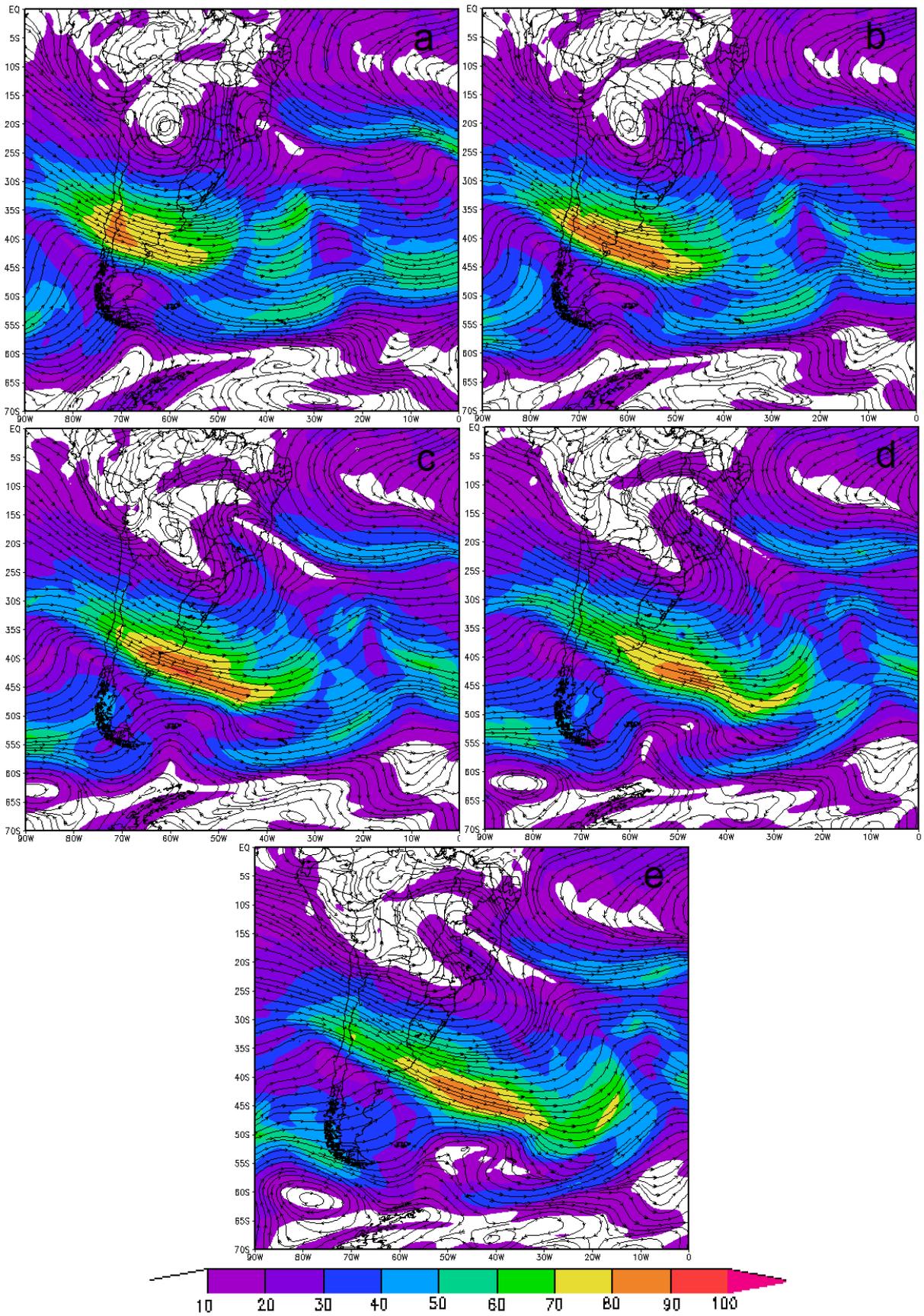


Figura 48 - Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z.

Nas linhas de corrente em 850 hPa (Figura 49) observa-se que o escoamento de ar quente e úmido da Amazônia não alcança a região do ciclone.

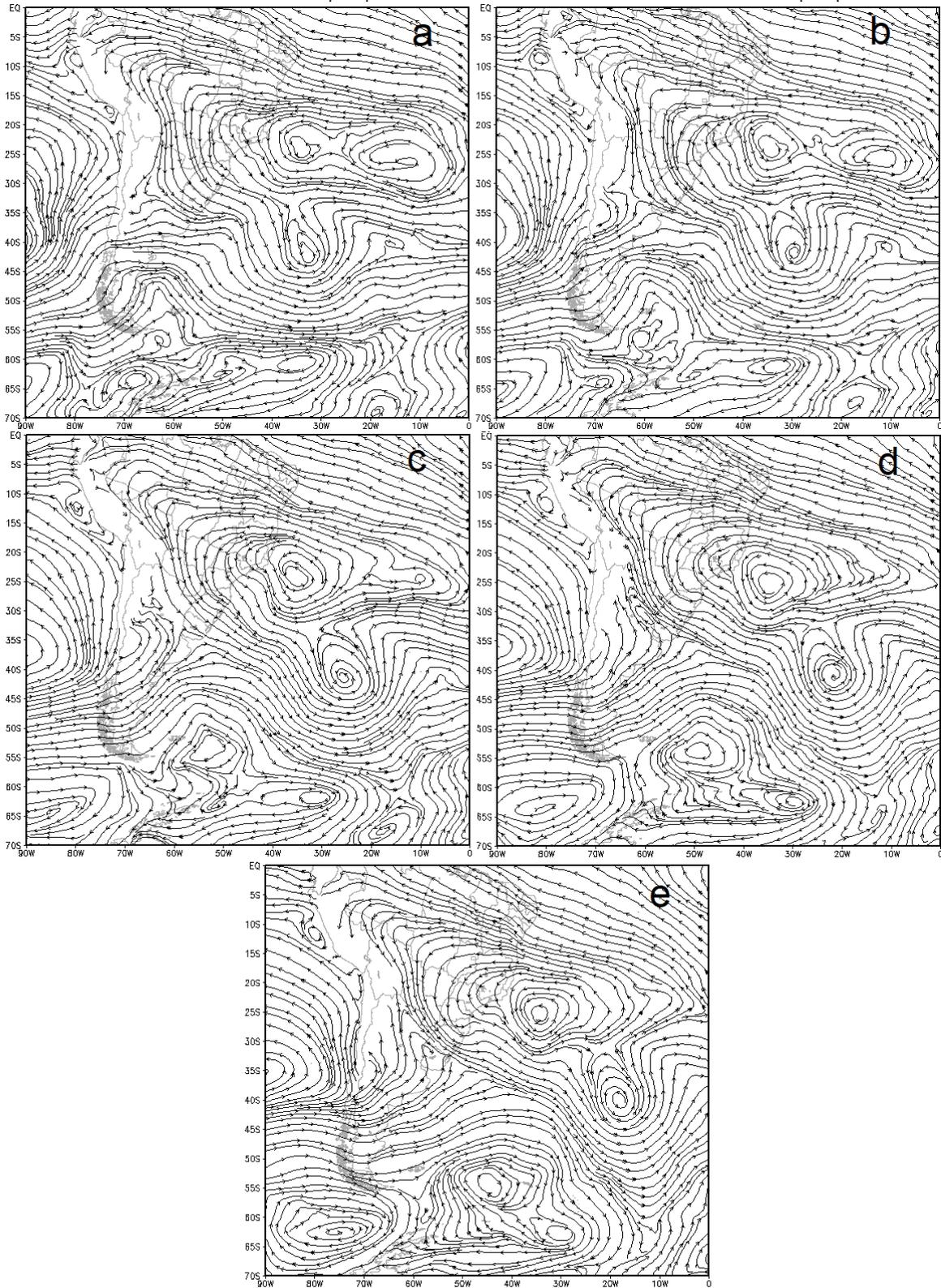


Figura 49 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z.

Na Figura 50, as tendências positivas de Ozônio predominam, com o mesmo padrão de tendência positiva a leste nas dobras e negativa a oeste, com exceção de dia 02/07 às 12Z, quando predomina tendência negativa na dobra acima da posição do ciclone (Figura 50d).

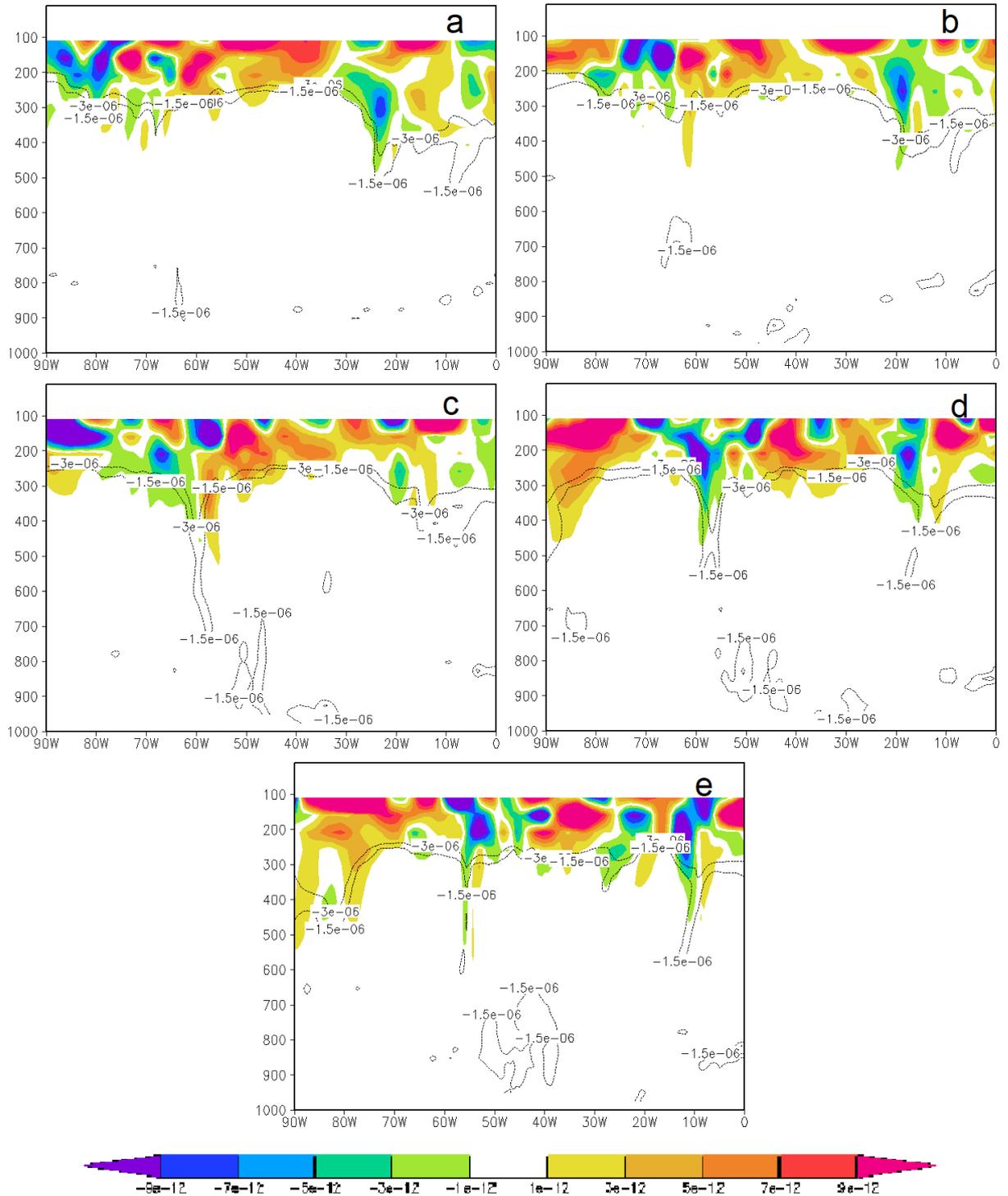


Figura 50 - Secções verticais de EPV menor ou igual a $-1,5$ PVU (contornos) e tendência do Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 50°S , 01/07/2012 18z; b) 52°S , 02/07/2012 00z; c) 53°S , 02/07/2012 06Z; d) 54°S , 02/07/2012 12Z, e) 54°S , 02/07/2012 18Z.

Nas secções verticais da Figura 51, os movimentos verticais subsidentes aparecem mais fortes no início, mas com o padrão de movimento descendente a oeste da dobra da tropopausa e ascendente a leste.

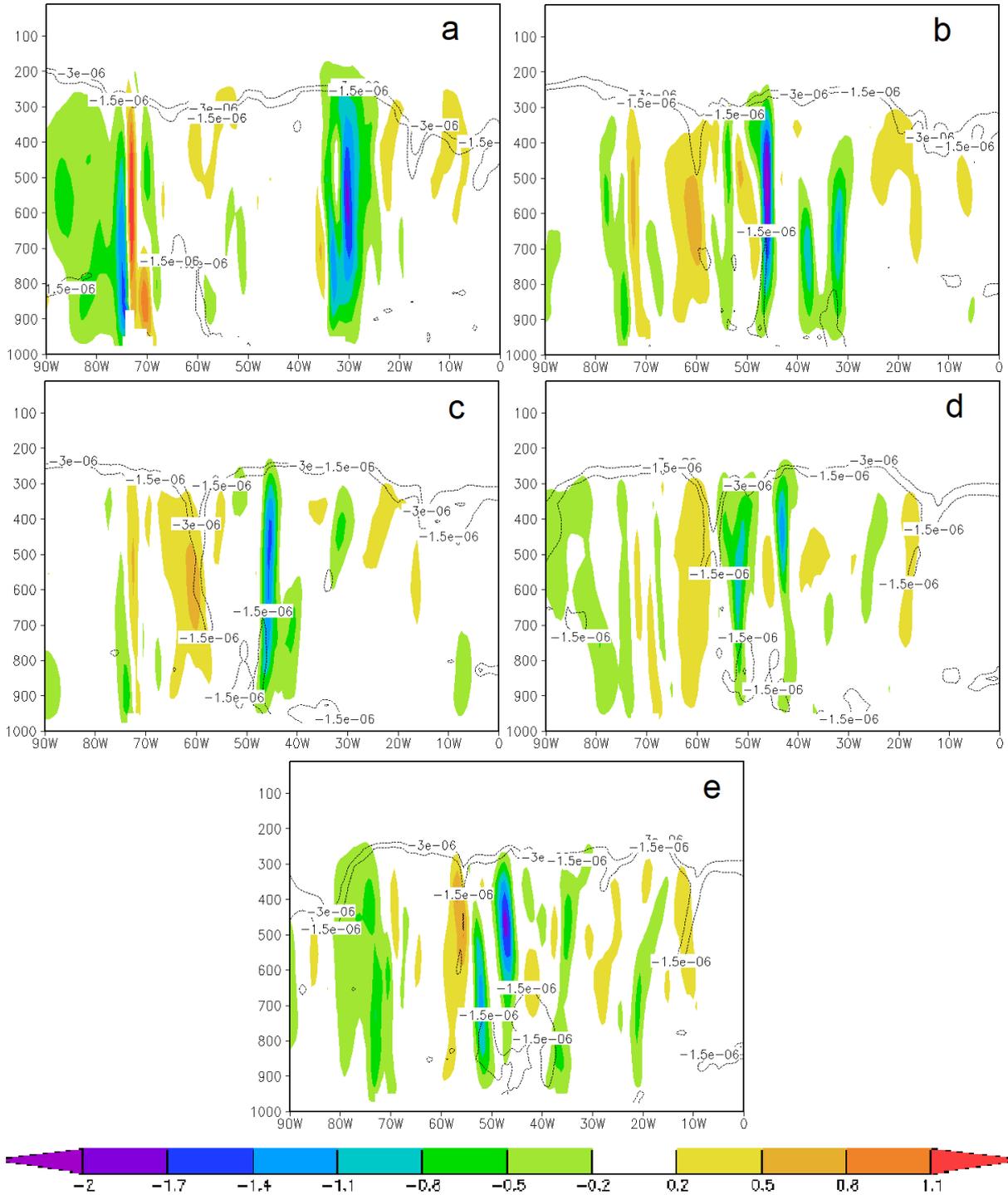


Figura 51 - Secções verticais de EPV menor ou igual a $-1,5$ PVU (contornos) e velocidade vertical Omega (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 50°S, 01/07/2012 18z; b) 52°S, 02/07/2012 00z; c) 53°S, 02/07/2012 06z; d) 54°S, 02/07/2012 12z, e) 54°S, 02/07/2012 18z.

Nestas outras secções verticais da Figura 52, os valores de umidade relativa menores do que 20 e 10% coincidem com a tropopausa dinâmica e acima dela, e também nas regiões de movimento subsidente.

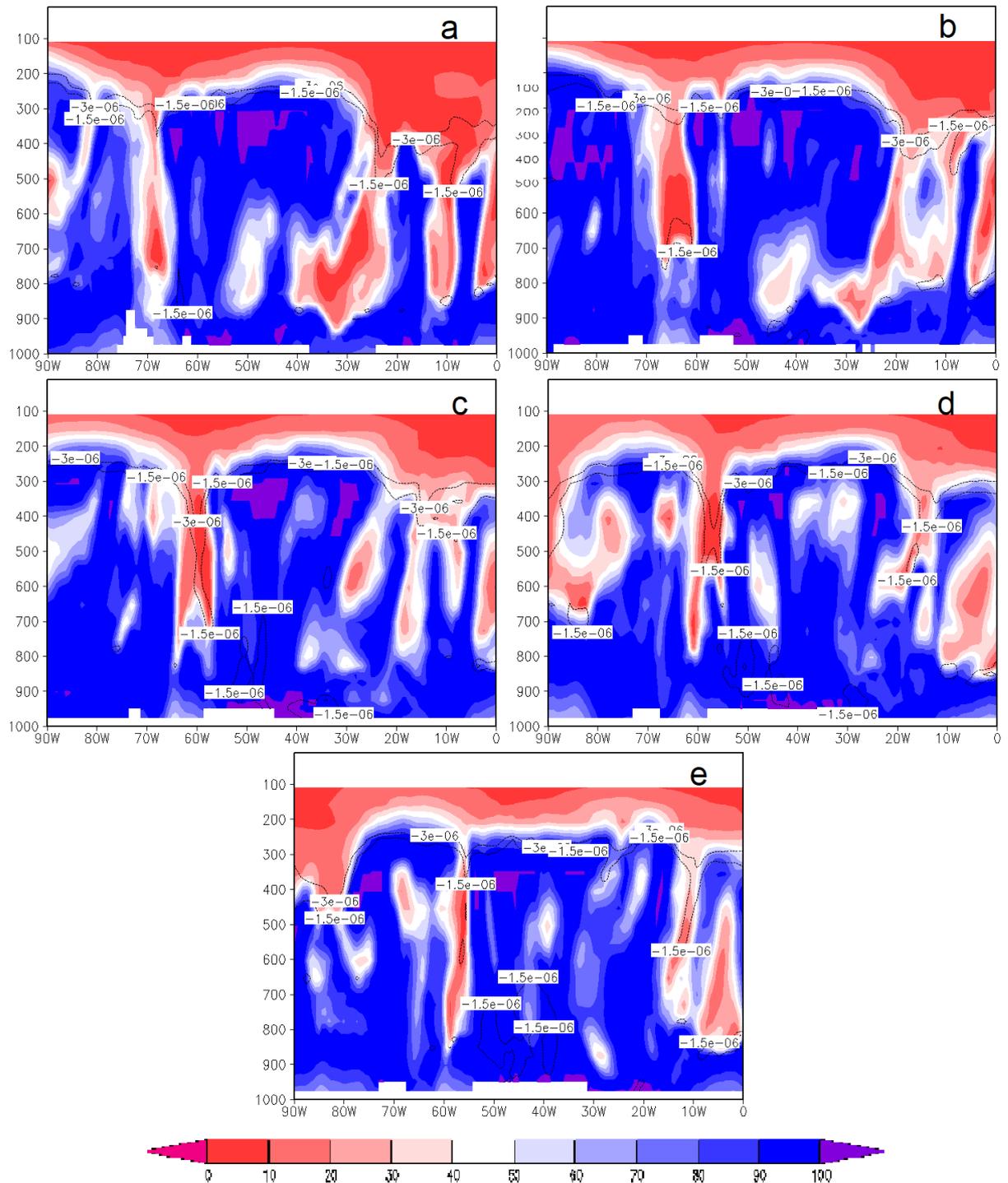


Figura 52 - Secções verticais de EPV menor ou igual a $-1,5$ PVU (contornos) e umidade relativa (sombreado colorido), nas latitudes em que o ciclone esteve localizado: a) 50°S, 01/07/2012 18z; b) 52°S, 02/07/2012 00z; c) 53°S, 02/07/2012 06z; d) 54°S, 02/07/2012 12z, e) 54°S, 02/07/2012 18z.

Na Figura 53, observam-se valores positivos apreciáveis de fluxo de calor latente na região atrás da frente fria durante todo o ciclo explosivo.

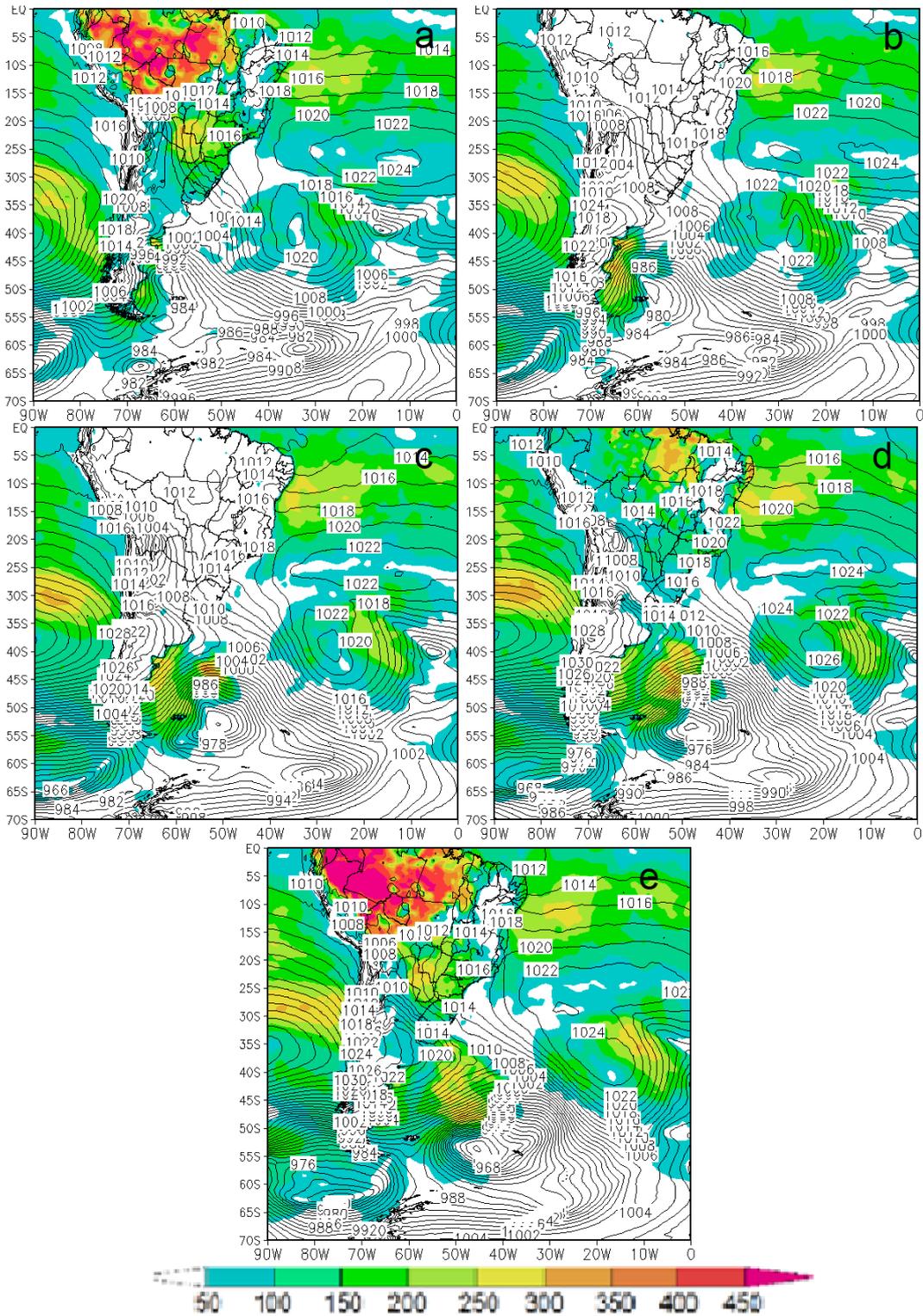


Figura 53 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor latente (sombreado em cores, Wm^{-2}). a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z.

Na Figura 54, observam-se fluxos de calor sensível de origem turbulenta positivos no setor frio e poucos negativos no setor quente.

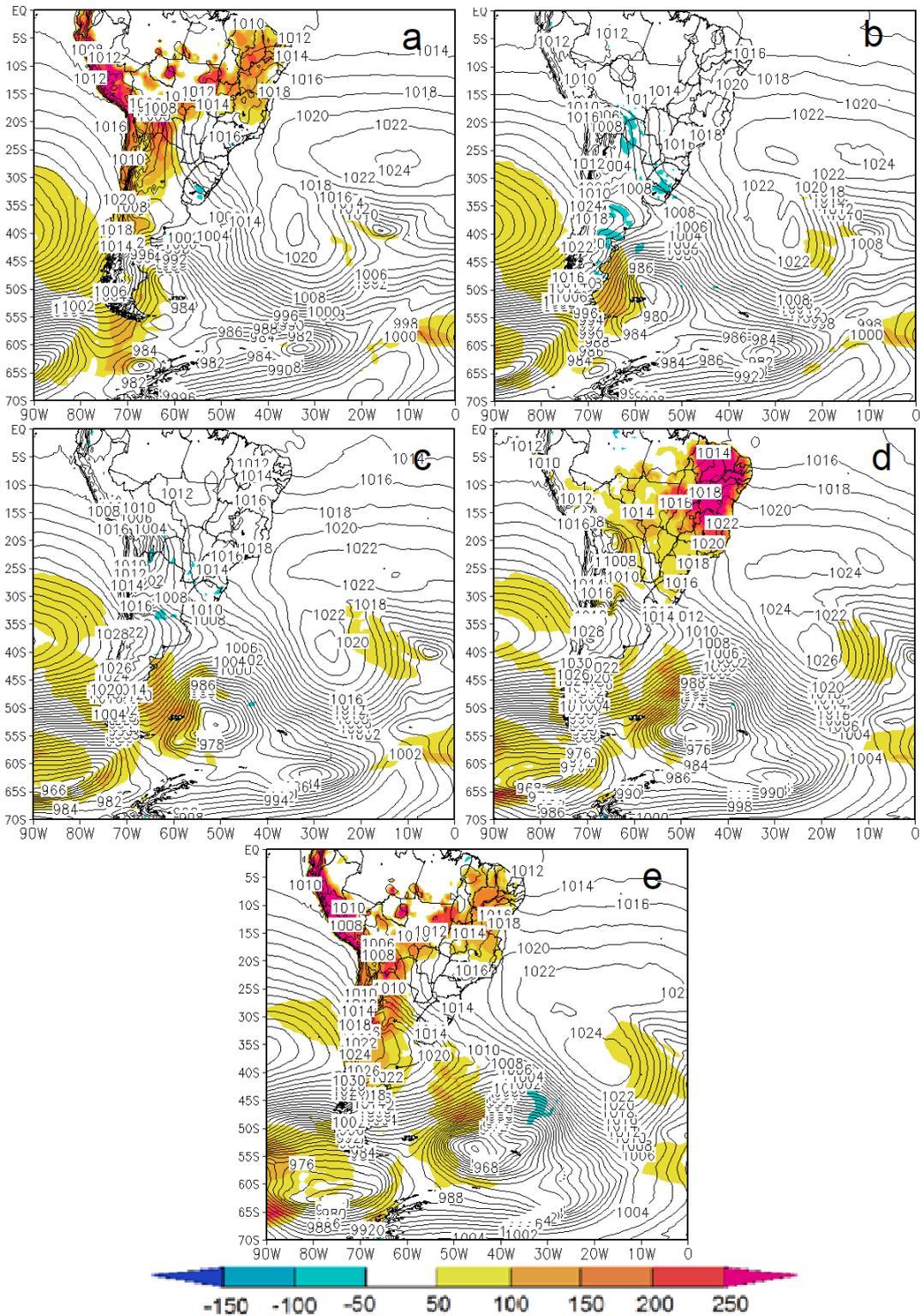


Figura 54 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta (sombreado em cores, Wm^{-2}). a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z.

Como pode ser visto na Figura 55, a energia cinética atmosférica destaca o jato, mas só apresenta valores mais altos no jet streak ao final do ciclo explosivo e após.

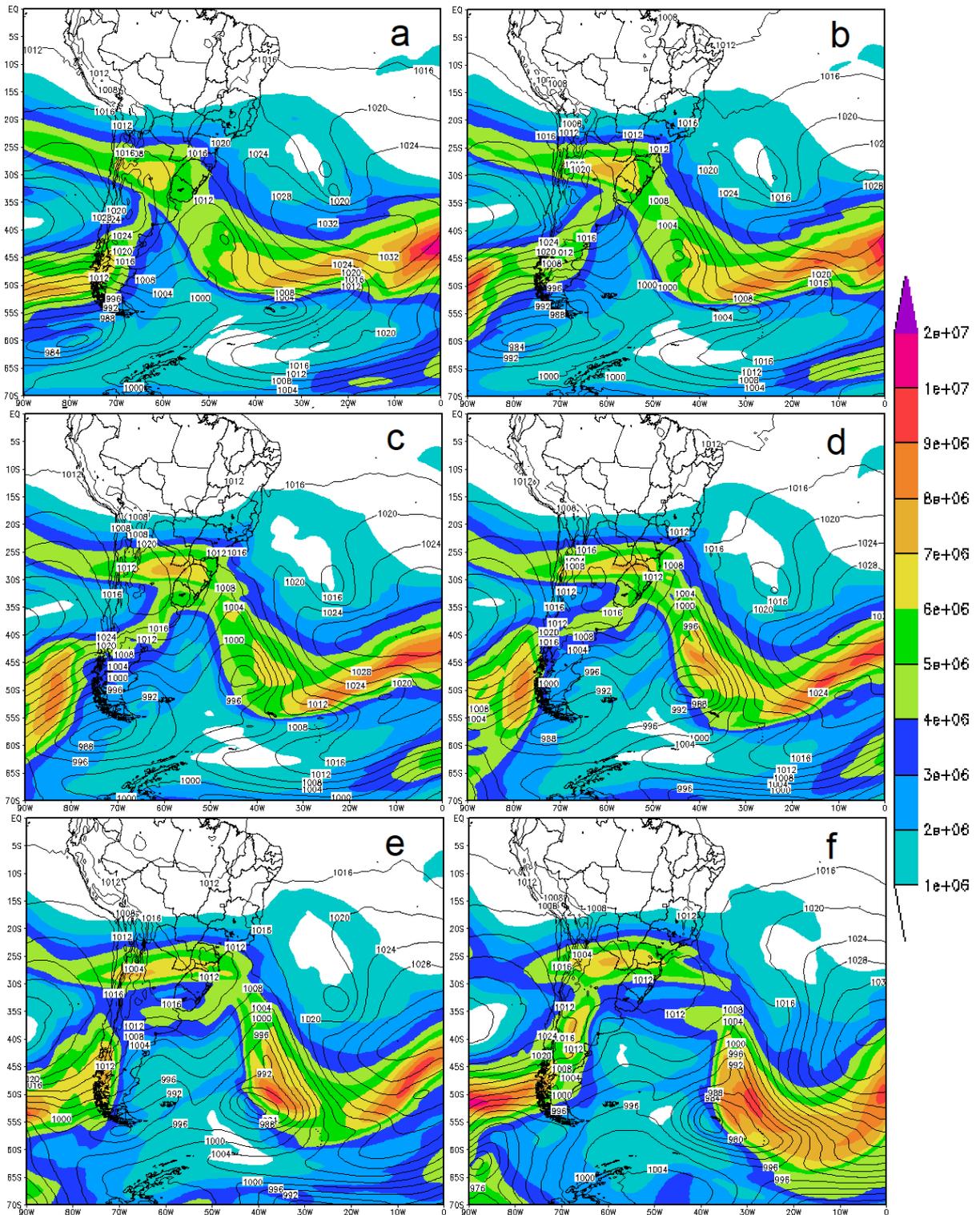


Figura 55 – Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z, f) 03/07/2012 06Z.

O fluxo zonal de energia cinética (Figura 56) apresenta altos valores no jet streak desde o início do ciclo explosivo.

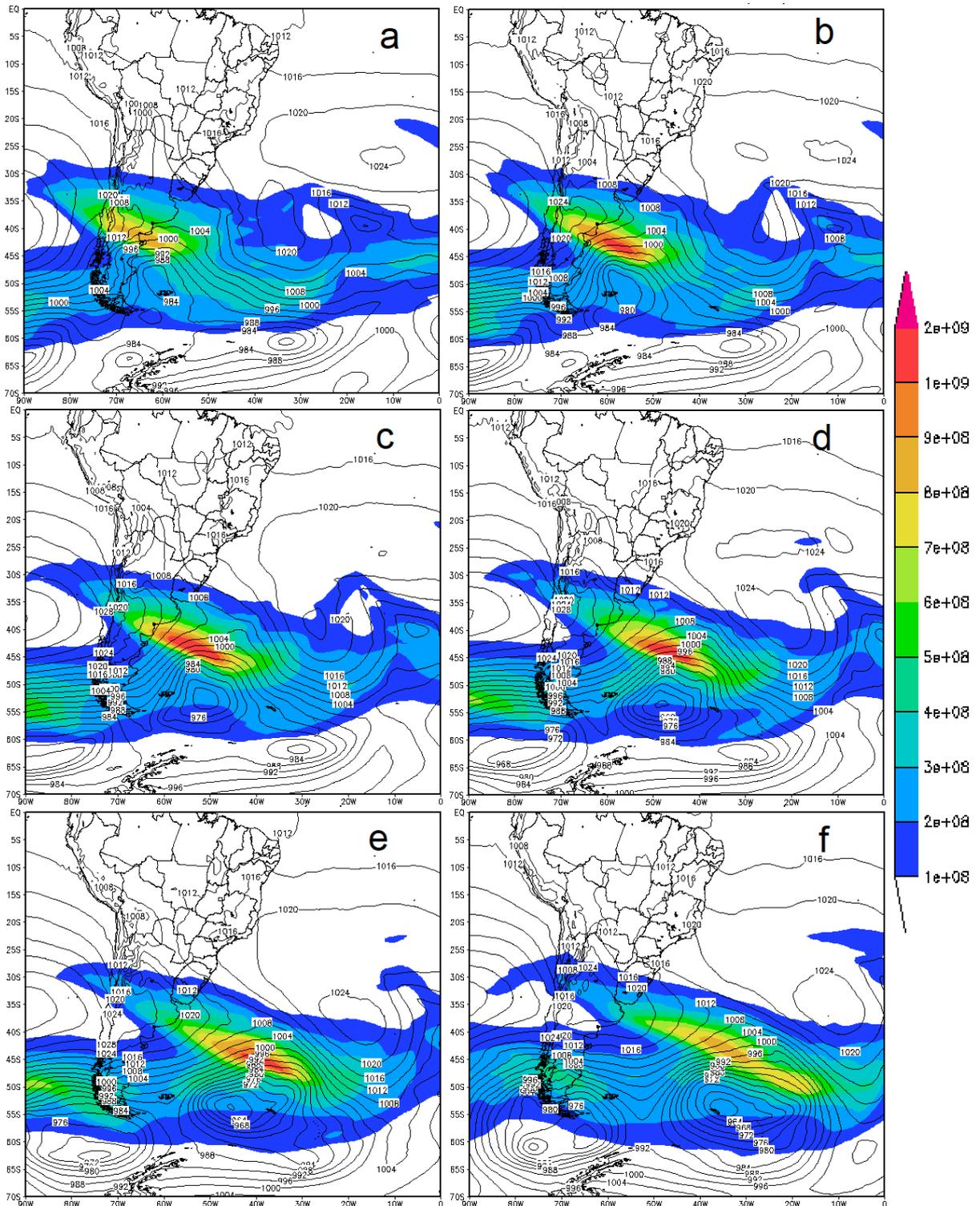


Figura 56 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z, f) 03/07/2012 06Z.

O fluxo meridional de energia cinética (Figura 57) mostra valores fracos embora mais abrangentes, compreendendo a parte mais desviada do jato subtropical e o jet streak.

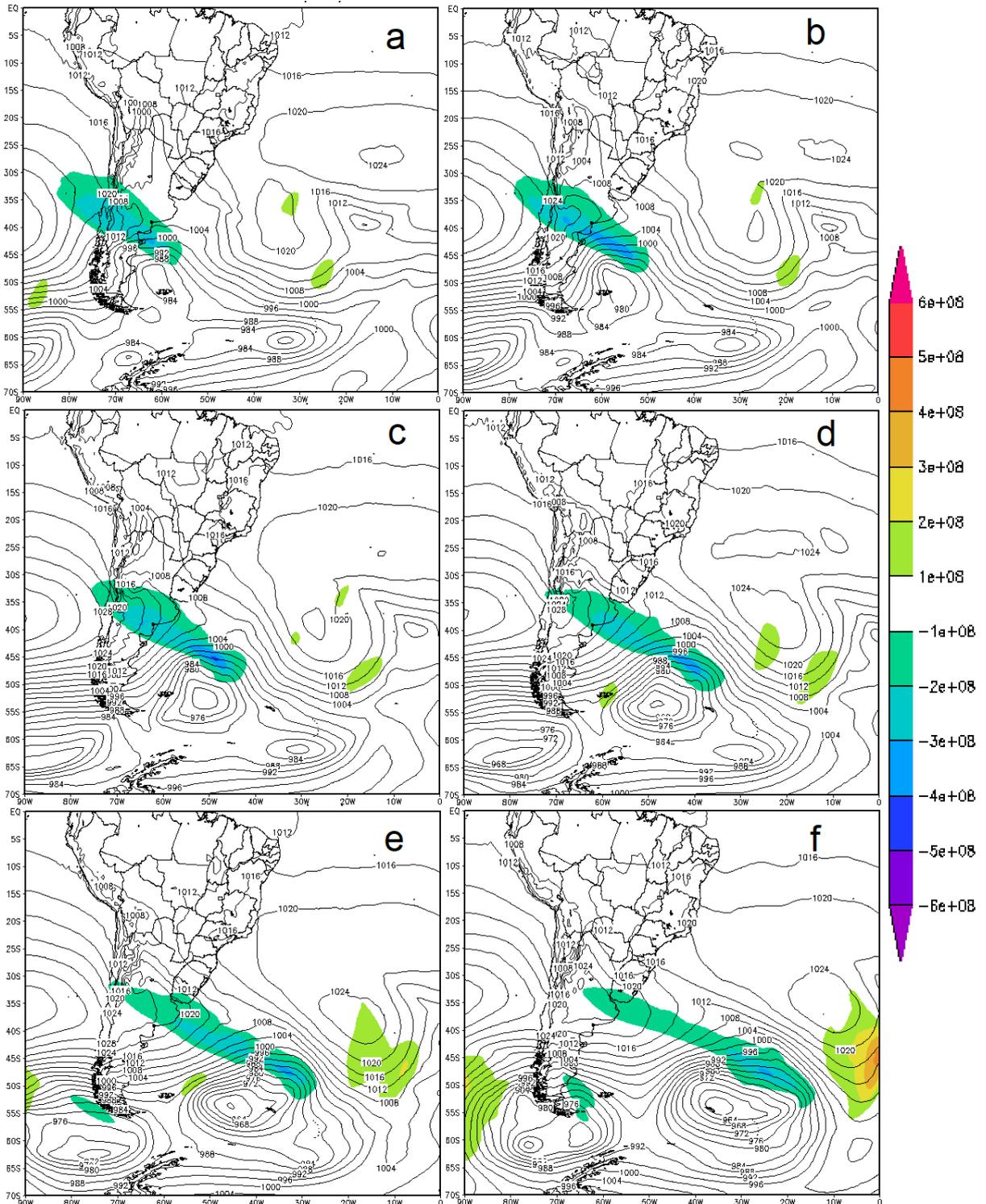


Figura 57 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. a) 01/07/2012 18Z, b) 02/07/2012 00Z, c) 02/07/2012 06Z, d) 02/07/2012 12Z, e) 02/07/2012 18Z, f) 03/07/2012 06Z .

4.5 Caso de 10/07/2012 - Inverno - Fraco (em latitude mais baixa)

Este ciclone começou seu ciclo explosivo em 10/07/2012, às 12Z, em 42°S-47W, com uma pressão central de 1004 hPa (Figura 58a), apresentando uma queda de 24 hPa até as 12Z de 11/07/2012, quando estava localizado em 53°S-40W (Figura 58e). A TNA calculada para esta queda de pressão nesta latitude média foi de 1,18 B classificando esta ciclogênese como explosiva fraca.

Este caso se diferencia daquele de 01/07/2012 porque embora seja fraco e de inverno, ocorreu em uma latitude bem mais baixa. No entanto, observa-se que o deslocamento dos dois ciclones convergiu praticamente para a mesma localização no final do ciclo explosivo, estando já em estado barotrópico, visto que, embora o deslocamento dos dois tenha sido para sudeste, este ciclone do dia 10/07/2012 teve uma componente meridional bem mais acentuada.

Nas secções verticais de EPV na Figura 59, a tropopausa dinâmica, mais alta do que aquela do dia 01/12, obviamente por causa da latitude mais baixa, mostra-se mais perturbada, embora também tenha pouca resposta em superfície em termos de valores altos de EPV.

Nas imagens de satélite no canal do vapor d'água (Figura 60) percebe-se que a faixa estreita com gradiente forte de umidade é quase zonal até chegar à costa leste onde sofre um desvio de praticamente 90° para o sul, o que pode ser verificado nas linhas de corrente em 250 hPa (Figura 61) como sendo uma consequência da interação dos jatos, na medida em que o jato subtropical é influenciado pela circulação anticiclônica sobre o norte do continente em altos níveis, enquanto o jato polar é influenciado pela circulação ciclônica em altos níveis no lado polar do mesmo, próximo ao extremo sul da América do Sul, favorecendo a confluência dos jatos sobre o sul do continente. Desta maneira, o ar estratosférico introduzido pela dobra associada com o jato subtropical foi capturado pela circulação do jato Polar, o qual mudou abruptamente a direção da referida intrusão para o sul na medida em que ocorreu a difluência dos jatos na costa leste. O resultado desta interação, com o jato Polar tomando energia do jato Subtropical, mas sem grande intensidade no jet streak, fez com que a intrusão não fosse tão vigorosa, mas mesmo assim foi suficiente para tornar explosivo o desenvolvimento do ciclone.

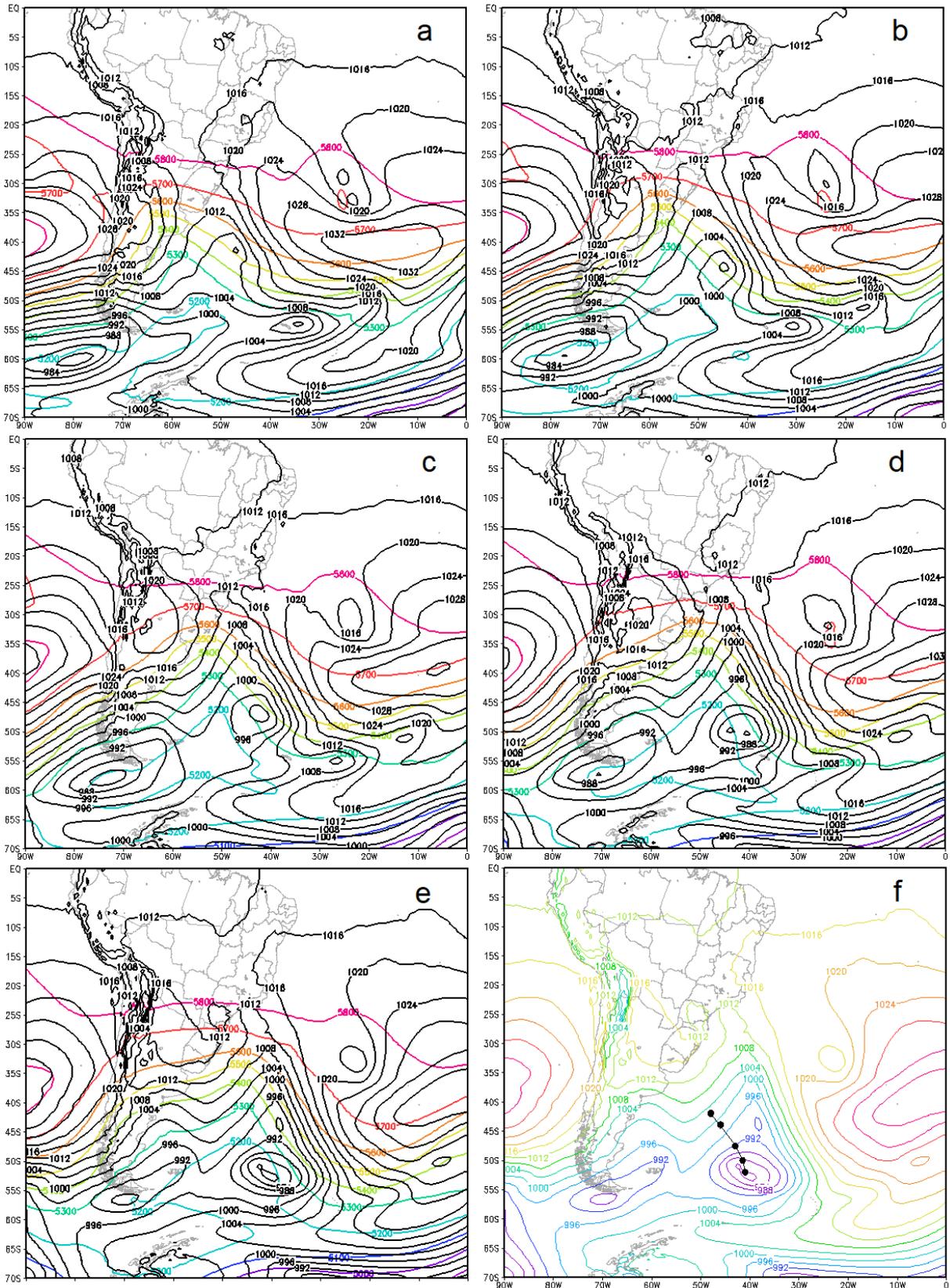


Figura 58 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em cores). a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z, f) PNMM 11/07/2012 12Z e trajetória.

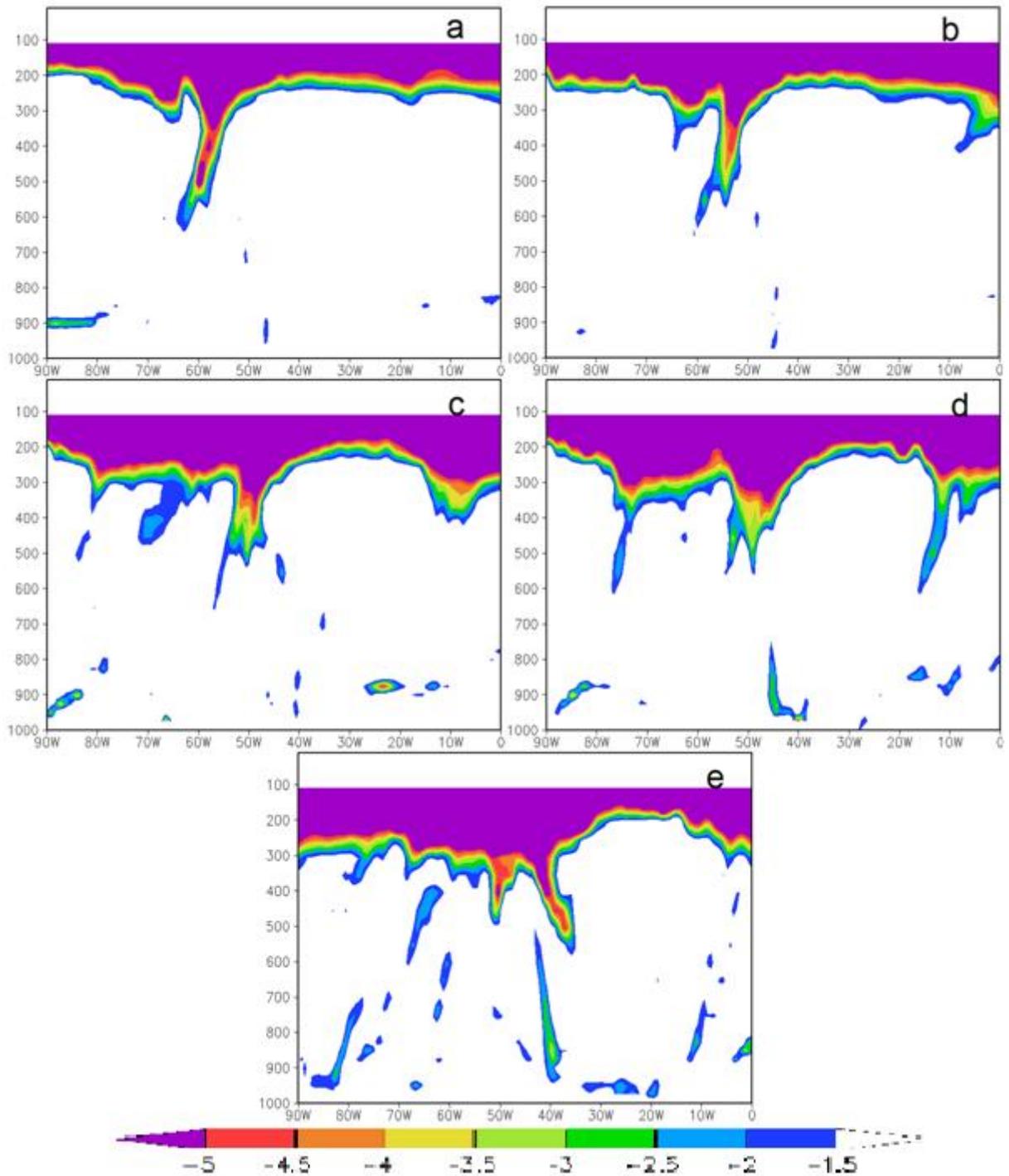


Figura 59 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 42°S, 10/07/2012 12Z, b) 44°S, 10/07/2012 18Z, c) 47.5°S, 11/07/2012 00Z, d) 50°S, 11/07/2012 06Z, e) 53°S, 11/07/2012 12Z.

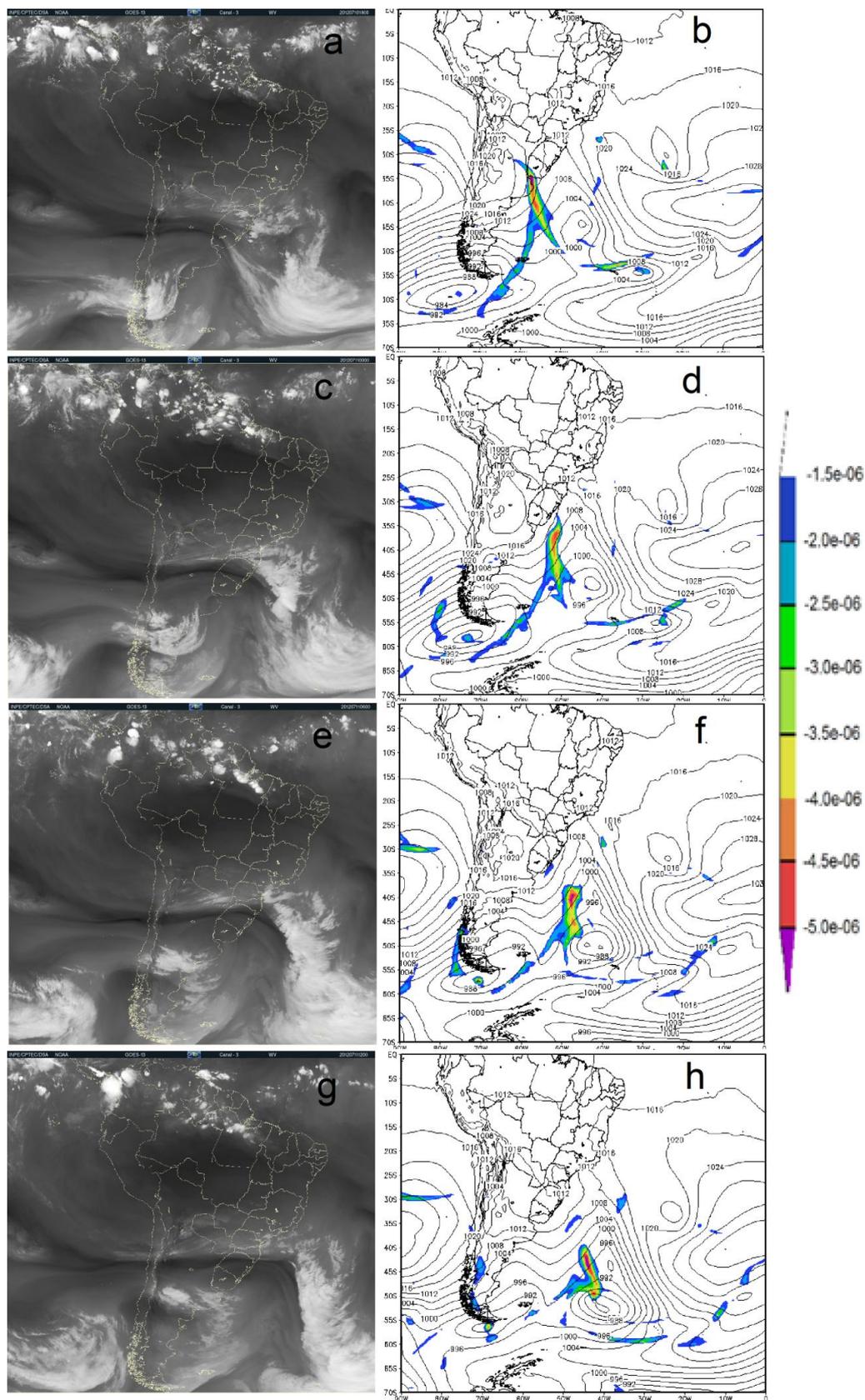


Figura 60 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 10/07/2012 18Z, (c) 11/07/2012 00Z, (e) 11/07/2012 06Z, (g) 11/07/2012 12Z, e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 10/07/2012 18Z, (d) 11/07/2012 00Z, (f) 11/07/2012 06Z, (h) 11/07/2012 12Z.

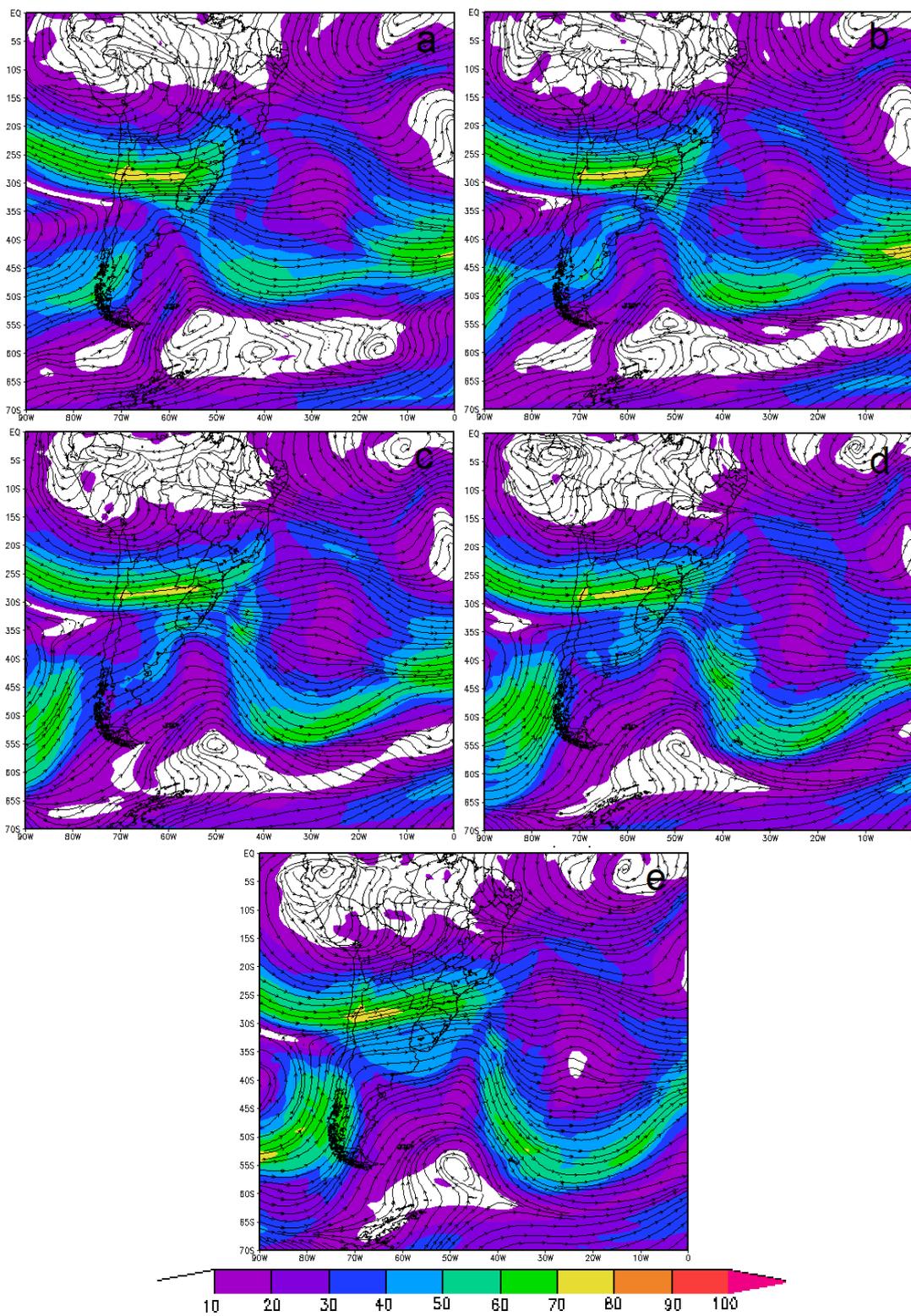


Figura 61 - Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z.

As linhas de corrente em 850 hPa mostram que durante a primeira metade do ciclo explosivo houve alguma contribuição do escoamento da Amazônia em termos de calor e umidade.

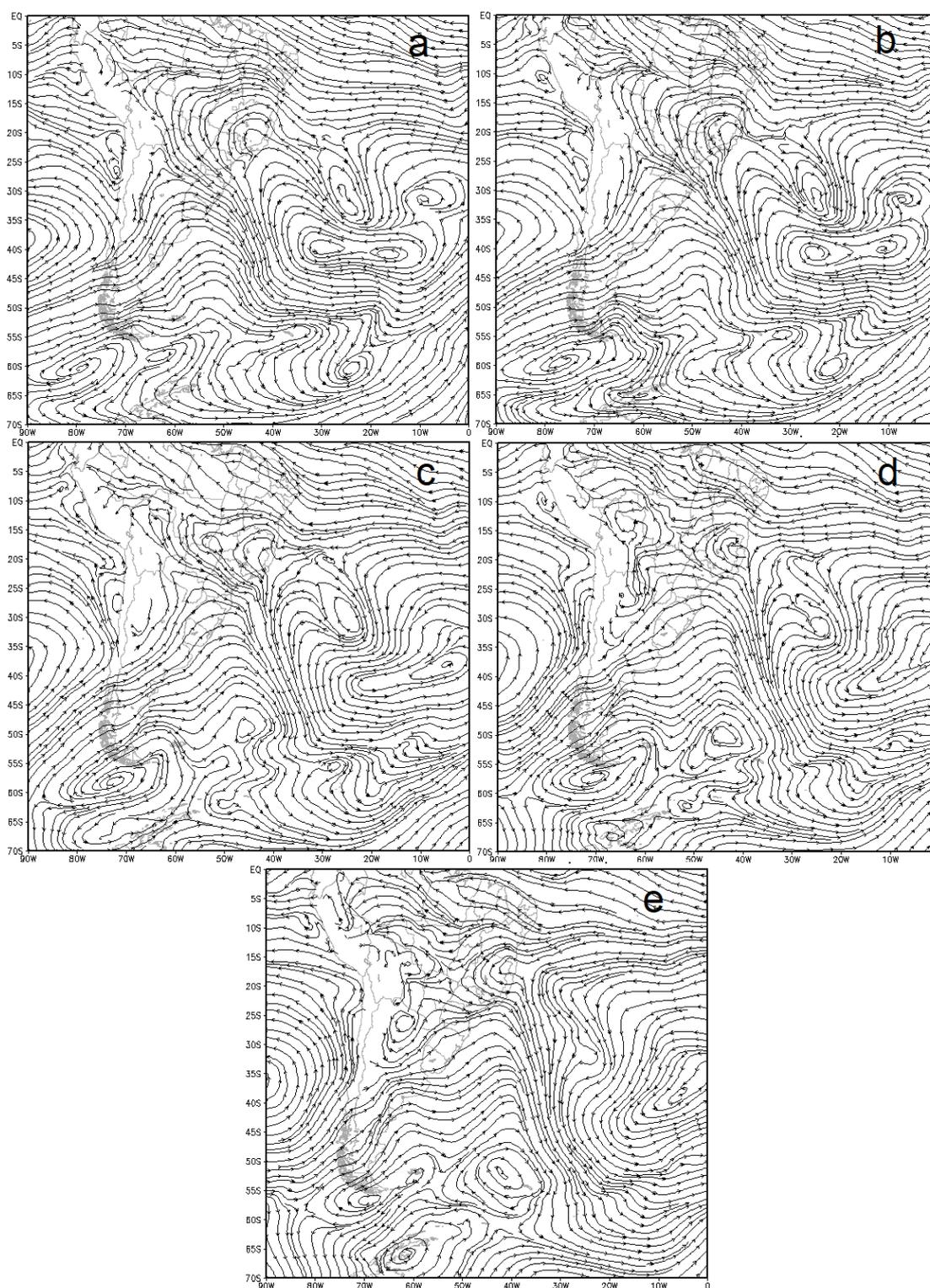


Figura 62 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z.

As secções verticais de EPV acoplada com tendência de ozônio (Figura 63) mostram o padrão normal, mesmo sem a abrangência de casos mais intensos.

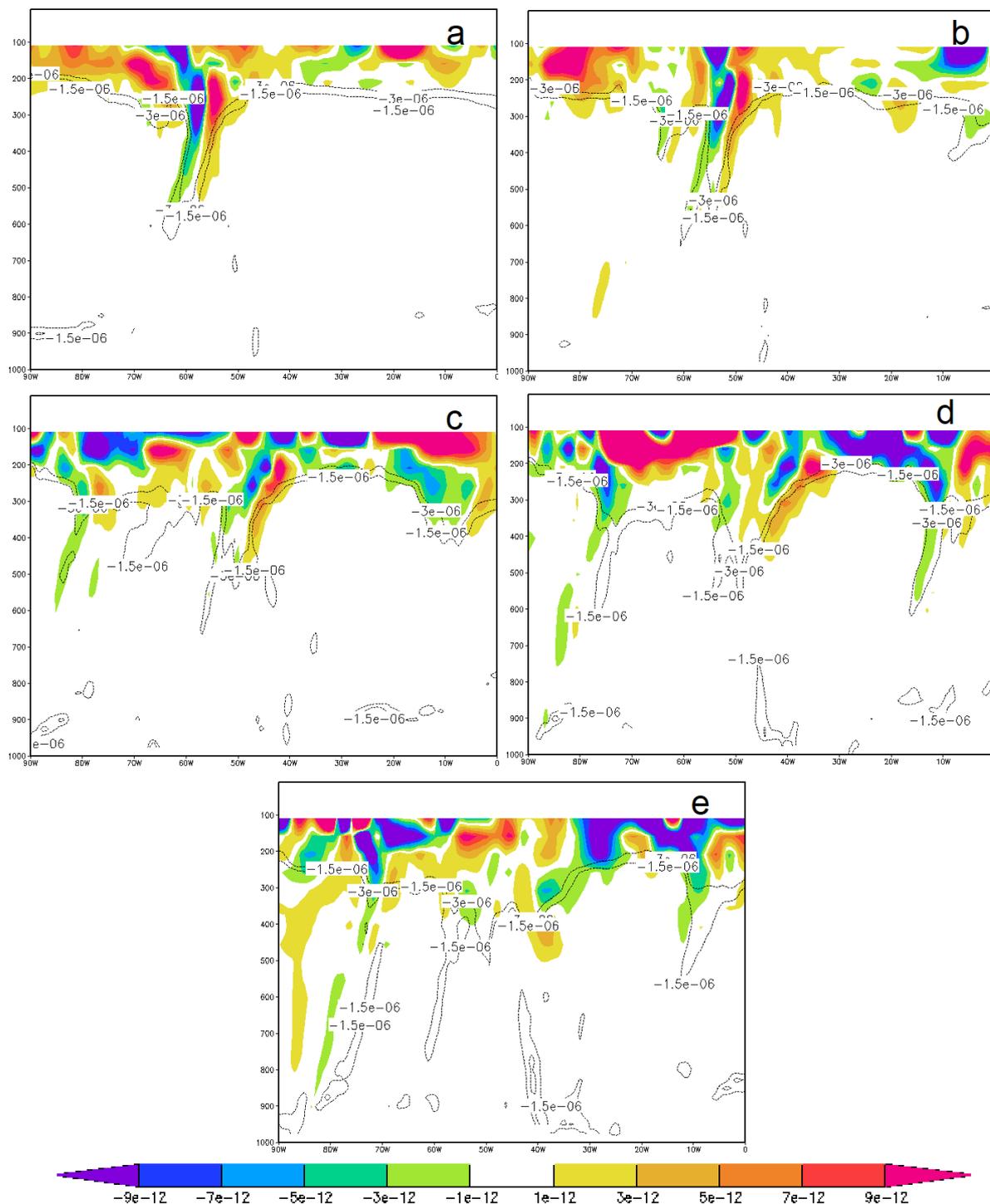


Figura 63 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e tendência de Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 42°S, 10/07/2012 12Z, b) 44°S, 10/07/2012 18Z, c) 47.5°S, 11/07/2012 00Z, d) 50°S, 11/07/2012 06Z, e) 53°S, 11/07/2012 12Z.

As secções verticais de EPV acoplada com velocidade vertical (Figura 64) também mostram o padrão normal, mesmo sem a abrangência de casos mais intensos. O mesmo ocorre com a umidade relativa (Figura 65) com a tropopausa e regiões de movimento subsidente marcadas por baixos valores de umidade relativa.

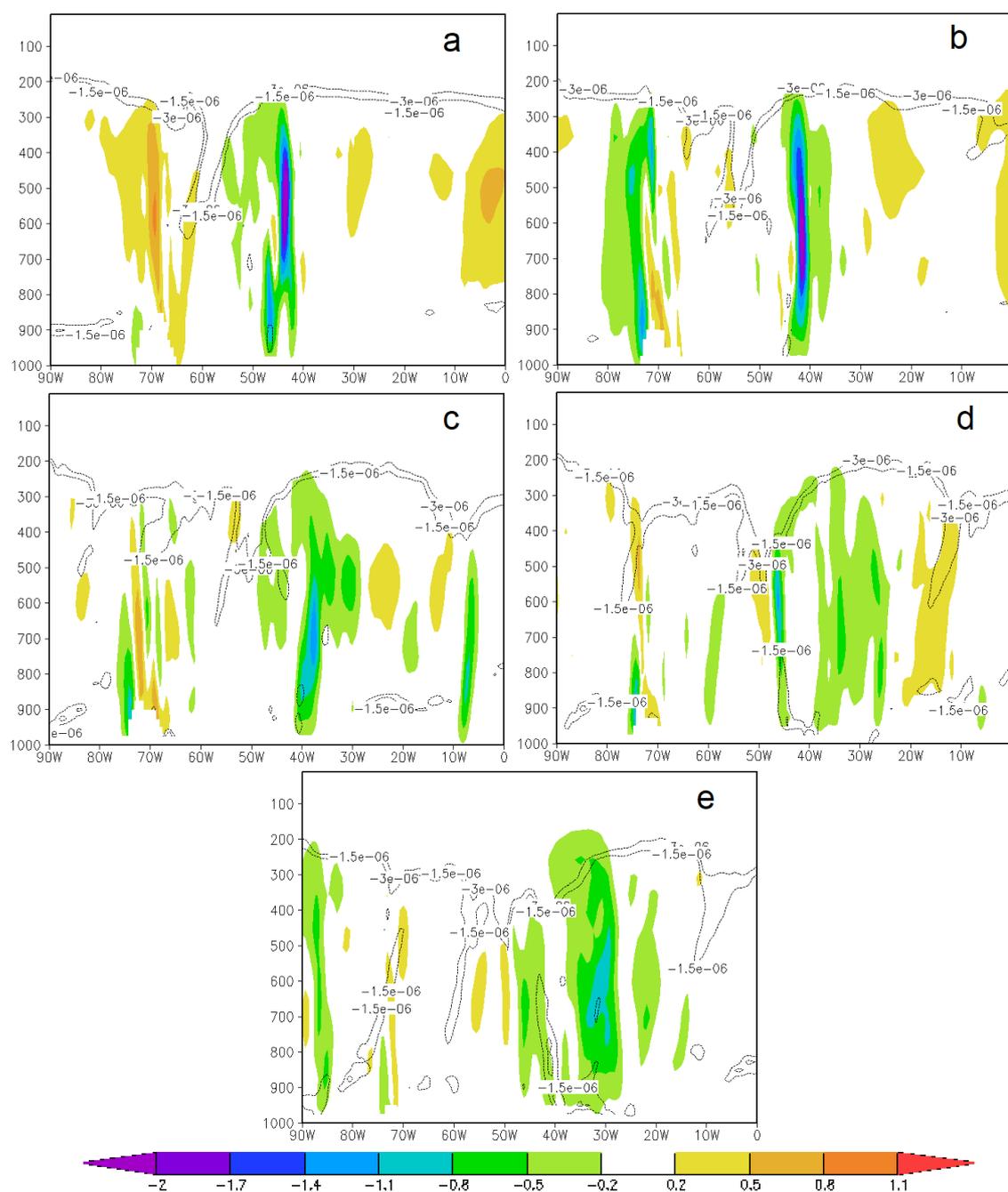


Figura 64 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU e velocidade vertical Omega, nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 42°S, 10/07/2012 12Z, b) 44°S, 10/07/2012 18Z, c) 47.5°S, 11/07/2012 00Z, d) 50°S, 11/07/2012 06Z, e) 53°S, 11/07/2012 12Z.

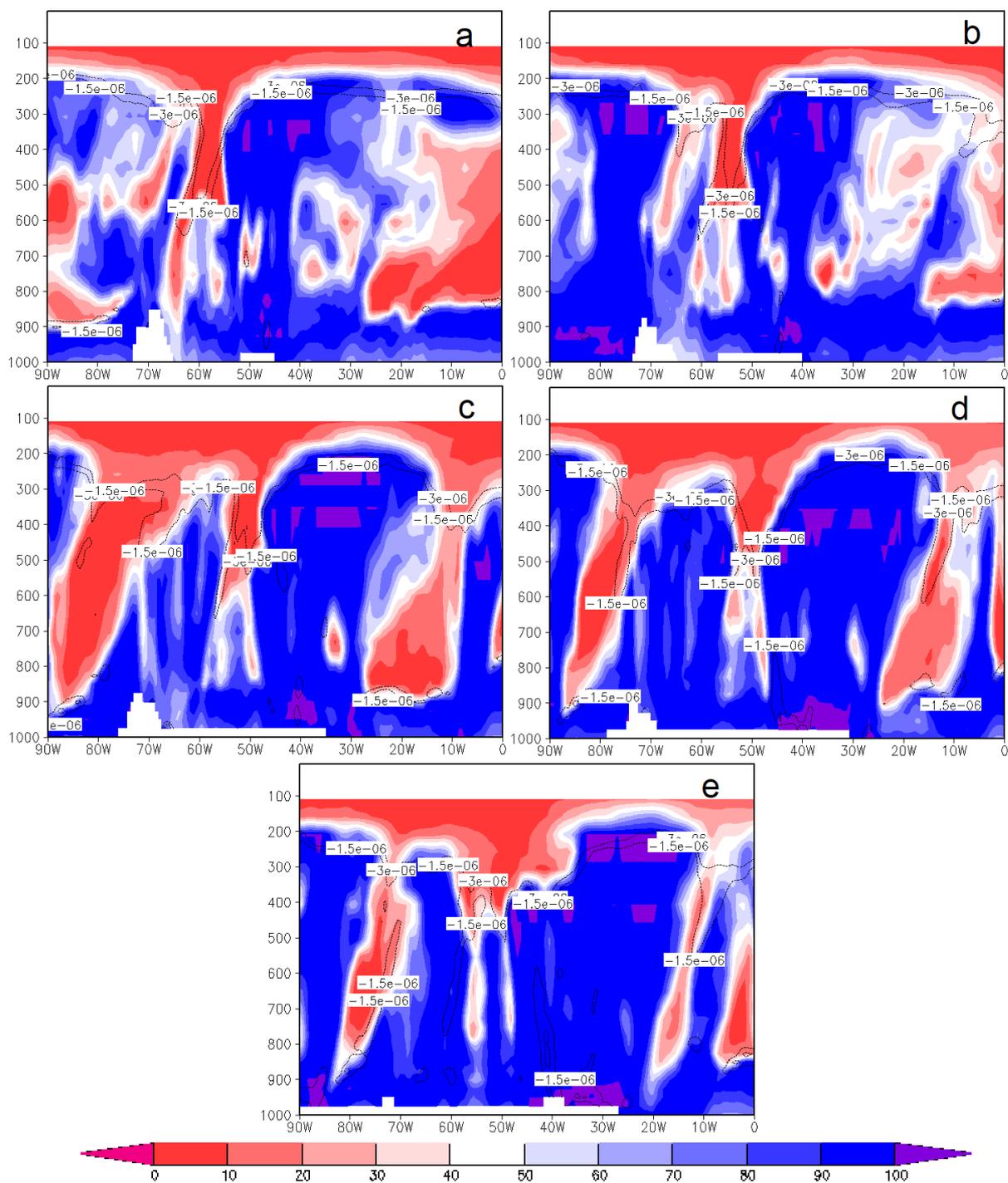


Figura 65 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU e umidade relativa nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 42°S, 10/07/2012 12Z, b) 44°S, 10/07/2012 18Z, c) 47.5°S, 11/07/2012 00Z, d) 50°S, 11/07/2012 06Z, e) 53°S, 11/07/2012 12Z.

Os fluxos de calor latente (Figura 66) aparecem na região atrás da frente fria e se mantêm na mesma região mesmo depois que o ciclone evolui para o sul.

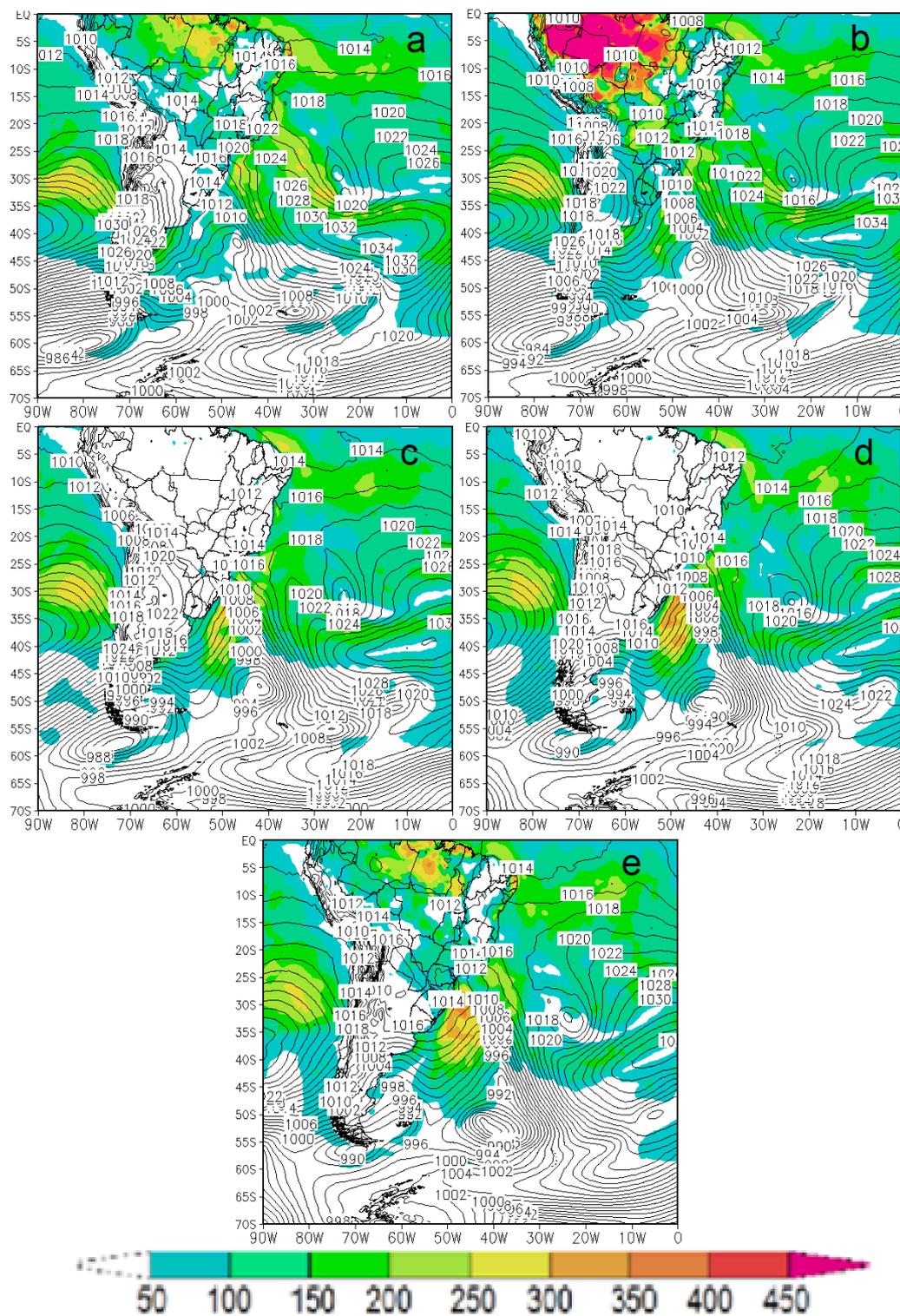


Figura 66 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor latente (sombreado em cores, Wm^{-2}). a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z.

Na Figura 67, os fluxos positivos de calor sensível atrás da frente fria aparecem desde o início, e os valores negativos ao final do ciclo na região da frente quente.

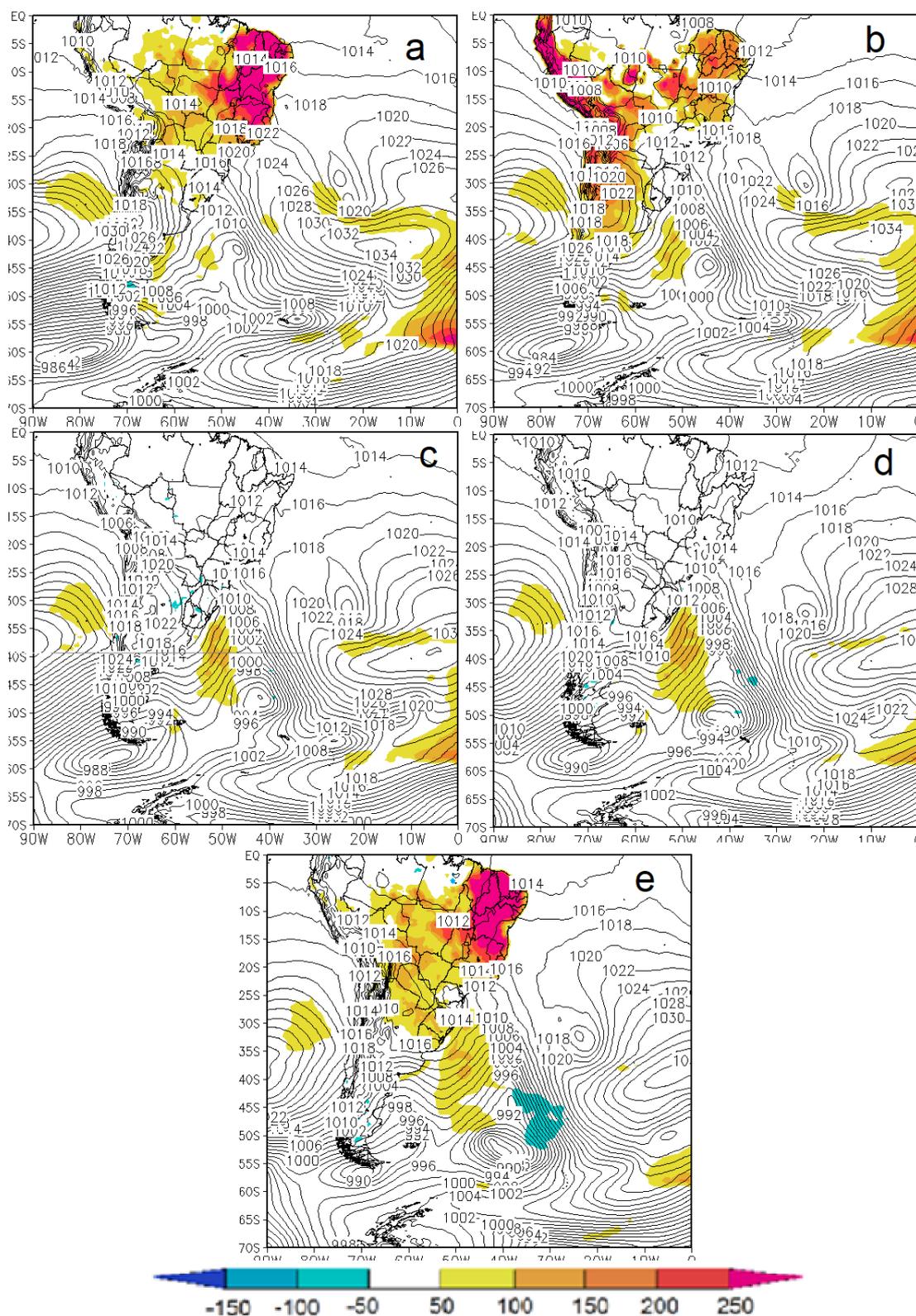


Figura 67 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta (sombreado em cores, Wm^{-2}). a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z.

Os valores de energia cinética (Figura 68) são relativamente menores na região de formação do ciclone, tornando-se apreciáveis apenas ao final do ciclo explosivo.

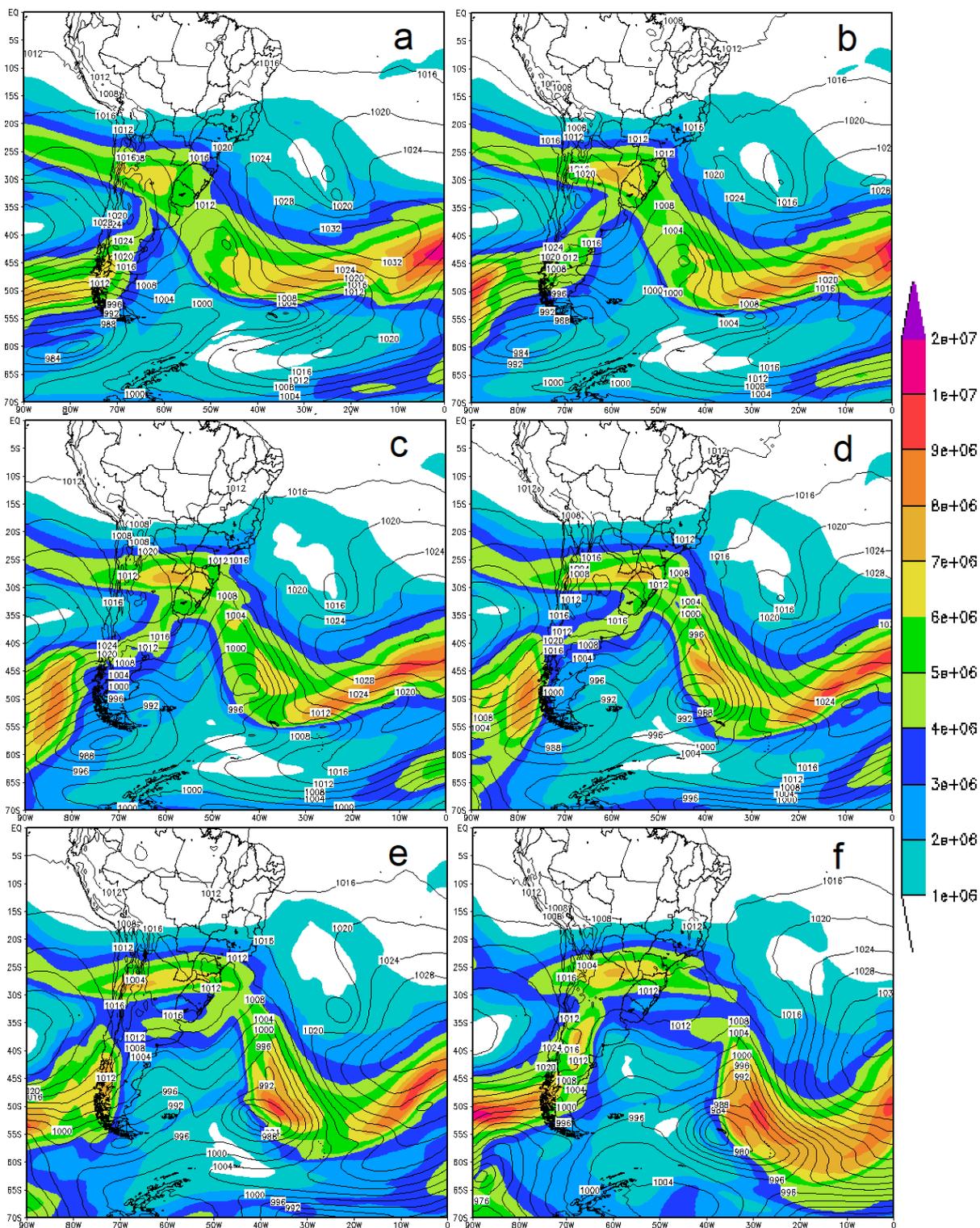


Figura 68 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z, e) 12/07/2012 00Z.

O fluxo zonal de energia cinética (Figura 69) também apresenta valores pequenos durante praticamente todo o ciclo explosivo.

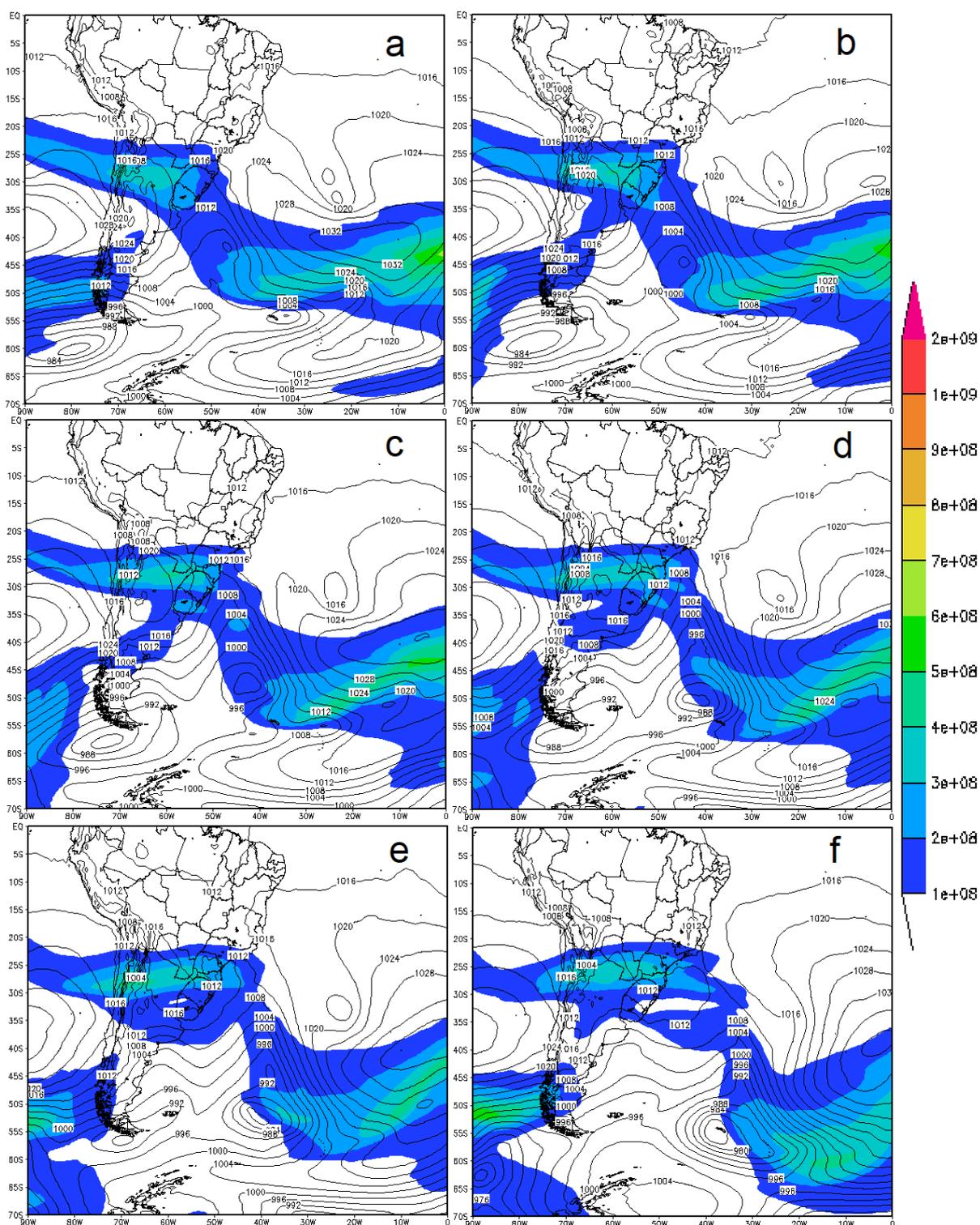


Figura 69 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z, e) 12/07/2012 00Z.

O fluxo meridional de energia cinética (Figura 70) mostra valores compatíveis com a perturbação do jato Polar desviado para o sul com bastante abrangência em torno da região onde o ciclone se desenvolveu.

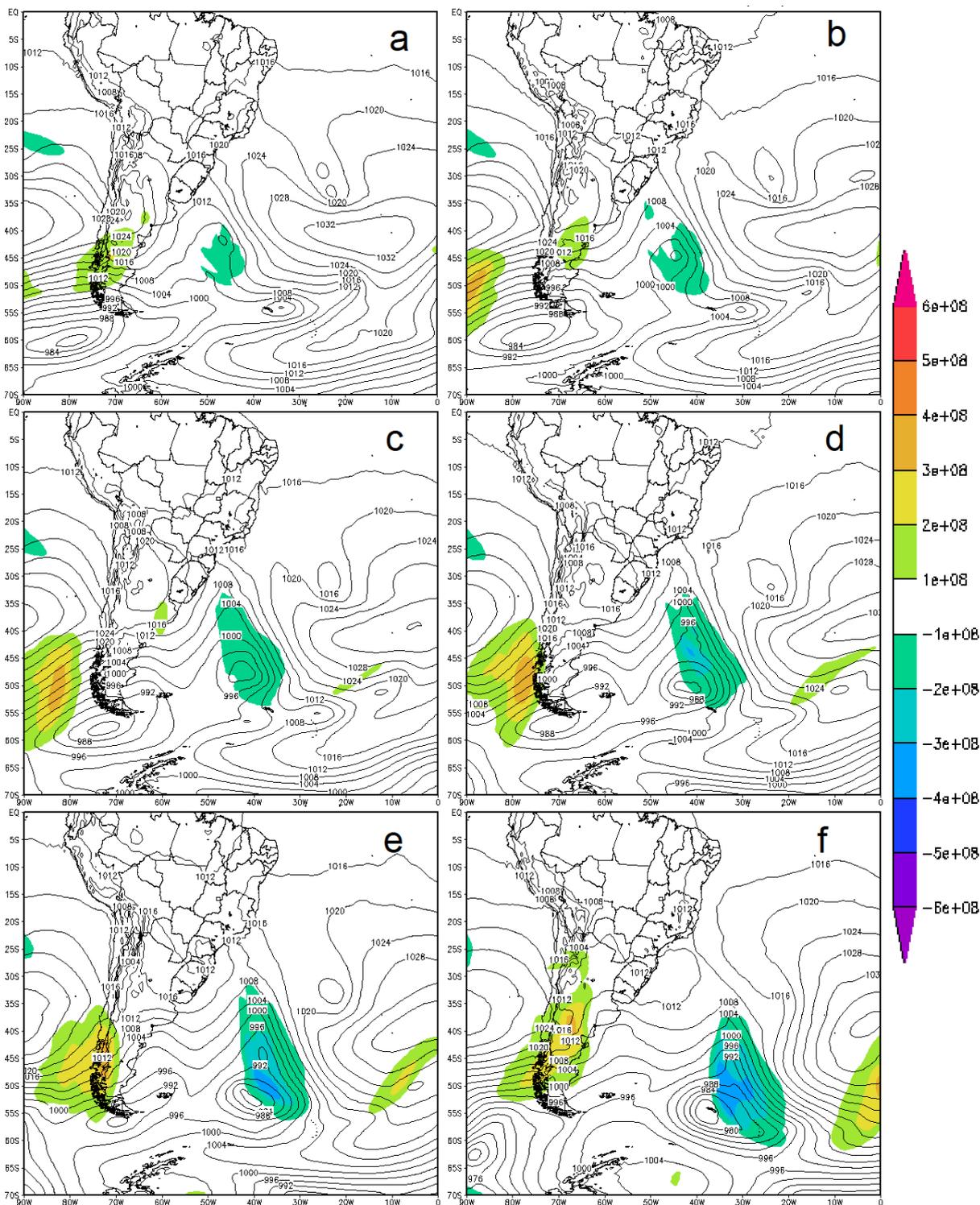


Figura 70 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 10/07/2012 12Z, b) 10/07/2012 18Z, c) 11/07/2012 00Z, d) 11/07/2012 06Z, e) 11/07/2012 12Z, e) 12/07/2012 00Z.

4.6 Caso 13/07/2012 00Z – Inverno - Moderado

O ciclo explosivo deste ciclone começou às 0Z de 13/07/2012, em 33°S-43°W, com uma pressão central de 1000 hPa (Figura 71a), chegando às 0Z de 14/07/2012 em 44°S-34°W, com uma pressão central de 976 hPa (Figura 71e). Esta queda de 24 hPa na pressão central em 24 horas, para esta latitude média de 38,5°, corresponde a uma taxa de aprofundamento de 1,39 B, classificando este caso como ciclogênese explosiva moderada.

Apesar de moderado, este ciclone causou prejuízos nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais pela abrangência da frente associada com ele (G1_d, 2012).

Nesta mesma Figura pode ser visto a defasagem entre o cavado nos contornos de geopotencial em 500 hPa e o centro do ciclone na superfície, indicando a baroclinia do sistema.

As secções verticais de EPV (Figura 72) mostram a perturbação na tropopausa dinâmica crescendo durante o desenvolvimento do ciclone, porém com uma língua, a qual indica a intrusão, mostrando uma componente apontando para oeste, ao contrário do que acontece nos casos fortes quando aponta para leste, e sem grande resposta aparente na superfície.

A Figura 73, mostra nas imagens de satélite, a região da intrusão com uma clássica e bem marcada “cabeça de nuvem” (indicada por cn na Figura 73a), exibindo uma configuração que segue o modelo conceitual de Shapiro e Keyser (1990), com uma frente fria que se desloca perpendicularmente a frente quente e se torna cada vez menos intensa, enquanto a frente quente, mais intensa e deslocando-se mais rápido, espirala no centro do ciclone, indicando a seclusão de ar quente.

Curiosamente, o campo de advecção de temperatura (Figura 74), mostra que a frente fria se desvanece no fim do ciclo explosivo, formando-se outra frente fria mais atrás, a qual avança mais rápido girando como um ponteiro de relógio e alcançando a frente quente, aos moldes do modelo conceitual de Bjerkness e Solberg (1922). Cabe notar que, a frente fria primária que se desvanece em termos do campo de advecção de temperatura, indicando seu enfraquecimento, continua mostrando uma apreciável banda de nuvens nas imagens de satélite nos canais do vapor d'água e

do visível. Enquanto isso, a frente fria secundária, originada pelo ar frio proveniente do sul contornando a região da seclusão, só aparece nos campos de advecção de temperatura, não exibindo banda de nuvens apreciável, o que a caracteriza como uma frente seca.

Na Figura 75, as linhas de corrente em 250 hPa mostram a confluência dos jatos polar e subtropical sobre a região sul do Brasil e difluência no oceano próximo à costa leste, com o ciclone se formando à direita da saída do “jet streak”. Na sequência, percebe-se pela configuração dos jatos, que ao difluirem, o jato polar toma energia do jato subtropical.

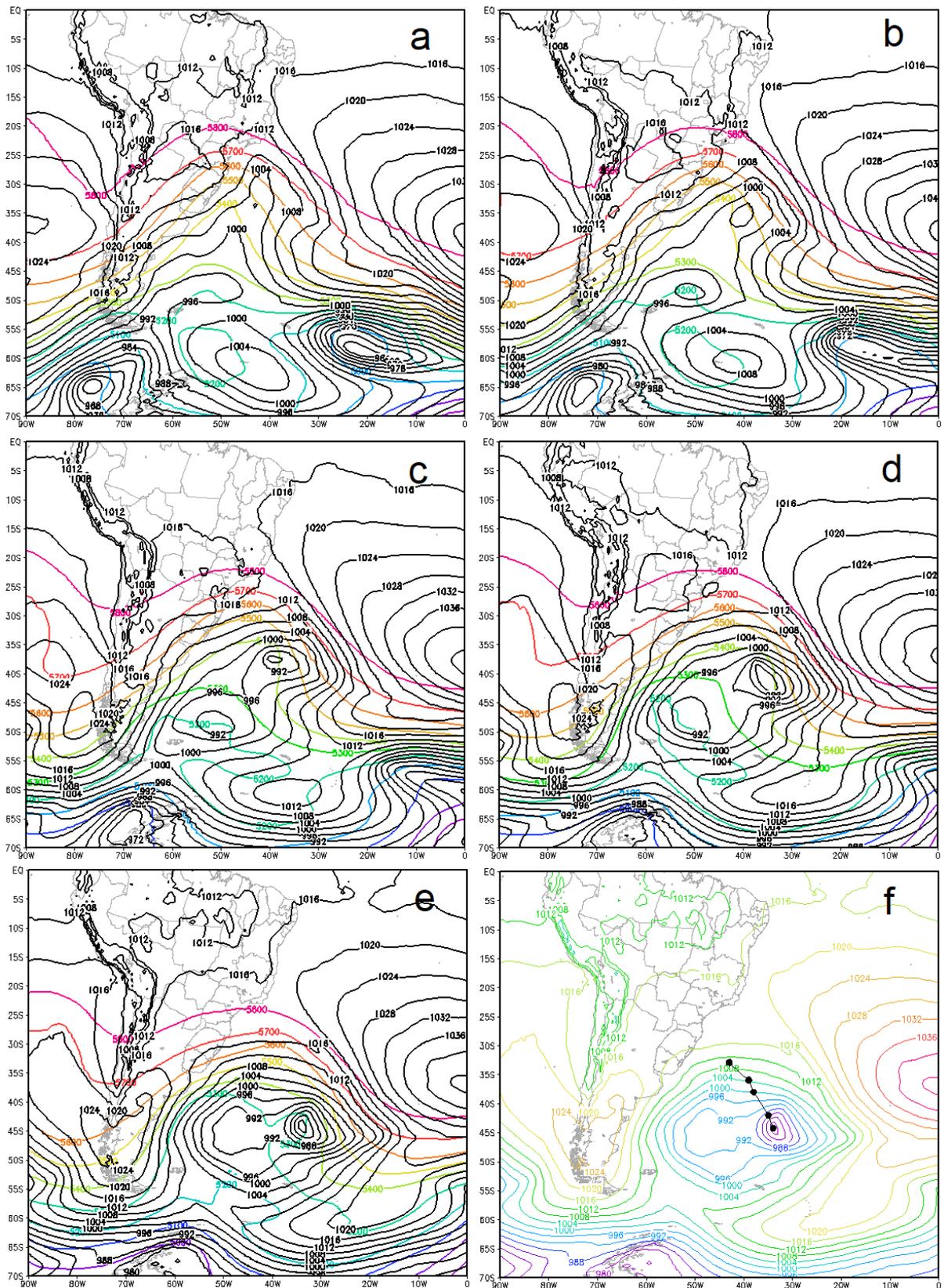


Figura 71 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta (sombreado em cores). a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z, f) PNMM 14/07/2012 00Z e trajetória.

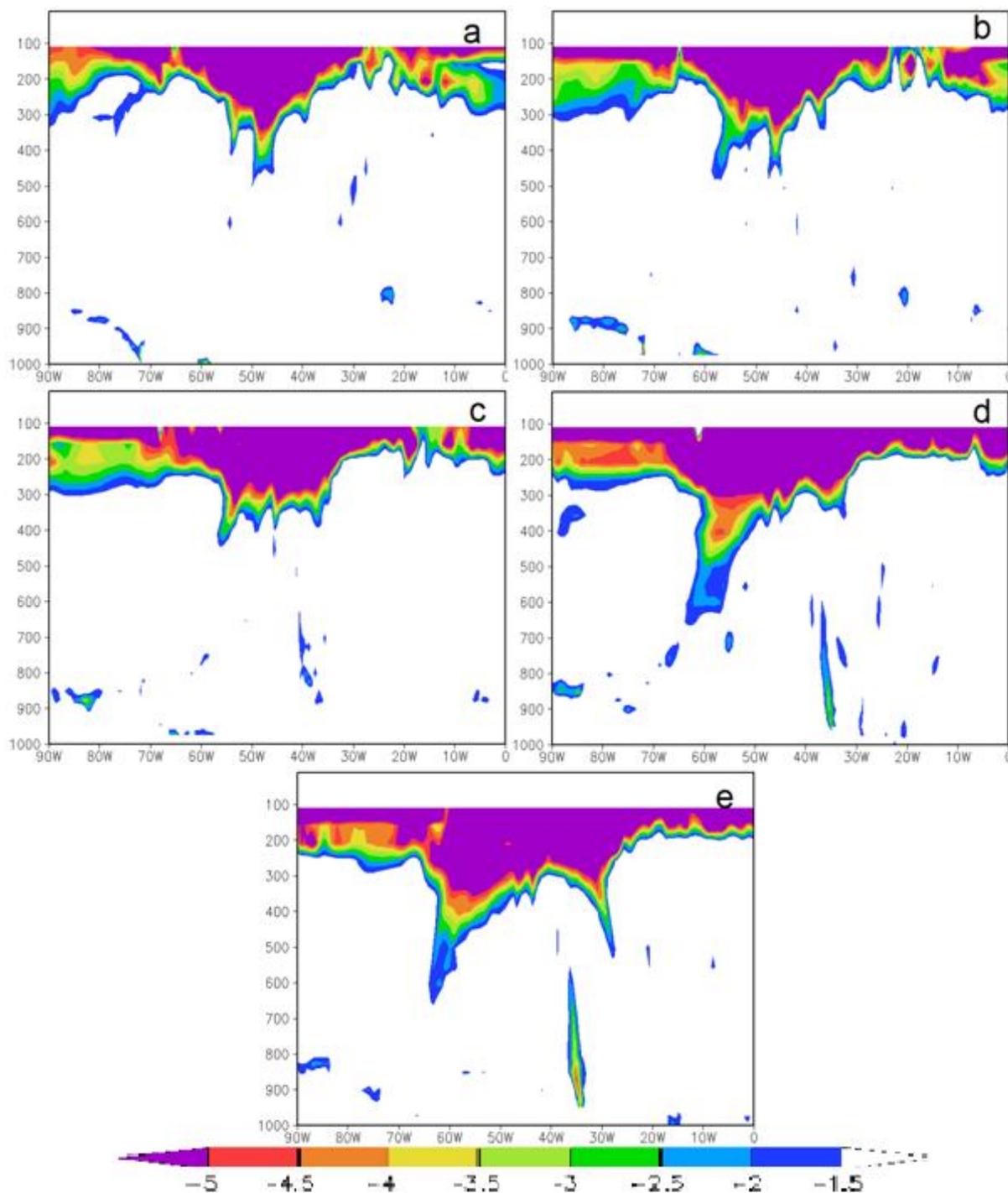


Figura 72 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 33°S, 13/07/2012 00Z, b) 36°S, 13/07/2012 06Z, c) 38°S, 13/07/2012 12Z, d) 42°S, 13/07/2012 18Z, e) 44°S, 14/07/2012 00Z.

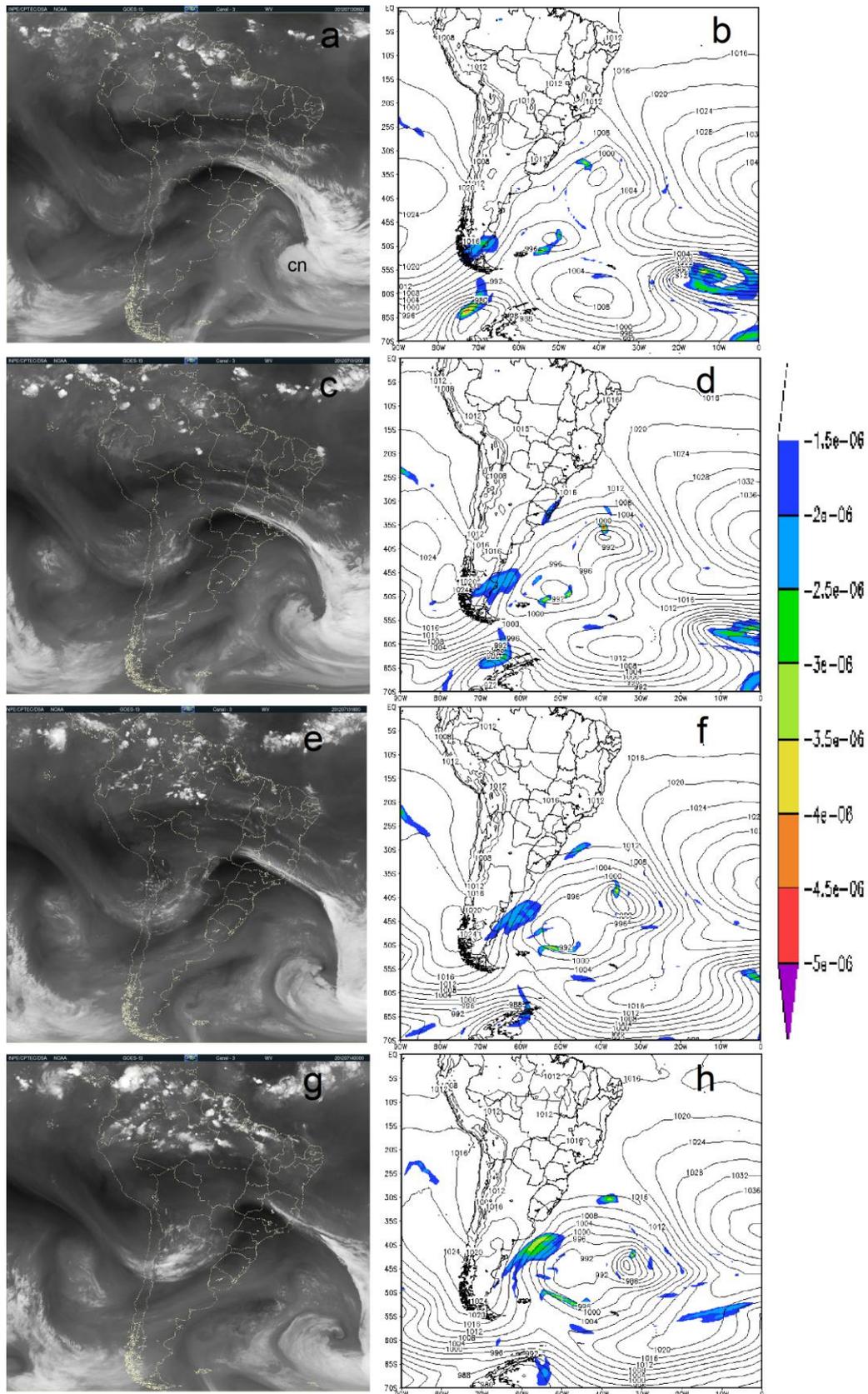


Figura 73 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 13/07/2012 06Z, (c) 13/07/2012 12Z, (e) 13/07/2012 18Z, (g) 14/07/2012 00Z, e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 13/07/2012 06Z, (d) 13/07/2012 12Z, (f) 13/07/2012 18Z, (h) 14/07/2012 00Z.

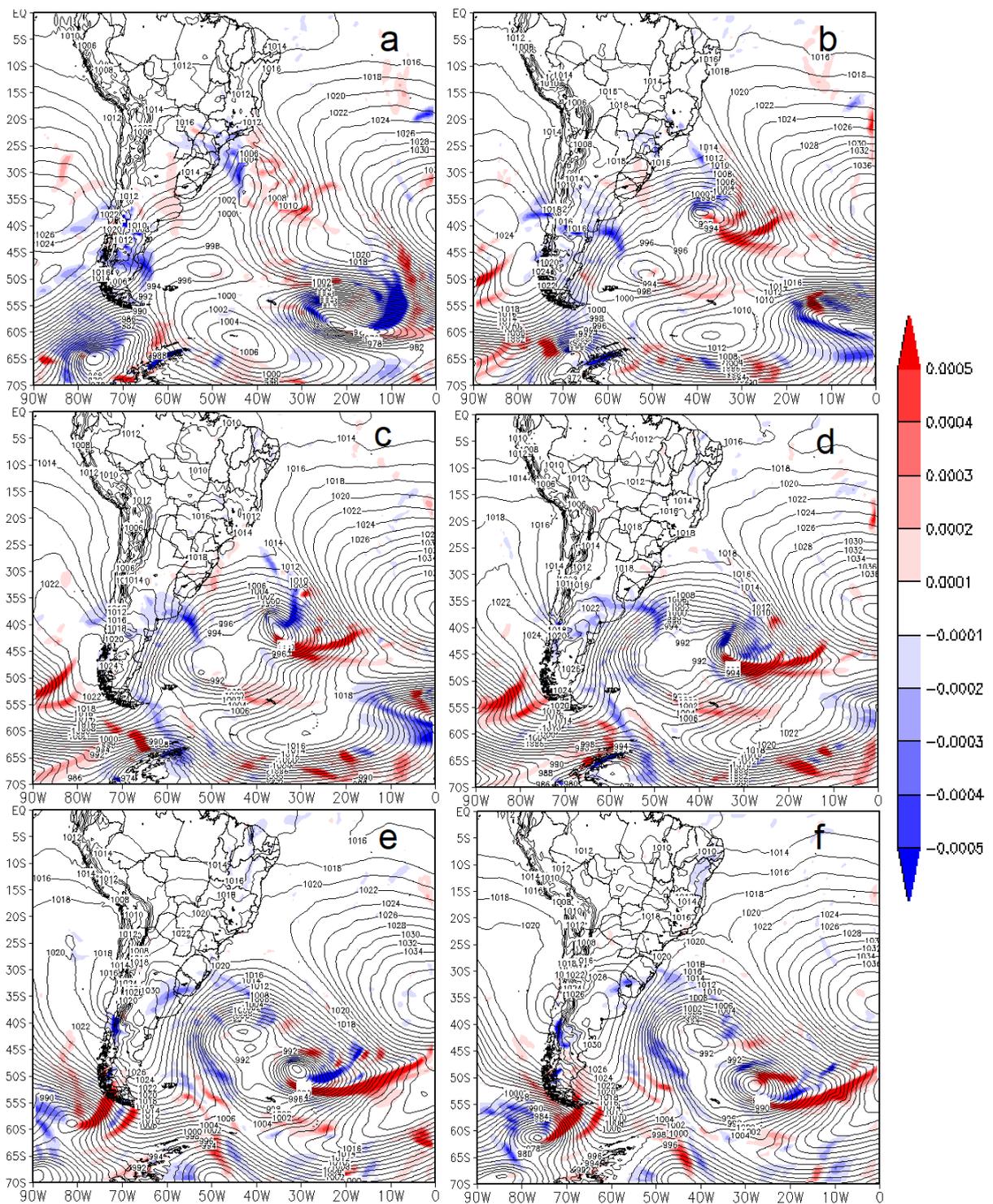


Figura 74 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e advecção de temperatura (sombreado em cores): a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 12Z, c) 13/07/2012 18Z, d) 14/07/2012 00Z, e) 14/07/2012 12Z, f) 14/07/2012 18Z.

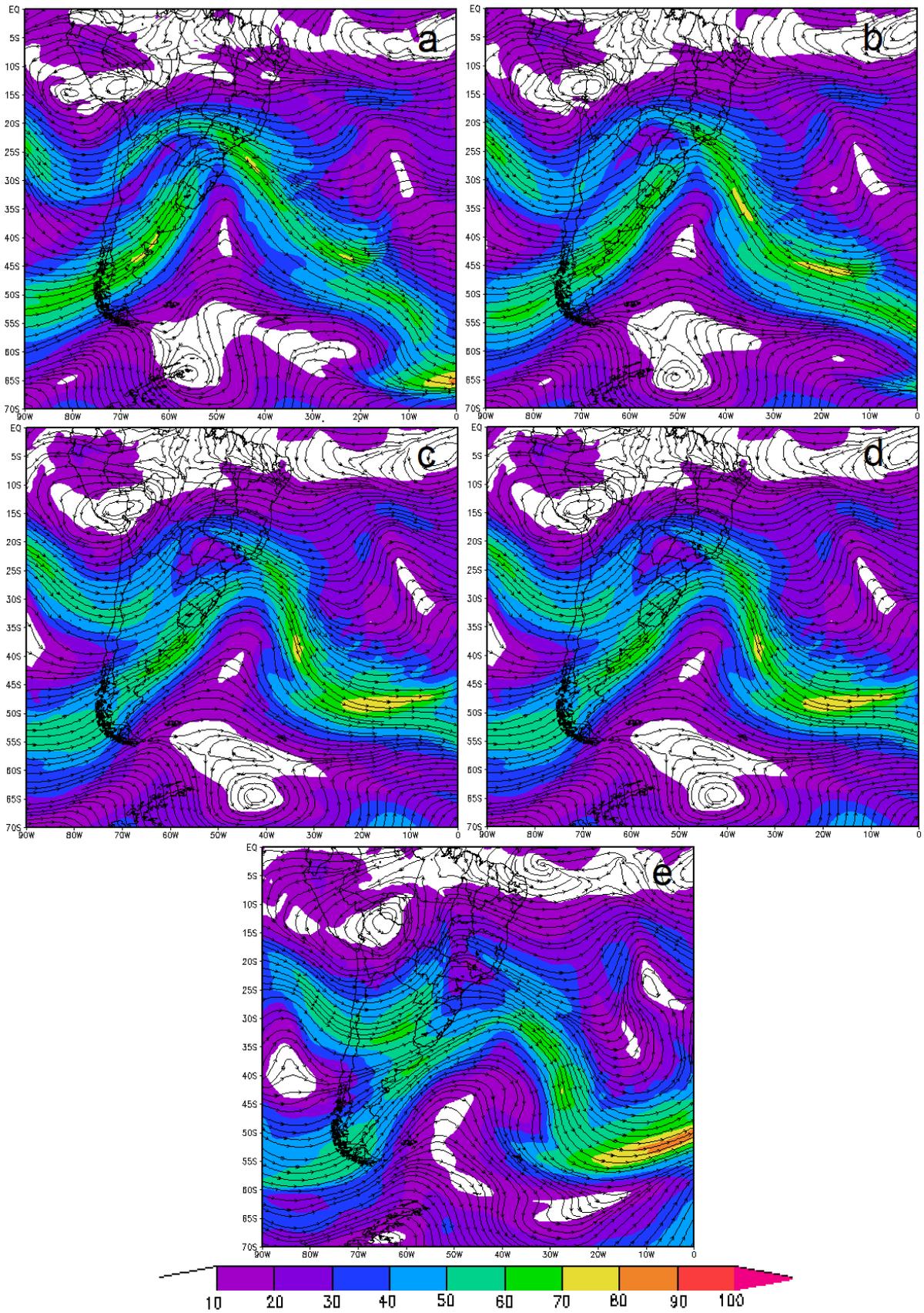


Figura 75 – Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z.

As linhas de corrente em 850 hPa (Figura 76) mostram que também neste caso não houve aporte de ar quente e úmido proveniente da Amazônia.

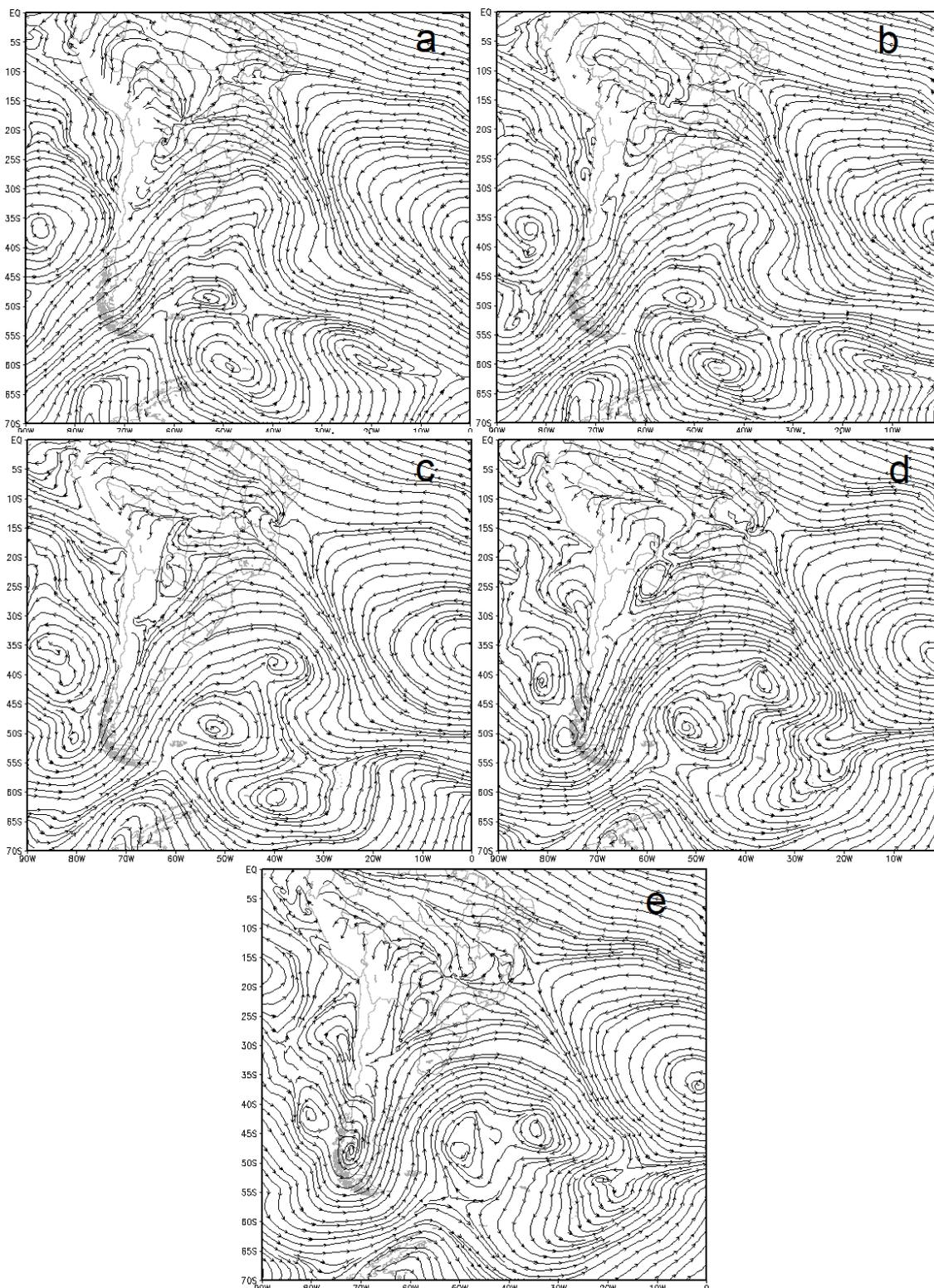


Figura 76 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z

Na Figura 77, as secções verticais de EPV acoplada com tendência de Ozônio, mostram uma grande mescla de tendências acima da tropopausa dinâmica, embora mostre o padrão de tendências negativas de ozônio na parte oeste da dobra e tendência positiva a leste, dentro da dobra.

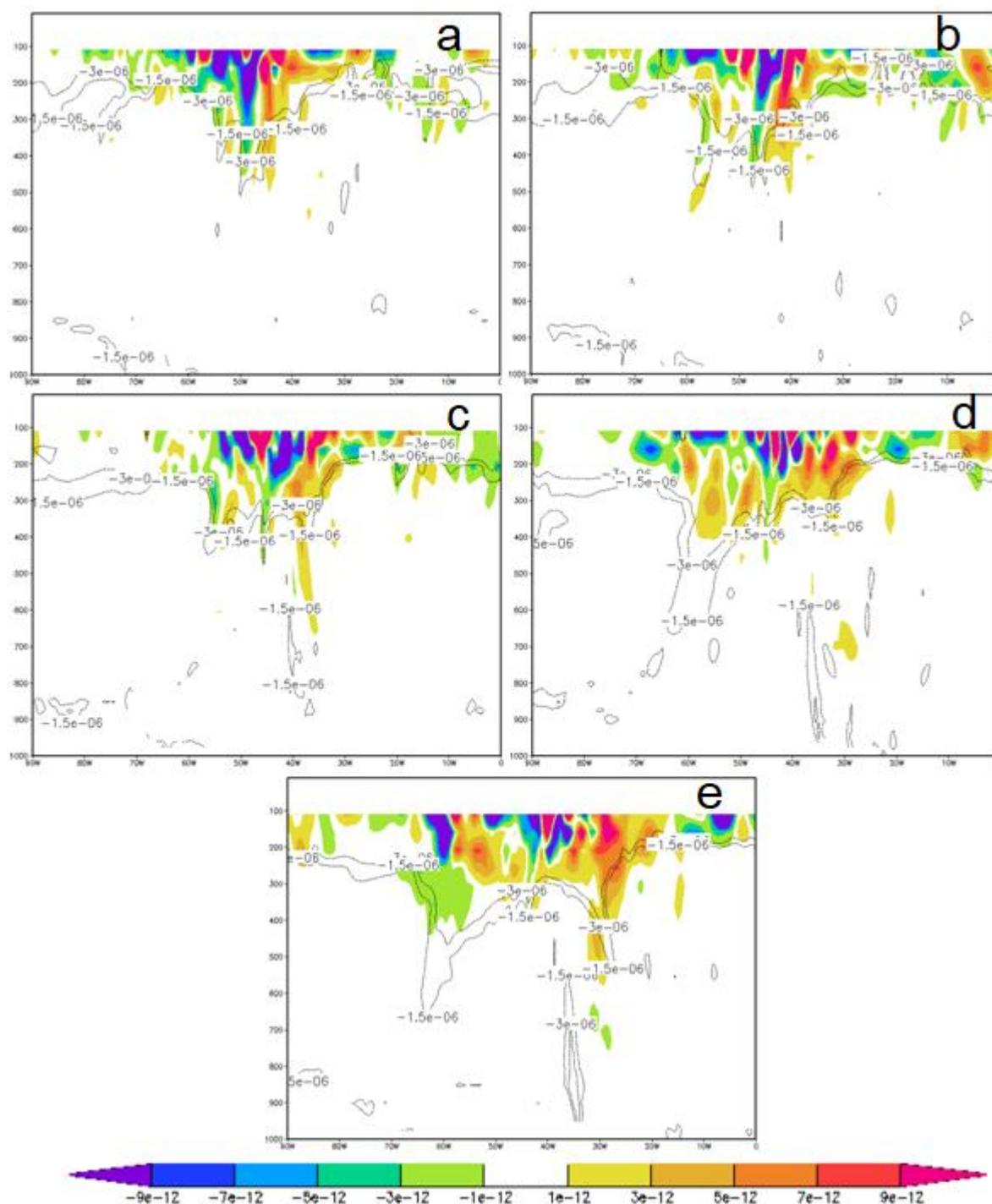


Figura 77 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e tendência de Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 33°S, 13/07/2012 00Z; b) 36°S, 13/07/2012 06Z; c) 38°S, 13/07/2012 12Z; d) 42°S, 13/07/2012 18Z; e) 44°S, 14/07/2012 00Z.

As secções verticais nas Figuras 78 e 79 mostram que os comportamentos da velocidade vertical e da umidade relativa foram conforme o padrão mostrado nos casos anteriores.

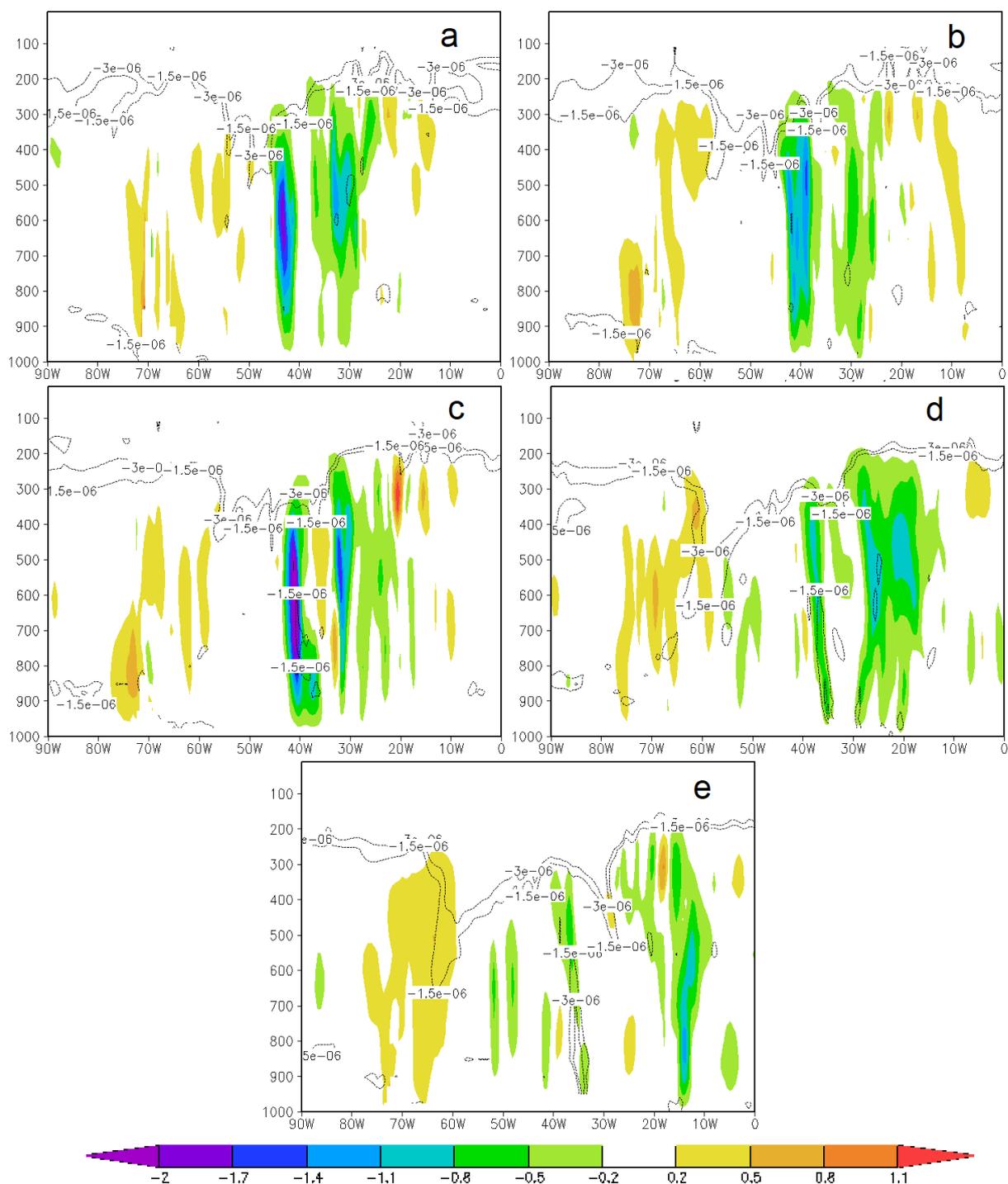


Figura 78 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e velocidade vertical omega (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 33°S, 13/07/2012 00Z; b) 36°S, 13/07/2012 06Z; c) 38°S, 13/07/2012 12Z; d) 42°S, 13/07/2012 18Z; e) 44°S, 14/07/2012 00Z.

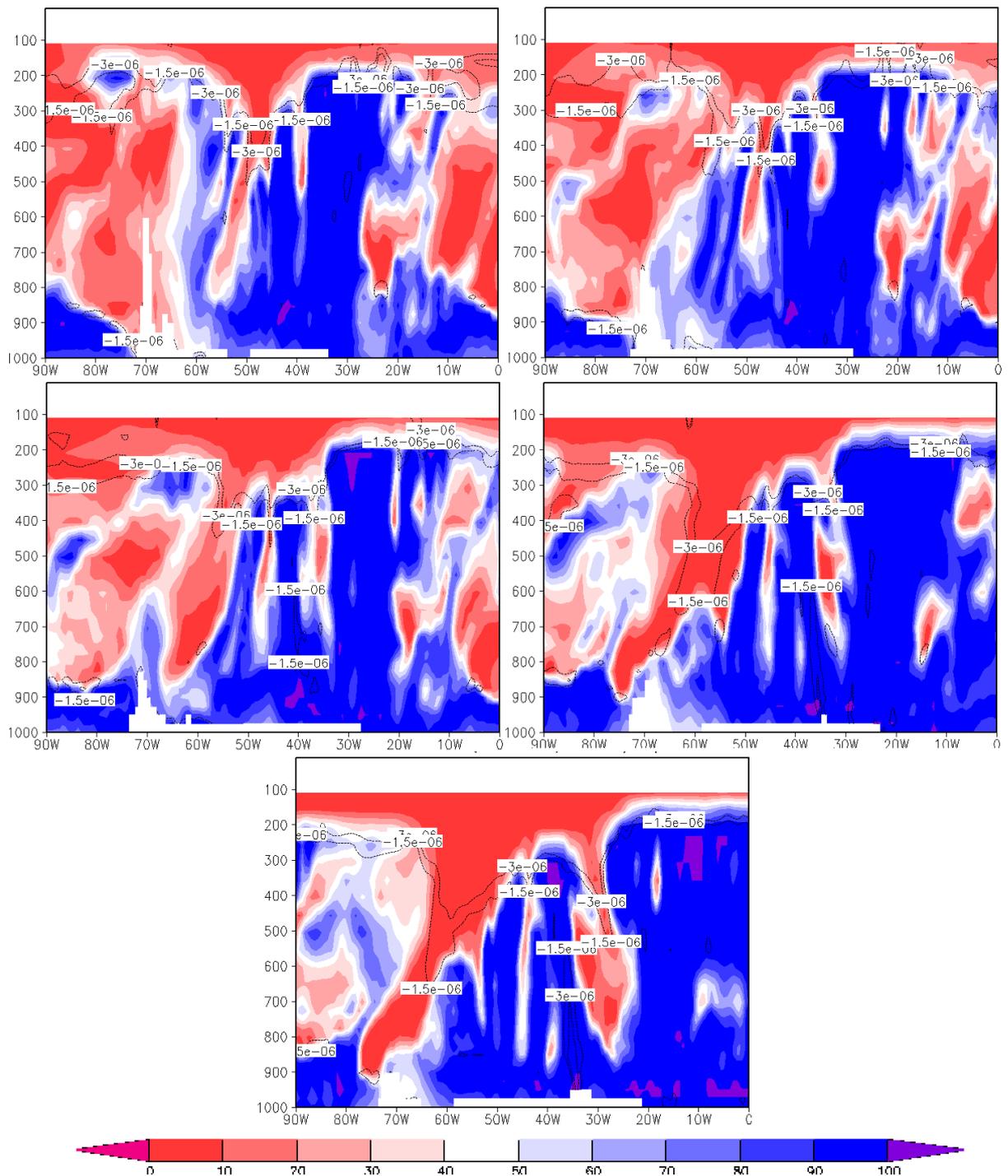


Figura 79 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e umidade relativa (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 33°S, 13/07/2012 00Z; b) 36°S, 13/07/2012 06Z; c) 38°S, 13/07/2012 12Z; d) 42°S, 13/07/2012 18Z; e) 44°S, 14/07/2012 00Z.

Na Figura 80 observam-se altos valores dos fluxos de calor latente no setor frio durante todo o ciclo do desenvolvimento explosivo.

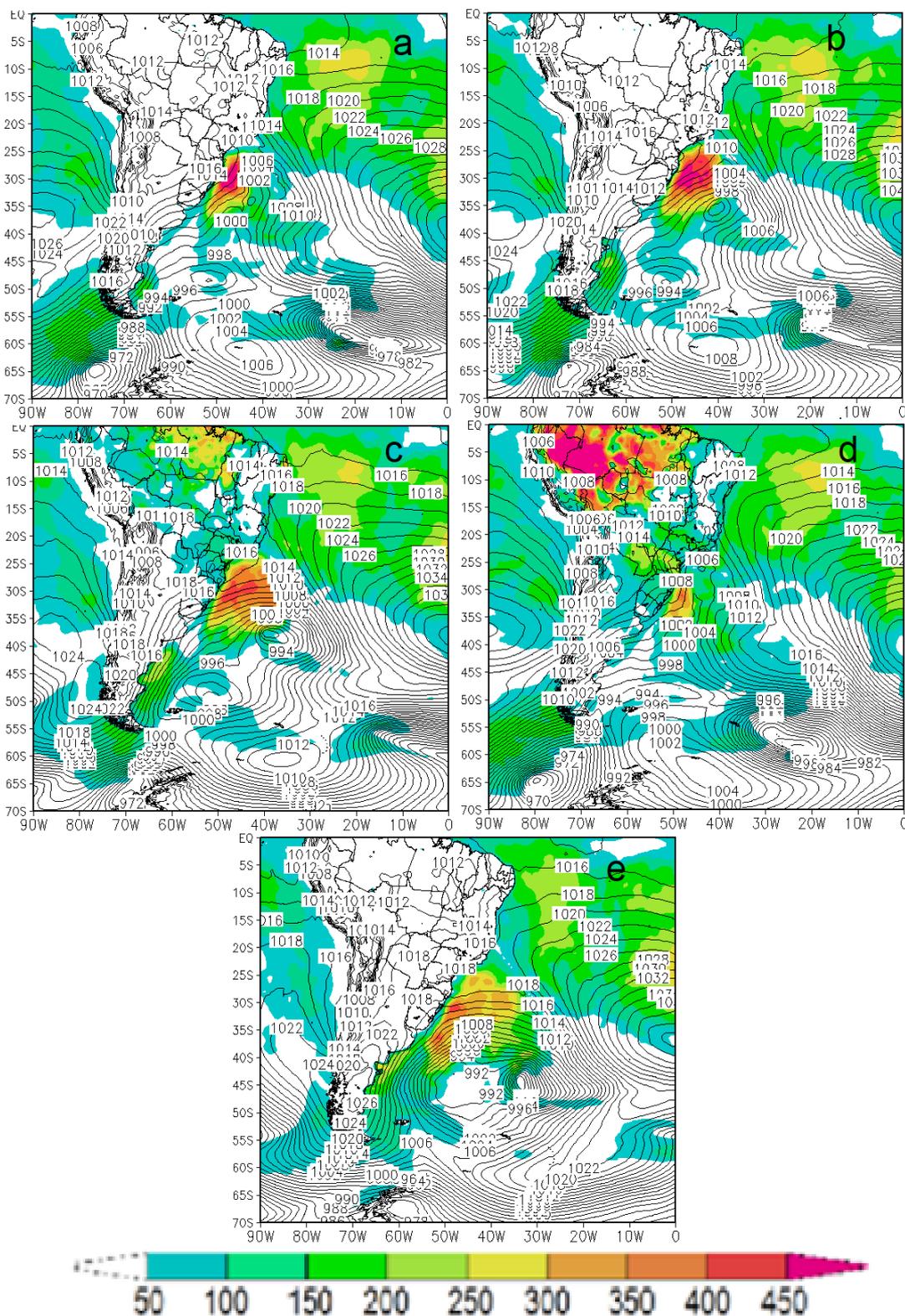


Figura 80 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor latente (sombreado em cores, Wm^{-2}): a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z.

Na Figura 81, pode se notar que os fluxos positivos de calor sensível, com valores menos expressivos, ocorrem no setor frio inicialmente, e depois ocorrem fluxos negativos no setor quente.

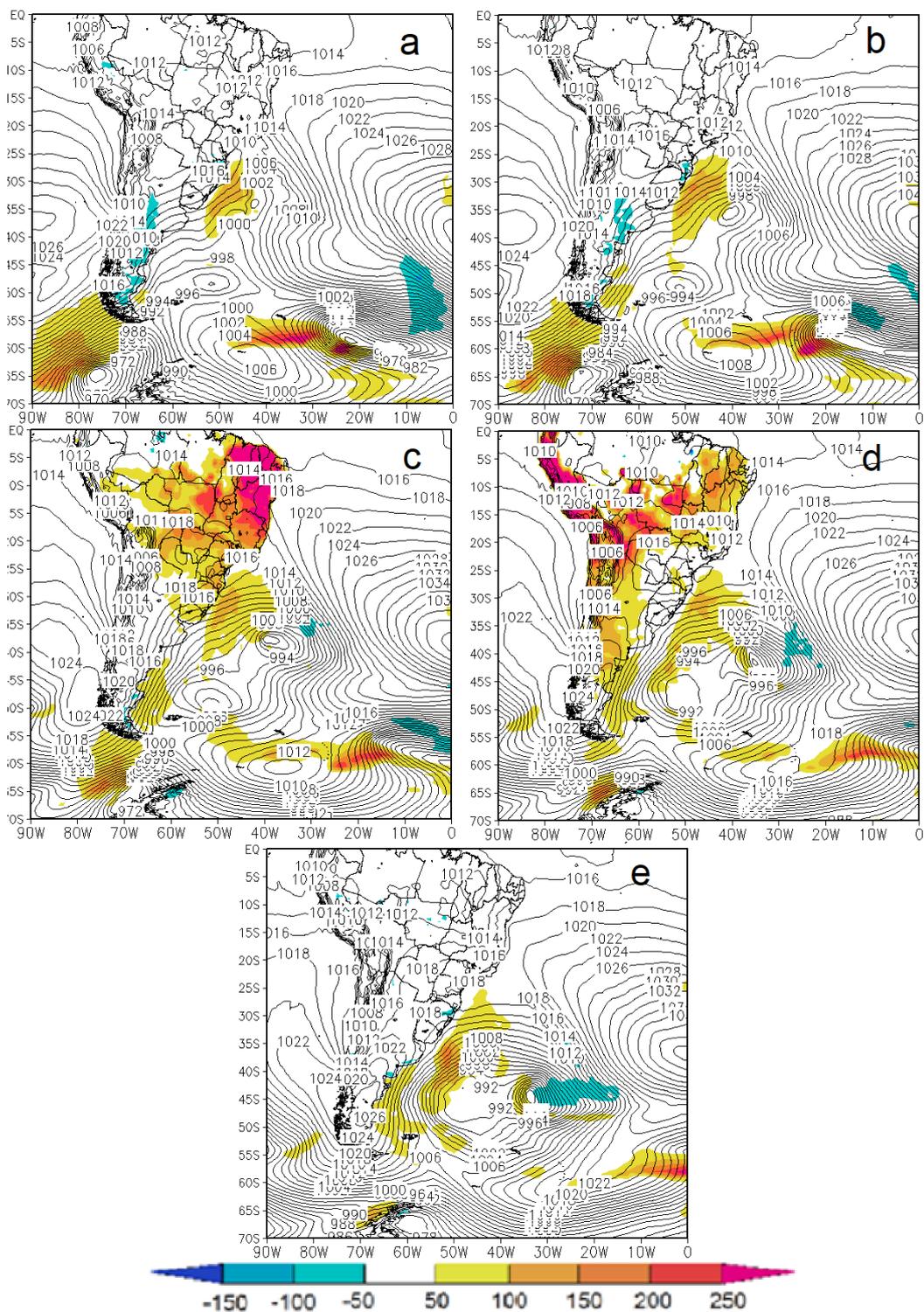


Figura 81 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta (sombreado em cores, Wm^{-2}): a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z.

A energia cinética (Figura 82) mostra um apreciável incremento na região do ciclone, onde ao difluir, o jato Polar toma energia do jato Subtropical.

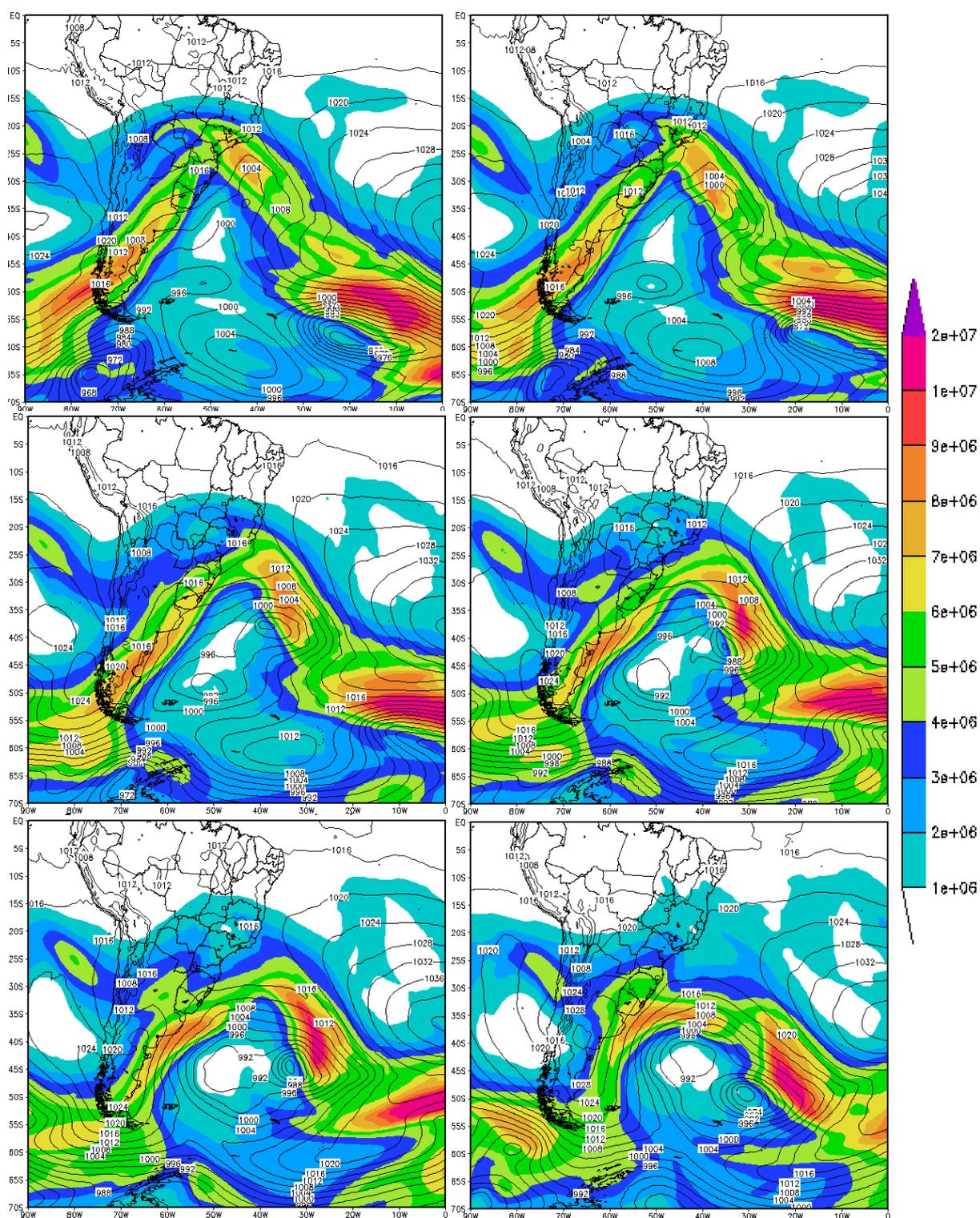


Figura 82 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z, f) 14/07/2012 12Z.

O fluxo zonal de energia cinética mostra valores baixos com fraco incremento ao final do ciclo explosivo.

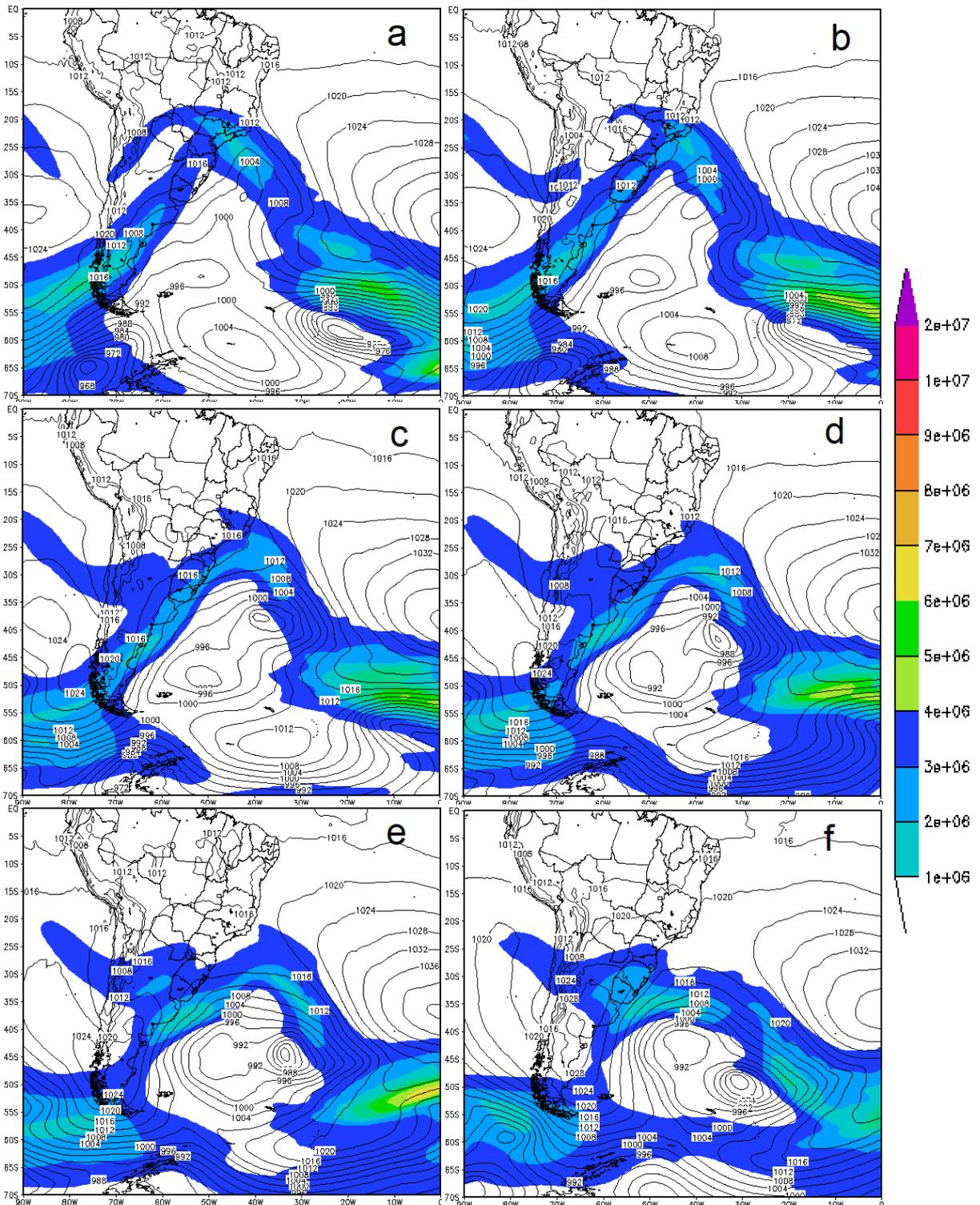


Figura 83 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z, f) 14/07/2012 12Z.

O fluxo meridional de energia cinética (Figura 84) apresenta uma boa abrangência desde o início com um grande incremento durante o ciclo explosivo e doze horas após.

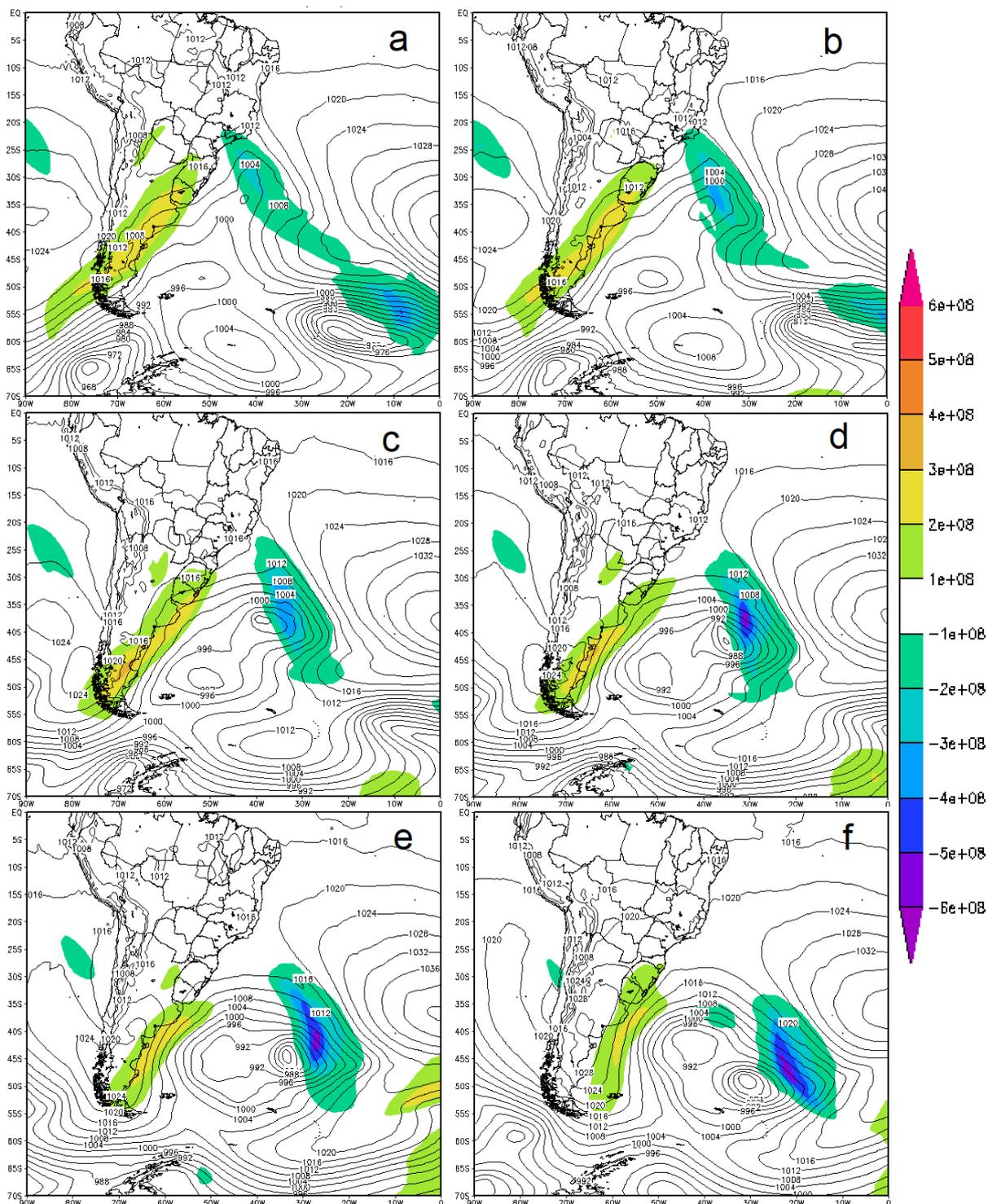


Figura 84 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. a) 13/07/2012 00Z, b) 13/07/2012 06Z, c) 13/07/2012 12Z, d) 13/07/2012 18Z, e) 14/07/2012 00Z, f) 14/07/2012 12Z.

4.7 Caso 30/07/2012 06Z – Inverno - Forte

Este ciclone começou às 06Z do dia 30/07/2012, em 40°S-35°W, com uma pressão central de 992 hPa (Figura 85a), e alcançou 56°S-19°W às 06Z de 31/07/2012 (Figura 85e), com uma pressão central de 948 hPa, apresentando portanto, uma queda na pressão central de 44 hPa, correspondendo para a latitude média de 48°, à uma taxa de aprofundamento de 2,13 B, classificando-se como ciclogênese explosiva forte.

Na Figura 85a pode se observar também a defasagem do ciclone incipiente com o cavado em 500 hPa, e seu deslocamento para sudeste transversalmente aos contornos de geopotencial em direção ao centro do cavado onde ocorre o alinhamento barotrópico com o contorno de geopotencial do ar superior fechado sobre o ciclone justamente no fim do ciclo explosivo(Figura 85e) .

Na Figura 86, as secções verticais de vorticidade potencial evidenciam uma anomalia da tropopausa dinâmica bastante pronunciada indicando uma vigorosa intrusão de ar estratosférico e a correspondente resposta em superfície.

As imagens de satélite (Figura 87-a,c,e,g) no canal do vapor d'água mostram a faixa escura correspondente ao ar seco na região da dobra da tropopausa conforme se pode verificar no campo de vorticidade potencial em 500 hPa (Figura 87-b,d,f,h).

Nas linhas de corrente em 250 hPa (Figura 88), observa-se que a posição onde o ciclone iniciou, coincide ainda com o centro do jet streak, tendendo na sequência, para a região à direita da saída do mesmo, que é onde normalmente os ciclones explosivos se formam. Pode se notar também nesta Figura, que os jatos confluem de tal forma que, ao difluir, o jato polar toma energia do jato subtropical intensificando-se na forma de um jet streak. À medida que evolui em seu ciclo explosivo, o ciclone fica envolvido na região de circulação ciclônica no lado polar do jato até a oclusão.

Surpreendentemente, por se tratar de um caso de ciclogênese explosiva forte, a Figura 89 mostra, através das linhas de corrente em 850 hPa, que não houve contribuição de ar quente e úmido da Amazônia.

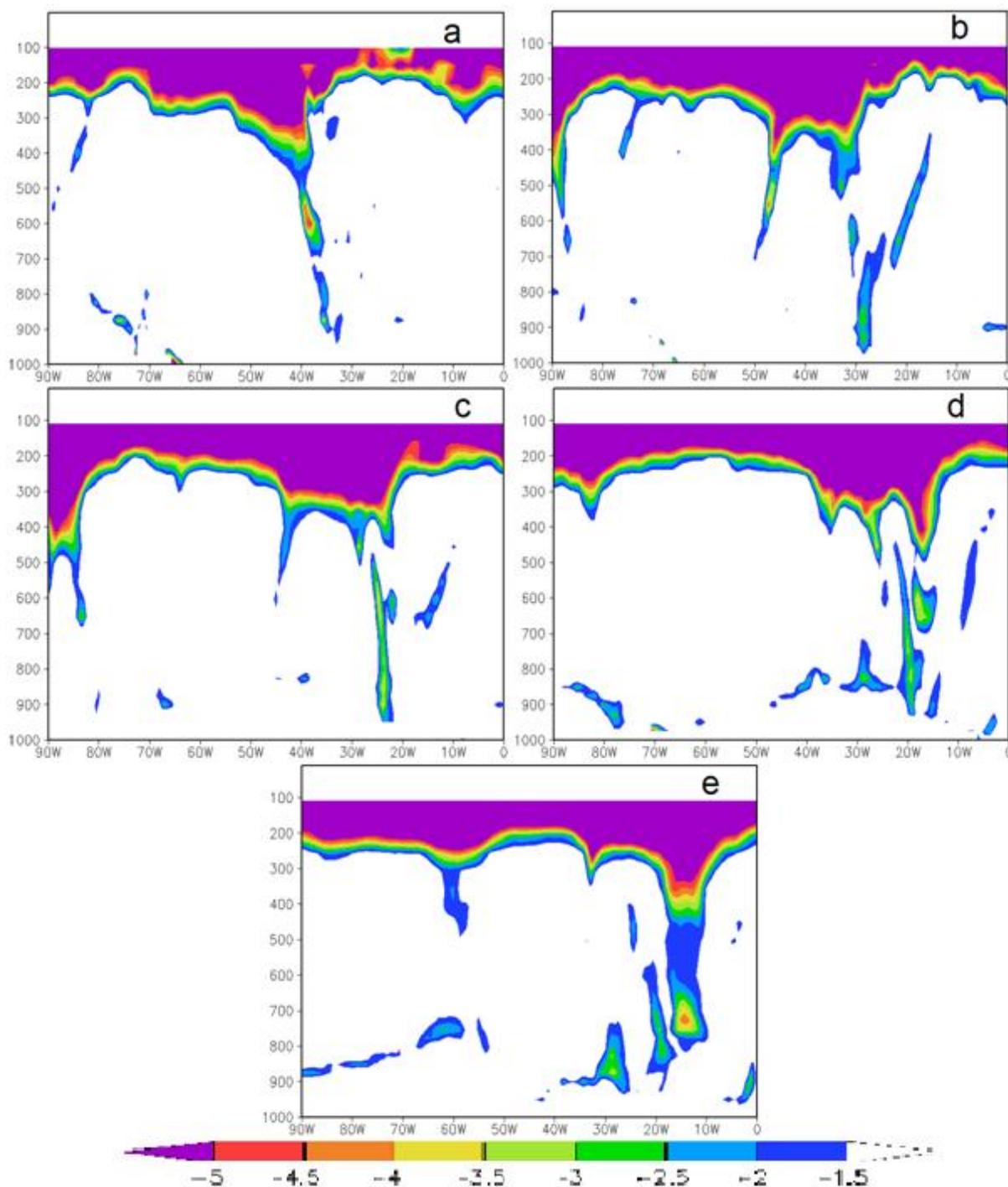


Figura 86 - Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 40°S, 30/07/2012 06Z; b) 45°S, 30/07/2012 12Z; c) 48°S, 30/07/2012 18Z; d) 52°S, 31/07/2012 00Z, e) 56°S, 31/07/2012 06Z.

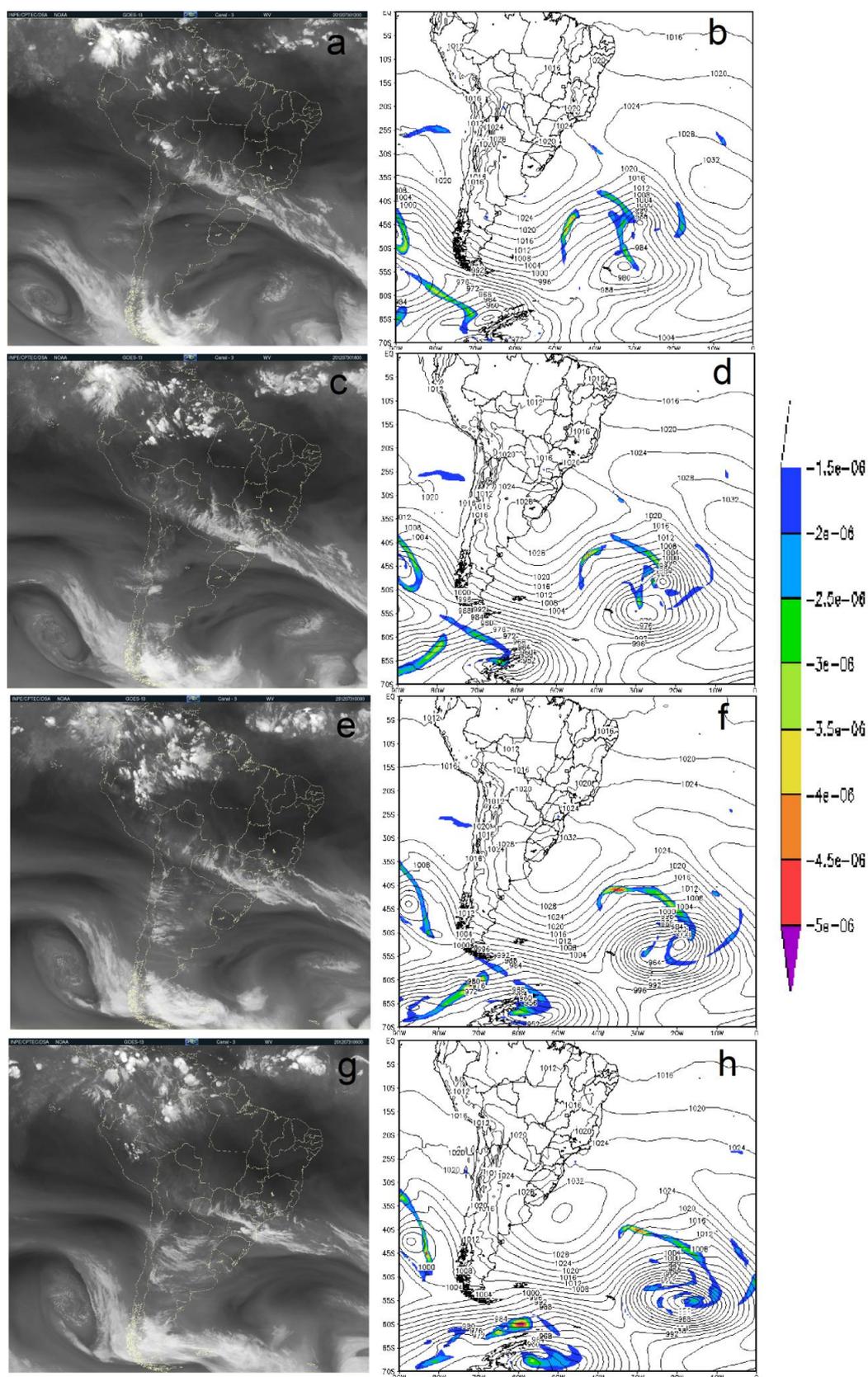


Figura 87 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 30/07/2012 12Z, (c) 30/07/2012 18Z, (e) 31/07/2012 00Z, (g) 31/07/2012 06Z; e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 30/07/2012 12Z, (d) 30/07/2012 18Z, (f) 31/07/2012 00Z, (h) 31/07/2012 06Z.

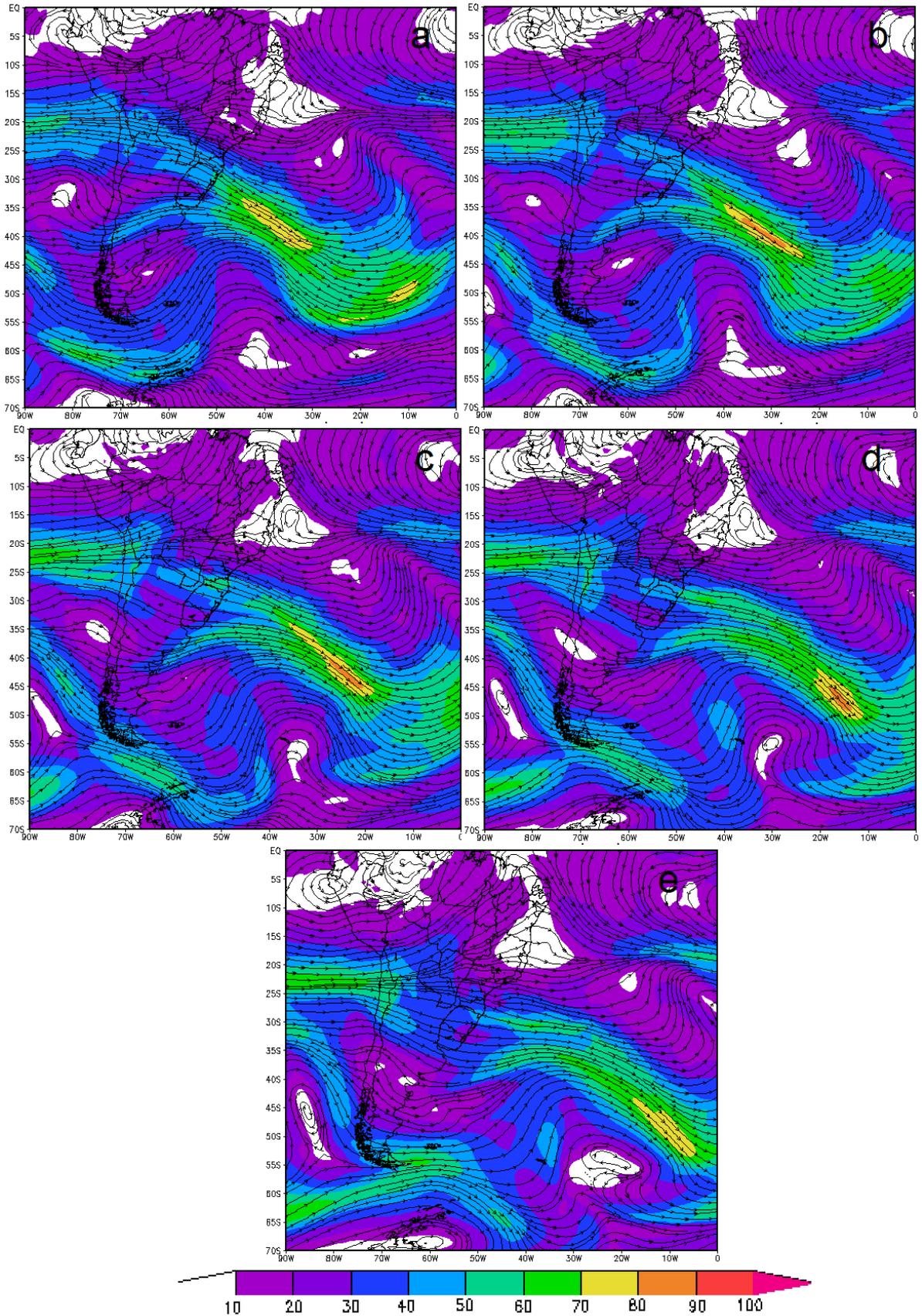


Figura 88 - de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z.

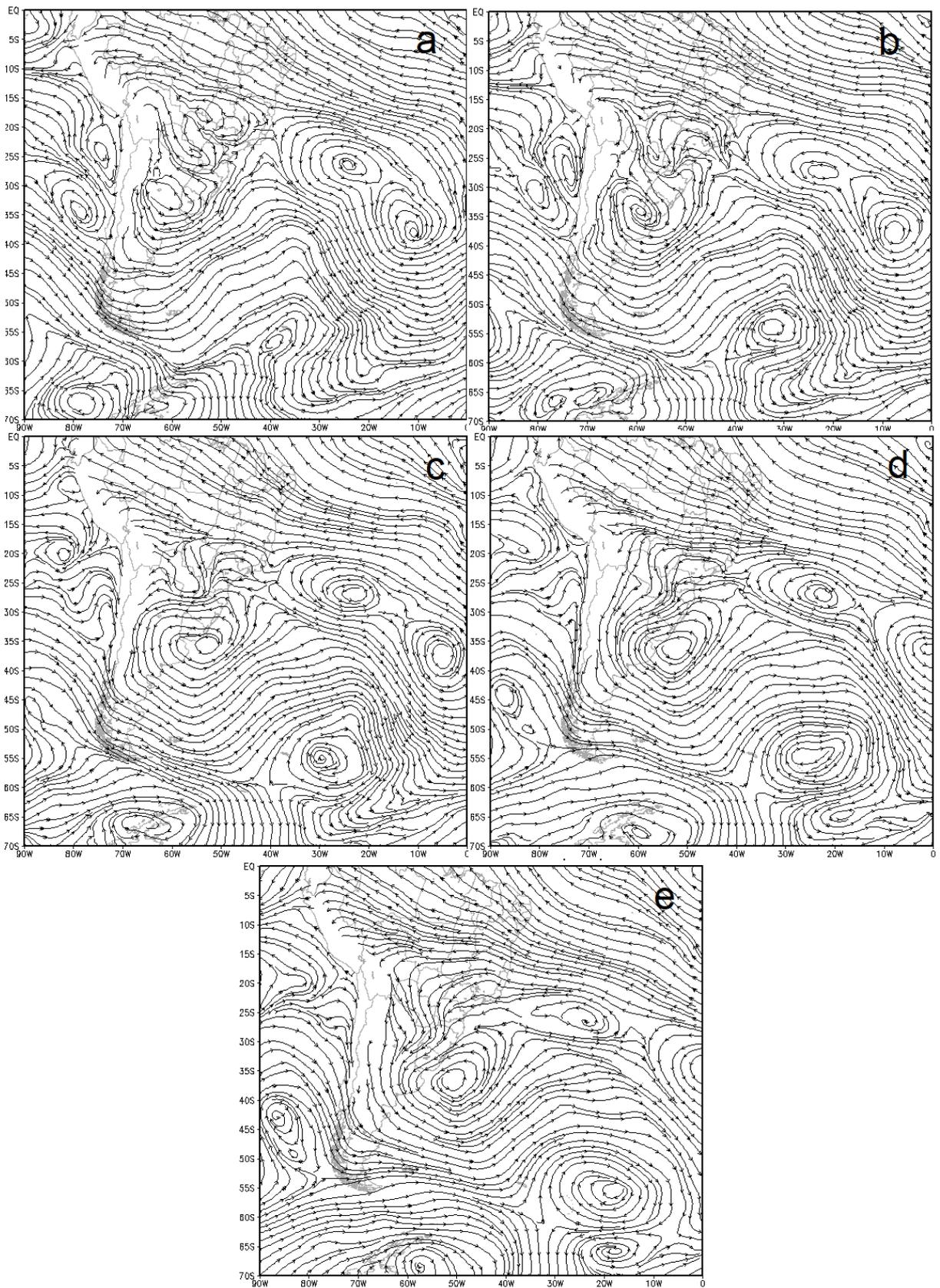


Figura 89 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z.

As secções verticais das Figuras 90 e 91, mostram respectivamente, apreciáveis tendências de ozônio e velocidade vertical acopladas com EPV, e de acordo com o padrão.

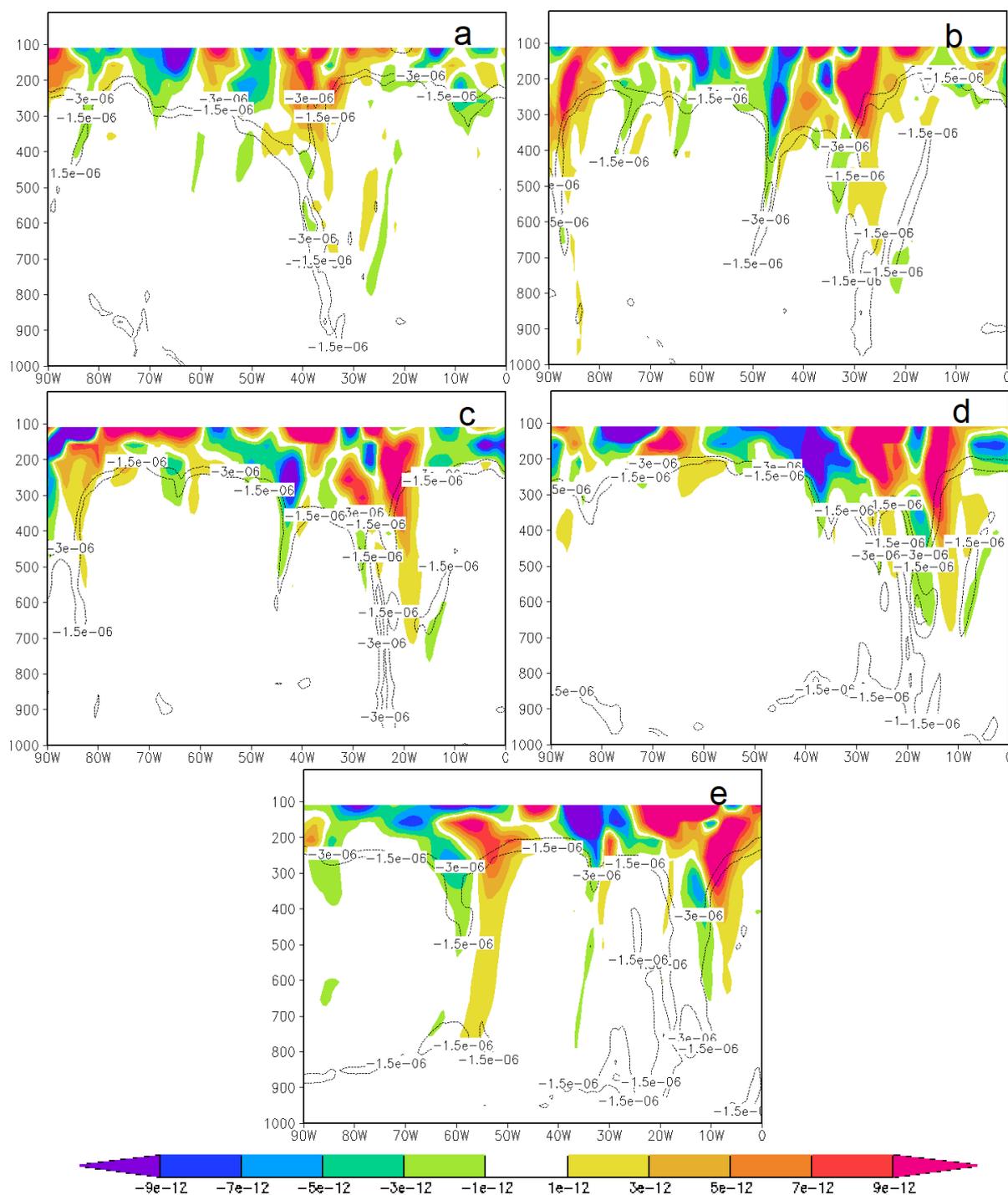


Figura 90 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e tendência de Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 40°S, 30/07/2012 06Z; b) 45°S, 30/07/2012 12Z; c) 48°S, 30/07/2012 18Z; d) 52°S, 31/07/2012 00Z, e) 56°S, 31/07/2012 06Z.

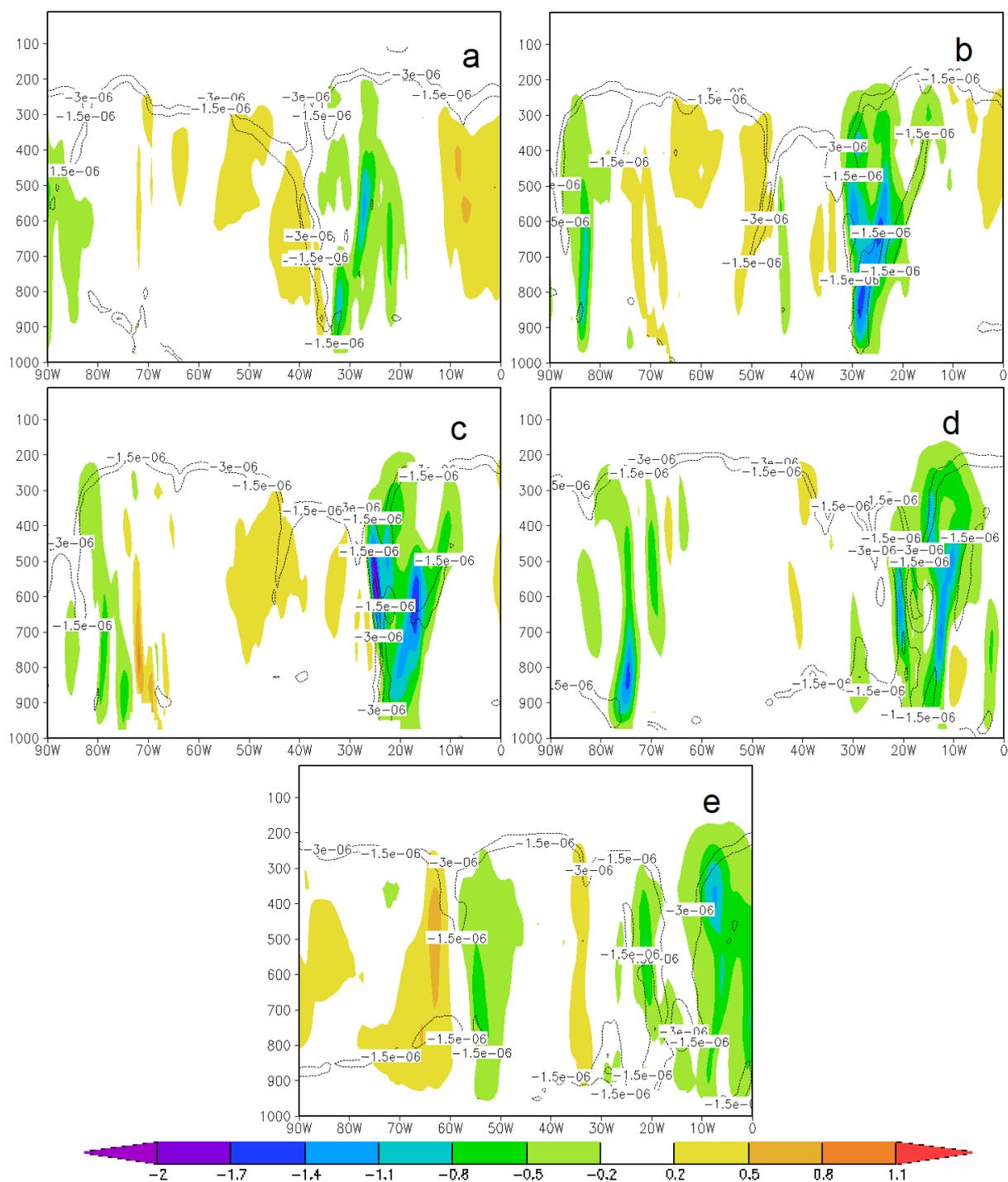


Figura 91 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e velocidade vertical Ω (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 40°S, 30/07/2012 06Z; b) 45°S, 30/07/2012 12Z; c) 48°S, 30/07/2012 18Z; d) 52°S, 31/07/2012 00Z, e) 56°S, 31/07/2012 06Z.

Também a distribuição vertical de umidade relativa acoplada com EPV, mostrada na Figura 92, mostra que os valores de UR entre 10-20% são um bom indicador da tropopausa dinâmica.

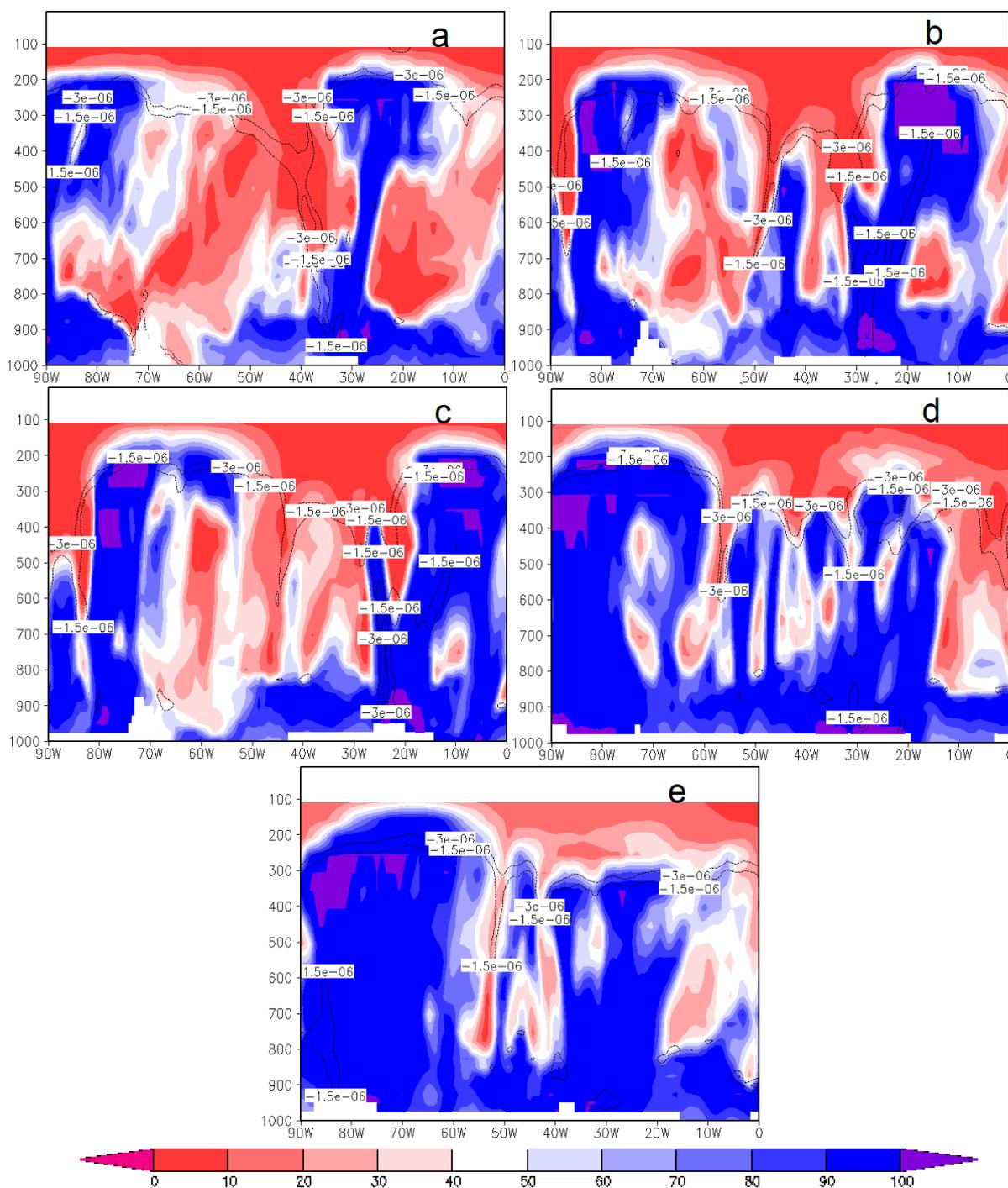


Figura 92 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e umidade relativa (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 40°S, 30/07/2012 06Z; b) 45°S, 30/07/2012 12Z; c) 48°S, 30/07/2012 18Z; d) 52°S, 31/07/2012 00Z, e) 56°S, 31/07/2012 06Z.

A Figura 93 mostra que os fluxos de calor latente foram abrangentes em uma ampla região atrás da frente fria, em conexão com outro ciclone pré-existente mais ao sul, porém com valores mais baixos do que no caso moderado de 13/07/2012.

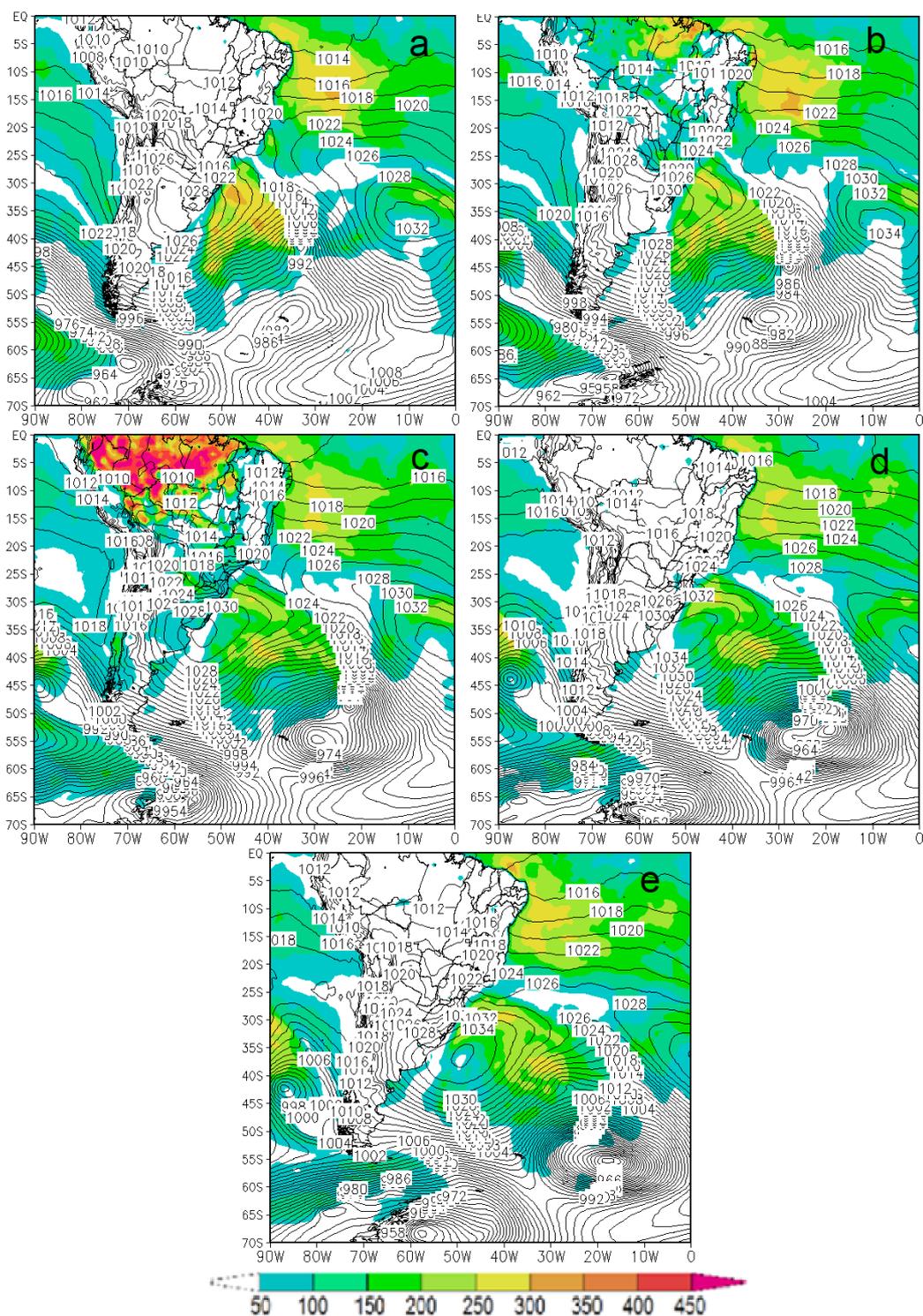


Figura 93 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor latente (sombreado em cores, Wm^{-2}): a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z.

Os fluxos de calor sensível de origem turbulenta não foram pronunciados no setor frio e menos ainda no setor quente (Figura 94).

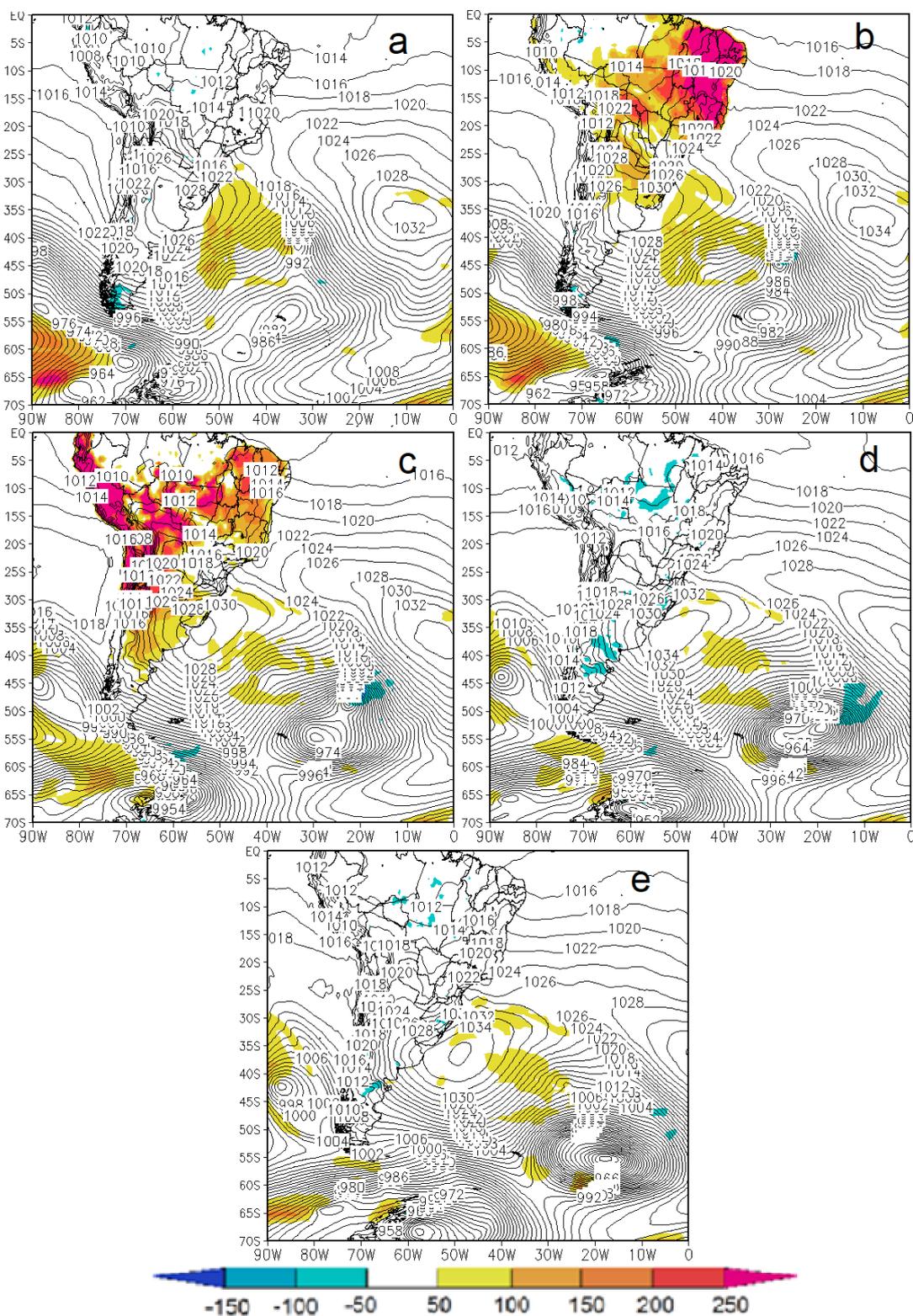


Figura 94 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta (sombreado em cores, Wm^{-2}): a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z.

Os valores de energia cinética na região do ciclone foram altos desde o início (Figura 95), mantendo-se altos e aumentando um pouco a abrangência até doze horas após o ciclo explosivo.

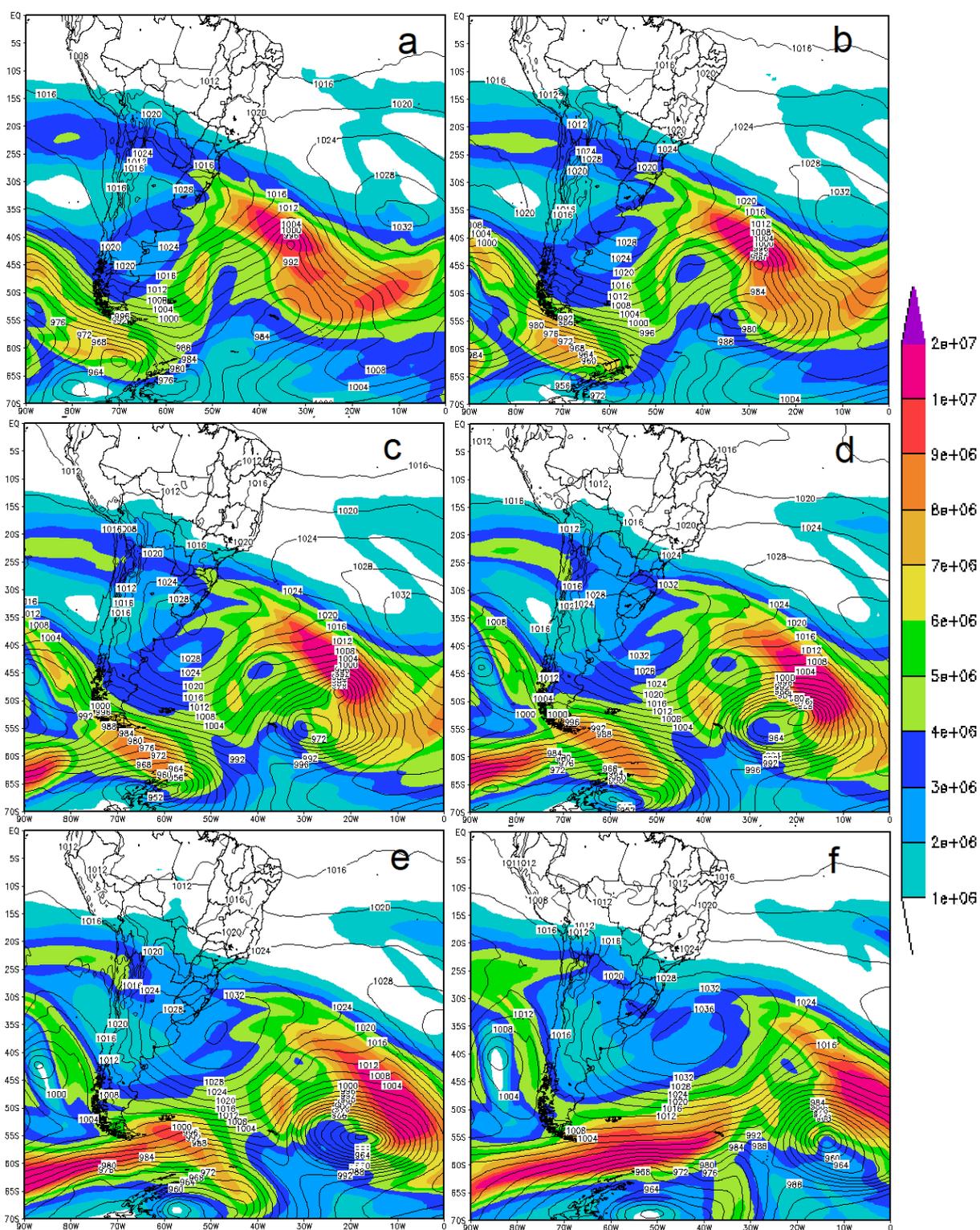


Figura 95 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z, f) 31/07/2012 18Z.

Os valores do fluxo zonal de energia cinética (Figura 96) foram baixos, aumentando um pouco até o final do ciclo explosivo.

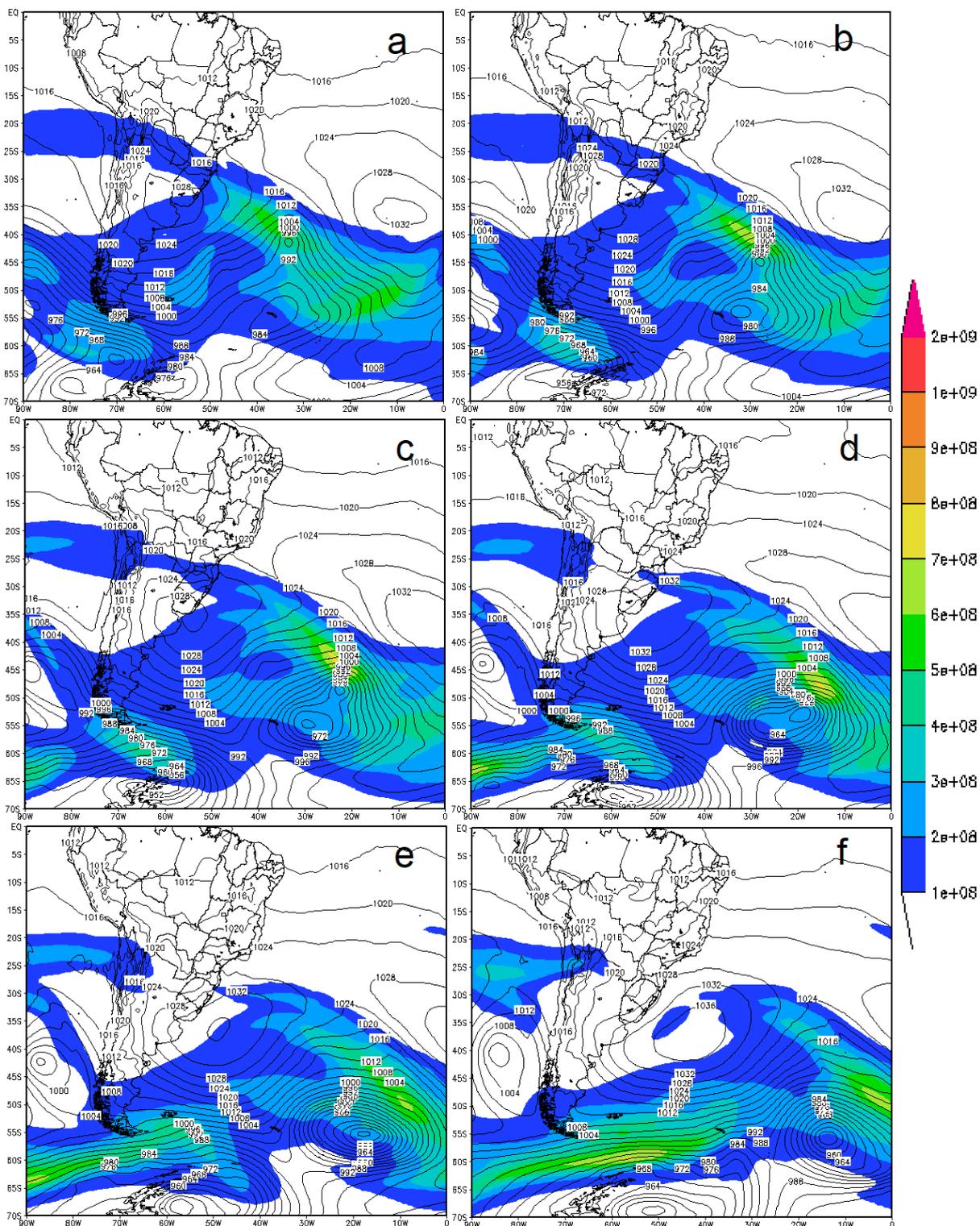


Figura 96 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) e PNMM. a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z, f) 31/07/2012 18Z.

O fluxo meridional de energia cinética (Figura 97), abrangente desde o início do ciclo explosivo na região do ciclone, alcança valores máximos durante este ciclo, diminuindo um pouco no final e nas doze horas subsequentes.

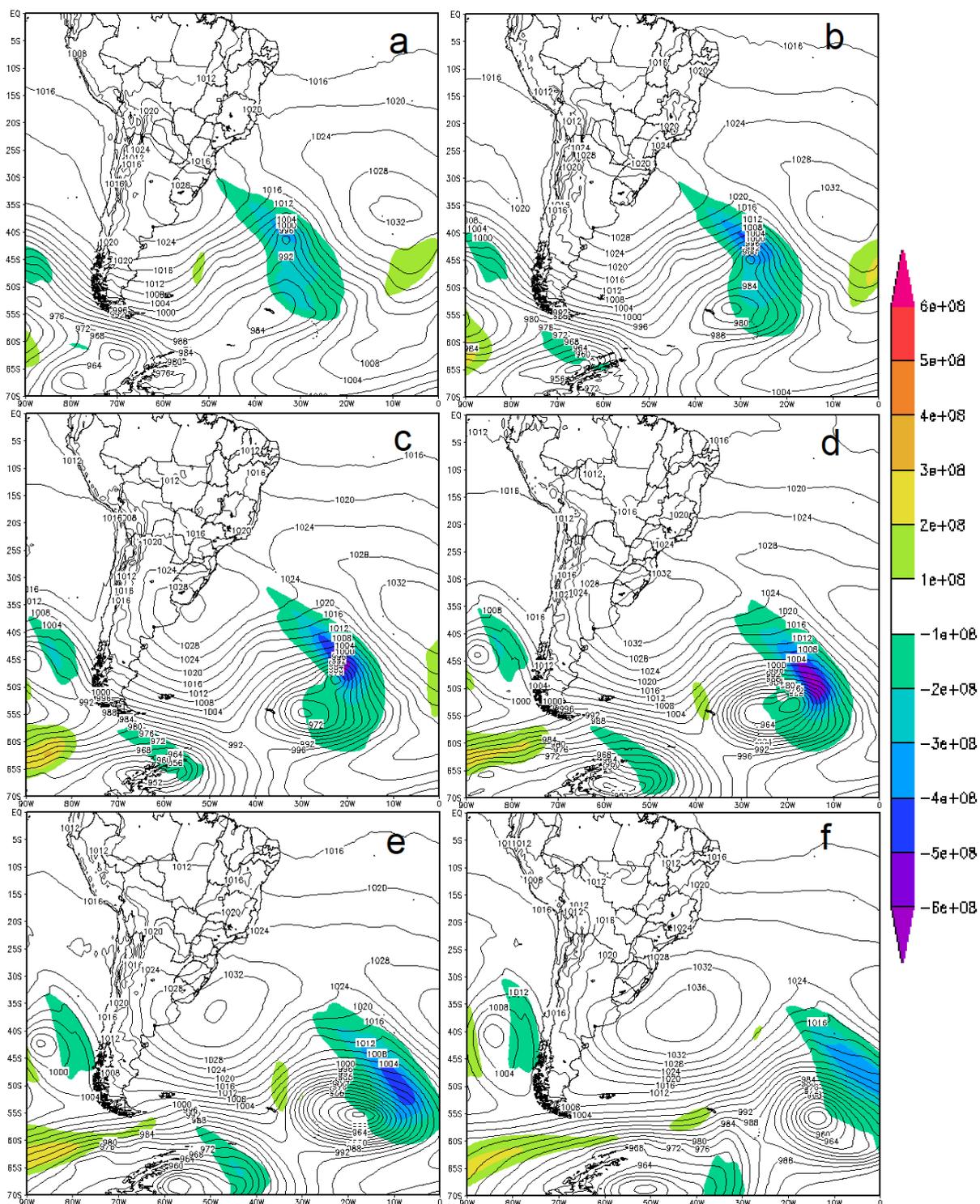


Figura 97 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 30/07/2012 06Z, b) 30/07/2012 12Z, c) 30/07/2012 18Z, d) 31/07/2012 00Z, e) 31/07/2012 06Z, f) 31/07/2012 18Z.

4.8 Caso de 01/10/2014 – Primavera - Forte

Como pode ser visto na Figura 98, este ciclone iniciou seu desenvolvimento explosivo no dia 01/10/2014, as 12Z (Figura 98a), com uma pressão de 1008 hPa no centro localizado em 32°S, 41°W, o qual apresentou uma queda de pressão de 32 hPa em 24 horas, enquanto se deslocava para sudeste até as 12Z do dia 02/10/2014 (Figura 98e), quando alcançou 40°S, 25°W com 976 hPa. A TNA calculada para a média destas latitudes (36°) e para esta queda de pressão foi de 1,96 B, o que classifica este caso como ciclogênese explosiva forte.

Embora o ciclo explosivo tenha começado as 12Z, o ciclo de vida deste ciclone iniciou antes, aparecendo já formado às 00Z de 01/10/2014 em 28°S, 54°W (não mostrado aqui), do lado equatorial do jato Subtropical, apresentando características de ciclone tropical como núcleo quente e centro de baixa pressão a superfície em fase com o cavado de ar superior, indicando desenvolvimento barotrópico. Na continuação, o ciclone em superfície segue uma trajetória ao mesmo tempo transversal e oblíqua ao jato subtropical, aumentando a defasagem entre o centro de pressão a superfície e o cavado de ar superior, indicando aumento de baroclinia, durante todo o ciclo explosivo e dias depois. O padrão assim descrito é compatível com transição de ciclone tropical em extratropical, referido como ciclone subtropical.

As secções verticais de EPV (Figura 99) mostram uma anomalia da tropopausa dinâmica bem pronunciada e com resposta vigorosa em superfície.

As imagens de satélite no canal do vapor d'água (Figura 100-a,c,e,g) mostram a existência de uma forte dobra da tropopausa introduzindo ar seco estratosférico na região do ciclone, a qual não se destaca no campo de EPV em 500 hPa (Figura 100-b,d,f,h), provavelmente por causa da maior elevação da tropopausa nestas latitudes mais baixas, como pode ser visto na Figura 99. A nebulosidade na região da frente fria mostra uma evolução compatível com o modelo conceitual de Shapiro e Keyser (1990).

As linhas de corrente em 250 hPa (Figura 101) mostram o padrão de confluência dos jatos Subtropical e Polar Norte ao sul, próximo à costa leste, estabelecendo um jet streak, após o qual ocorre difluência sobre o oceano, sendo que o jato subtropical sofre um desvio pronunciado para norte, influenciado pela circulação anticiclônica

em altos níveis do lado equatorial do mesmo. Diferentemente de outros casos, neste o ciclone se forma do lado equatorial do jet streak e não do lado direito da sua saída.

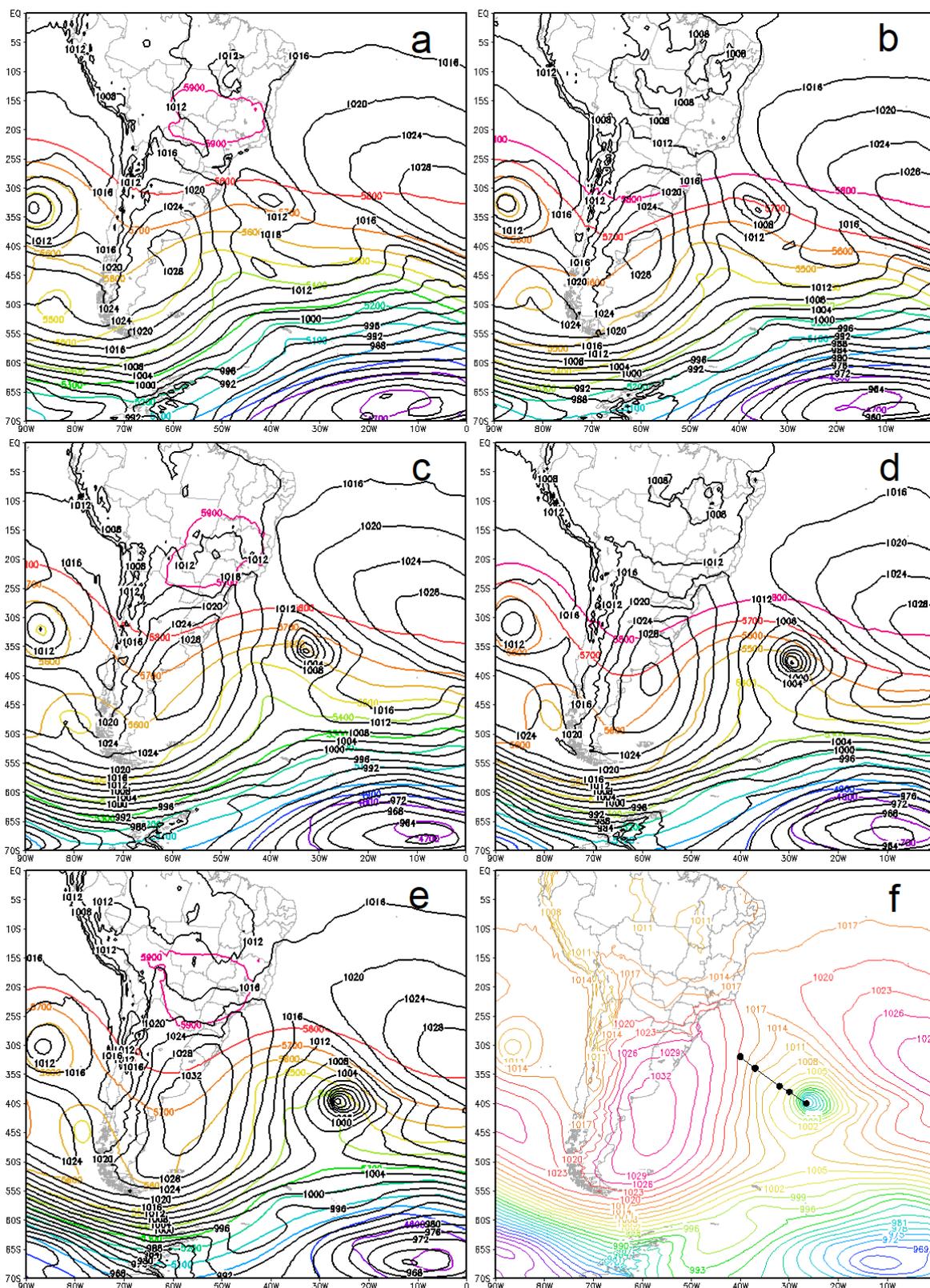


Figura 98 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e altura geopotencial em 500 hPa (contornos em cores): a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z, f) PNMM 02/10/2014 12Z e trajetória.

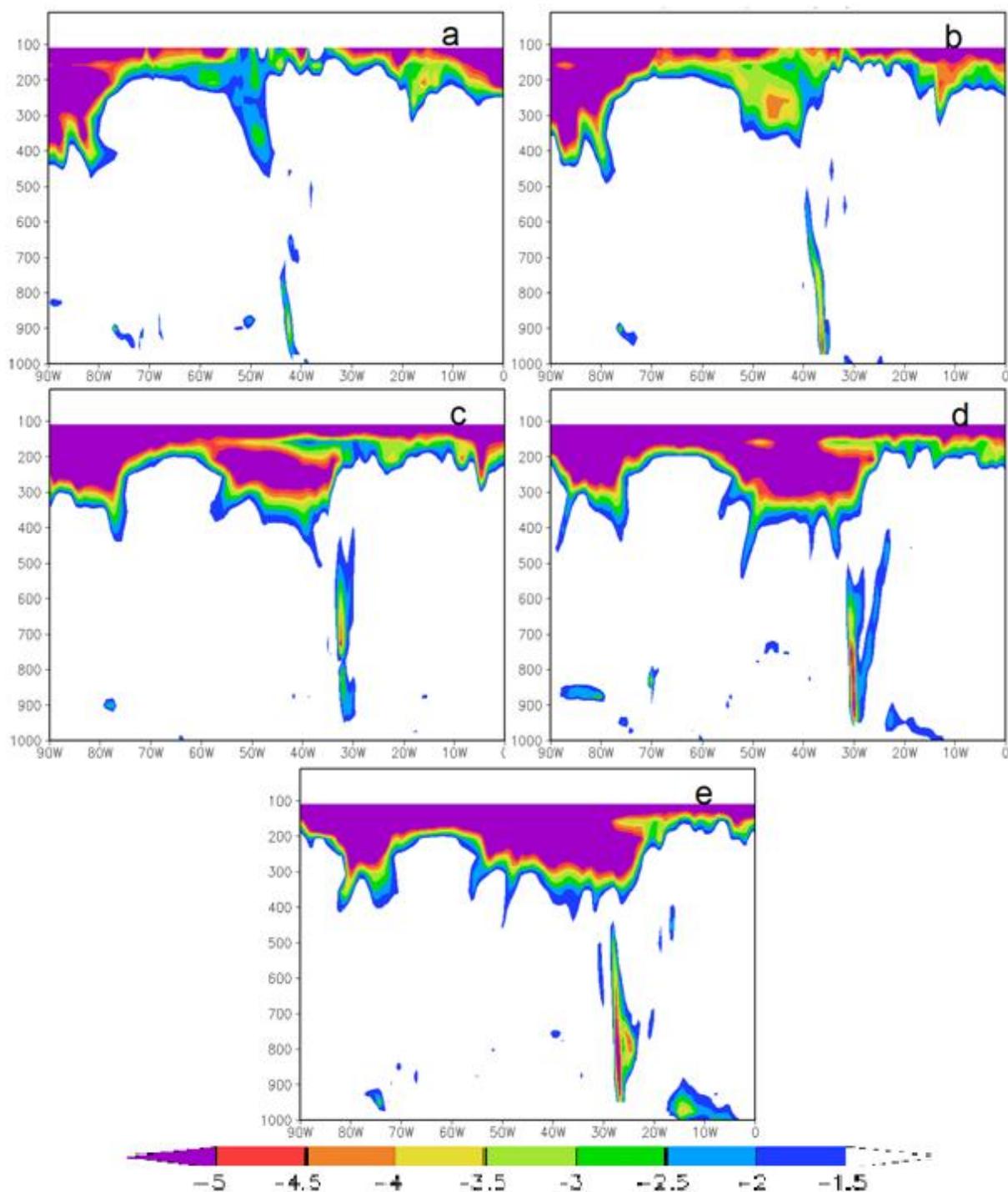


Figura 99 – Secções verticais (longitude x pressão) de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 32°S, 01/10/2014 12Z; b) 34°S, 01/10/2014 18Z; c) 37°S, 02/10/2014 00Z; d) 38°S, 02/10/2014 06Z, e) 40°S, 02/10/2014 12Z.

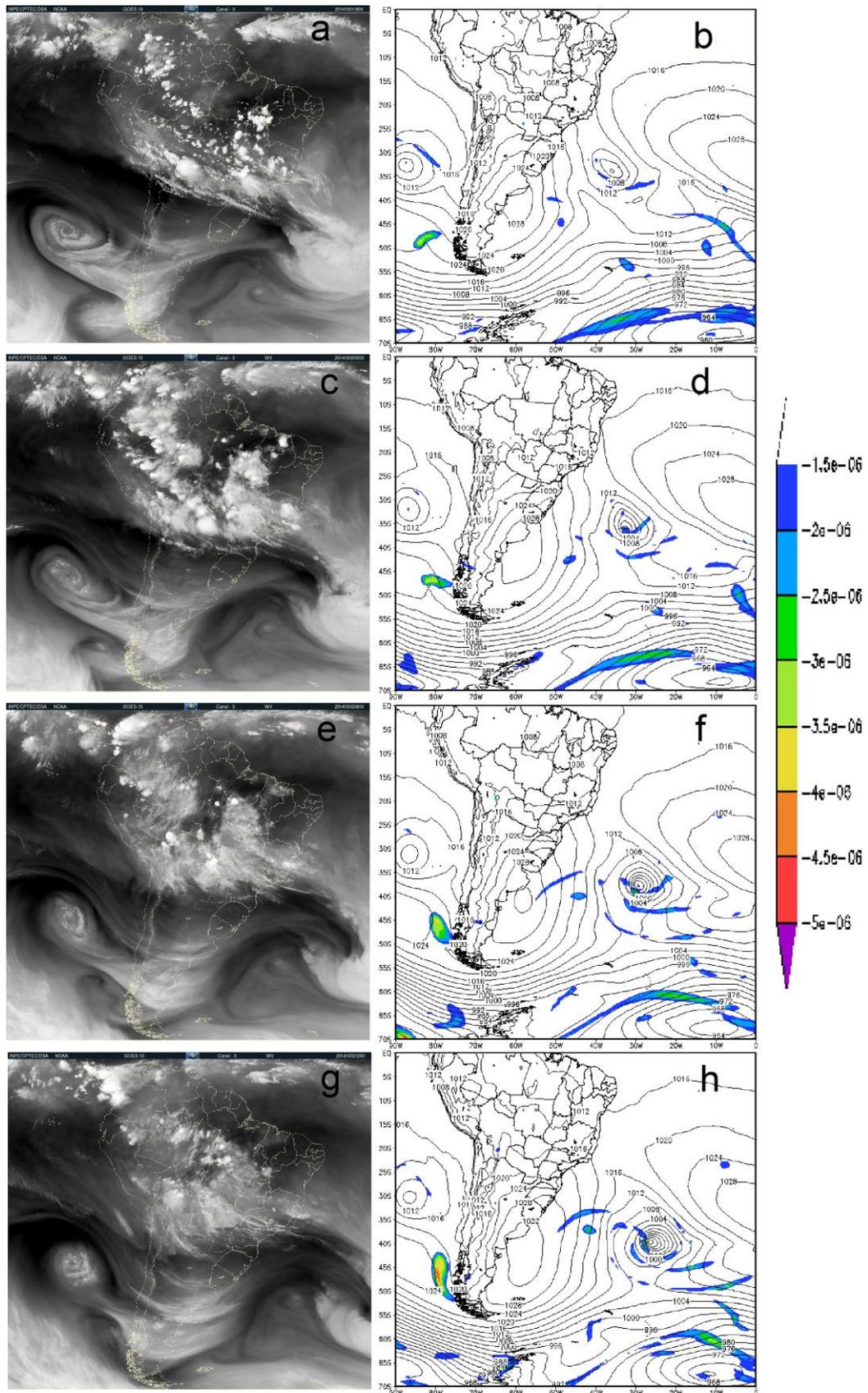


Figura 100 - Imagens de satélite (vapor d'água) de: (a) 01/10/2014 18Z; (c) 02/10/2014 00Z; (e) 02/10/2014 06Z, (g) 02/10/2014 12Z; e campos de PNMM em hPa (contorno) e EPV em $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ para o nível de 500 hPa (sombreado colorido) em: (b) 01/10/2014 18Z; (d) 02/10/2014 00Z; (f) 02/10/2014 06Z, (h) 02/10/2014 12Z.

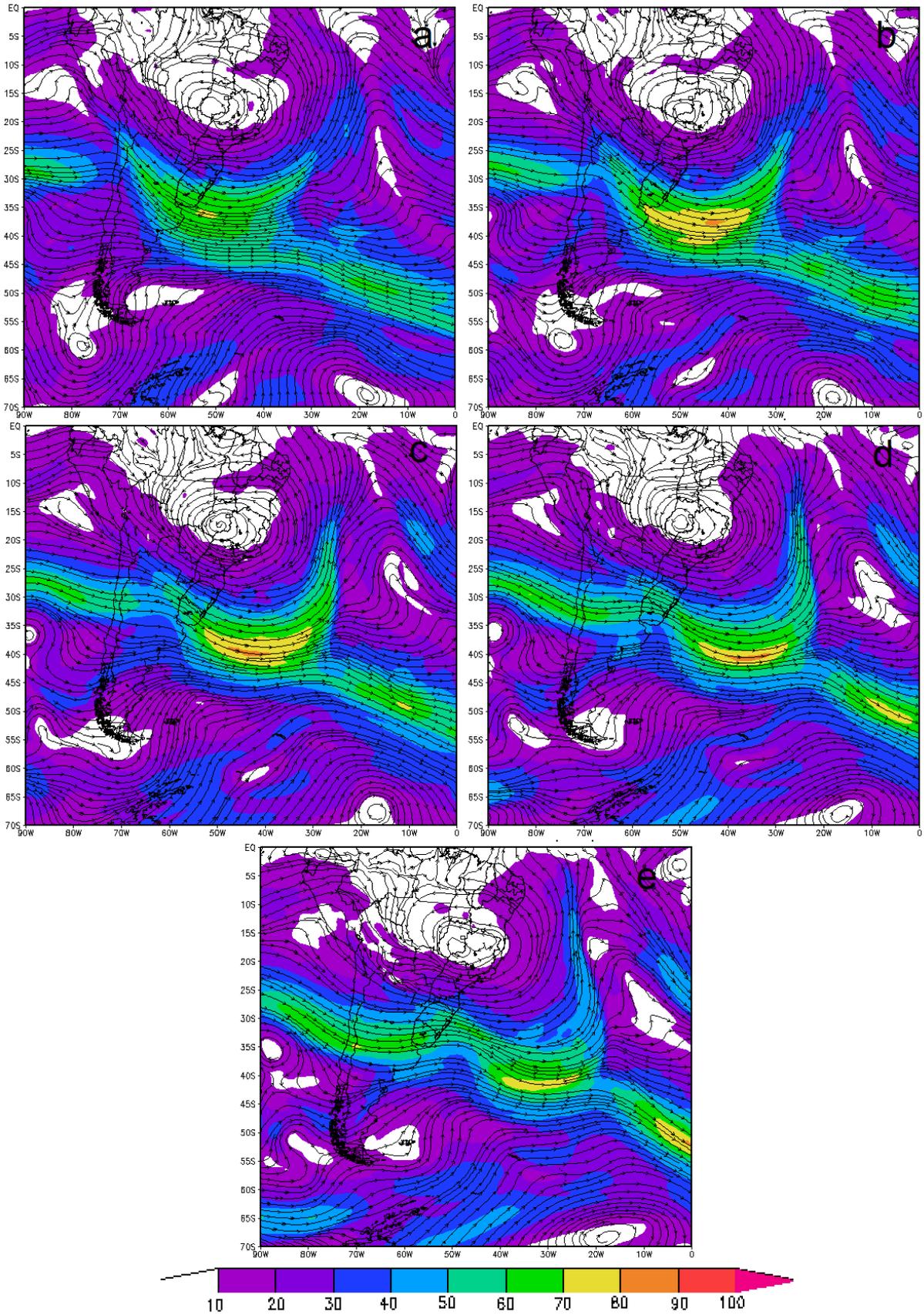


Figura 101 - Linhas de corrente em 250 hPa com magnitude hachurada em cores: a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z.

As linhas de corrente em 850 hPa (Figura 102) mostram que apenas no início houve contribuição do escoamento de ar quente e úmido da Amazônia.

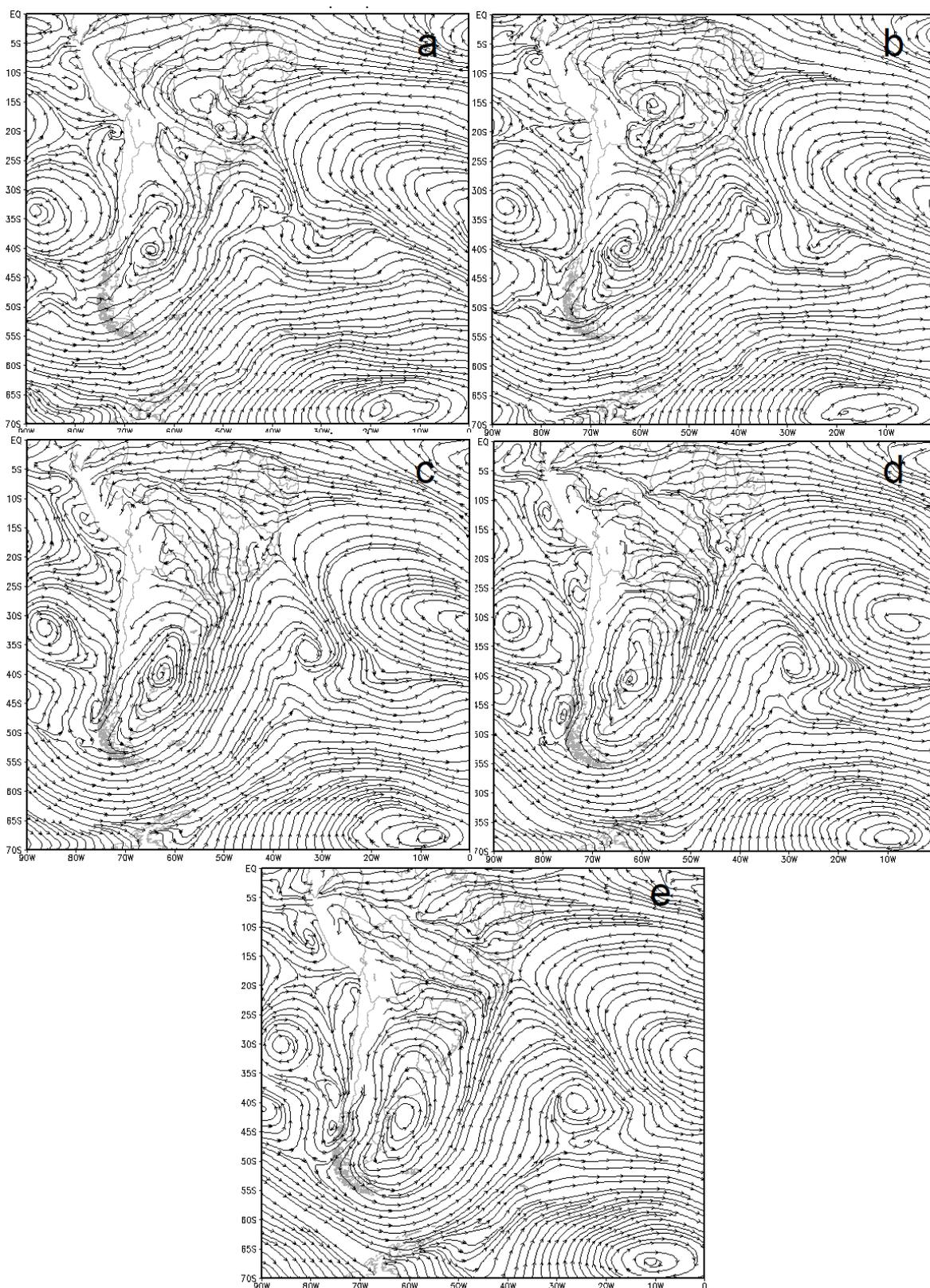


Figura 102 - Linhas de corrente em 850 hPa. a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z.

A tendência de Ozônio acoplada com EPV (Figura 103) mostra que a intrusão de ar estratosférico rico em Ozônio predominou na parte leste da dobra da tropopausa.

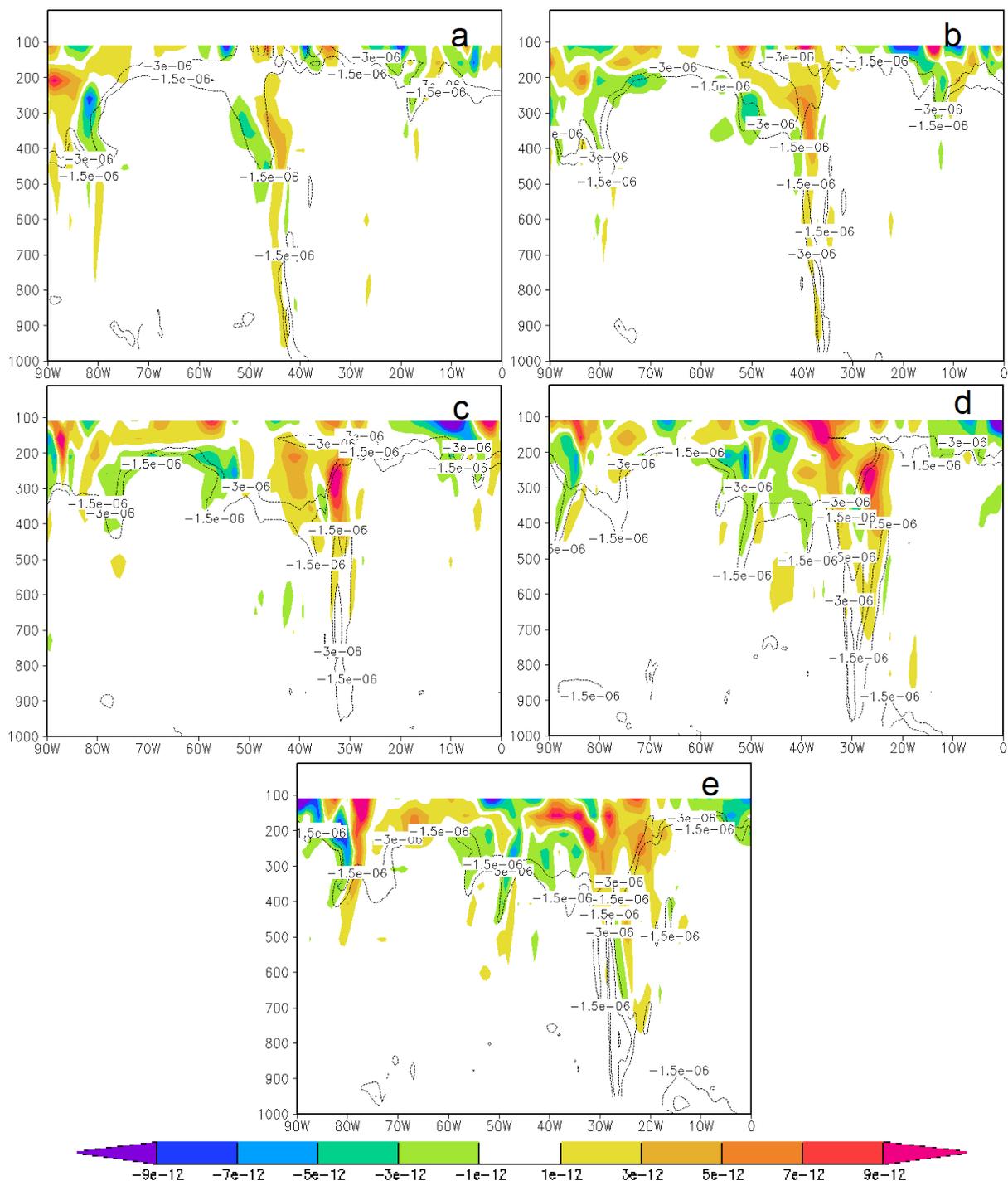


Figura 103 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e tendência de Ozônio (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 32°S, 01/10/2014 12Z; b) 34°S, 01/10/2014 18Z; c) 37°S, 02/10/2014 00Z; d) 38°S, 02/10/2014 06Z, e) 40°S, 02/10/2014 12Z.

As secções verticais de velocidade vertical Omega e EPV (Figura 104) mostram que os movimentos verticais foram vigorosos, sendo mais abrangentes os movimentos subsidentes a oeste da dobra da tropopausa e mais intensos os ascendentes a leste.

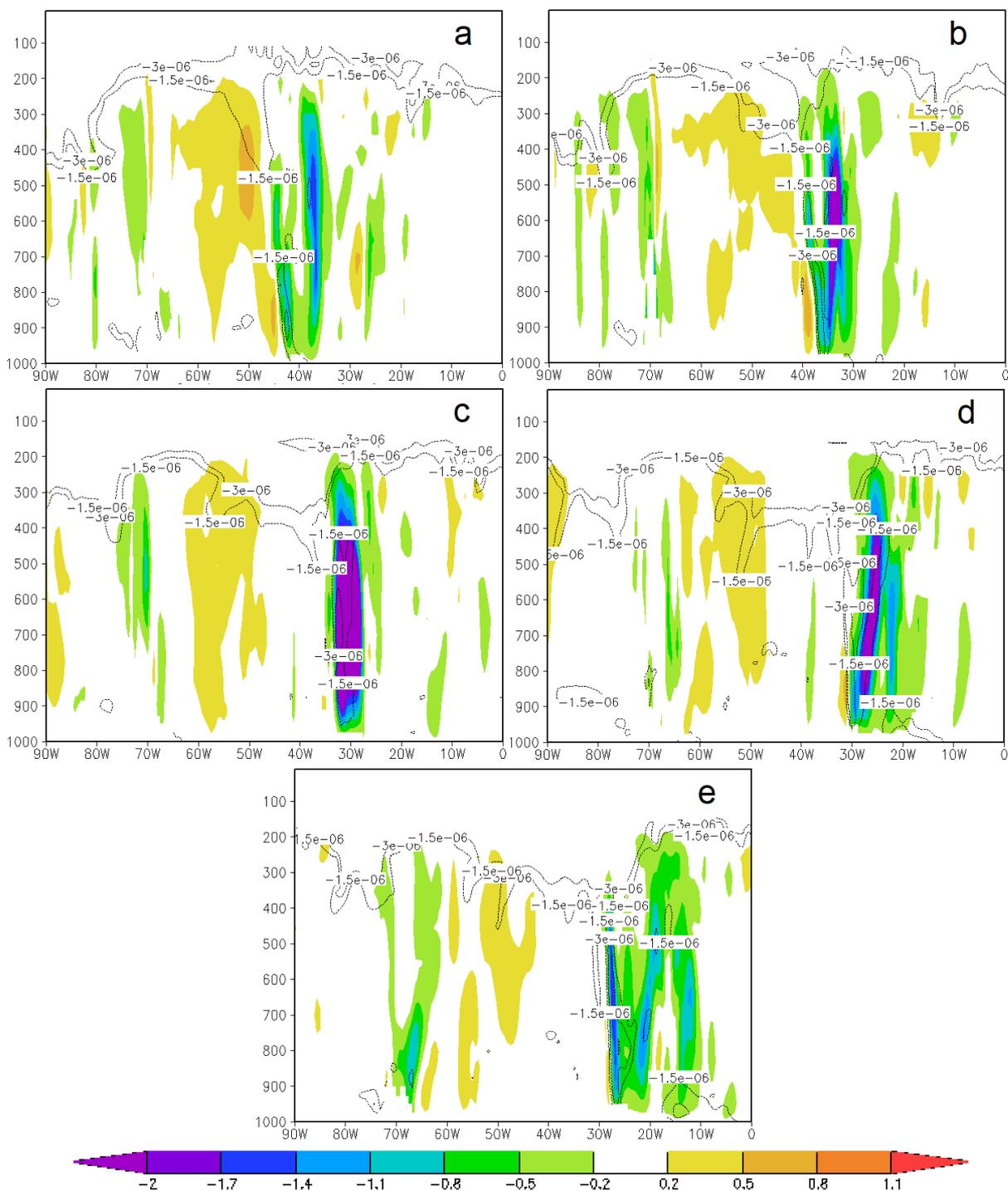


Figura 104 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e velocidade vertical omega (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 32°S, 01/10/2014 12Z; b) 34°S, 01/10/2014 18Z; c) 37°S, 02/10/2014 00Z; d) 38°S, 02/10/2014 06Z, e) 40°S, 02/10/2014 12Z.

As secções verticais de umidade relativa e EPV (Figura 105) mostram que o ar do ramo subsidente é seco enquanto o ar do ramo ascendente é úmido.

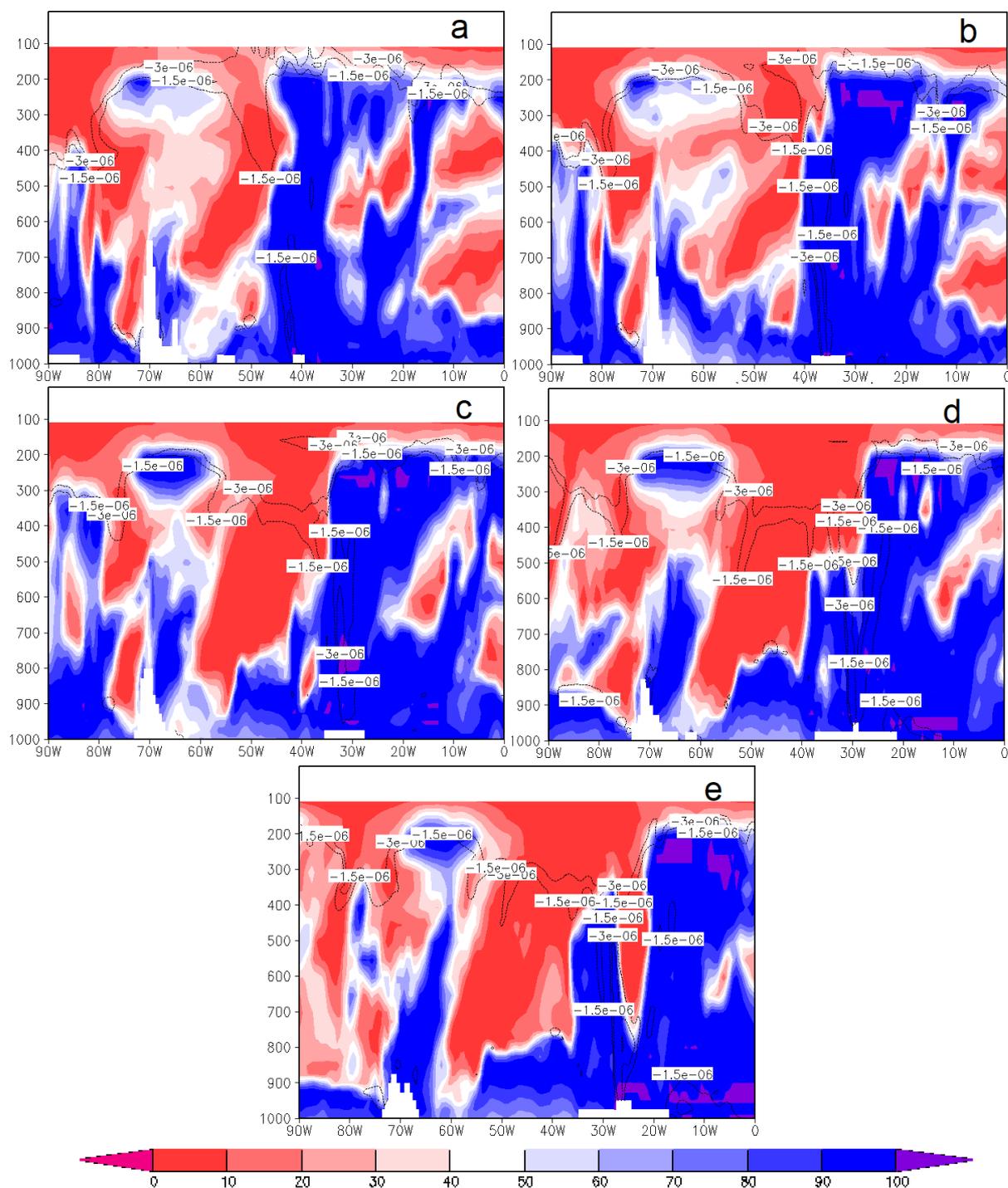


Figura 105 - Secções verticais de EPV maior ou igual, em módulo a 1.5 PVU (contornos) e umidade relativa (sombreado colorido), nas latitudes onde se encontrava o ciclone: a) 32°S, 01/10/2014 12Z; b) 34°S, 01/10/2014 18Z; c) 37°S, 02/10/2014 00Z; d) 38°S, 02/10/2014 06Z, e) 40°S, 02/10/2014 12Z.

Os fluxos de calor latente (Figura 106) surgem na região da frente fria, em conexão com o anticiclone a sudoeste, e aumentam até o final do ciclo explosivo.

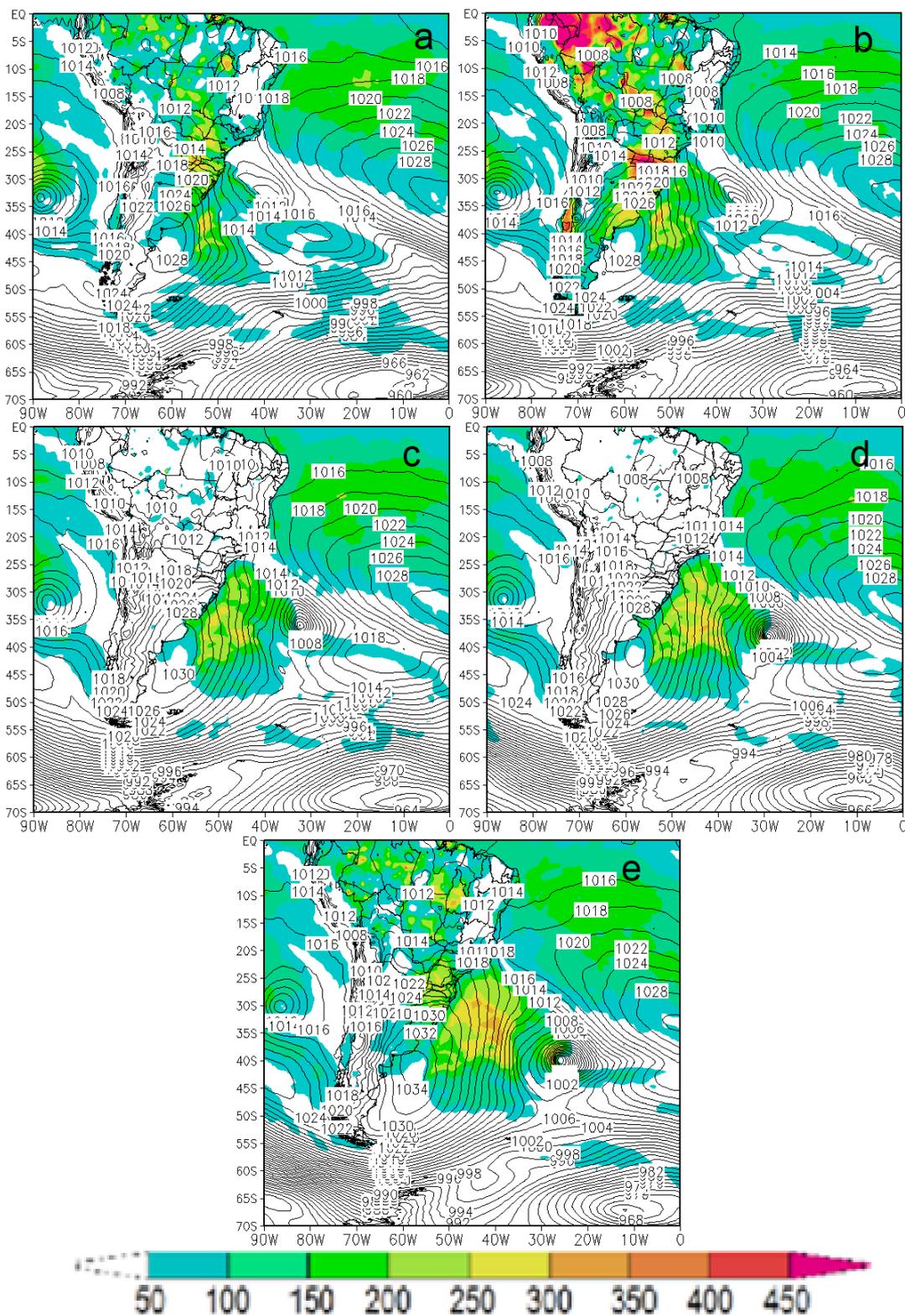


Figura 106 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor latente (sombreado em cores, Wm^{-2}): a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z.

Os fluxos de calor sensível de origem turbulenta (Figura 107) surgem a partir da metade do ciclo explosivo e aumentam até o final, com valores positivos no setor frio e valores negativos no setor quente.

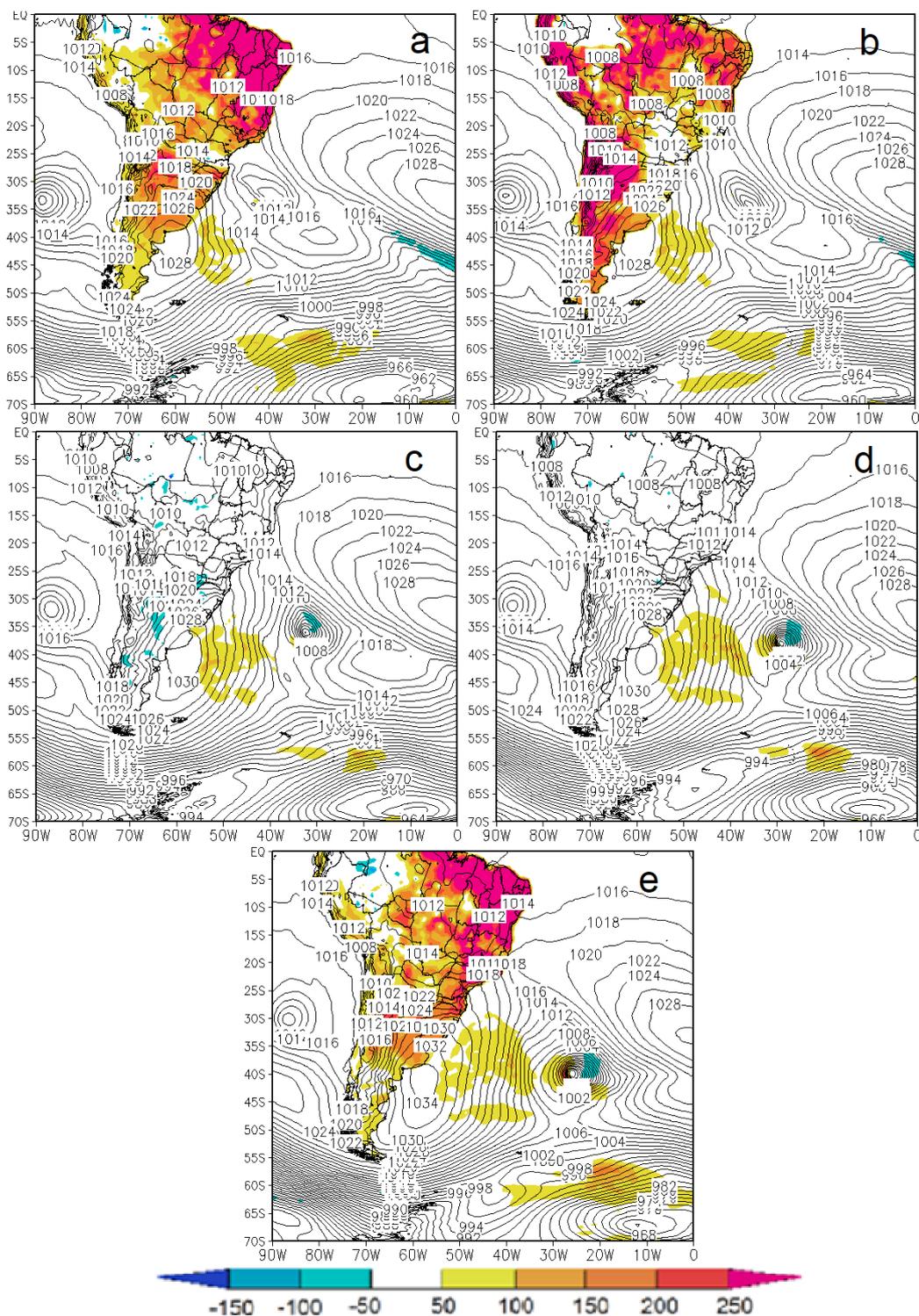


Figura 107 - Pressão ao nível médio do mar (contornos em preto) e fluxo de calor sensível de origem turbulenta (sombreado em cores, Wm^{-2}): a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z.

A distribuição dos valores de energia cinética integrada na vertical (Figura 108) mostra que o ciclone começou fora do escoamento básico e se deslocou em direção a uma confluência entre os jatos Polar Norte e Polar onde havia um forte jet streak.

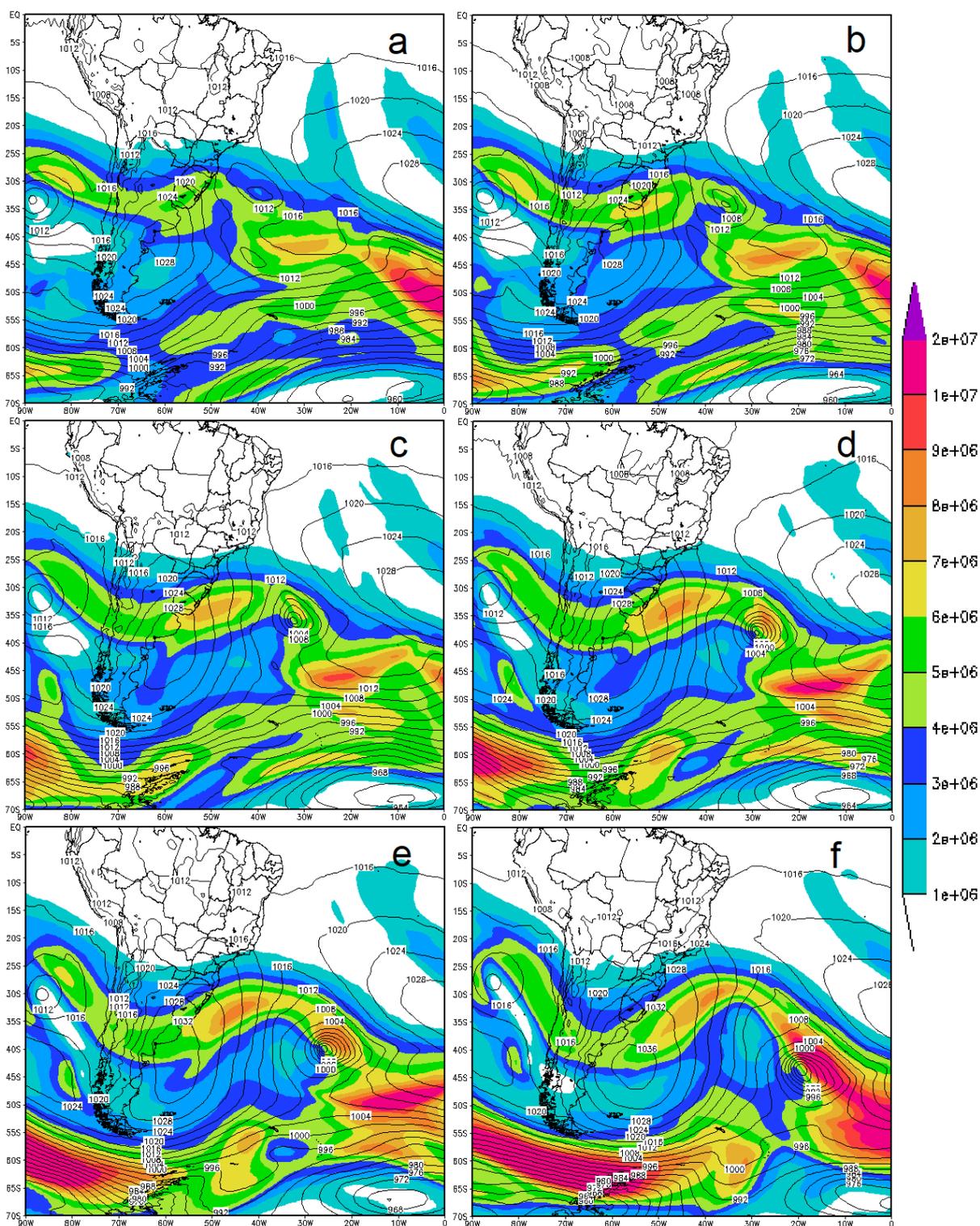


Figura 108 - Energia Cinética atmosférica integrada na vertical (Jm^{-2}) e PNMM. a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z, f) 03/10/2014 00Z.

O fluxo zonal de energia cinética integrado na vertical (Figura 109) mostra o mesmo que se pode observar na Figura 108.

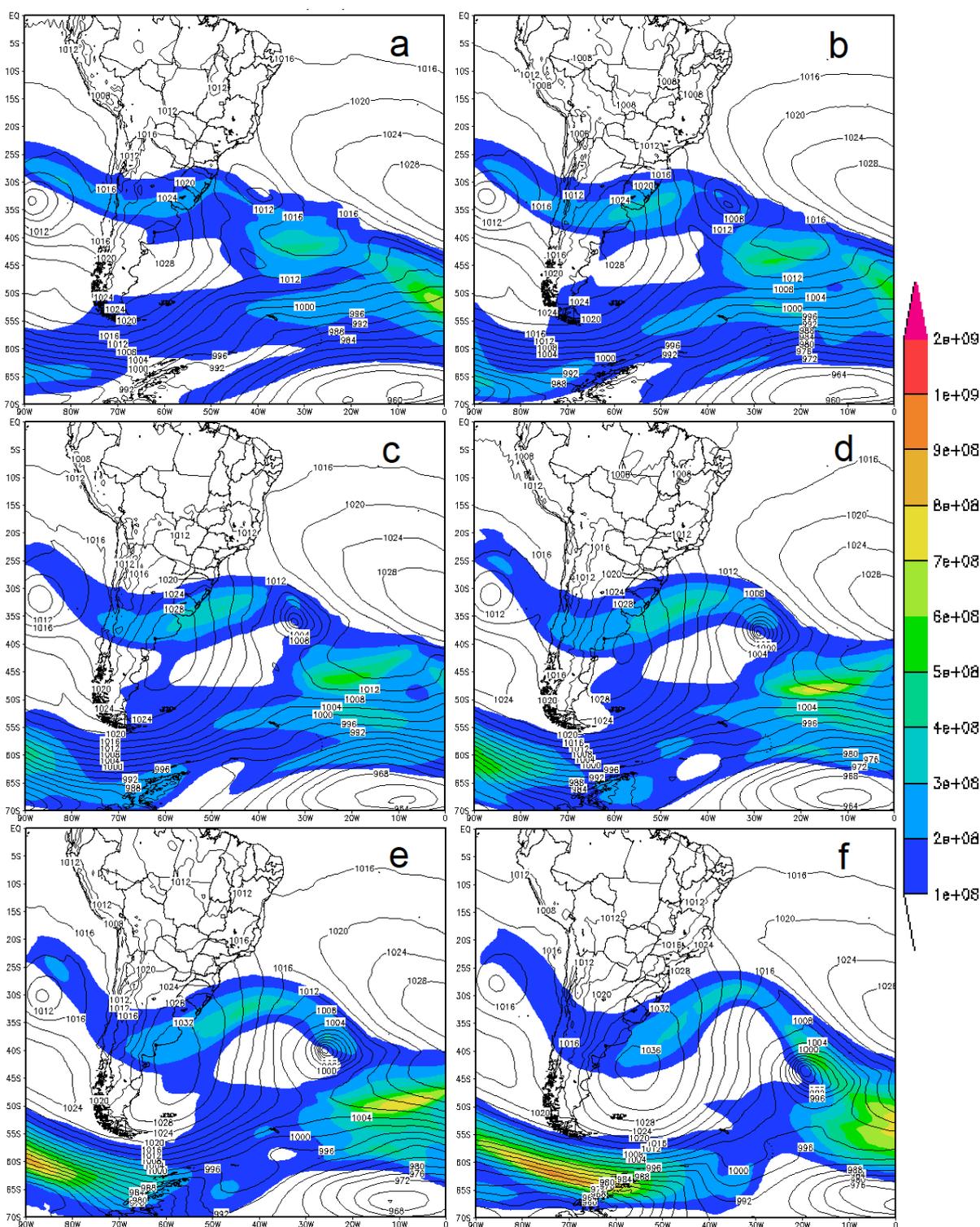


Figura 109 - Fluxo zonal de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z, f) 03/10/2014 00Z.

O fluxo meridional de energia cinética integrada na vertical (Figura 110) mostra que na região do ciclone houve aumento de energia cinética perturbada em abrangência durante o ciclo explosivo e em valor no final, principalmente após.

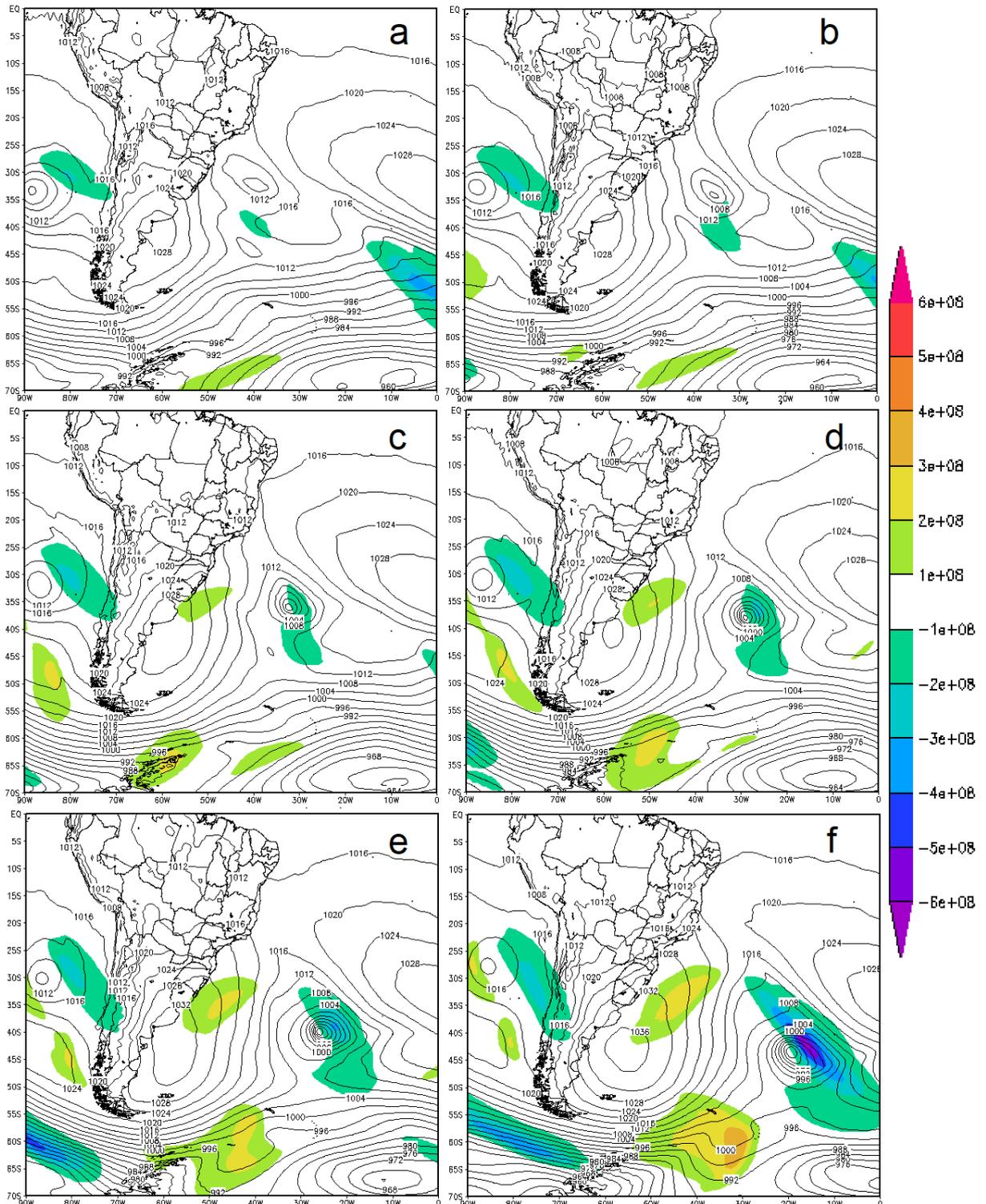


Figura 110 - Fluxo meridional de Energia Cinética atmosférica integrada na vertical ($Jm^{-1}s^{-1}$) e PNMM. a) 01/10/2014 12Z; b) 01/10/2014 18Z; c) 02/10/2014 00Z; d) 02/10/2014 06Z, e) 02/10/2014 12Z, f) 03/10/2014 00Z.

4.9 Síntese

Os casos apresentados diferem em vários aspectos como intensidade e estação do ano, bem como posição inicial e trajetória. No entanto, observou-se que em todos os casos, ocorre dobra da tropopausa, com movimento vertical subsidente a oeste e na dobra, sendo ascendente a leste, havendo dentro da dobra, tendência de ozônio negativa a oeste e positiva a leste, além de valores de umidade relativa entre 10-20% coincidindo com a tropopausa dinâmica.

Em todos os casos observou-se sobre a América do Sul ou adjacências no Oceano Atlântico, a confluência em altos níveis, das correntes de jato Subtropical e Polar, seguida de difluência das mesmas corrente abaixo, sob influência de um cavado no lado equatorial do jato subtropical e de uma crista ao sul do jato Polar. Na confluência das correntes de jato é formado um jet streak, na saída do qual é formado o ciclone em superfície, em geral do lado direito desta saída onde há circulação ciclônica. Também, por causa desta confluência, parte do escoamento da corrente de jato subtropical, devido a inclinação das superfícies isobáricas em direção ao polo, tende a escoar para o sul e subsidir arrastando ar seco estratosférico para níveis inferiores dentro da troposfera, como indicaram os campos analisados de vorticidade potencial em 500 hPa. Esta intrusão de ar estratosférico com altos valores de vorticidade potencial contribui para a ciclogênese explosiva, em acordo com a literatura (e.g. Santurette e Georgiev, 2005).

Além disso, observou-se influência do local de formação sobre a intensidade dos sistemas estudados, na medida em que, quanto mais ao sul a formação, mais tende a ser zonal a trajetória do ciclone durante o ciclo explosivo, sendo que todos os ciclones mais intensos apresentaram trajetórias para sudeste com uma apreciável componente meridional.

5. Conclusões

Foram detectados os casos de ocorrência de ciclogêneses explosivas, no período de 2012 à 2016, e classificados pela intensidade pelo critério de Sanders (1986). Foi detectado um número bem maior de ciclones comparado com outros trabalhos, provavelmente por causa da qualidade dos dados de alta resolução e pela inspeção direta destes dados, mas com resultados semelhantes no que se refere à detecção de mais casos no inverno e média de apenas dois casos fortes por ano.

Foi verificado que em todos os casos a intensidade da ciclogênese está associada com a perturbação dos jatos, de origem baroclínica, e envolvendo uma interação do escoamento anticiclônico em altos níveis sobre o continente no lado equatorial do jato subtropical, com o escoamento ciclônico em altos níveis no lado polar do jato polar, tendo como resultado desta interação a confluência destes jatos sobre o sul da América do Sul, com energia potencial e cinética sendo tomada de um dos jatos pelo outro. Além disso, observa-se que o escoamento de ar quente e úmido proveniente da Amazônia contribui para o desenvolvimento explosivo de alguns ciclones.

Outra constatação interessante e original, indicada por todos os casos selecionados e analisados, é de que os ciclones explosivos evoluem segundo o modelo conceitual de ciclogênese de Shapiro e Keyser (1990), no qual a frente fria se desloca perpendicularmente a frente quente por causa da intrusão de ar seco estratosférico próximo ao centro do ciclone criando um padrão de catafrente, no qual o ar quente que deveria ascender sobre a rampa frontal (esteira condutora de ar quente), ao começar a subir, logo é empurrado pela intrusão de ar seco, sendo obrigado a retornar. No modelo conceitual tradicional de Bjerkness e Solberg (1922), a frente fria gira que nem um ponteiro de relógio até alcançar a frente quente quando então as massas de ar frio, ao se encontrarem, erguem o ar quente no processo chamado oclusão. No modelo conceitual de Shapiro e Keyser (1990), quando a intrusão de ar seco empurra o ar quente fazendo-o voltar logo acima, a parte deste ar quente que ficou por baixo torna-se aprisionada pelo ar da intrusão em um processo chamado de seclusão, só conseguindo subir muito vagarosamente depois, através do ar frio.

Esta constatação do parágrafo anterior só foi comentada em um dos casos, pois o tamanho menor do domínio da imagem de satélite torna difícil percebê-la de imediato, visto que, em muitos dos casos observa-se só o início, saindo do domínio em seguida. Isto só se tornou evidente depois de examinar todos os outros casos fortes ocorridos no período analisado, os quais estão brevemente descritos no Apêndice A (exceto aqueles três já mostrados no trabalho).

Como contribuições deste trabalho, destacam-se:

- Ciclones explosivos detectados para o período de 2012-2016 pela inspeção visual direta das análises de PNMM obtidas de dados de reanálises de alta resolução;
- Casos classificados segundo a intensidade;
- Confirmação, pelos casos estudados, de que sempre existem dobras da tropopausa associadas com a ciclogênese explosiva;
- Confirmação de que a Vorticidade Potencial descreve bem estas dobras e a intrusão de ar seco da estratosfera através da assim chamada “Anomalia da Tropopausa Dinâmica”;
- Indicação bastante consistente que os valores de umidade relativa entre 10-20% coincidem perfeitamente com a tropopausa dinâmica;
- Indicação muito forte de que os ciclones explosivos se desenvolvem segundo o modelo conceitual de ciclone de Shapiro e Keyser (1990).

Para finalizar, algumas sugestões para estudos futuros:

- Detalhar os estudos dos casos fortes para publicação de artigos científicos;
- Promover estudos dos casos de Ciclogênese Explosiva ampliando o período de análise com o intuito de fazer comparações com os resultados obtidos por outros autores através da utilização de esquemas automáticos de detecção, bem como o acompanhamento de ciclones em escala climática;
- Detalhar a estrutura dinâmica e termodinâmica de ciclones explosivos.

6. Referências Bibliográficas

ALLEN, J. T.; PEZZA, A. B.; BLACK, M. T. Explosive cyclogenesis: A global climatology comparing multiple reanalysis. **Journal of Climate**, v. 23, n. 24, p. 6468-6484, 2010.

AVILA, V. D., NUNES, A.B.; ALVES, R. C. M.; RODRIGUES, B. D. Analysis of a bombogenesis in South Atlantic summer using Ertel potential vorticity. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 6., 2015, Natal-RN. **Proceedings**. Natal: SBMet, 2015.

AVILA, V. D.; NUNES, A. B. ; ALVES, R. C. M. . Analysis of an explosive cyclogenesis case occurred in 03/01/2014 on the south of the Atlantic Ocean. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, p. 1088-1100, 2016.

BITENCOURT, D. P.; FUENTES, M. V.; CARDOSO, C. S.: Climatologia de Ciclones Explosivos Para a Área Ciclogênica da América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.1, p. 43 - 56, 2013.

BITHELL, M.; GRAY, L. J.; COX, B. D. . A three-dimensional view of the evolution of midlatitude stratospheric intrusions. **Journal of the Atmospheric Sciences**. v. 56, p. 673-688, 1999.

BJERKNES, J. On the structure of moving cyclones. **Geofysiske Publikasjoner**, v. 1, n. 2, p. 1-8, 1919.

BJERKNES, J.; SOLBERG, H. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. **Geofysiske Publikasjoner**, v. 3, p. 3-18, 1922.

BLACK, M. T.; PEZZA, A. B.: A universal, broad-environment energy conversion signature of explosive cyclones. **Geophysical Research Letters**, v. 40, p. 452–457, 2013.

BLENDER, R., FRAEDRICH, K., Lunkeit, F. Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic. **Quart. J. Roy. Met. Soc.**, v. 123, n.239, p 727-741, 1997.

Bluestein, H.B. Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II: Observations and theory of weather systems. Oxford University Press. Oxford. 594p, 1993.

BOSART, L. F. The Presidents' Day Snowstorm of 18–19 February 1979: A Subsynoptic-Scale Event. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 7, p. 1542-1566, 1981.

BOSART, L. F.; LIN, S. C., A diagnostic analysis of the Presidents' Day storm of February 1979. **Mon. Wea. Rev.**, v. 112, p. 2148–2177, 1984.

CAU, P.; METHVEN, J.; HOSKINS, B. Origins of dry air in the tropics and subtropics. **Journal of Climate**. v. 20, p. 2745-2759, 2007

COSSETIN, F.; NUNES, A. B.; TEIXEIRA, M. 2016. Análise do movimento vertical sob duas configurações de altos níveis da troposfera. **Ciência e Natura**. (in press).

G1_a <http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2014/01/temporal-chega-santa-catarina-e-defesa-civil-alerta-para-riscos.html> Acessado em 30/12/2018.

G1_b <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2014/02/temporal-derruba-arvores-sobre-casas-no-vale-do-taquari-no-rs.html> Acessado em 30/12/2018.

G1_c <https://ndonline.com.br/florianopolis/noticias/temporal-caoa-estragos-em-cidades-catarinenses> Acessado em 30/12/2018.

G1_d <http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2012/07/cabo-frio-rj-decreta-estado-de-emergencia-apos-chuva-de-granizo.html> Acessado em 30/12/2018.

GAN, M. A.; RAO, V. B.. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293-1302, 1991.

GELARO, R., MCCARTY, W., SUÁREZ, M. J., TODLING, R., MOLOD, A., TAKACS, L., RANGLES, C. A., DARMENOV, A., BOSILOVICH, M., REICHLE, R., WARGAN, K., COY, L., CULLATHER, R., DRAPER, C., AKELLA, S., BUCHARD, V., CONATY, A., DA SILVA, A., GU, W., KIM, G.-K., KOSTER, R., LUCHESI, R., MERKOVA, D., NIELSEN, J. E., PARTYKA, G., PAWSON, S., PUTMAN, W., RIENECKER, M., SCHUBERT, S. D., SIENKIEWICZ, M. AND ZHAO, B.: The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2), **Journal of Climate**, 14, 5419-5454, 19 doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1, 2017.

GIORDANI, H.; CANIAUX, G. Sensitivity of cyclogenesis to sea surface temperature in the northwestern Atlantic. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 6, p. 1273-1295, 2001.

GRAY, W.M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. **Monthly Weather Review**, v. 96, p. 669-7

GYAKUM, J. R. On the Evolution of the QE II Storm. I: Synoptic Aspects. **Monthly Weather Review**, v. 111, n. 6, p. 1137-1155, 1983a.

GYAKUM, J. R. On the Evolution of the QE II Storm. II: Dynamic and Thermodynamic Structure. **Monthly Weather Review**, v. 111, n. 6, p. 1156-1173, 1983b.

HART, R.E. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal assymetry. **Monthly Weather Review**, v. 131, p. 585-616, 2003.

HODGES KI, LEE RW & BENGTTSSON L. A comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25. **Journal of Climate**. v. 24, p. 4888-4906, 2011.

HOLTON, J. R., 1992: An Introduction to Dynamic Meteorology, Third Edition. **Academic Press**, San Diego, 511p..

HOSKINS, B.. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 111, p. 877-946, 1985.

HOSKINS, B. J.; HODGES, K. I. A New Perspective on Southern Hemisphere Storm Tracks. **J. Climate**, v. 18, p. 4108-4129, 2005.

IWABE, C. M. N., ROCHA, R. P. An event of stratospheric air intrusion and its associated secondary surface cyclogenesis over the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, D09101, doi:10.1029/2008JD011119, 2009.

KENNEDY, A. D; DONG, X.; XI, B.; XIE, S.; ZHANG, Y.; CHEN, J. A comparison of MERRA and NARR reanalysis with the DOE ARM SGP data. **Journal of Climate**. v.24, p. 4541-4557, 2011.

LIM, E. P.; SIMMONDS, I. Explosive cyclone development in the Southern Hemisphere and a comparison with Northern Hemisphere Events. **Monthly Weather Review**, v. 130, n. 9, p. 2188-2209, 2002.

MENDES, D.; SOUZA, E. P.; MARENGO, J. A.; MENDES, M. C. D.. Climatology of extratropical cyclones over the South American-southern oceans sector. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3-4, p.239-250, 2010.

MURRAY, R. J.; SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. **Australian Meteorological Magazine**, v. 39, p.155–166, 1991.

NAUD, C. M.; BOOTH, J. F.; DEL GENIO, A. D. Evaluation of ERA-Interim and MERRA cloudiness in the Southern Ocean. **Journal of Climate**. v.27, p. 2109-2124, 2014.

NECCO, G. Comportamiento de vortices ciclonicos en el area Sudamericana durante el FGGE : Ciclogenesis. **Meteorologica**, v.13, n. 1-2, p. 7-19, 1982.

ODA, T. O. Efeitos da Distribuição Espaço-Temporal da Temperatura do Mar no Desenvolvimento de Ciclones Extratropicais. 2005. 125 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 2005.

ONI_NOAA <https://ggweather.com/enso/oni.htm> Acessado em 30/12/2018

ORLANSKI, I.; KATZFEY, J. The life cycle of a cyclone wave in the Southern Hemisphere. 1. Eddy energy budget. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 48, p. 1972-1998, 1991.

PALMÉN, E. Formation and development of tropical cyclones. In Proc. Tropical Cyclone Symp. Brisbane, pp. 213-231. **Bur. Meteorol., Melbourne**, Australia, 1956.

PALMEN, E.;NEWTON, C. M. Atmospheric Circulation Systems. **Academic Press**, 603 p. 1969.

PETTERSEN, S. Motion and Motion Systems, New York: **McGraw Hill**, 1956. v. I, 428 p.

PETTERSEN, S.; SMEBYE, S. J. On the development of extratropical cyclones. **Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society**, v. 97, p. 457-482, 1971.

PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B.; ACEVEDO, O.; WAINER, I.; MATA, M. M.; GARCIA, C. A. E. AND CAMARGO, R. Multiyear measurements of the oceanic and atmospheric boundary layers at the Brazil-Malvinas confluence region, **J. Geophys. Res.**, 114, D19103, doi:10.1029/2008JD011379, 2009.

PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B.; DOURADO, M. S.; GARCIA, C. A. E.; MATA, M. M. AND DIAS, M. A. F. S. Ocean-atmosphere in-situ observations at the Brazil-Malvinas confluence region, **Geophys. Res. Lett.**, 32, L22603, doi:10.1029/2005GL023866, 2005.

PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B.; FARIAS, P.C.; ACEVEDO, O.; AND MILLER, A. J. Airsea interaction at the Southern Brazilian Continental Shelf: In situ observations, **J. Geophys. Res. Oceans**, 121, doi:10.1002/2016JC011774, 2016a.

PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B.; QUADRO M. F. L. Uma Revisão dos Processos de Interação Oceano-Atmosfera em Regiões de Intenso Gradiente Termal do Oceano Atlântico Sul Baseada em Dados Observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, 428-453, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631231420150032>, 2016b.

PEZZI, L. P.; VIALARD, J.; RICHARDS, K. J.; MENKES, C. AND ANDERSON, D. Influence of ocean-atmosphere coupling on the properties of tropical instability waves, **Geophys. Res. Lett.**, 31, L16306, doi:10.1029/2004GL019995, 2004.

PINTO, J. R. D. Estudo da estrutura e energética dos distúrbios de escala sinótica na costa leste da América do Sul. 90f. Dissertação (Mestrado), **Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas IAG/USP**, 2010.

PIVA, E. D. Estudo de caso sobre o papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície em processos de ciclogênese de costa leste ocorrido na costa da América do Sul. 2001. 162 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - **INPE-8498-TDI/781**, INPE, São José dos Campos, 2001.

PIVA, E. D.; MOSCATI, M. C. L.; GAN, M. A. Papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície associado a um caso de ciclogênese na costa leste da América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 4, p.450-476, 2008.

PIVA, E.; GAN, M. A.; MOSCATI, M. C. L. The role of latent and sensible heat fluxes in an explosive cyclogenesis over South America. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 89(6), p. 1–27, 2011, DOI:10.2151/jmsj.2011-604.

POSSELT, D. J.; JONGEWARD, A. R.; HSU, C-Y.; POTTER, G. L.: Object-based evaluation of MERRA cloud physical properties and radiative fluxes during the 1998 El Niño-La Niña transition. **Journal of Climate**. v. 25, p.7313-7327, 2012.

QUADRO, M. F. L.; SILVA, DIAS M. A.; HERDIES, D. L.; GONÇALVES, L. G. G. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**. V. 27, p. 152-162, 2012.

REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T., 2005: Climatologia de Ciclones sobre o Atlântico Sul Utilizando Métodos Objetivos na Detecção destes Sistemas. In: **IX CONGREGMET**, CONGRESSO ARGENTINO DE METEOROLOGIA, Buenos Aires, AR, Outubro 3-7, 2005.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A., DA ROCHA R. P., AMBRIZZI T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25(2), p.185-204, 2010a.

REBOITA, M. S. Ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação climática e experimentos de sensibilidade. **IAG-USP**: São Paulo, 359 p., 2008.

REED, R. J. A study of a characteristic type of upper-level frontogenesis. **J. Meteor.**, v. 12, p. 226-237, 1955.

RIENECKER, M. M.; SUAREZ, M. J.; GELARO, R.; TODLING, R.; BACMEISTER, J.; LIU, E.; BOSILOVICH, M. G.; SCHUBERT, S. D.; TAKACS, L.; GI-KONG, K.; BLOOM, S.; CHEN, J.; COLLINS, D.; CONATY, A.; SILVA, A.; GU, W.; JOINER, J.; KOSTER, R. D.; LUCCHESI, R.; MOLOD, A.; OWENS, T.; PAWSON, S.; PEGION, P.; REDDER, C. R.; REICHEL, R.; ROBERTSON, F. R.; RUDDICK, A. G.; SIENKIEWICZ, M.; WOOLLEN, J. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. **Journal of Climate**. v. 24, p. 3624-3648, 2011.

SANDERS, F.; GYAKUM, J. R. Synoptic–dynamic climatology of the “Bomb”. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 10, p.1589–1606, 1980.

SANDERS, F.: Explosive cyclogenesis in the West-Central North Atlantic Ocean, 1981–84. Part I: Composite structure and mean behavior. **Monthly Weather Review**, v. 114, n. 10, p.1781-1794, 1986.

SANTURETTE, P.; GEORGIEV, C. G.; **Weather analysis and forecasting**: Applying satellite water vapor imagery and potential vorticity analysis. Academic Press. Amsterdam. 179p., 2005.

SATYAMURTY, P.; FERREIRA, C. C.; GAN, M. A. Cyclonic vortices over South America. **Tellus A**, v. 42A, n. 1, p. 194-201, 1990.

SCHUBERT, W. H.; RUPRECHT, E.; HERTENSTEIN, R.; FERREIRA, R.N.; TAFT, R.; ROZOFF, C.; CIESIELSKI, P.; AND KUO, H.-C.: English translations of twenty-

one of Ertel's papers on geophysical fluid dynamics. **Meteor. Zeit.**, 13,527-576, 2004.

SIMMONDS, I.; KEAY, K. Mean southern hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP-NCAR reanalysis, **J. Climate**, v. 13, n. 5, p. 873-885, 2000.

SHAPIRO, M.A.; KEYSER, D. Fronts, jet streams and the tropopause. Extratropical Cyclones, The Erik Palmén Memorial Volume, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., **American Meteorological Society**, p. 167-191, 1990.

SINCLAIR, M. R. A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 6, p. 1601-1619, 1995.

SUTCLIFFE, R. C. A contribution to the problem of development, **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 73, p. 370–383, 1947. doi:10.1002/qj.49707331710.

TALJAARD, J. J. Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during the IGY. **J. appl. Met.**, v.6, n. 6, p. 973-987, 1967.

TRIGO, I. F.; DAVIES T. D.; BIGG, G. R. Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region. **J. Climate**, v. 12, n. 10, p. 1685-1696, 1999.

UCCELLINI, L. W.; KEYSER, D.; BRILL, K. F.; WASH, C. H. The President's Day Cyclone of 18-19 February 1979: Influence of upstream trough amplification and associated tropopause folding on rapid cyclogenesis. **Monthly Weather Review**. v. 113, p. 962-988, 1985.

UCCELLINI, L. W. The Possible Influence of Upstream Upper-Level Baroclinic Processes on the Development of the QE II Storm. **Monthly Weather Review**, v. 114, n. 6, p. 1019-1027, 1986.

UNIMELB – University of Melbourne. Authomatic Cyclone Tracking Home Page, 2016. Disponível em: <<http://legacy.earthsci.unimelb.edu.au/tracks/cychome.htm>> Acesso em: 28 mar. 2016.

VAUGHAN, G.; PRICE, J. D.; HOWELLS, A.: Transport into the troposphere in a tropopause fold. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 120, n. 518, p. 1085-1103, 1994.

WANG, C-C; ROGERS, J. C.: A composite study of explosive cyclogenesis in different sectors of the North Atlantic. Part I: Cyclone structure and evolution. **Monthly Weather Review**. v.129, p. 1481–1499, 2001.

WEI, J.; DIRMEYER, P. A.; WISSER, D.; BOSILOVICH, M. G; MOCKO, D. M. Where does the irrigation water go? An estimate of the contribution of irrigation to precipitation using MERRA. **Journal of Hydrometeorology**. v.14, p. 275-289, 2013.

WHITAKER, J. S.; UCCELLINI, L. W.; BRILL, K. F. A Model-Based Diagnostic Study of the Rapid Development Phase of the Presidents's Day Cyclone. **Monthly Weather Review**, v. 116, n. 11, p. 2337-2365, 1988.

Apêndice A

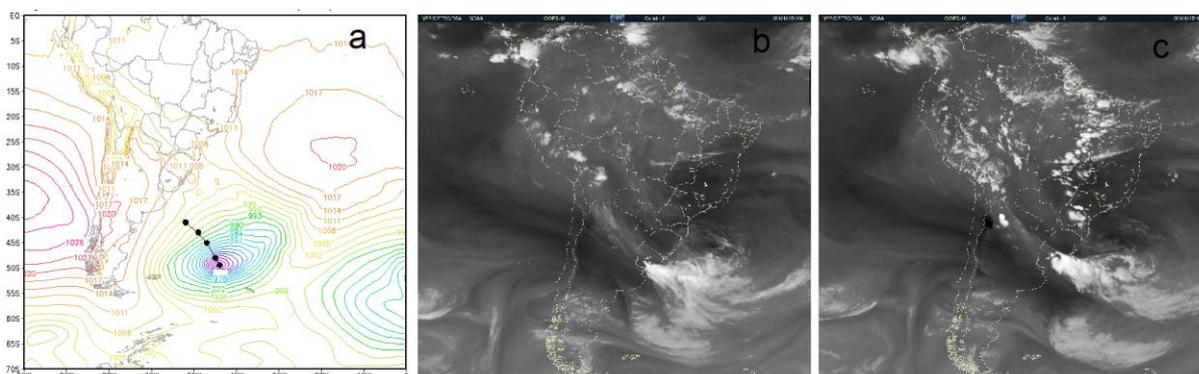
Casos de Ciclogênese Explosiva Forte no Período 2012-2016

Em adição aos casos apresentados na seção de resultados, este apêndice mostra todos os casos de ciclogênese explosiva forte ocorridos no período de análise, exceto aqueles já apresentados na referida seção de resultados. Consiste de uma análise resumida focando apenas nas trajetórias marcadas de seis em seis horas para mostrar que nos casos fortes elas são dirigidas para sudeste, com uma componente meridional acentuada e também de duas imagens de satélite com o fito de salientar o comportamento compatível com o modelo conceitual de Shapiro e Keyser (1990).

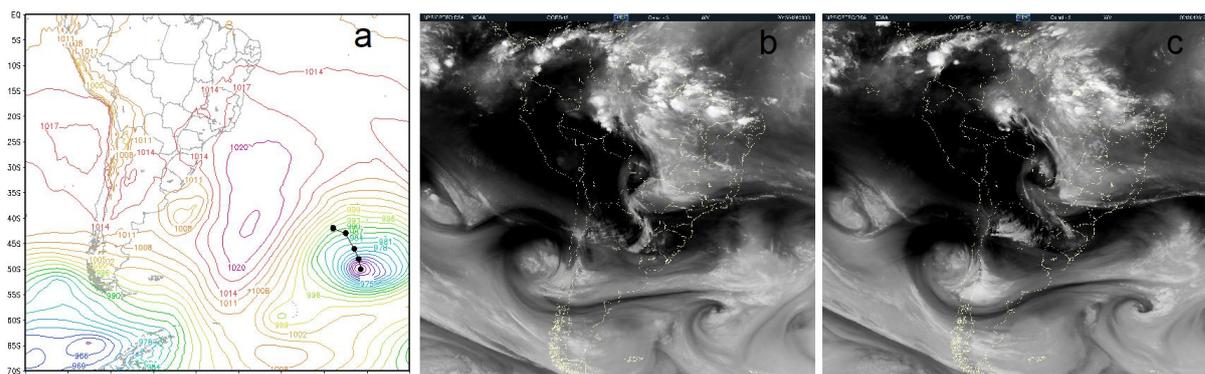
Caso de 30/07/2012:

Já mostrado nos resultados.

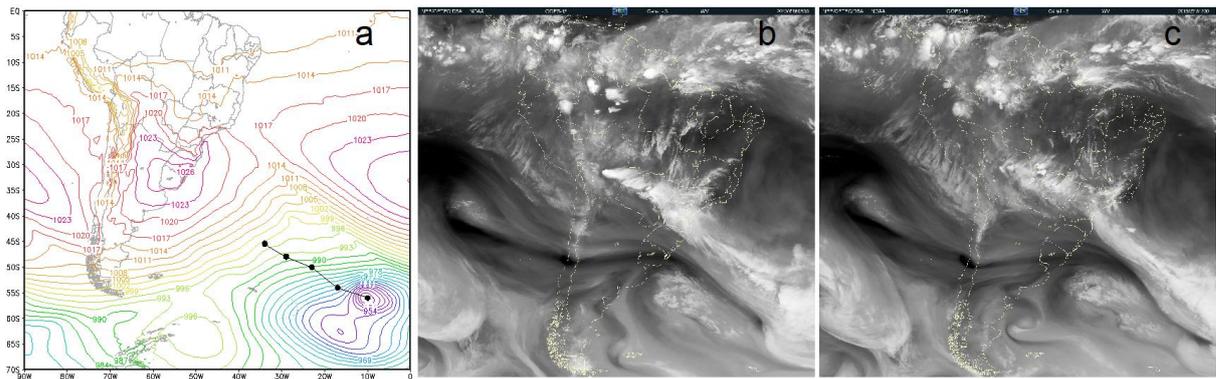
Caso de 25/12/2012: Iniciou às 12Z. Imagens de Satélite às 12Z e 18Z.



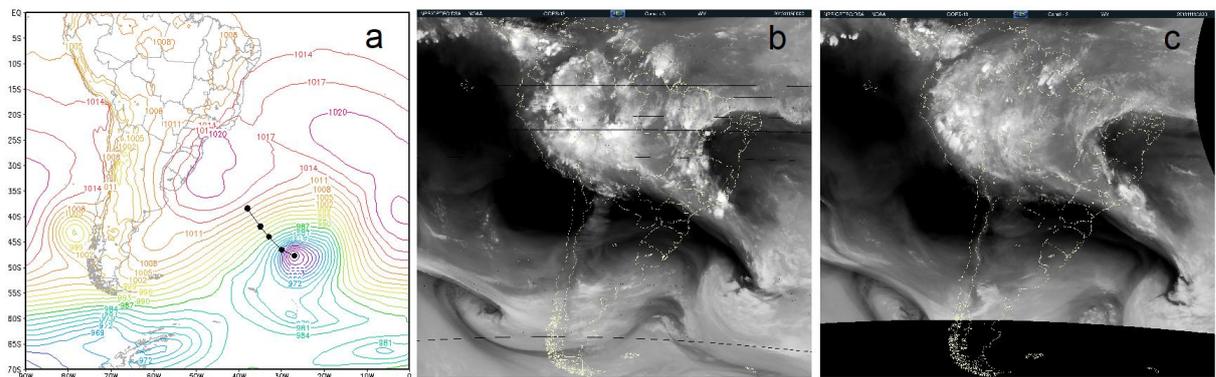
Caso de 28/04/2013: Iniciou às 12Z. Imagens de Satélite às 06Z e 12Z, do dia 26.



Caso de 16/05/2013: Iniciou às 06Z. Imagens de Satélite às 06Z e 12Z



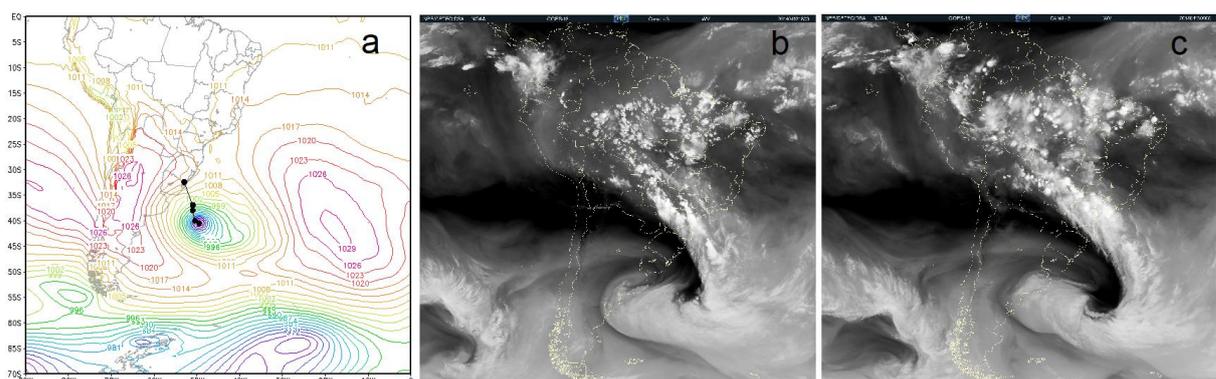
Caso de 13/11/2013: Iniciou às 00Z. Imagens de Satélite às 00Z e 06:30Z



Caso de 03/01/2014:

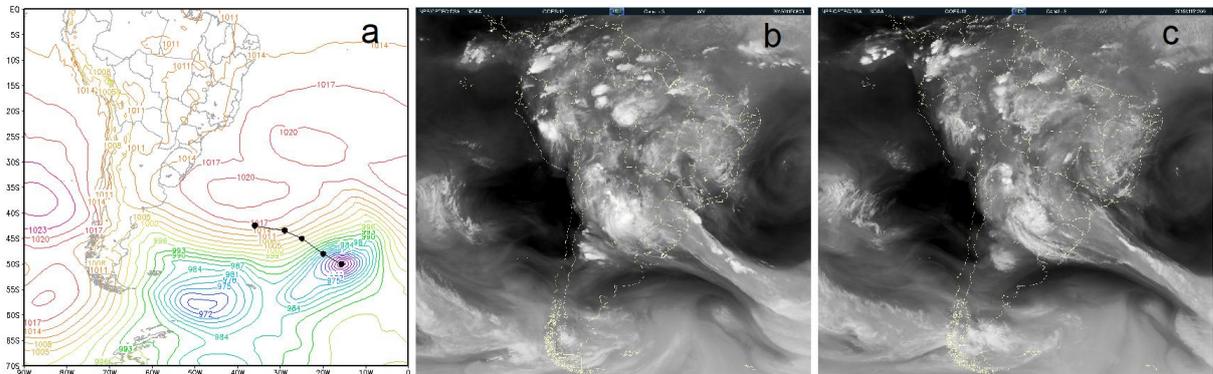
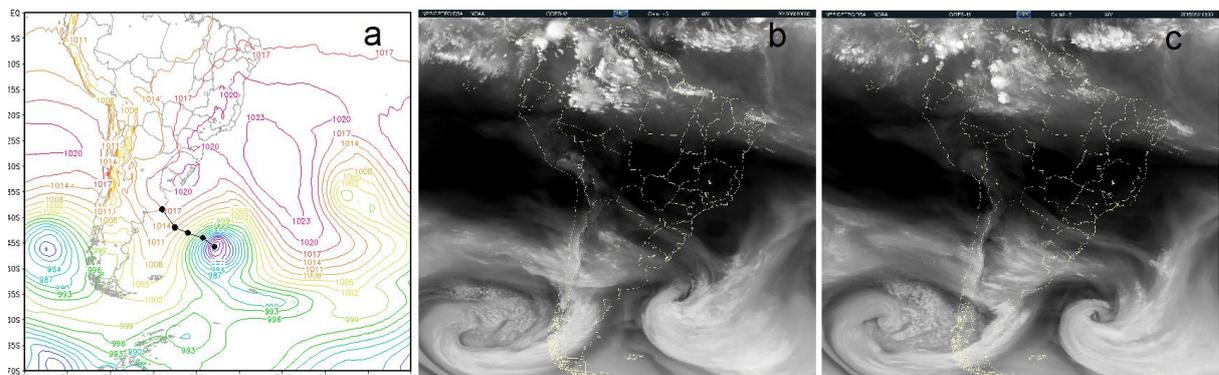
Já mostrado nos resultados.

Caso de 12/04/2014: Iniciou às 06Z. Imagens de Satélite às 18Z do dia 12 e às 00Z do dia 13.



Caso de 01/10/2014:

Já mostrado nos resultados.

Caso de 15/01/2015: Iniciou às 06Z. Imagens de Satélite às 06Z e 12Z.**Caso de 31/07/2015: Iniciou às 12Z. Imagens de Satélite às 00Z e 06Z do dia 01/08.****Caso de 22/10/2015: Iniciou às 06Z. Imagens de Satélite às 15Z e 18Z do dia 21.**