

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Ciências Atmosféricas

Maria Laura Guimarães Rodrigues

**EVENTOS DE CHUVA OROGRÁFICA EM
SANTA CATARINA: CLIMATOLOGIA E
SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

São Paulo
2015

Maria Laura Guimarães Rodrigues

EVENTOS DE CHUVA OROGRÁFICA EM SANTA CATARINA: CLIMATOLOGIA E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Dissertação/Tese apresentada ao Departamento Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre/Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia
Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Rita Yuri Ynoue

São Paulo

2015

Para Diego e Ruy.
Pacientes, comprensivos, generosos.

AGRADECIMENTOS

As primeiras energias vieram da Epagri, através da liberação e acompanhamento, com a participação do Edson e Angelo (co-orientador). A equipe da Meteorologia do Ciram foi especial, por todo o carinho antes, durante e depois..... Anderson, Clovis, Elaine, Fabricio, Gil, Laís, Maikon, Mariana, Marilene, Martins, Vera..... eu amo trabalhar com vocês!!

Na USP, a Rita, a sempre paciente orientadora, acreditou, em mim e na “lestada”. Depois reencontrei o Shige e o Ricardo Camargo, sempre especiais, e a Rosmeri.

Foi uma grande alegria, naquele imenso corredor do IAG, fazer amigos como a Bruna e o Rafael, companheiros de sala, assim como a Clara, João Rafael e Luiz Felipe. E ser atendida sempre de forma atenciosa pelos meninos da Informática e pelas meninas das secretarias, e pelo Lélis (sem palavras!).

Depois veio o sanduíche (una bocatta del mejor jamon ibérico): una estancia en la mas dulce isla del Mediterrâneo: Mallorca!! El Grupo de Meteorologia de la Univeridad de les Illes Balears se fue especial. Romu y Climent y Víctor y Jordi.

Para o Ruy e Di, um agradecimento especial: vocês, que assistiram muito filme com pipoca e muito jogo do Palmeiras, tornaram São Paulo uma cidade bem mais agradável!

Agradecimentos ao CNPq, CAPES, pela concessão das bolsas, às agências que gentilmente disponibilizam informações essenciais ao nosso trabalho.

RESUMO

RODRIGUES, M. L. G. **Eventos de Chuva Orográfica em Santa Catarina: Climatologia e Simulações Numéricas**. 2015. 113 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Por sua hidrografia, vegetação, solo e relevo, o litoral de Santa Catarina é uma região vulnerável a eventos de inundação e movimentos de massa. Este trabalho tem como objetivo determinar as características sinóticas e físicas associadas a eventos de chuva extrema na região. Foi determinada a climatologia sinótica em tais eventos e realizadas simulações numéricas, avaliando o papel da orografia e da evaporação do mar. Foram selecionados 18 casos a partir de dados observacionais no litoral central de Santa Catarina, entre 1969-2010, considerando os extremos no q99,5% de chuva acumulada em cinco dias consecutivos. Os campos atmosféricos foram obtidos das reanálises do ERA-Interim. As simulações foram realizadas com o MM5 em dois domínios aninhados: 22,5 km e 7,5 km. A maior parte dos eventos ocorreu no verão (56%), em fevereiro. Em geral a chuva intensa concentra-se em 24 horas. Em todos os casos verificou-se uma alta pressão no Atlântico Sul, favorecendo ventos persistentes de leste/nordeste em baixos níveis, que resulta no transporte de calor e umidade para a costa catarinense. Na maior parte dos casos, predominam sistemas semiestacionários de alta pressão no mar e de ciclone em médios níveis, no Sul do Brasil ou área continental próxima. Experimentos de sensibilidade foram realizados com ausência da evaporação do mar (f_1), da orografia (f_2) e de ambos os fatores (f_0), enquanto o experimento controle (f_{12}) considera a presença da topografia e evaporação do mar. O método de Separação de Fatores foi empregado para avaliar os efeitos dos fatores, da orografia, da evaporação no mar e da interação entre ambos. Para os eventos de chuva no Litoral Sul, é grande o efeito da topografia no aumento da precipitação, assim como o efeito da interação. O efeito da evaporação no mar aparece principalmente quando ocorre chuva no Litoral Norte. Mas, nesses casos, o principal efeito no aumento da precipitação, nas áreas do litoral, é aquele produzido pela interação entre orografia e evaporação no mar. O efeito da interação é ainda de reduzir a precipitação em áreas no mar e no continente, concentrando a chuva na parte litorânea.

Palavras-chaves: Santa Catarina, climatologia sinótica, simulações numéricas.

ABSTRACT

RODRIGUES, M. L. G. **Orographic Rain Events in Santa Catarina: Climatology and Numerical Simulation.** 2015. 113 f. Thesis (Ph.D.) - Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo, 2015.

Because of its hydrography, vegetation, soil and terrain, the coast of Santa Catarina is a region vulnerable to flooding and mass movements events. This study therefore aims to determine the synoptic and physical characteristics associated with heavy rainfall events in the region. To this end, it was determined the synoptic climatology in such events and performed numerical simulations, evaluating the role of terrain and evaporation of the sea. We selected 18 cases from observational data in the central coast of Santa Catarina, between 1969 to 2010, considering the extreme q99.5% of accumulated rain in five consecutive days. The atmospheric fields were obtained from ERA-Interim reanalysis. The simulations were performed with MM5 nested in two areas: 22.5 km and 7.5 km. The majority of events occurred in the summer (56%), in February. Heavy rain concentrated in 24 hours. In all cases there was a high pressure in the South Atlantic, favoring persistent winds from the east / northeast at low levels, resulting in the transport of heat and moisture to the coast of Santa Catarina. In most cases, the predominant high pressure semistationary systems at sea and cyclone in middle levels, in southern Brazil or nearby mainland. Sensitivity Experiments were carried out with no evaporation of the sea (f1), of the terrain (f2) and both (f0), while the control experiment (f12) considers the presence of sea evaporation, and topography. The factor separation method was used to evaluate the effects of the factors, the topography, sea evaporation and the interaction between them. For rain events in the South Coast, the effect of topography on increased rainfall, is large, as well as the effect of interaction. The effect of sea evaporation appears mostly when there is rain in the North Coast. But, in these cases, the main effect on the increase in precipitation, in the coastal areas, is that produced by the interaction between topography and sea evaporation. The effect of the interaction is also to reduce precipitation in areas at sea and in the continent, with concentrated rain in the coastal part.

Keywords: Santa Catarina, climatology synoptic, numerical simulations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Localização da área da grande Florianópolis (GF) (circundada em vermelho) no litoral do Estado de Santa Catarina (SC), pertencente à Região Sul do Brasil (contorno hachurado da altura de relevo).

Figura 3.1 – Média mensal, desvio padrão, mínimos e máximos de precipitação na GF (1969-2010).

Figura 3.2 – Distribuição temporal da precipitação: (a) diária e (b) acumulada de cinco dias consecutivos na GF (1969-2010) (Linhas coloridas para q95%, q99%, q99,5%).

Figura 3.3 – Distribuição temporal sazonal da precipitação acumulada de cinco dias consecutivos na GF (1969-2010): (a) Verão; (b) Outono, (c) Inverno, (d) Primavera.

Figura 3.4 - Distribuição anual de casos extremos (q99,5%) de chuva acumulada em cinco dias consecutivos na GF (1969-2010).

Figura 3.5 - Distribuição mensal de casos extremos (q99,5%) de chuva acumulada em cinco dias consecutivos na GF (1969-2010).

Figura 3.6 – Total de precipitação de 12 horas (mm) na GF, para casos de chuva concentrada em um ou dois dias: (a) fev/1977; (b) /fev1979; (c) fev/1987; (d) fev/1990; (e) fev/1994; (f) dez/1995; (g) fev/2001; (h) jan/2004; (i) jan-fev/2008; (j) dez/2008 (dados na coluna 4 da **Tabela 3.1**, em meses de verão).

Figura 3.7 – Total de precipitação de 12 horas (mm) na GF, para casos de chuva concentrada em um ou dois dias: (a) jul/1973; (b) mar/1981; (c) mar/1985; (d) nov/1991; (e) mai/2010 (dados na coluna 4 da **Tabela 3.1**, em meses de outono-inverno-primavera).

Figura 3.8 – Total de precipitação de 12 horas (mm) na GF, para casos de chuva concentrada em três dias: (a) ago/1977; (b) nov/2008; (c) abr/2009 (dados na coluna 4 da **Tabela 3.1**).

Figura 3.9 – Precipitação horária (mm) na GF em (a) jan/2008; (b) nov/2008; (c) dez/2008; (d) abr/2009; (e) mai/2010.

Figura 4.1. Campo médio da pressão ao nível médio do mar (intervalo de contorno de 4 hPa) e do vento a 10 metros de altura ($m s^{-1}$), nas últimas 24 horas, em: (a) 10/03/1985-12 UTC, (b) 18/05/2010-12 UTC. Altura geopotencial (intervalo de contorno de 30 mgp) e advecção de vorticidade relativa negativa ($X 10^{-9} s^{-1}$,

sombreado em intervalo de 1 e iniciando em -1) em 500 hPa: (c) 09/03/1985-12 UTC, (d) 17/05/2010-12 UTC, (e) 10/03/1985-12 UTC, (f) 18/05/2010-12 UTC (Fonte: ECMWF).

Figura 4.2. Campos em 18/05/2010-12 UTC e 19/05/2010-00 UTC: (a, b) PNMM e vento a 10 metros de altura (m s^{-1}) e (c, d) vento em 850 hPa (m s^{-1}). Velocidade do vento acima de 8 m s^{-1} (hachurado em intervalo de 1 m s^{-1}) (Fonte: ECMWF).

Figura 4.3. Campos em 850 hPa, em 18/05/2010-12 UTC e 19/05/2010-00 UTC: (a, b) temperatura (intervalo de contorno de $2 \text{ }^\circ\text{C}$) e umidade específica (hachurado em intervalo de 2 g kg^{-1} e iniciando em 10 g kg^{-1}); (c, d) advecção de temperatura ($\times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, intervalo de 0,2 e iniciando em 0,2) e omega (hachurado em intervalo de $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ e iniciando em $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$). Positivo em linha sólida e negativo em linha tracejada (Fonte: ECMWF).

Figura 4.4. Campos de temperatura (intervalo de contorno de $2 \text{ }^\circ\text{C}$); omega (hachurado em intervalo de $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ e iniciando em $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$) e vento (m s^{-1}) em 500 hPa, em (a) 18/05/2010-12 UTC e (b) 19/05/2010-00 UTC (Fonte: ECMWF).

Figura 4.5. Campo médio da pressão ao nível médio do mar (intervalo de contorno de 4 hPa) e do vento a 10 metros de altura (m s^{-1}), nas últimas 24 horas, em: (a, b) 27 e 28/03/1981-12 UTC; (c, d) 10 e 11/02/1990-12 UTC; (e, f) 14 e 15/11/1991-12 UTC; (g, h) 04 e 05/02/2001-12 UTC (Fonte: ECMWF).

Figura 4.6. Altura geopotencial (intervalo de contorno de 30 mgp) e advecção de vorticidade relativa negativa ($\times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, hachurado em intervalo de 1 e iniciando em -1) em 500 hPa: (a, b) 27 e 28/03/1981-12 UTC; (c, d) 10 e 11/02/1990-12 UTC; (e, f) 14 e 15/11/1991-12 UTC; (g, h) 04 e 05/02/2001-12 UTC (Fonte: ECMWF).

Figura 4.7. Campos de vento a 10 metros de altura (m s^{-1}) e em 850 hPa (m s^{-1}): (a, b) 03/02/2001-18 UTC; (c, d) 04/02/2001-00 UTC; (e, f) 04/02/2001-06 UTC. Velocidade do vento acima de 8 m s^{-1} (hachurado em intervalo de 1 m s^{-1}) (Fonte: ECMWF).

Figura 4.8. Campos em 850 hPa de temperatura (intervalo de contorno de $2 \text{ }^\circ\text{C}$) e umidade específica (hachurado em intervalo de 2 g kg^{-1} e iniciando em 10 g kg^{-1}) em (a) 03/02/2001-12 UTC e (b) 04/02/2001-12 UTC (Fonte: ECMWF).

Figura 4.9. Campos em 03/02/2001-18 UTC e 04/02/2001-00 UTC, para (a,b) advecção de temperatura ($\times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, intervalo de 0,2 e iniciando em 0,2, positivo em linha sólida e negativo em linha tracejada) e omega em 850 hPa

(hachurado em intervalo de $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ e iniciando em $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$); temperatura (intervalo de contorno de $2 \text{ }^\circ\text{C}$), omega (hachurado em intervalo de $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ e iniciando em $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$) e vento (m s^{-1}) em 500 hPa (Fonte: ECMWF).

Figura 4.10. Campo médio da pressão ao nível médio do mar (intervalo de contorno de 4 hPa) e do vento a 10 metros de altura (m s^{-1}), nas últimas 24 horas: (a, b) 23 e 25/12/1995-12 UTC; (c, d) 30/01 e 01/02/2008-12 UTC; (e, f) 14 e 16/12/2008-12 UTC; (g, h) 21 e 23/04/2009-12 UTC (Fonte: ECMWF).

Figura 4.11. Altura geopotencial (intervalo de contorno de 30 mgp) e advecção de vorticidade relativa negativa ($\times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, hachurado em intervalo de 1 e iniciando em -1) em 500 hPa: (a, b) 23 e 25/12/1995-12 UTC; (c, d) 30/01 e 01/02/2008-12 UTC; (e, f) 15 e 16/12/2008-12 UTC; (g, h) 22 e 23/04/2009-12 UTC (Fonte: ECMWF).

Figura 4.12. Campos em 30 e 31/01/2008-12 UTC: (a, b) vento a 10 metros de altura (m s^{-1}) e (c, d) em 850 hPa (m s^{-1}); (e, f) temperatura (intervalo de contorno de $2 \text{ }^\circ\text{C}$) e umidade específica (hachurado em intervalo de 2 g kg^{-1} e iniciando em 10 g kg^{-1}). Velocidade do vento acima de 8 m s^{-1} (hachurado em intervalo de 1 m s^{-1}) (Fonte: ECMWF).

Figura 4.13. Campos de advecção de temperatura ($\times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, intervalo de 0,2 e iniciando em 0,2) e omega (hachurado em intervalo de $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ e iniciando em $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$), em 31/01/2008: (a) 00 UTC; (b) 06 UTC; (c) 12 UTC e (d) 18 UTC. Positivo em linha sólida e negativo em linha tracejada (Fonte: ECMWF).

Figura 4.14. Campos de temperatura (intervalo de contorno de $2 \text{ }^\circ\text{C}$); omega (hachurado em intervalo de $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$ e iniciando em $0,1 \text{ Pa s}^{-1}$) e vento (m s^{-1}) em 500 hPa, em 31/01/2008: (a) 00 UTC e (b) 12 UTC (Fonte: ECMWF).

Figura 4.15. Campo médio da pressão ao nível médio do mar (intervalo de contorno de 4 hPa) e do vento a 10 metros de altura (m s^{-1}), nas últimas 24 horas: (a, b) 22 e 24/02/1979-12 UTC; (c, d) 11 e 16/02/1987-12 UTC; (e, f) 18 e 22/02/1994-12 UTC; (g, h) 26 e 28/01/2004-12 UTC; (i, j) 19 e 23/11/2008-12 UTC (Fonte: ECMWF).

Figura 4.16. Altura geopotencial (intervalo de contorno de 30 mgp) e advecção de vorticidade relativa negativa ($\times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, hachurado em intervalo de 1 e iniciando em -1) em 500 hPa: (a, b) 22 e 24/02/1979-12 UTC; (c, d) 12 e 16/02/1987-12 UTC; (e, f) 20 e 22/02/1994-12 UTC; (g, h) 26 e 28/01/2004-12 UTC; (i, j) 21 e 23/11/2008-12 UTC (Fonte: ECMWF).

Figura 4.17. Campos em 23 e 24/02/1979-00 UTC: (a, b) vento a 10 metros de altura (m s^{-1}) e (c, d) em 850 hPa (m s^{-1}); (e, f) temperatura (intervalo de contorno de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$) e umidade específica (hachurado em intervalo de 2 g kg^{-1} e iniciando em 10 g kg^{-1}). Velocidade do vento acima de 8 m s^{-1} (hachurado em intervalo de 1 m s^{-1}) (Fonte: ECMWF).

Figura 4.18. Campos de advecção de temperatura ($\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, intervalo de 0,2 e iniciando em 0,2) e omega (hachurado em intervalo de $0,1\text{ Pa s}^{-1}$ e iniciando em $0,1\text{ Pa s}^{-1}$), em 31/01/2008: (a) 00 UTC; (b) 06 UTC; (c) 12 UTC e (d) 18 UTC. Positivo em linha sólida e negativo em linha tracejada (Fonte: ECMWF).

Figura 4.19. Campos de temperatura (intervalo de contorno de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$); omega (hachurado em intervalo de $0,1\text{ Pa s}^{-1}$ e iniciando em $0,1\text{ Pa s}^{-1}$) e vento (m s^{-1}) em 500 hPa, em (a) 23/02/1979-12 UTC e (b) 24/02/1979-00 UTC (Fonte: ECMWF).

Figura 5.1 – Campos de vento em 925 hPa (23/12/1995 - 18 UTC) e de precipitação (acumulada entre 22/12 - 18 UTC e 25/12/1995 - 00 UTC) obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

Figura 5.2 – Campos de vento em 925 hPa (23/04/2009 - 00 UTC) e precipitação (acumulada entre 21/04 - 00 UTC e 23/04/2009 - 12 UTC) obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

Figura 5.3 – Campos de vento em 925 hPa (31/01/2008 - 06UTC) e de precipitação (acumulada entre 30/02 - 00 UTC e 01/02/2008 - 12 UTC), obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

Figura 5.4 – Campos de vento em 925 hPa (22/11/2008 - 00 UTC) e de precipitação (acumulada entre 19/11 - 12 UTC e 23/11/2008 - 12 UTC) obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

Figura 5.5 – Campos de vento em 925 hPa (27/01/2004 - 18 UTC) e de precipitação

(acumulada entre 26/01 - 12 UTC e 28/01/2004 - 12 UTC) obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

Figura 5.6 – Campos de vento em 925 hPa (04/02/2001 - 00 UTC) e de precipitação (acumulada entre 03/02 - 00 UTC e 05/02/2001 - 00 UTC) obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

Figura 5.7 – Campos de vento em 925 hPa (18/05/2010 - 18 UTC) e de precipitação (acumulada entre 17/05 - 12 UTC e 19/05/2010 - 12 UTC) obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

Figura 5.9 – Contribuição do (a) efeito da topografia (F1), (b) evaporação do mar (F2) e (c) interação entre ambos (F12), nos campos de precipitação do evento dez/1995.

Figura 5.10 – Contribuição do (a) efeito da topografia (F1), (b) evaporação do mar (F2) e (c) interação entre ambos (F12), nos campos de precipitação do evento abr/2009.

Figura 5.11 – Contribuição do (a) efeito da topografia (F1), (b) evaporação do mar (F2) e (c) interação entre ambos (F12), nos campos de precipitação do evento jan/2008.

Figura 5.12 – Contribuição do (a) efeito da topografia (F1), (b) evaporação do mar (F2) e (c) interação entre ambos (F12), nos campos de precipitação do evento nov/2008.

Figura 5.13 – Contribuição do (a) efeito da topografia (F1), (b) evaporação do mar (F2) e (c) interação entre ambos (F12) nos campos de precipitação do evento jan/2004.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Experimentos numéricos realizados (2 fatores).

Tabela 3.1 – Chuva de 12 horas, 24 horas e cinco dias consecutivos, para eventos de chuva extrema (q99,5%) na GF (1969-2010).

Tabela 5.1 – Simulações de casos de chuva extrema na GF com o MM5

LISTA DE SIGLAS

MM5	Mesoscale Model Version 5
SC	Santa Catarina
LN	Litoral Norte
LS	Litoral Sul
SP	São Paulo
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
GF	Grande Florianópolis
G1	Grupo 1
G2	Grupo 2
G3	Grupo 3
G4	Grupo 4
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
SF	Separação de Fatores

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SIGLAS	xi
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 - MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	1
1.2 - LITORAL DE SANTA CATARINA: REGIÃO DE ESTUDO.....	2
1.3 - OS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS E A PRECIPITAÇÃO NO LITORAL DE SANTA CATARINA	4
1.4 - CHUVA OROGRÁFICA NO LITORAL DO BRASIL	6
CAPÍTULO II – MATERIAL E MÉTODOS	11
2.1 - DADOS OBSERVACIONAIS, REANÁLISES E ANÁLISES DO ECMWF	11
2.2 – PRECIPITAÇÃO EXTREMA: SELEÇÃO DOS CASOS	11
2.3 - CAMPOS SINÓTICO-DINÂMICOS: AGRUPAMENTO DOS CASOS.....	13
2.4 – EXPERIMENTOS DE SENSIBILIDADE	14
2.5 – MÉTODO DA SEPARAÇÃO DOS FATORES (SF).....	16
CAPÍTULO III – EVENTOS DE CHUVA EXTREMA	17
3.1 – OS CASOS SELECIONADOS	17
3.2 – DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO.....	25
3.3 – CONCLUSÕES PARCIAIS.....	34
CAPÍTULO IV – AMBIENTE SINÓTICO DA CHUVA EXTREMA	36
4.1. – GRUPO G1	36
4.1.1 – O caso de maio/2010	39
4.2 – GRUPO G2	43
4.2.1 – O caso de fevereiro/2001	47
4.3 – GRUPO G3	51
4.3.1 – O caso de janeiro/2008	56
4.4 – GRUPO G4	60

4.4.1 – O caso de fevereiro/1979.....	66
4.5 – SIMILAREDADES E DIFERENÇAS ENTRE OS CASOS	71
CAPÍTULO V– SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	76
5.1 – EXPERIMENTOS DE SENSIBILIDADE	76
5.1.1 – Dezembro de 1995.....	77
5.1.2 – Abril de 2009.....	80
5.1.3 – Janeiro e Novembro de 2008	82
5.1.4 – Janeiro de 2004.....	86
5.1.5 – Fevereiro de 2001 e Maio de 2010.....	88
5.2 – MÉTODO DE SEPARAÇÃO DE FATORES.....	92
5.3 – CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	102
CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO E SUGESTÕES	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
ANEXOS	110
ANEXO A - Distribuição espacial da precipitação diária na GF: a) 04/fev/2001; b) 28/jan/2004; c) 01/fev/2008; d) 23/nov/2008; e) 16/dez/2008; f) 23/abr/2009; g) 19/mai 2010.	111
ANEXO B - Campos de precipitação acumulada para as simulações numéricas: a) entre 13/11 - 18 UTC e 15/11/1991 - 18 UTC; b) entre 21/02 - 00 UTC e 23/02/1994 - 00 UTC; c) entre 03/02 - 00 UTC e 05/02/2001 - 00 UTC.	112

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1 – MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Localizado em latitudes médias, o litoral de Santa Catarina é uma região de deslocamento de frentes frias e ciclones, em superfície e em níveis superiores da atmosfera, onde ocorrem eventos de chuva extrema que resultam em enchentes e deslizamentos de encosta (Haas 2002; Lima et al. 2009; Silva Dias et al. 2009). Além disto, as características de relevo acidentado, hidrografia e vegetação, contribuem para tornar a região altamente vulnerável.

Analisando as principais ocorrências de desastres naturais em um período de 25 anos (1980-2004), para as seis mesorregiões que compõem o estado de Santa Catarina, Herrmann et al. (2006) encontraram que os escorregamentos associados a episódios de inundação decorrente de chuvas intensas ocorreram principalmente em áreas serranas das mesorregiões situadas na borda oriental do estado, como Vale do Itajaí e grande Florianópolis. E, nestas regiões, os municípios de maior frequência para esse tipo de fenômeno são Florianópolis e Blumenau.

Neste mesmo estudo, a análise das informações para a mesorregião da grande Florianópolis identificou um total de 204 registros de inundações, o que corresponde ao maior número (70,8%) dos 288 desastres naturais computados no período, sendo 132 (45,8%) episódios de inundações graduais e 72 (25%) de inundações bruscas. Nesta mesorregião, o município de Florianópolis foi o que apresentou o maior número de inundações, num total de 21 registros, destacando-se também com nove episódios de escorregamento.

Uma das regiões mais afetadas por eventos de enchentes no estado de Santa Catarina abrange a bacia hidrográfica do rio Itajaí, com área aproximada de 15.000 km². Destes, cerca de 80% estão inseridos na região da Mata Atlântica, caracterizada principalmente pelo relevo fortemente acidentado. Na cidade de Blumenau as enchentes marcaram a história da cidade. A ocorrência de enchentes oriundas do rio Itajaí-Açu causa transtornos desde o início da colonização.

Lima et al. (2009) compararam três eventos de precipitação intensa, que resultaram em inundações e enchentes de proporções devastadoras, além de

deslizamentos de encosta, na Planície Costeira Catarinense: em março de 1974, no Litoral Sul; em dezembro de 1995, no Litoral Sul e Grande Florianópolis; em novembro de 2008, na Grande Florianópolis, Litoral Norte e Vale do Itajaí. Neste último episódio, os deslizamentos em áreas de encosta atingiram uma ampla área, com registro de mais de 100 óbitos. Em 1974, ocorreu o transbordamento do rio Tubarão e foram aproximadamente 200 óbitos, com 85% da população local desabrigada.

Assim, este trabalho tem como objetivo principal determinar as características sinóticas e físicas associadas a eventos de chuva extrema no litoral de Santa Catarina (SC). Para tal, foi determinada a climatologia sinótica em tais eventos e realizadas simulações numéricas, avaliando o papel da orografia e da evaporação do mar. A região da grande Florianópolis (GF) foi definida como a principal área de estudo no litoral.

Trabalhos diversos de *flash flood*, realizados para regiões montanhosas dos EUA (Maddox et al. 1978; Maddox et al. 1979; Pontrelli et al. 1999) e Europa (Doswell et al. 1998; Ramis et al. 1998; Bousquet e Smull 2003), consideraram a importância de um estudo detalhado dos campos sinótico-dinâmicos e de dados observacionais para subsidiar a investigação com o uso das técnicas de modelagem.

1.2 – LITORAL DE SANTA CATARINA: REGIÃO DE ESTUDO

O Estado de Santa Catarina (Figura 1.1) está localizado na Região Sul do Brasil, na porção sudeste da América do Sul, fazendo fronteira com os Estados do Rio Grande do Sul (ao sul) e Paraná (ao norte). A região da grande Florianópolis (GF) está localizada no litoral central de SC, próximo das elevações da Serra do Mar com altitudes em torno de 600-800 m. A parte do litoral que se estende da GF em direção a latitudes mais baixas, foi considerada como litoral norte (LN). Em direção oposta, como litoral sul (LS).

Com relevo plano e altitudes inferiores a 200 m, a Planície Costeira Catarinense, banhada pelo Oceano Atlântico e próxima das encostas da Serra, acompanha a faixa litorânea do Estado em uma extensão de 561,4 km entre as

latitudes aproximadas de 26-29°S. A cadeia de montanhas da Serra do Mar, inserida na região da Mata Atlântica, tem início no Estado do Rio de Janeiro e prolonga-se em São Paulo e Paraná, estendendo-se até a região norte de Santa Catarina, onde apresenta altitudes entre 600 m e 800 m e picos máximos de 1.000 m, com relevo fortemente acidentado. Na extensa área do Vale do Itajaí, de aproximadamente 15.000 km², está a bacia hidrográfica do rio Itajaí, uma das mais afetadas por eventos de enchente no estado de Santa Catarina. No sul catarinense estão as encostas da Serra Geral, formada por montanhas e vales profundos com altitude média de 1000 m e picos máximos de 1800 m. Nesta parte do estado, as diferenças de altitude chegam a mais de 1.000 metros a uma distância máxima de 50 km entre si, com o platô da Serra Geral formando um paredão ou abismo junto ao litoral.

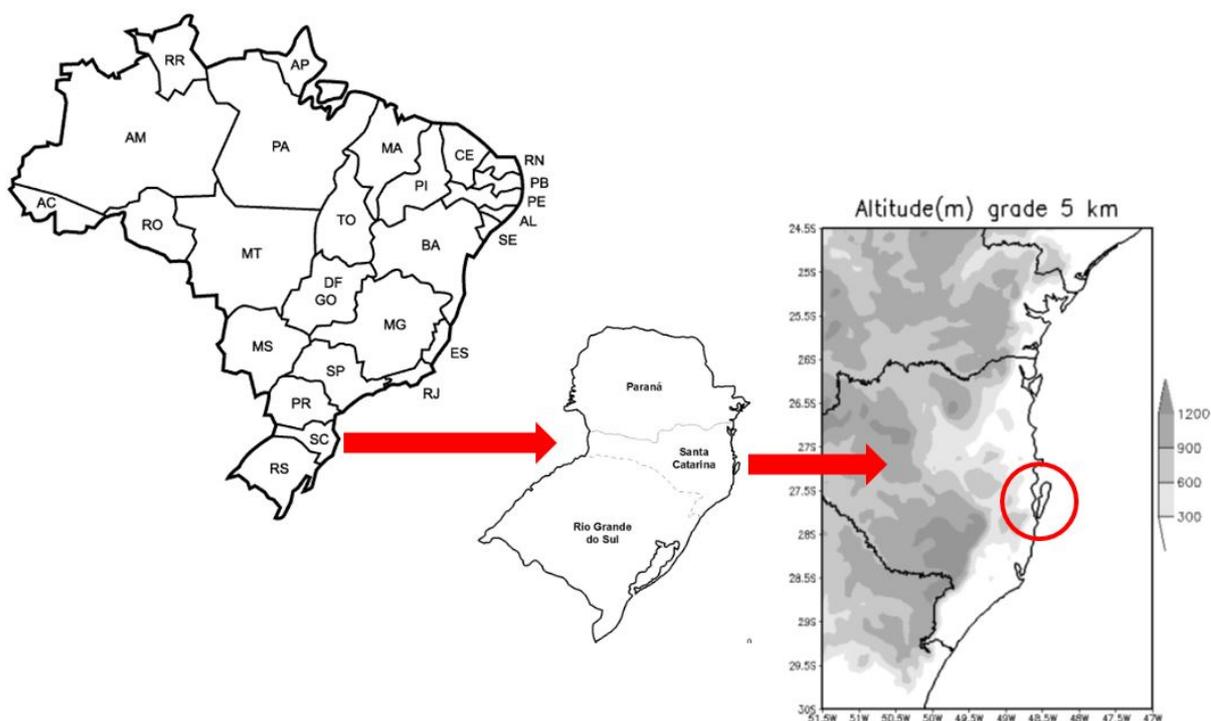


Figura 1.1 Localização da área da grande Florianópolis (GF) (circundada em vermelho) no litoral do Estado de Santa Catarina (SC), pertencente à Região Sul do Brasil (contorno hachurado da altura de relevo)

1.3 SISTEMAS ATMOSFÉRICOS E PRECIPITAÇÃO NO LITORAL DE SANTA CATARINA

A região Sul do Brasil apresenta um regime de precipitação característico de latitudes médias, com as chuvas bem distribuídas ao longo do ano e as quatro estações bem definidas. As mudanças bruscas e significativas nas condições de tempo em geral estão associadas aos sistemas frontais provenientes do Pacífico ou que se formam na própria região por processos de frontogênese e ciclogênese. Os sistemas ciclônicos entre médios e altos níveis também estão entre os principais sistemas atmosféricos que contribuem para a precipitação nos Estados do Sul do Brasil.

No verão, o anticiclone do Atlântico Sul está mais pronunciado em direção ao Sul do Brasil e seu centro, mais afastado da costa brasileira. Nos meses de inverno, o centro da alta subtropical do Atlântico Sul aproxima-se do continente sul-americano e os ventos médios tornam-se mais meridionais (de norte) no litoral catarinense (Satyamurty et al, 1998).

Na circulação de mesoescala, a influência da brisa, tanto de mar como de montanha, é verificada nas áreas do litoral catarinense. No litoral norte do Estado (Prudêncio, 2002) e área da grande Florianópolis (Franco et al., 2006), estes autores identificaram um sinal de brisa marítima e terrestre com grande influência na circulação local, bem definido especialmente nos meses mais quentes do ano, de novembro a fevereiro. A entrada da brisa marítima foi verificada entre 11HL e 12HL, estendendo-se até o início da noite (19HL) com um predomínio do fluxo em superfície entre sudeste e leste. A brisa terrestre tem início entre 22HL e 23HL, com direção média em superfície entre noroeste e oeste. Prudêncio (2002) também ressalta a influência da circulação de vale-montanha no sistema de circulação em áreas do litoral norte de Santa Catarina, observando uma maior frequência de vento de oeste em grande parte dos meses durante o ano, predominante no período entre a noite e madrugada.

Em estudos realizados sobre a climatologia da precipitação em Santa Catarina, a estação de verão aparece como a mais chuvosa nas áreas litorâneas e do Vale do Itajaí (Nimer 1979; Grimm et al. 1998).

Em estudo da distribuição espacial da precipitação, Prudêncio et al. (1999) determinaram as médias mensais na Planície Costeira Catarinense, utilizando dados de 32 estações pluviométricas no período entre 1961-1995, e encontraram o verão como o período mais chuvoso, seguido da primavera. As médias são sempre mais elevadas no Litoral Norte, ficando em torno de 250 mm no verão, diminuindo no Litoral Sul, para aproximadamente 150 mm nesta época do ano. Os autores mencionam os meses de janeiro e fevereiro como os de maior média mensal de precipitação no litoral de SC, quando a diferença dos valores entre algumas localidade pode variar de 100 mm no Litoral centro-sul a aproximadamente 150 mm no Litoral centro-norte. O terceiro mês mais chuvoso alterna-se entre dezembro ou março. Os autores ainda destacam que, no Litoral Sul do Estado, os municípios localizados próximos à região montanhosa, na Serra Geral, apresentam totais mensais mais elevados em relação aos totais observados em estações também localizadas no Litoral Sul, porém mais próximas das áreas litorâneas.

Severo (1996) e Teixeira (2010) destacam a importância da forçante sinótica, em eventos de chuva intensa no Sul do Brasil, e da presença de um escoamento em 850hPa, como fonte alimentadora da convecção na região, favorecendo um fluxo úmido e quente no sentido noroeste-sudeste. Teixeira e Satyamurty (2007) verificaram que a ocorrência de episódios de chuva intensa, na área costeira de Santa Catarina e Vale do Itajaí, é verificada em meses de verão, enquanto nas demais áreas do Estado, tais eventos podem ser esperados nas outras três estações do ano, outono, inverno e primavera. Os autores, também para episódios de chuva intensa, verificaram um deslocamento da região de convergência do fluxo de umidade da área continental para a costa Sul do Brasil, em meses de verão. A Região Sul é homogênea em termos de episódios de chuva intensa, mas a área costeira de Santa Catarina foi identificada como a única diferenciada no verão (Teixeira e Satyamurty, 2007).

Agrupando casos de chuva intensa, conforme suas características sinóticas e dinâmicas, Severo (1996) identificou, na região do Vale do Itajaí, em Santa Catarina, um padrão em que predomina um escoamento de nordeste em baixos níveis, associado à circulação de um anticiclone no Atlântico Sul.

Apesar das frequentes passagens frontais que ocorrem na costa de SC (Satyamurty et al. 1998), em intervalo médio de 8 dias (Rodrigues et al. 2004), e do

predomínio de ciclones extratropicais no Sul do Brasil, especialmente em meses de outono-inverno (Gan e Rao 1991), estes não são necessariamente os principais sistemas meteorológicos associados a chuvas intensas naquela região. Rodrigues et al. (2011) analisaram o ambiente sinótico em casos de chuva acumulada extrema na grande Florianópolis (GF), localizada no litoral central de SC, próximo das elevações da Serra do Mar com altitudes em torno de 600-800 m (Figura 1). Os autores verificaram o predomínio de um intenso e persistente vento de leste, aproximadamente perpendicular à costa, associado a um anticiclone no Atlântico Sul, em lento deslocamento pós-frontal, ou permanecendo próximo da costa em período prolongado, de mais de três dias. Nestes eventos, mais frequentes em meses de verão, com destaque para fevereiro, os elevados totais diários de precipitação, superiores a 100 mm, em geral ocorreram em um ou dois dias, com a presença de perturbações de onda curta em níveis superiores da atmosfera, como cavados ou ciclones fechados.

1.4 - CHUVA OROGRÁFICA NO LITORAL DO BRASIL

Alguns estudos foram realizados sobre eventos de precipitação orográfica no Litoral das Regiões Sul e Sudeste do Brasil, os quais favoreceram a ocorrência de inundações, enchentes e deslizamentos de encosta (Blanco, 1999; Haas, 2002; Seluchi e Chou, 2009; Lima et al., 2009; Silva Dias et al., 2009; Pissi, 2010). Os autores mencionam a presença de um fluxo em baixos níveis, com direção perpendicular à costa, em associação a um sistema de alta pressão no Atlântico Sul, favorecendo o deslocamento de ar rico em umidade para o continente. O ar úmido transportado penetra nas regiões de vale, elevando-se ao ser interceptado nas barreiras impostas pela serra, o que por sua vez favorece o processo de condensação.

Lima et al. (2009) compararam três eventos de precipitação intensa no litoral de SC, acompanhados de sistemas de baixa pressão com centro frio (*cutoff low*). No evento de novembro de 2008, os ventos de leste estiveram associados à presença de um anticiclone de bloqueio no Atlântico Sul (Silva Dias, 2009). Nos casos de dezembro de 1995, estudado por Haas (2002), e de março de 1974,

quando as chuvas atingiram o Litoral Sul catarinense, a área de vento leste aparece entre o sistema de alta pressão no mar e um sistema de baixa pressão no Sul do Brasil (Lima et al., 2009). Haas (2002) identificou, através de simulação numérica, uma esteira transportadora úmida a leste de um VCAN, com uma banda de nebulosidade mais espessa e permanente, associada ao escoamento de baixos níveis indo de encontro à Serra Geral e efetuando o deslocamento de ar rico em umidade do Oceano.

Para estes três eventos, Lima et al. (2009) encontraram características semelhantes. O período prolongado de chuva, em torno de sete dias consecutivos, ocorreu em associação à permanência de um intenso fluxo de leste em baixos níveis. A interação desta circulação com o ciclone em médios níveis favoreceu a intensificação da precipitação orográfica em torno de dois a três dias, quando os totais diários superaram os 100 mm. O registro de inundações de caráter repentino também foi observado nestes eventos, o que é esperado quando ocorre precipitação intensa associada à orografia, segundo Smith (1979).

Estas mesmas características foram observadas por Pissi (2010), que estudou um número maior de casos de chuva orográfica intensa no Litoral Norte de Santa Catarina e Vale do Itajaí, selecionando 18 episódios não consecutivos, no período de 1998 a 2009 (12 anos), com totais diários de precipitação acima de 50 mm e acompanhados de vento predominante entre nordeste e sudeste. Metade dos eventos ocorreu na primavera e, os demais, no verão e outono, sendo em todos observada a presença de um sistema de alta pressão no Atlântico Sul, com diferenças entre si em relação à intensidade ou posição do centro. Em geral, a chuva foi persistente por mais de um dia e com registro de inundações de caráter repentino. Em metade dos eventos, ocorreu a interação da circulação em baixos níveis com um VCAN, resultando em totais diários de precipitação acima de 100 mm.

No estudo de eventos de chuva orográfica na Serra do Mar em São Paulo, que resultaram em deslizamentos de encosta, Blanco (1999) e Seluchi e Chou (2009) identificaram a presença de um sistema de alta pressão no Atlântico Sul, associado a uma condição de pós-frontal e de episódios da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), favorecendo o transporte de umidade em

baixos níveis. Blanco (1999) menciona um fluxo de sudeste, neste caso perpendicular à costa da sua região de estudo, a Baixada Santista.

O padrão de ZCAS e de frentes frias, identificado para os eventos selecionados por Seluchi e Chou (2009) entre novembro e abril de 1995 a 2005 (11 anos), difere do padrão da climatologia destes sistemas. No caso de ZCAS, foi observada uma configuração de alta de bloqueio no Atlântico Sul. Na região das chuvas, maior umidade específica e forte circulação ciclônica em baixos níveis, enquanto em altos níveis a divergência de massa é mais intensa e, 24 horas antes dos deslizamentos, um cavado de onda curta interage com a ZCAS, intensificando-se.

Como verificado para Santa Catarina (Lima et al., 2009), os episódios de chuva na Serra do Mar em São Paulo (Blanco, 1999; Seluchi e Chou, 2009) ocorreram com maior frequência na primavera e verão, com acumulação muito grande, longa duração e caráter estratiforme da precipitação, o que favorece a infiltração no solo. Selecionando casos entre 1991-1995 (5 anos), em que os totais de precipitação de estações localizadas próximas da serra foram maiores em relação aos totais obtidos para o litoral, Blanco (1999) encontrou uma taxa média de precipitação de caráter estratiforme e acumulado máximo entre 10 mm e 50 mm em 12 horas, valores em geral associados a episódios de maior risco de acidentes em encostas. Com o padrão de bloqueio observado em eventos de chuva orográfica do Sul e Sudeste do Brasil, a banda de precipitação concentra-se na área Leste destas regiões, enquanto no interior predomina um padrão seco, com características de estiagem em alguns casos (Blanco, 1999; Lima et al., 2009; Silva Dias, 2009).

Em eventos de intensificação orográfica da precipitação, observa-se uma estrutura vertical de nuvens quentes, de fraco desenvolvimento vertical, com formação de nuvens baixas e médias, do tipo stratus e cumulus (Blanco, 1999; Haas, 2002; Silva Dias, 2009). Para Seluchi e Chou (2009), cujo estudo identificou 80% dos casos de chuva orográfica sendo associados a sistemas de grande escala ou sinótica, a umidade que chega à área de montanha, proveniente do escoamento em baixos níveis, favorece a instabilidade termodinâmica, enquanto o sistema sinótico aumenta a ascendência do ar.

Conforme Ray (1986), nos Estados Unidos da América, os processos que causam eventos de chuva orográfica são observados nas áreas de planície a leste

das Montanhas Rochosas, onde a circulação de leste dirigida à montanha é proveniente de dois sistemas: o ciclone extratropical bem desenvolvido e o raso anticiclone ártico. Diferentemente do observado nas áreas do litoral Sul e Sudeste do Brasil, próximas às regiões serranas, o período de setembro a abril (outono-inverno no H.N.) é o mais favorável para os eventos na região das Montanhas Rochosas, especialmente entre dezembro e março. Neste caso, as tempestades de inverno provenientes do ciclone extratropical podem produzir episódios de neve extrema. Mas são poucos os eventos em que a circulação proveniente do anticiclone ártico favorece chuva moderada ou forte. Algumas vezes, esta circulação ocasiona somente a formação de nuvens do tipo stratus e, em 55% dos casos, resulta em chuva fraca.

Ray (1986) destaca a dificuldade da previsão de mesoescala em eventos desta natureza, que envolvem a interação de diferentes processos e escalas, como fontes de umidade oceânicas ou regionais, características do fluxo de leste que chega à montanha e da topografia local, suporte dinâmico e termodinâmico para os diversos processos de microfísica de formação de chuva. Em latitudes médias, os ingredientes para elevadas taxas de precipitação são encontrados na escala sinótica, que propicia o ambiente favorável ao desenvolvimento e manutenção da instabilidade, e na mesoescala, que fornece as condições para o rápido levantamento de ar úmido (Maddox et al. 1979; Doswell et al. 1996).

Como fator comum presente em eventos de chuva orográfica intensa em diferentes regiões montanhosas dos EUA (Maddox et al. 1978; Pontrelli et al. 1999), Europa (Doswell et al. 1998) e Ásia, Lin et al. (2001) mencionam um fluxo de vento em baixos níveis com velocidade normal à montanha superior a 10 m s^{-1} (jato em baixos níveis, JBN). Conforme os autores, este fluxo de ar efetua o transporte de elevada umidade para a área afetada e, na presença da montanha, é forçado a ascender até seu nível de convecção livre, aumentando a instabilidade condicional.

Em estudo para a região de Valencia, leste da Espanha, com o uso de simulação numérica, Romero et al. (2000) verificaram a importância do aspecto sinótico e de mesoescala na permanência e eficiência de um caso de chuva orográfica intensa e prolongada, que provocou inundação com registro de mais de 800 mm em 24 horas. O padrão sinótico de longa duração, associado a uma alta de

bloqueio, favoreceu um escoamento em baixos níveis com persistentes ventos de leste e nordeste forçando a ascendência do ar na montanha.

A chuva orográfica está sempre acompanhada de instabilidade atmosférica de grande escala, sendo intensificada pela associação com a circulação local. A intensidade da chuva está relacionada com a instabilidade do sistema gerador das chuvas, altura/inclinação das montanhas e intensidade da circulação local. O efeito de bloqueio das montanhas e da elevação da parcela de ar é maior (chuva de maior intensidade) para maiores velocidades do vento local, pequenas colinas e sistemas de menor intensidade (Smith,1979).

CAPÍTULO II – MATERIAL E MÉTODOS

2.1 – DADOS OBSERVACIONAIS, REANÁLISES E ANÁLISES DO ECMWF.

Foram utilizados dados de precipitação de 00 UTC, 12 UTC e 18 UTC da estação meteorológica convencional da GF (synop 83899), no período de 01/01/1969 a 31/12/2010. A estação pertence à rede do INMet (Instituto Nacional de Meteorologia) e está localizada a uma altitude de 1,84 m do nível do mar, no litoral central de SC (27°S 36' e 48°W 37'), na parte continental próxima da Ilha de Santa Catarina (**Figura 1.1**). Esta série histórica de precipitação apresentou um total de 75 dados faltantes, o que corresponde a 0,5% do período analisado. Para os casos selecionados de chuva extrema na GF, foram também utilizados dados de precipitação diária e horária de estações automáticas e convencionais localizadas em Santa Catarina, pertencentes às redes de observação da ANA (Agência Nacional de Águas), EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Santa Catarina) e INMet.

Para o diagnóstico dos casos extremos na escala sinótica, foram utilizados os campos atmosféricos das reanálises do ERA-Interim, obtidas do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Data Server* (www.ecmwf.int), grade horizontal 1.5° x 1.5°, horários de 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC e 18 UTC. Para determinar as condições de inicialização e fronteira nas simulações, foram utilizados os campos atmosféricos das análises do ECMWF, nos horários de 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC e 18 UTC.

2.2 – PRECIPITAÇÃO EXTREMA: SELEÇÃO DOS CASOS

Os eventos extremos de chuva foram determinados a partir dos dados diários de precipitação da estação meteorológica convencional do INMet na GF. A chuva, acumulada em 24 horas, representa o total entre 12 UTC do dia anterior e 12 UTC do dia considerado. Além de apresentar uma série histórica de longo período, a região da GF pode ser considerada como representativa para estudo de precipitação

no litoral de SC. Localizada na porção litorânea central, é atingida por episódios de chuva extrema que afetam tanto o LS como LN de SC, conforme estudos de Haas (2002), Silva Dias et al. (2009) e Lima et al. (2009).

A partir da série diária de dados foram determinados totais acumulados em 5 dias consecutivos, resultando em uma nova série de precipitação, cujo valor representa o acumulado dos 5 dias anteriores. Para os totais diários, foram considerados os valores de precipitação acima de 0,1 mm e, para os acumulados de 5 dias, os valores de precipitação acima de 1mm (Frich et al. 2002). Em ambos os conjuntos de dados, diário e acumulado, foi determinada a distribuição temporal das séries anuais e sazonais: verão (dezembro-janeiro-fevereiro), outono (março-abril-maio), inverno (junho-julho-agosto), primavera (setembro-outubro-novembro). Devido ao elevado número de totais diários faltantes entre 22/11/1985 e 13/03/1986, não há totais de chuva acumulada de 5 dias neste período, que inclui o verão de 1985/1986.

Os eventos extremos foram selecionados na série anual de dados de chuva acumulada em 5 dias consecutivos na GF, com o uso da técnica dos quantis, para um limiar de 99,5%. Esta técnica foi utilizada por Teixeira e Satyamurty (2007) para determinar eventos de precipitação extrema no Sul do Brasil e é descrita em Xavier et al. (2002). A técnica dos quantis foi aplicada à série anual de dados, uma vez que eventos extremos ocorrem em todas as épocas do ano no litoral de SC, conforme a distribuição temporal sazonal apresentada nos resultados do Cap. III. Analisando dados de chuva na Região Sul do Brasil, Teixeira (2010) verificou que a variação mensal do quantil climatológico de 99% não difere muito ao longo do ano, apresentando valores diários entre 30 mm e 45 mm.

Segundo Frich et al. (2002), elevados acumulados de precipitação obtidos em 5 dias consecutivos podem ser considerados na identificação de chuva intensa em curto período, indicando um potencial para enchente. Em eventos de chuva intensa com características de influência orográfica, que resultaram em enchente ou alagamento no litoral de SC (Haas 2002; Silva Dias et al. 2009; Lima et al. 2009), os elevados totais de precipitação foram acumulados em um período em torno de 1 a 3 dias consecutivos (Rodrigues et al. 2011).

Na seleção dos casos de chuva, para descartar os dias que fazem parte de um mesmo evento, dentro de uma sequência consecutiva de totais de precipitação igual ou acima do limiar definido ($q_{99,5\%}$), considerou-se o primeiro dia.

A distribuição temporal da precipitação foi determinada para cada um dos eventos selecionados, com o uso de dados horários da estação automática da GF, pertencente à rede INMet e localizada na mesma latitude/longitude da estação convencional utilizada neste trabalho. Como estes dados horários estão disponíveis a partir de 2005, foram também determinados os totais de precipitação a cada 12 horas (00 UTC e 12 UTC), registrados na estação convencional da GF. A partir deste acumulado, foram considerados os dois maiores totais consecutivos em 12 horas para determinar novos totais de chuva em 24 horas, (de 12 UTC do dia anterior às 12 UTC do dia ou de 00 UTC do dia anterior às 00 UTC do dia).

2.3 – CAMPOS SINÓTICO-DINÂMICOS: AGRUPAMENTO DOS CASOS

Para caracterizar o ambiente sinótico-dinâmico em cada evento de chuva selecionado no quantil q99,5%, foram determinados os seguintes campos atmosféricos, desde pelo menos cinco dias antes até um dia depois do(s) dia(s) de registro de chuva extrema no litoral de SC:

- pressão ao nível médio do mar (PNMM) e componente zonal e meridional do vento a 10 metros;
- temperatura, umidade específica e componente zonal e meridional do vento em 850 hPa;
- altura geopotencial, temperatura e advecção de vorticidade relativa em 500 hPa.

Conforme características similares observadas nos campos de PNMM, foi determinado o agrupamento dos casos, por análise subjetiva. Romero et al. (1999) utilizaram campos de geopotencial em 925hPa e 500hPa para definir padrões sinóticos associados a eventos de chuva intensa na área litorânea da Espanha banhada pelo Mar Mediterrâneo. Teixeira (2010) também utilizou campos de PNMM para definir padrões de chuva intensa nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil, encontrando uma forte associação destes com padrões de geopotencial em 500 hPa.

Os campos atmosféricos mencionados a seguir, foram também

analisados para todos os casos, a cada 6 horas, desde 24 horas antes do horário de início da chuva extrema, até 12 horas depois do seu término.

- O movimento vertical foi analisado através de ω (*omega*) em 850 hPa e 500 hPa, obtido diretamente das reanálises, cuja formulação pode ser encontrada em Holton (2004).

- A convergência de umidade específica em 850 hPa e 700 hPa, e a advecção de temperatura em 850 hPa, foram determinadas a partir dos campos de umidade específica, temperatura e componentes zonal e meridional do vento das reanálises.

Estes campos das forçantes dinâmicas da teoria quase-geostrófica (Holton 2004) foram utilizados em estudos de chuva intensificada pela orografia (Doswell et al. 1998; Ramis et al. 1998) como bons indicativos, em latitudes médias, para determinar áreas de grande escala favoráveis aos processos de desenvolvimento da precipitação. Teixeira e Satyamurty (2007) analisaram tais parâmetros, com bons resultados, em estudo que identifica o padrão sinótico-dinâmico de chuva intensa no Sul do Brasil.

A convergência de umidade em baixos níveis é considerada importante na identificação de áreas subsinóticas de rápida ascensão de ar úmido e, portanto, favoráveis à chuva intensa (Doswell et al. 1996; Doswell et al. 1998).

2.4 – EXPERIMENTOS DE SENSIBILIDADE

Para as simulações numéricas, foi utilizado o MM5, modelo atmosférico de mesoescala de quinta geração, da Pennsylvania State University – National Center (*Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model*) (Grell et al., 1994). As simulações controle foram realizadas para os dez eventos de anos mais recentes (a partir de 1991), entre os casos de chuva intensa selecionados (ítem 2.2).

Nas configurações de grade foram definidos dois domínios aninhados, ambos com 82 pontos na latitude e longitude, centrados na região de estudo (GF), em 27°S/48°W. A resolução do domínio 1 (D1) é de 22,5 km e do domínio 2 (D2), de 7,5 km. Foram selecionados 23 níveis sigma na vertical, com maior resolução na camada inferior para melhor resolver os processos de turbulência.

Nos testes de sensibilidade, as saídas de chuva do modelo foram analisadas em relação à quantidade e distribuição espacial, na área da GF e litoral de SC, e comparadas, de forma subjetiva, com dados de precipitação registrados em estações meteorológicas localizadas nestas áreas. O tempo de inicialização e de integração das simulações é apresentado no Cap. IV, e foi definido conforme o período de duração da precipitação em cada caso.

Para sete eventos cujas simulações melhor representaram a precipitação ocorrida, foram realizados, além do experimento controle, experimentos de sensibilidade, considerando dois fatores: a topografia (fator 1 - ORO) e a evaporação do mar (fator 2 - EVAP). Assim, um total de quatro (4) simulações foram realizadas para cada evento, considerando:

- presença simultânea da topografia e evaporação do mar - experimento controle (f_{12});
- ausência da evaporação do mar (f_1);
- ausência da topografia (f_2);
- ausência simultânea da topografia e evaporação do mar (f_0).

A ausência do fator 1 ou fator 2 consiste em zerar, respectivamente, a orografia e a evaporação do mar, em toda a extensão do domínio. Estes experimentos são resumidos na **Tabela 2.1**, com indicativo da presença ou ausência do fator.

Tabela 2.1 – Experimentos numéricos realizados (2 fatores).

	ORO (fator 1)	EVAP (fator 2)
(f_{12})	presente	presente
(f_1)	presente	ausente
(f_2)	ausente	presente
(f_0)	ausente	ausente

2.5 – MÉTODO DA SEPARAÇÃO DE FATORES (SF)

A partir dos experimentos de sensibilidade mencionados anteriormente, foi empregado o método de Separação de Fatores (SF), utilizado por Stein e Alpert (1993), com o objetivo de avaliar os efeitos da presença da topografia e evaporação do mar nos campos de precipitação. O método permite isolar a contribuição de cada fator, assim como a contribuição da interação entre fatores. Conforme os autores, a diferença simples entre simulações, obtida da subtração entre o campo para um fator específico e o campo da simulação controle, não isola a influência do fator. Estudos de chuva intensa no oeste do Mediterrâneo utilizaram esta metodologia para identificar efeitos da topografia e evaporação do mar (Romero et al. 1998; Ramis et al. 1998), ou efeitos da topografia e calor latente (Romero et al., 2000).

A partir das equações definidas por Stein e Alpert (1993) na utilização da SF, no presente estudo foi calculada a contribuição do efeito da topografia (F1), da evaporação do mar (F2) e da interação entre ambos (F12). As saídas dos campos de precipitação utilizadas nas equações a seguir, foram obtidas dos experimentos numéricos da **Tabela 2.1** (item 2.5).

$$F1 \text{ (efeito da topografia)} = f_1 - f_0$$

$$F2 \text{ (efeito da evaporação do mar)} = f_2 - f_0$$

$$F12 \text{ (efeito da interação da topografia e evaporação do mar)} = f_{12} - (f_1 + f_2) + f_0$$

CAPÍTULO III – EVENTOS DE CHUVA EXTREMA

Neste capítulo, são apresentados os eventos de chuva acumulada extrema na GF, selecionados conforme Metodologia, Cap. 2 (item 2.2), com suas características de precipitação associada.

3.1 – OS CASOS SELECIONADOS

A distribuição mensal da precipitação foi determinada para os dados da GF utilizados neste estudo, no período 1969-2010 (**Figura 3.1**). Os maiores valores de médias mensais, entre 200 mm e 220 mm, ocorrem nos meses de verão austral, janeiro e fevereiro, seguidos dos meses de estações intermediárias, março, novembro e dezembro, quando os valores ficam em torno de 150-190 mm. As menores médias de chuva, inferiores a 120 mm, são verificadas no período de abril a agosto. Este padrão foi identificado por Nimer (1979), Grimm et al. (1998) e Prudêncio et al. (1999) nas áreas entre o litoral central e norte de SC. Totais mensais inferiores a 40 mm, verificados em períodos mais secos, ou totais mensais elevados, de mais de 400 mm, podem ocorrer em qualquer estação do ano. Entre os mínimos totais mensais de precipitação, fevereiro é o único que apresenta valor acima de 50 mm, enquanto o mês de junho é o único com um máximo total mensal inferior a 200 mm.

Na distribuição temporal da chuva diária na GF, entre 1969-2010 (**Figura 3.2a**), as linhas em vermelho representam, respectivamente, os quantis 95% (40,2 mm), 99% (82,3 mm) e 99,5% (102,8 mm). Totais diários acima de 50 mm representam menos de 5% das informações e valores acima de 100 mm são observados ao longo da série histórica. A precipitação máxima diária é de 404,8 mm, registrada em novembro.

Na distribuição temporal da série de dados acumulados, são indicados (linha vermelha) os limiares para q95% (93,1 mm), q99% (167,8 mm) e q99,5% (208,1 mm). Pode-se dizer que menos de 5% da chuva acumulada de cinco dias está acima de 100 mm. Os acumulados de chuva entre 93,1 mm (q95%) e 167,8 mm (q99,5%) ocorrem ao longo de toda a série (**Figura 3.2b**), mas entre 167,8 mm (q99%) e 208,1 mm (q99,5%) concentram-se entre as décadas de 70 e 80. Os

acumulados no limiar q99,5%, por sua vez, concentram-se nas décadas seguintes, a partir dos anos 90.

Analisando a distribuição sazonal dos totais de chuva acumulada em cinco dias, na **Figura 3.3** verifica-se que, no quantil q95% (93,1 mm), os casos de inverno (**Figura 3.3c**) concentram-se entre a década de 70 e meados dos anos 80. É também na década de 70 que se observam os acumulados máximos da estação, no quantil 99,5% (208,1 mm). Na primavera (**Figura 3.3d**), ao contrário, os acumulados acima de 93,1 mm (q95%) aparecem principalmente a partir de meados da década de 80. No verão e outono (**Figuras 3.3a-b**), os casos de chuva acumulada, neste limiar, são encontrados ao longo de todo o período de dados. A chuva acumulada no outono, para o intervalo 93,1-167,8 mm (q95%-q99%), ocorreu principalmente nas décadas de 70-80, o que também foi verificado nos meses de inverno (**Figuras 3.3b-c**). No verão (**Figura 3.3a**), os acumulados neste limiar são observados ao longo de toda a série, enquanto a primavera (**Figura 3.3d**) pode ser considerada a estação do ano com menor frequência destas informações. É também no verão, e a partir de meados da década de 1990, que se encontram os acumulados de chuva acima de 300 mm, para toda a série histórica. Acumulados de quase 300 mm foram registrados tanto no outono como na primavera (**Figura 3.3b e 3.3d**), mas nos últimos anos da série, de 2008 a 2010.

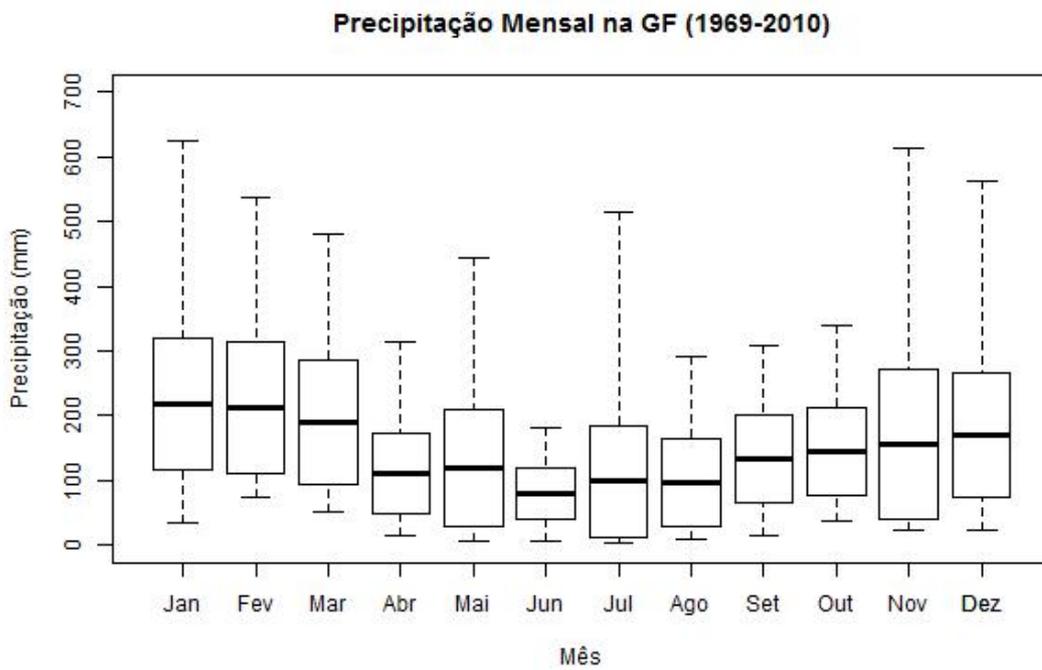
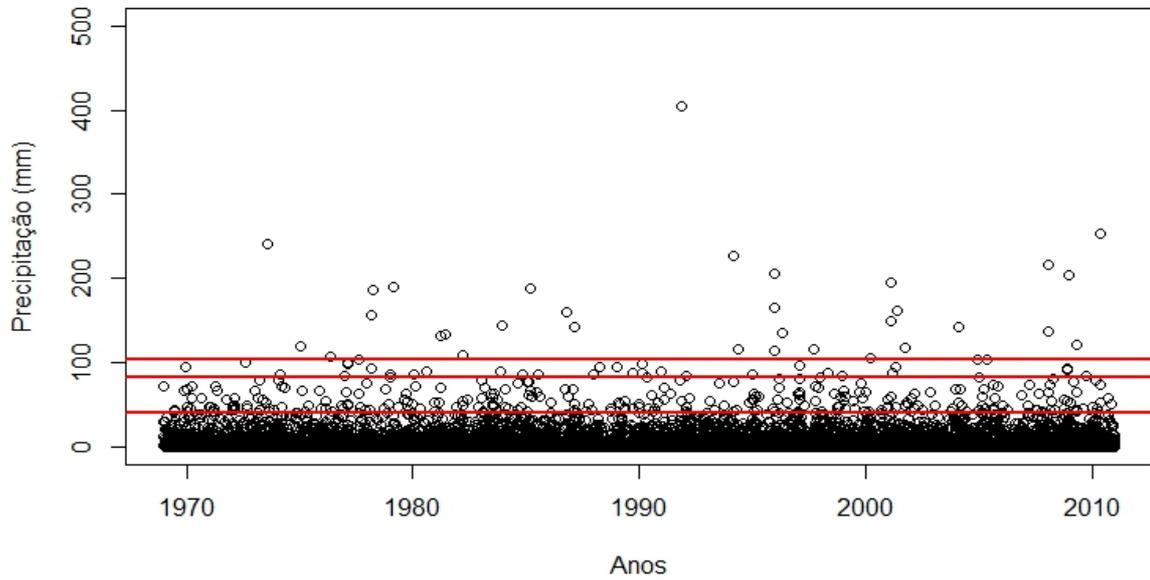


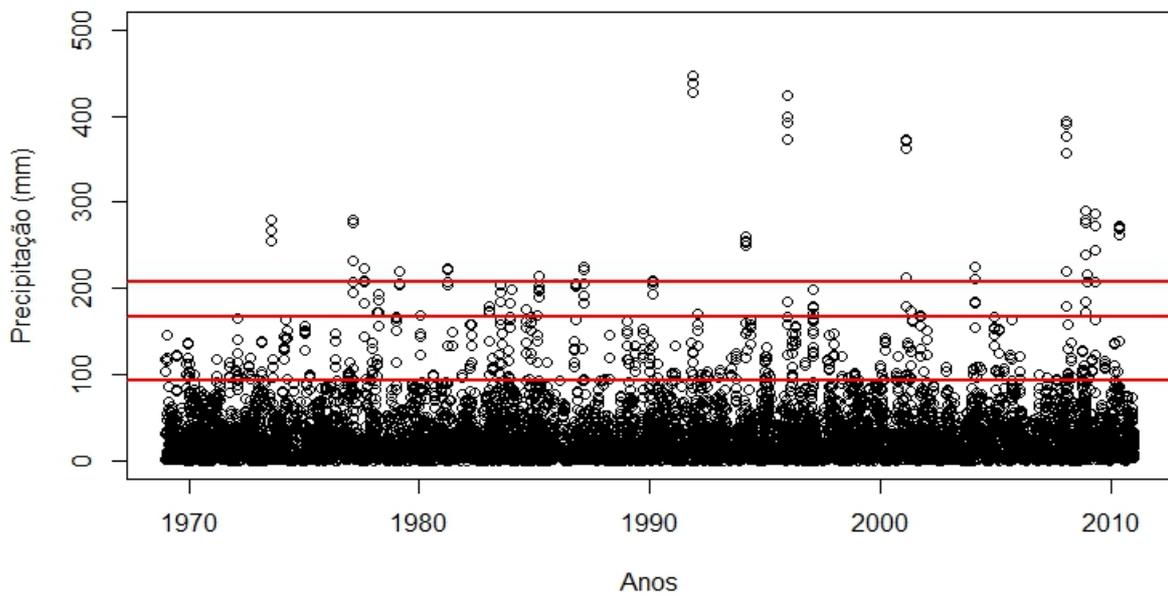
Figura 3.1 – Média mensal, desvio padrão, mínimos e máximos de precipitação na GF (1969-2010).

Precipitação diária na GF



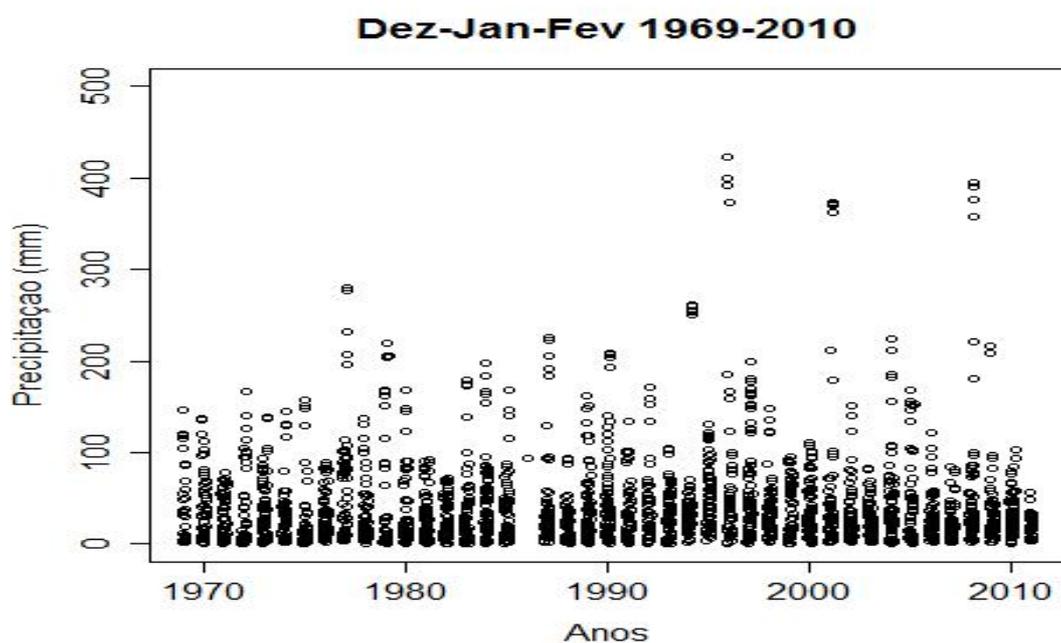
(a)

Precipitação acumulada 5 dias na GF

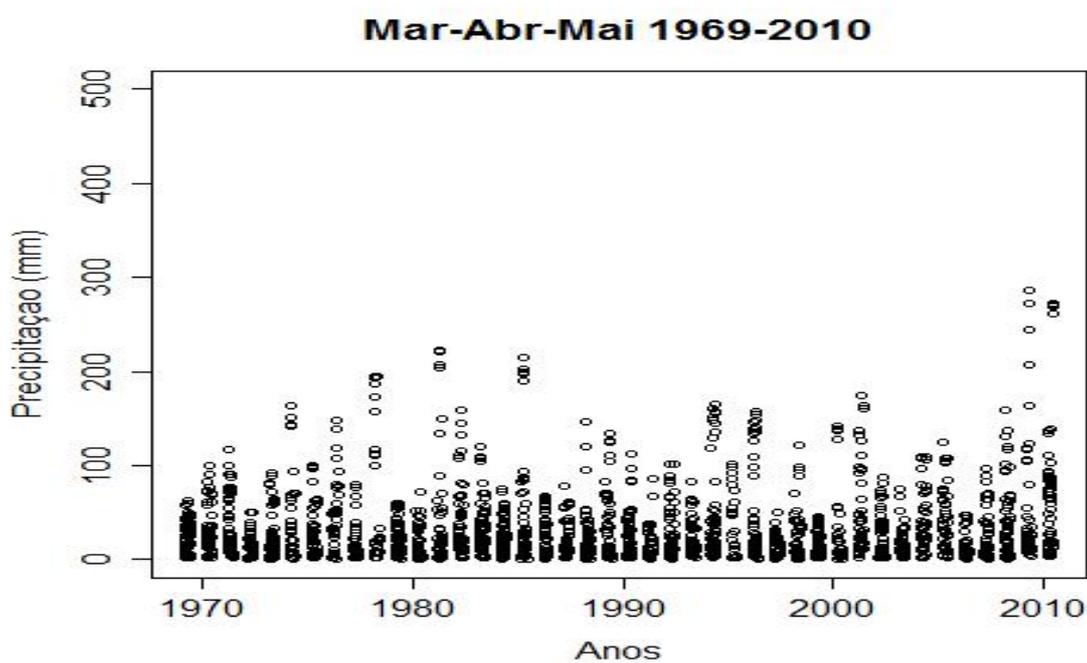


(b)

Figura 3.2 – Distribuição temporal da precipitação: (a) diária e (b) acumulada de cinco dias consecutivos na GF (1969-2010) (Linhas coloridas para q95%, q99%, q99,5%).

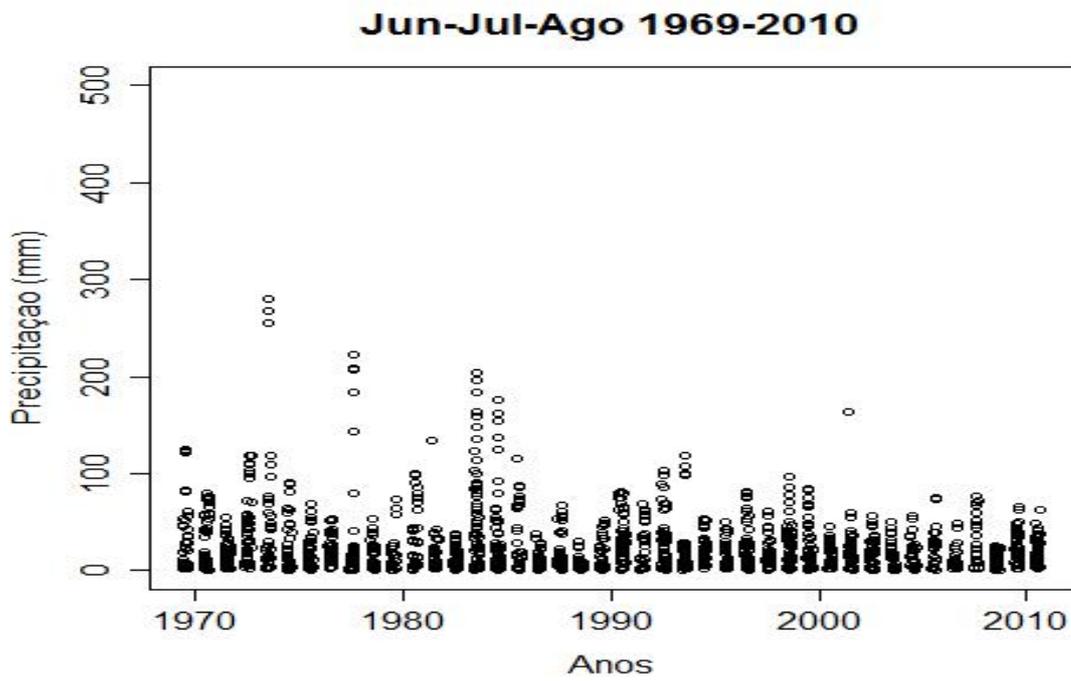


(a) Verão

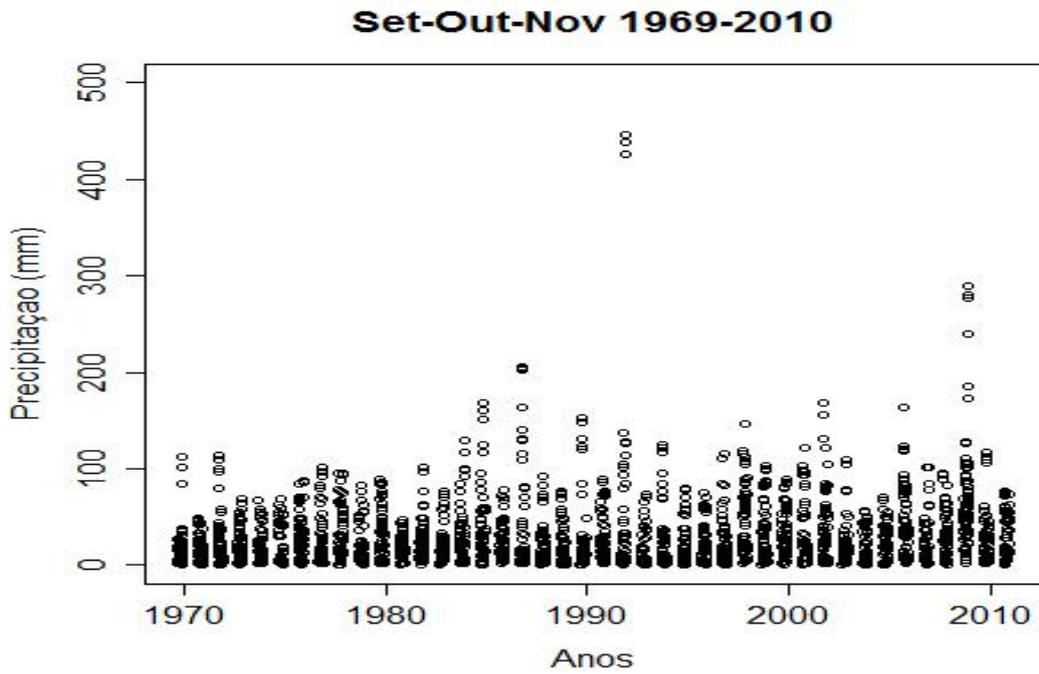


(b) Outono

Figura 3.3 – Distribuição temporal sazonal da precipitação acumulada de cinco dias consecutivos na GF (1969-2010): (a) Verão; (b) Outono, (c) Inverno, (d) Primavera.



(c) Inverno



(d) Primavera

Conclusão da **Figura 3.3.**

Para seleccionar acumulados de cinco dias de chuva extrema, considerou-se o limiar q99,5% (208,1 mm) (ver Metodologia, Cap. 2, ítem 2.2). Os 18 casos identificados (**Figura 3.2b**) podem ser visualizados na distribuição anual da **Figura 3.4**, com indicação das estações do ano, e distribuição mensal da **Figura 3.5**. Os anos que apresentaram mais de um caso foram 1977 (2 casos) e 2008 (3 casos) (**Figura 3.4**).

O verão foi o período de maior frequência, com 10 casos, sendo seis somente em fevereiro (**Figuras 3.4 e 3.5**). Nos dois eventos em janeiro, a chuva acumulada extrema ocorreu entre os dias 28 e 31, bem próximo de fevereiro. Em dezembro (verão), novembro e março (meses próximos do verão), também foram dois eventos, enquanto em abril, maio, julho e agosto (meses de outono e inverno), foi apenas um caso. Os meses de junho, setembro e outubro não apresentaram registro. A distribuição sazonal dos 18 eventos pode ser assim sintetizada (**Figuras 3.4 e 3.5**):

- Verão - 10 casos: 6 fevereiro, 2 janeiro, 2 dezembro;
- Outono - 4 casos: 2 março, 1 abril, 1 maio;
- Inverno – 2 casos: 1 julho, 1 agosto;
- Primavera - 2 casos: 2 novembro.
- Sem registro – junho, setembro, outubro.

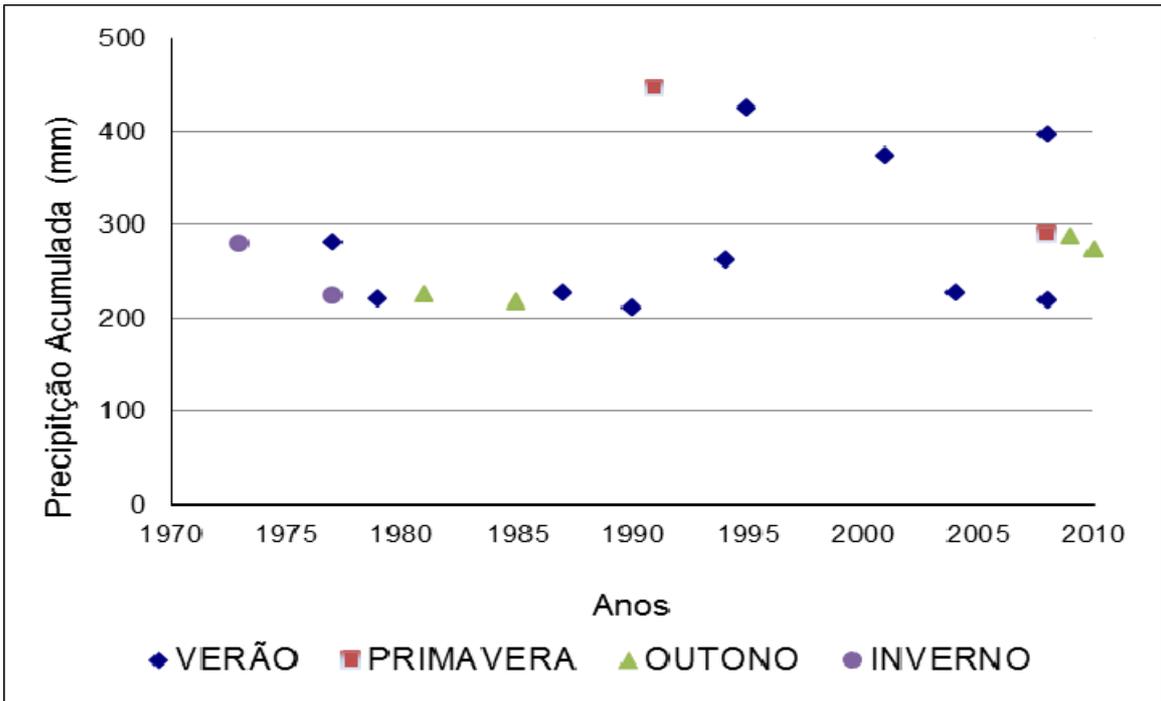


Figura 3.4 - Distribuição anual de casos extremos (q99,5%) de chuva acumulada em cinco dias consecutivos na GF (1969-2010).

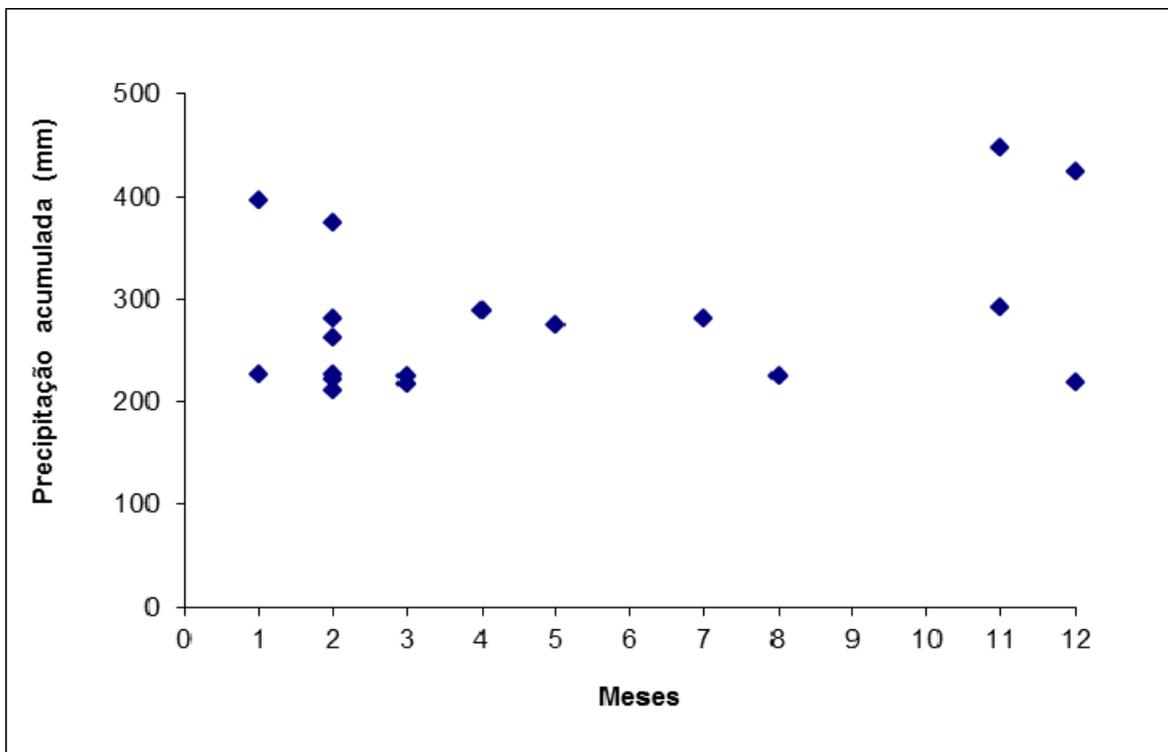


Figura 3.5 - Distribuição mensal de casos extremos (q99,5%) de chuva acumulada em cinco dias consecutivos na GF (1969-2010).

3.2– DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO

Os 18 eventos de chuva extrema na GF são apresentados na **Tabela 3.1**, cujos totais acumulados de precipitação foram determinados para diferentes períodos, conforme Metodologia no Cap. 2, item 2.2.

Os totais de cinco dias consecutivos, selecionados no limiar q99,5%, estão na coluna 2, e os respectivos totais de 24 horas, que resultaram neste acumulado, na coluna 3. Somente para o caso de fev/2001 considerou-se o segundo dia consecutivo de acumulado no limiar 99,5%, cujo valor foi de 361,90 mm no dia 05/02/2001, quando o total diário de precipitação foi de 150,20 mm. Nos demais casos, os valores subsequentes ao acumulado de chuva selecionado ficaram, no máximo, em 20 mm a mais, não sendo, portanto, considerados.

Na coluna 4 da **Tabela 3.1**, são apresentados os totais de precipitação em 12 horas, cuja soma, para um mesmo dia, corresponde aos totais diários da coluna 3. Os totais em 24 horas da coluna 5 foram determinados a partir do registro de 12 horas, conforme o exemplo para o caso de fev/1977. A soma dos 98,20 mm, registrados entre 00 UTC e 12 UTC do dia 01, e dos 100,40 mm, registrados entre 12 UTC do dia 01 e 00 UTC do dia 02 (coluna 4), totaliza 198,60 mm em 24 horas (coluna 5).

Em todos os eventos, observa-se que mais de 80% do total da chuva acumulada de cinco dias consecutivos ocorreu entre um a três dias (valores de chuva diária em negrito na coluna 3). A maior parte dos valores de precipitação intensa em dois dias, no entanto, ocorreu em 24 horas quando se considera o total da coluna 5. A distribuição temporal da precipitação a cada 12 horas, para os casos de chuva concentrada em um ou dois dias, é apresentada na **Figura 3.6**, dos meses de verão, e **Figura 3.7**, dos demais meses. Os casos de chuva concentrada em três dias estão na **Figura 3.8**.

Verifica-se na **Tabela 3.1** que em 12 dos 18 eventos a precipitação concentrou-se em 24 horas. Somente nos eventos de mar/1981, fev/1987 e jan/2004 é que a chuva concentrou-se em dois dias, consecutivos ou não (**Figuras 3.6 e 3.7**). E em outros três eventos, ago/1977, nov/2008 e abr/2009, em meses de inverno, primavera e outono (nenhum caso de verão), a chuva ficou distribuída em três dias consecutivos (**Figura 3.8**).

Na maior parte dos casos de chuva em um ou dois dias das **Figuras 3.6** (meses de verão) e **3.7** (demais meses), observa-se que praticamente não houve registro de chuva nas horas que precederam a ocorrência da chuva intensa. Os maiores totais da **Tabela 3.1** (de 12 horas, diário e de cinco dias) estão dentro destes casos. Em cada evento foi encontrado pelo menos um período de 12 horas com valores acima dos 89 mm registrados em fev/1990. O total máximo em 12 horas chegou a 227,4 mm em fev/1994. A chuva mais elevada em cinco dias (361,90-426,80 mm) ocorreu em nov/1991, dez/1995, fev/2001 e jan/2008, meses de primavera e verão, e a maior parte deste total foi registrada em um período de 24 horas (292,00-404,80 mm, na coluna 5).

Quando a maior parte da precipitação ficou concentrada em três dias (**Figura 3.8**), foram registrados os menores totais em 12 horas. Em geral, a chuva ficou em torno de 20-40 mm/12h, com um ou dois picos acima de 50 mm/12h, atingindo um máximo de 86,8 mm/12h em abr/2009. Os totais em cinco dias não passaram de 276,60 (nov/2008) e os totais em 24 horas (coluna 5) ficaram entre 106,60-120,80 mm.

Considerando os 18 eventos na **Tabela 3.1**, selecionados no limiar de 208,10 mm de chuva acumulados em cinco dias, pode-se dizer que todos apresentaram pelo menos 100 mm em 24 horas (coluna 5).

Tabela 3.1 – Chuva de 12 horas, 24 horas e cinco dias consecutivos, para eventos de chuva extrema (q99,5%) na GF (1969-2010).

VERÃO

DATA	TOTAL EM 5 DIAS	TOTAL EM 24h	CHUVA 12h		TOTAL EM 24h*
			00 UTC	12 UTC	
30/01/1977		6,20			
31/01/1977		1,90			
01/02/1977		98,20	0,00	98,20	
02/02/1977		100,40	100,40	0,00	198,60
03/02/1977	232,60	25,90			
20/02/1979		28,00			
21/02/1979		0,40			
22/02/1979		0,50			
23/02/1979		0,40			
24/02/1979	219,60	190,30	91,40	98,90	190,30
12/02/1987		6,00			
13/02/1987		23,30			
14/02/1987		44,00			
15/02/1987		9,10			
16/02/1987	225,40	143,00	121,70	21,30	143,00
10/02/1990		4,60			
11/02/1990		89,00	0,00	89,00	
12/02/1990		99,60	66,10	33,50	155,10
13/02/1990		14,40			
14/02/1990	209,00	1,40			
18/02/1994		9,80			
19/02/1994		9,90			
20/02/1994		7,90			
21/02/1994		0,00			
22/02/1994	255,00	227,40	0,00	227,40	227,40
21/12/1995		0,00			
22/12/1995		0,00			
23/12/1995		19,30			
24/12/1995		165,80	52,00	113,80	
25/12/1995	391,70	206,60	201,60	5,00	315,40
01/02/2001		13,20			
02/02/2001		1,60			
03/02/2001		2,00			
04/02/2001	212,30	194,90	0,00	194,90	
05/02/2001	361,90	150,20	128,20	22,00	323,10
24/01/2004		0,00			
25/01/2004		39,20			
26/01/2004		2,80			
27/01/2004		27,00			
28/01/2004	211,00	142,00	99,80	42,20	142,00
28/01/2008		4,40			
29/01/2008		18,30			
30/01/2008		18,60			
31/01/2008		136,90	25,10	111,80	
01/02/2008	394,60	216,90	180,20	36,20	292,00
12/12/2008		3,50			
13/12/2008		1,10			
14/12/2008		0,20			
15/12/2008		0,00			
16/12/2008	208,20	203,40	111,40	92,00	203,40

OUTONO

DATA	TOTAL EM 5 DIAS	TOTAL EM 24h	CHUVA 12h		TOTAL EM 24h*
			00 UTC	12 UTC	
27/03/1981		1,80			
28/03/1981		131,90	87,6	44,3	131,90
29/03/1981		70,90	11,9	59	
30/03/1981		2,80			
31/03/1981	223,10	15,70			
07/03/1985		12,20			
08/03/1985		4,20			
09/03/1985		1,40			
10/03/1985		9,20			
11/03/1985	215,30	188,30	188,3	0	188,30
21/04/2009		0,00			
22/04/2009		43,00	0	43	
23/04/2009		120,80	34	86,8	120,80
24/04/2009		44,00	26,8	17,2	
25/04/2009	272,30	64,50	0,1	64,4	
15/05/2010		0,00			
16/05/2010		0,00			
17/05/2010		4,20			
18/05/2010		11,80			
19/05/2010	269,00	253,00	63,4	189,6	253,00

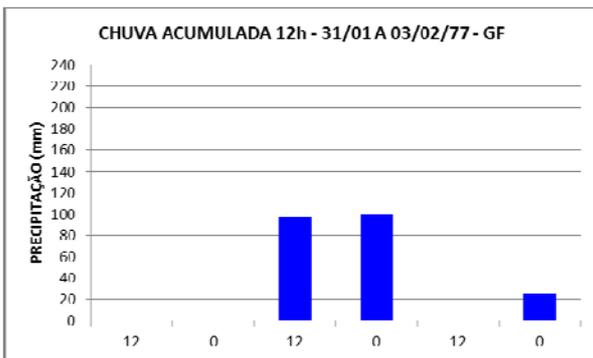
INVERNO

DATA	TOTAL EM 5 DIAS	TOTAL EM 24h	CHUVA 12h		TOTAL EM 24h*
			00 UTC	12 UTC	
18/07/1973		0,00			
19/07/1973		0,00			
20/07/1973		0,00			
21/07/1973		25,10			
22/07/1973	267,00	241,90	80	161,9	241,9
14/08/1977		14,40			
15/08/1977		1,00			
16/08/1977		63,70	15,3	48,4	
17/08/1977		103,90	34,9	69	106,6
18/08/1977	223,20	40,20	37,6	2,6	

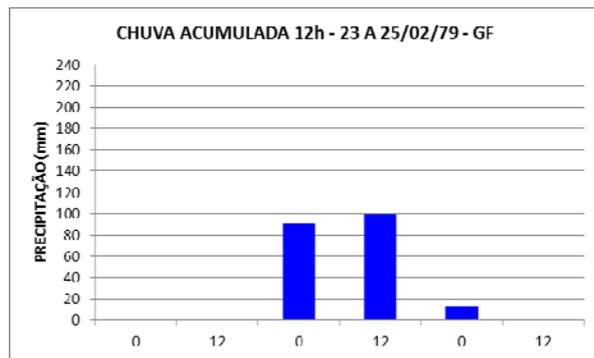
PRIMAVERA

DATA	TOTAL EM 5 DIAS	TOTAL EM 24h	CHUVA 12h		TOTAL EM 24h*
			00 UTC	12 UTC	
11/11/1991		0,00			
12/11/1991		8,40			
13/11/1991		0,00			
14/11/1991		13,60			
15/11/1991	426,80	404,80	192,00	212,80	404,80
19/11/2008		27,70			
20/11/2008		8,00			
21/11/2008		55,40	36,90	18,50	
22/11/2008		92,30	24,50	67,80	
23/11/2008	276,60	93,20	57,30	35,90	125,10

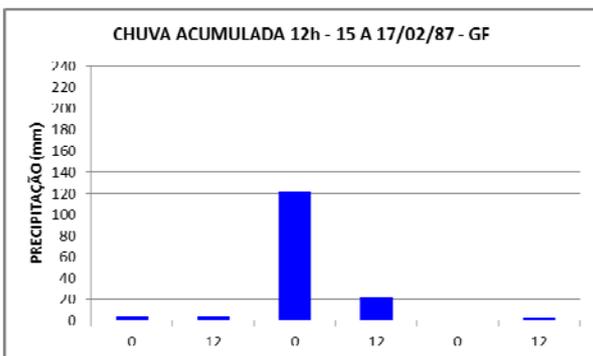
Conclusão da Tabela 3.1.



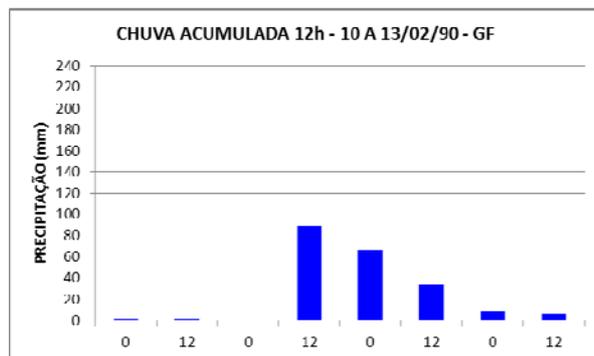
(a) Fevereiro/1977.



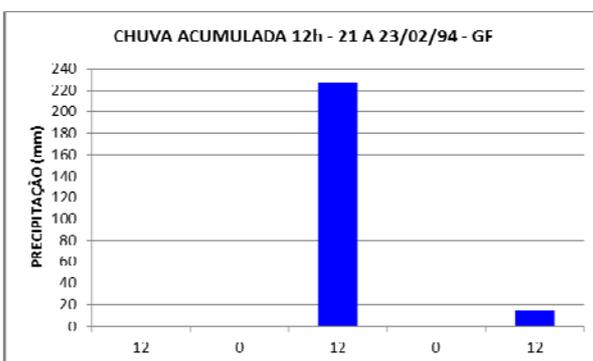
(b) Fevereiro/1979.



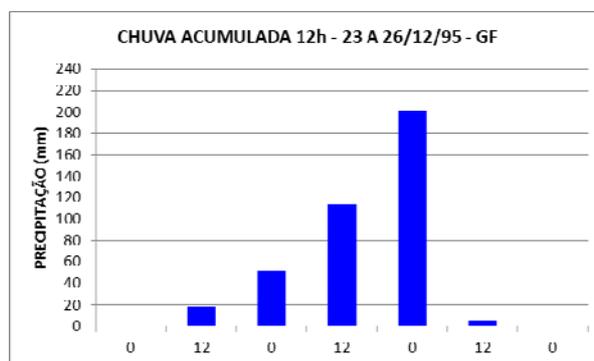
(c) Fevereiro/1987.



(d) Fevereiro/1990.

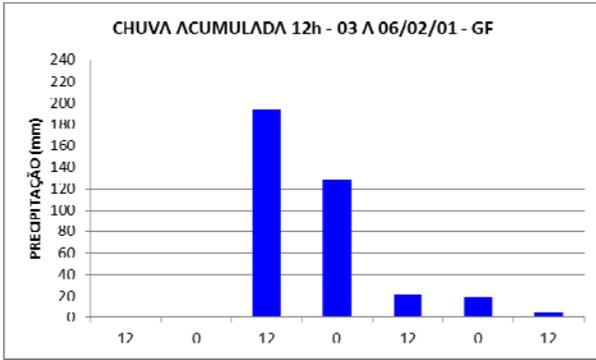


(e) Fevereiro/1994.

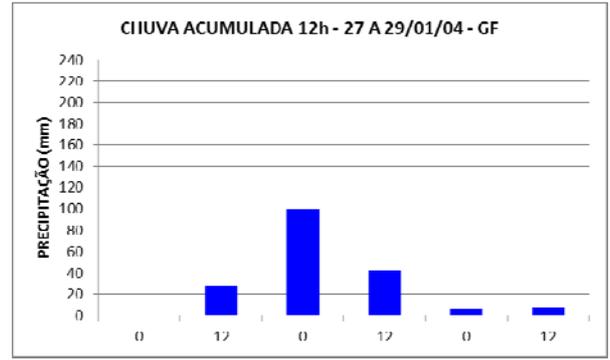


(f) Dezembro/1995.

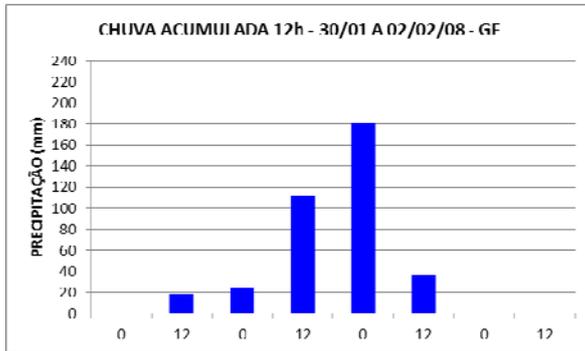
Figura 3.6 – Total de precipitação de 12 horas (mm) na GF, para casos de chuva concentrada em um ou dois dias: (a) fev/1977; (b) /fev1979; (c) fev/1987; (d) fev/1990; (e) fev/1994; (f) dez/1995; (g) fev/2001; (h) jan/2004; (i) jan-fev/2008; (j) dez/2008 (dados na coluna 4 da **Tabela 3.1**, em meses de verão).



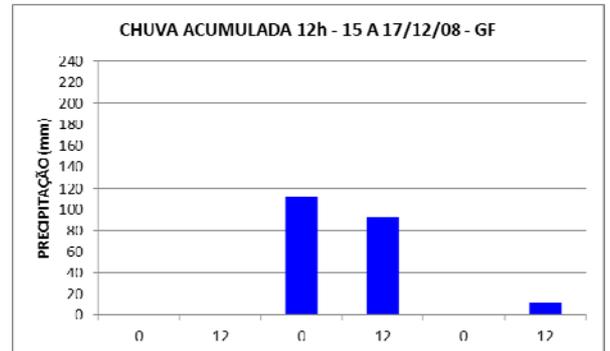
(g) Fevereiro/2001.



(h) Janeiro/2004.

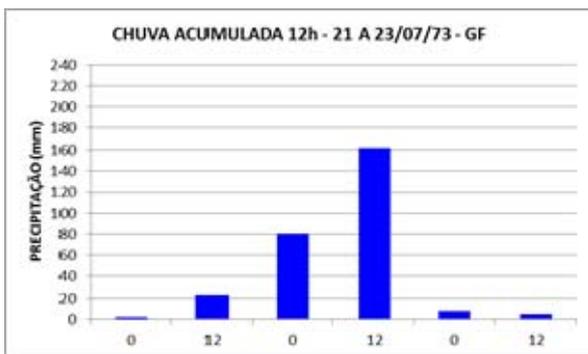


(i) Janeiro/2008.

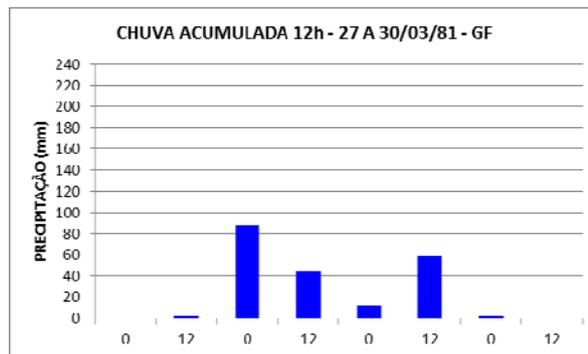


(j) Dezembro/2008.

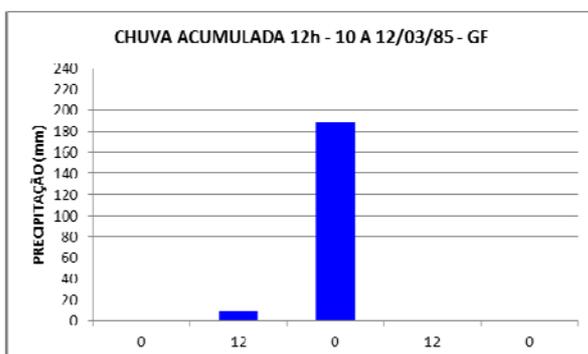
Conclusão da **Figura 3.6.**



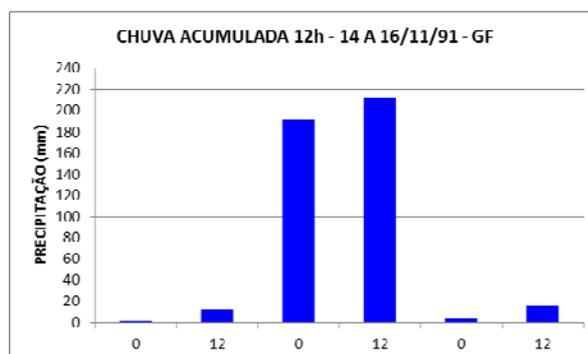
(a) Julho/1973.



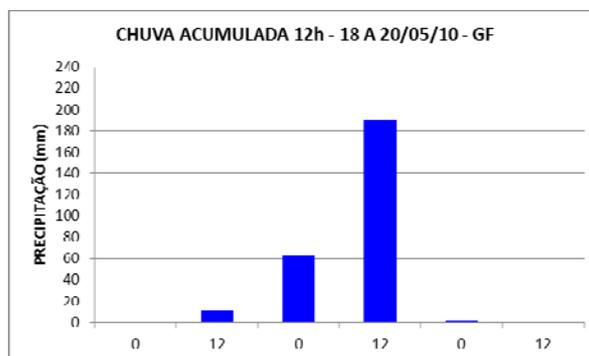
(b) Março/1981.



(c) Março/1985.

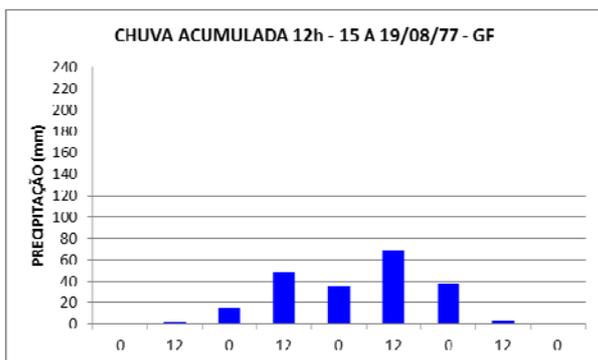


(d) Novembro/1991.

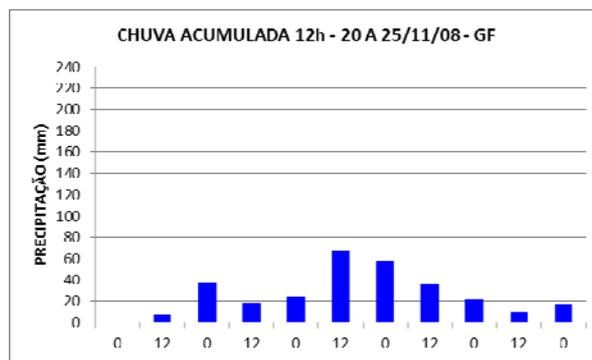


(e) Maio/2010.

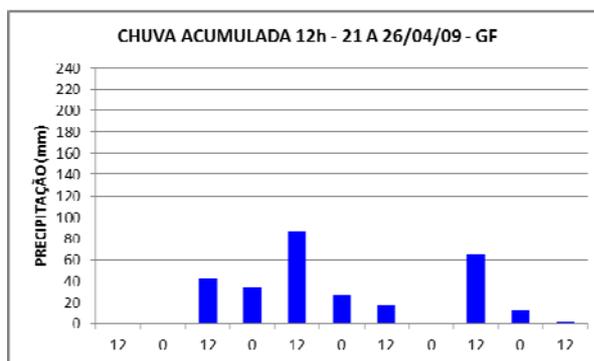
Figura 3.7 – Total de precipitação de 12 horas (mm) na GF, para casos de chuva concentrada em um ou dois dias: (a) jul/1973; (b) mar/1981; (c) mar/1985; (d) nov/1991; (e) mai/2010 (dados na coluna 4 da **Tabela 3.1**, em meses de outono-inverno-primavera).



(a) Agosto/1977.



(b) Novembro/2008



(c) Abril/2009.

Figura 3.8 – Total de precipitação de 12 horas (mm) na GF, para casos de chuva concentrada em três dias: (a) ago/1977; (b) nov/2008; (c) abr/2009 (dados na coluna 4 da **Tabela 3.1**).

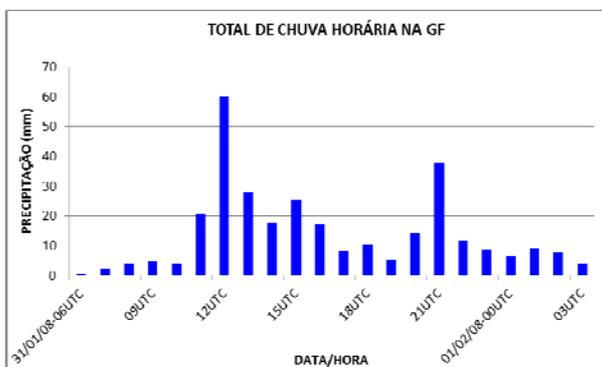
Na Figura 3.9, tem-se a distribuição horária para os casos a partir de 2008.

Em jan/2008, dez/2008 e mai/2010, a chuva horária ficou em torno de 10-20 mm, com um ou dois picos acima de 40 mm h⁻¹. Nos casos de jan/2008 e dez/2008, a chuva foi persistente em aproximadamente 12 horas (**Figura 3.9a** e **3.c**). No caso de mai/2010, verifica-se que os 189,6 mm de precipitação registrados em 12 horas (coluna 4 na **Tabela 3.1**) concentraram-se na verdade em 5 horas, entre 00-05 UTC do dia 19 (**Figura 3.9d**). Neste intervalo, foram registrados quase 100 mm em duas horas, entre 03 UTC e 05 UTC.

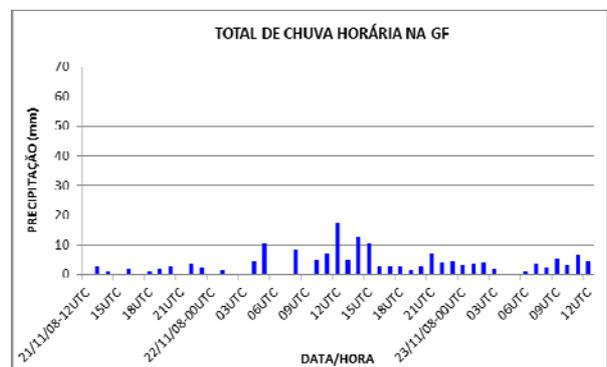
Nos casos de nov/2008 e abr/2009, para os quais 80% da precipitação ficou concentrada em três dias (**Figura 3.8**), os máximos picos horários foram de 20 mm h⁻¹ (**Figuras 3.9b** e **3.9e**). A chuva persistente de 10 mm h⁻¹, no entanto, neste período de três dias, favoreceu os elevados acumulados de 272,30 mm e 276,60

mm em cinco dias, verificados nestes eventos (**Tabela 3.1**). Em abr/2009, por exemplo, a chuva de 10 mm h^{-1} , mas de caráter contínuo, resultou em um total de 86,8 mm em 12 horas (**Tabela 3.1**), entre 00 UTC e 12 UTC do dia 23 (**Figura 3.9e**).

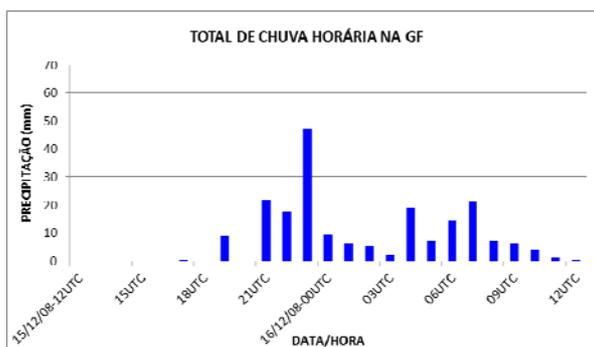
Avaliando casos de *flash flood* nos EUA, Doswell et al. (1996) consideraram taxas de precipitação acima de 25 mm h^{-1} como moderadamente elevadas e durações superiores a 1 hora como moderadamente longas. O caráter repentino da chuva e os elevados totais concentrados em áreas localizadas indicaram eventos de *flash flood* com influência de uma forçante de mesoescala (Maddox et al. 1979).



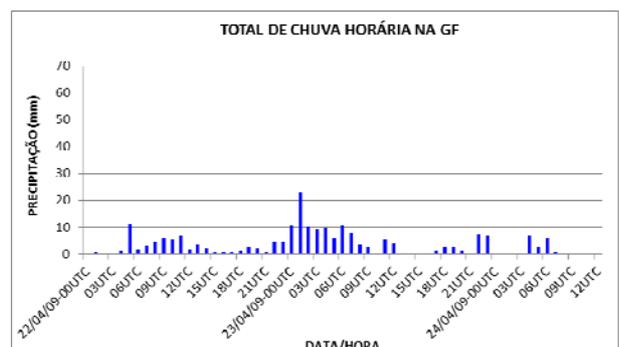
(a) Janeiro/2008.



(b) Novembro/2008.

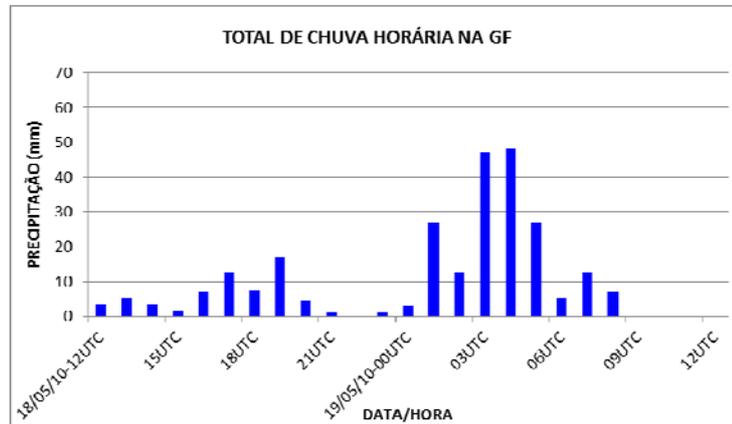


(c) Dezembro/2008.



(d) Abril/2009.

Figura 3.9 – Precipitação horária (mm) na GF em (a) jan/2008; (b) nov/2008; (c) dez/2008; (d) abr/2009; (e) mai/2010.



(e) Maio/2010.

Conclusão da **Figura 3.9**

3.3– CONCLUSÕES PARCIAIS

Na **Figura 3.9**, dos totais horários de precipitação, apesar da disponibilidade de um curto período de dados (a partir de 2005), é possível perceber que a chuva em geral ocorreu de forma persistente por um período entre 12 e 24 horas. Quando a precipitação ocorre em um ou dois dias (**Figuras 3.9a, 3.9b, 3.9c**), totais horários mais elevados de precipitação, entre 15 mm e 20 mm, concentram-se em um período de 6 a 12 horas, quando se verifica um ou dois picos máximos entre 40 mm e 60 mm. Nos casos em que a chuva ficou melhor distribuída em três dias (nov/2008 e abr/2009 nas **Figuras 3.9d, 3.9e**), os picos horários são menos elevados, entre 10 mm e 15 mm, e o pico máximo não ultrapassa os 25 mm/hora.

O período entre a década de 70 e meados dos anos 90, quando se verificou uma concentração de acumulados de chuva extrema entre os quantis q95% e q99% (93,1-167,8 mm), nos meses de inverno e outono (**Figuras 3.3a e 3.3d**), foi caracterizado por fases mais intensas de ENOS (El Niño-Oscilação Sul). Higgins & Kousky (2013) atribuíram o aumento de chuva média e extrema em determinadas regiões dos EUA entre 1980 e 2009, em relação aos 30 anos anteriores (1950 a 1979), a períodos mais intensos do fenômeno nas décadas de 1980-90. No Sul do Brasil, anos de El Niño estão geralmente associadas à ocorrência de chuva acima da média (Kousky e Cavalcanti, 1984; Casarin e Kousky, 1986; Grimm et al. 1998; Grimm et al. 2009). Grimm et al. 1998 identificou os meses de outono, inverno e

primavera como os de maior influência do fenômeno no Sul do Brasil. Chuvas acima da média registradas na região nas décadas de 80-90 foram associadas ao predomínio de fases positivas do ENOS. Estes autores identificaram uma atuação mais intensa, e em período prolongado, da corrente de jato subtropical, posicionada no Sul do Brasil em tais eventos.

Entre 2000 e 2010, em meses de verão, foi registrada uma maior frequência de acumulados de chuva no quantil 99% e acumulados acima de 300 mm na GF (**Figura 3.3a**). Foi também nesta mesma década que períodos prolongados com ausência de precipitação predominaram no oeste de Santa Catarina, especialmente em meses de verão (Lopes e Rodrigues 2008 e Sacco 2010). Analisando dados da região entre 2002 e 2006, Lopes e Rodrigues (2008) encontraram percentuais negativos de chuva, de pelo menos 40% abaixo da média, em janeiro ou fevereiro, e no mínimo 14 dias sem ocorrência do fenômeno nestes meses.

Na primavera, estação do ano que apresenta maior regularidade de passagens frontais no litoral de Santa Catarina (Rodrigues et al. 2004), foi encontrada a menor frequência de acumulados extremos no quantil 99%.

A partir da década de 2000, foram registrados os maiores extremos de precipitação acumulada na grande Florianópolis, no litoral de SC e também períodos prolongados com ausência de precipitação no oeste do Estado (Rodrigues e Lopes, 2008; Sacco, 2010), em meses de verão e associados a fases neutras ou negativas do ENSO.

CAPÍTULO IV – AMBIENTE SINÓTICO DA CHUVA EXTREMA

Entre os 18 eventos de chuva extrema acumulada de cinco dias (q99,5%) na GF, selecionados no período 1969-2010, foram determinados os campos sinótico-dinâmicos dos 15 casos ocorridos a partir de 1979 (ver Metodologia, Cap. 2, ítem 2.2), analisados a seguir.

Foram identificadas características sinóticas comuns entre os casos, tanto em superfície como em médios níveis. Apesar das similaridades, foi também na circulação em baixos e médios níveis da troposfera que se verificaram as principais diferenças entre os eventos. No agrupamento dos casos, determinado a partir do campo de PNMM (ver Metodologia, Cap. 2, ítem 2.3), foram definidos quatro padrões sinóticos (G1, G2, G3, G4) para eventos de chuva extrema na GF. As principais características sinótico-dinâmicas encontradas em cada grupo são apresentadas neste capítulo.

Para cada grupo foi apresentado um dos casos em maior detalhamento, especialmente na apresentação dos campos dinâmicos.

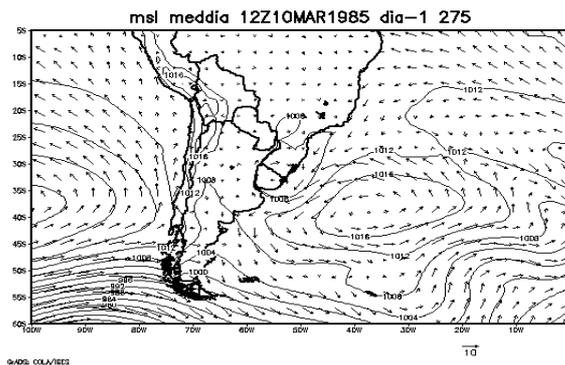
4.1 – GRUPO G1: MARÇO/1985 E MAIO/2010.

- ciclone em superfície no litoral Sul do Brasil
- *cutoff low* em lento deslocamento

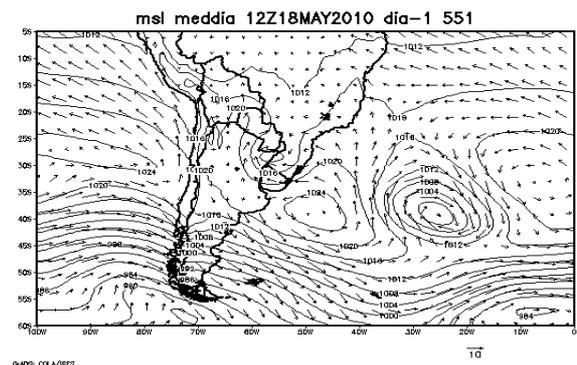
Os dois casos do grupo G1 ocorreram no outono, com totais de precipitação de quase 200 mm acumulados em 12 horas (**Tabela 3.1**). A chuva intensa teve início em 10/03/1985-12 UTC e em 18/05/2010-12 UTC. Nas 24 horas que antecederam este horário, cujos campos médios de PNMM e vento a 10 m são apresentados nas **Figuras 4.1a-b**, observa-se uma alta pressão com centro no Atlântico Sul, litoral da Argentina, em torno de 40-35°S, na retaguarda de uma frente fria que se deslocou no litoral Sul do Brasil no dia anterior. A presença de um ciclone em superfície com centro entre 35-30°S, no litoral do Rio Grande do Sul, favorece a ocorrência da chuva. O anticiclone afasta-se em trajetória zonal, da costa para o

mar, enquanto o ciclone no Sul do Brasil, observado na região de confluência de ventos, desloca-se na direção sul-sudeste.

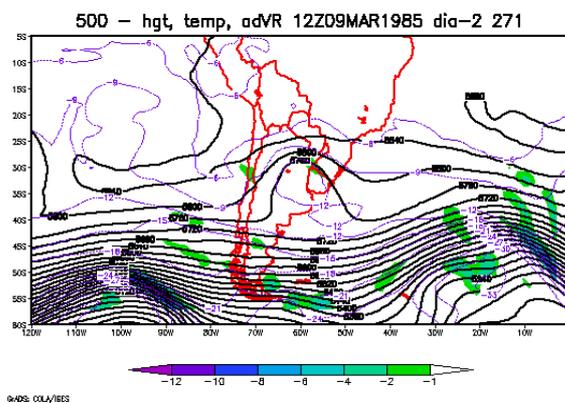
Um ciclone em médios e altos níveis deslocou-se no norte da Argentina, depois de atravessar os Andes em latitudes em torno de 30°S, embebido em cavado de onda curta com inclinação baroclínica. No campo de altura geopotencial em 500 hPa, o ciclone é observado no continente, em 09/03/1985-12 UTC e 18/05/2010-00Z (**Figuras 4.1c-d**), favorecendo o desenvolvimento do ciclone em superfície, observado nos campos de PNMM das **Figuras 4.1a-b**. Nas 24 horas seguintes **Figuras 4.1-f**, quando se inicia a chuva intensa, o cavado perde a inclinação noroeste-sudeste, posicionando-se meridionalmente e adquirindo um lento deslocamento zonal. Nesses dias, na parte leste do ciclone, observa-se uma diminuição nos valores de advecção de vorticidade relativa em 500 hPa, em relação ao dia anterior (**Figuras 4.1c-d**). O escoamento das ondas baroclínicas é verificado em latitudes superiores a 40°S. E em latitudes inferiores a 25°S, o anticiclone subtropical do Atlântico Sul avança em direção à costa do Brasil, o que também aparece nos campos de PNMM (**Figuras 4.1a-b**).



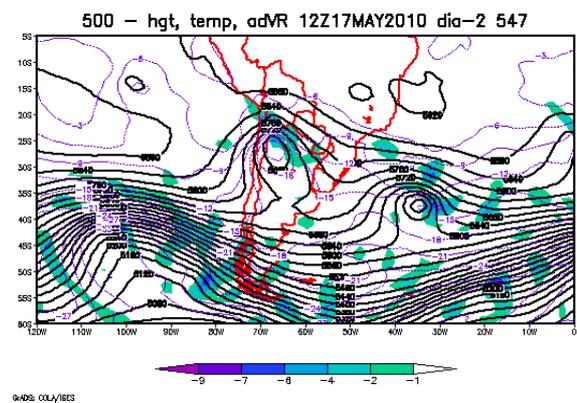
(a)



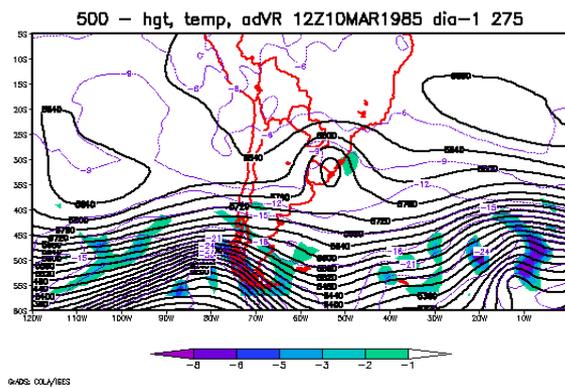
(b)



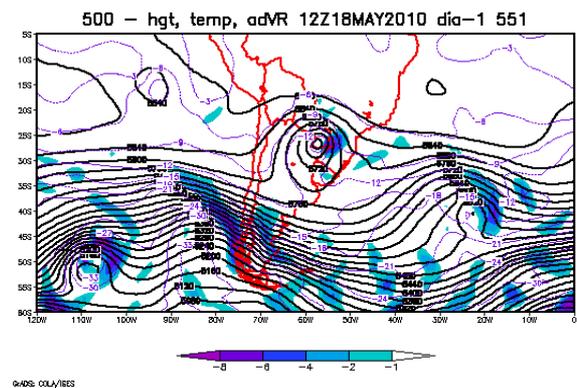
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.1. Campo médio da pressão ao nível médio do mar (intervalo de contorno de 4 hPa) e do vento a 10 metros de altura (m s^{-1}), nas últimas 24 horas, em: (a) 10/03/1985-12 UTC, (b) 18/05/2010-12 UTC. Altura geopotencial (intervalo de contorno de 30 mgp) e advecção de vorticidade relativa negativa ($\times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, sombreado em intervalo de 1 e iniciando em -1) em 500 hPa: (c) 09/03/1985-12 UTC, (d) 17/05/2010-12 UTC, (e) 10/03/1985-12 UTC, (f) 18/05/2010-12 UTC (Fonte: ECMWF).

4.1.1 – O caso de maio/2010

No dia 18/05, 12 UTC, na área marítima próxima ao litoral de SC, a velocidade do fluxo de vento a 10 m foi de 8-10 m s⁻¹ (mais intenso no LS) com direção aproximadamente de leste (**Figura 4.2a**). Às 00 UTC do dia 19/05, horário de início da chuva intensa (**Tabela 3.1**) e da passagem do ciclone em superfície, este escoamento gerado na circulação do anticiclone no mar passou a predominar de nordeste na área de mar próxima da costa, com intensidade acima de 12 m s⁻¹ (**Figura 4.2b**). O deslocamento da baixa pressão em direção ao mar e a proximidade do anticiclone da costa contribuíram para a intensificação do gradiente de pressão na região.

Em ambos os horários analisados, predominou um escoamento de nordeste em 850 hPa (**Figuras 4.2c-d**), na região marítima próxima da costa, bem mais intenso às 00 UTC do dia 19/05 (10-12 m s⁻¹), como também observado nos campos de vento a 10 m (**Figuras 4.2a-b**). Ainda em 850 hPa, nos campos de temperatura e umidade específica (**Figuras 4.3a-b**), e de advecção térmica (**Figuras 4.3c-d**), é possível visualizar a entrada de ar mais aquecido e úmido no litoral de SC e área marítima próxima, desde 12 UTC do dia 18/05, e ainda mais acentuada às 00UTC do dia 19/05. Neste último horário, de início da chuva intensa, a temperatura ficou entre 12-14 °C e a umidade em torno de 10 g kg⁻¹ em todo o litoral de SC (**Figura 4.3b**).

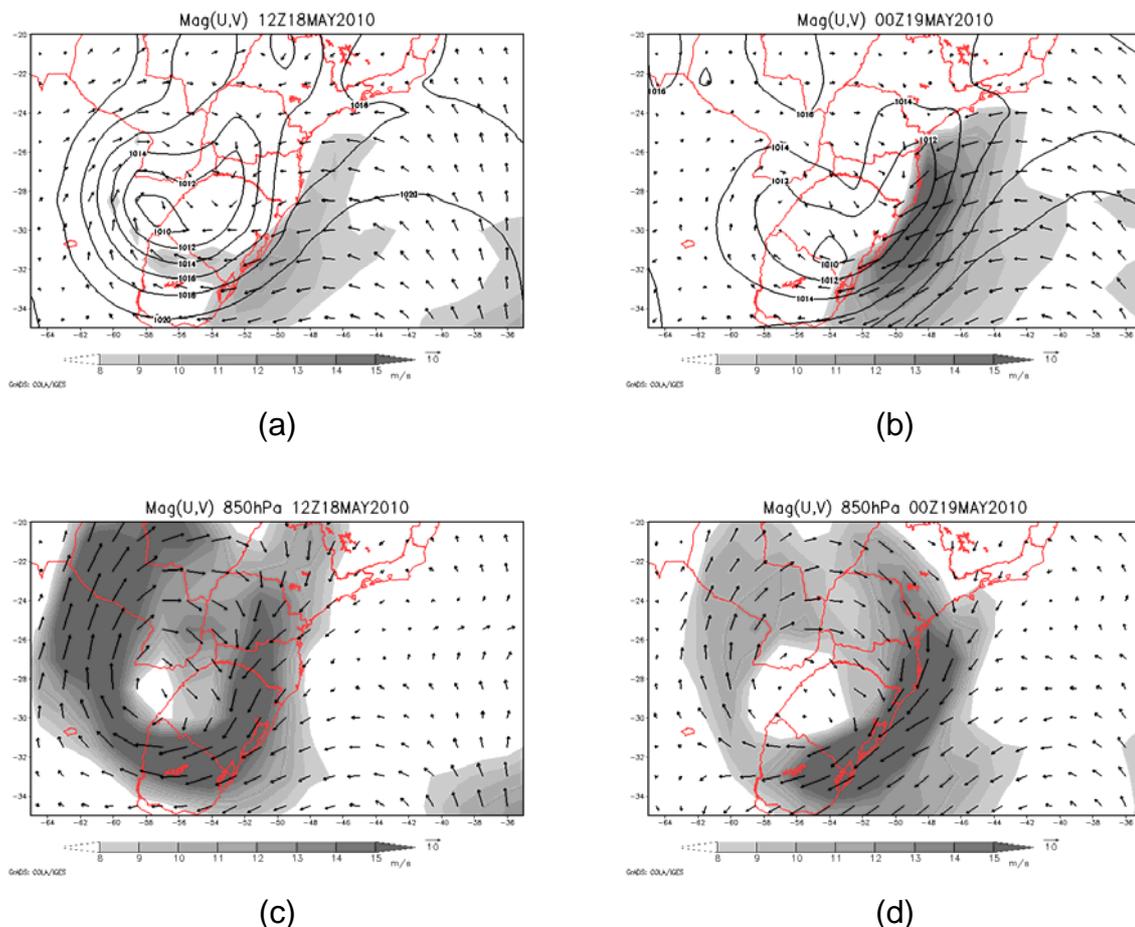


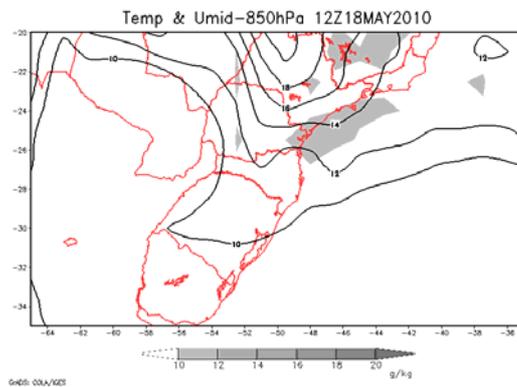
Figura 4.2. Campos em 18/05/2010-12 UTC e 19/05/2010-00 UTC: (a, b) PNMM e vento a 10 metros de altura (m s^{-1}) e (c, d) vento em 850 hPa (m s^{-1}). Velocidade do vento acima de 8 m s^{-1} (hachurado em intervalo de 1 m s^{-1}) (Fonte: ECMWF).

Nos campos de temperatura em médios níveis, da **Figura 4.4**, observa-se o núcleo frio do ciclone (*cutoff low*) deslocando-se lentamente em direção ao oeste de SC e Atlântico Sul, nas horas que antecedem a chuva intensa. Às 00 UTC do dia 19/05 (**Figura 4.4b**), a aproximação do ciclone favoreceu a entrada de ar mais frio no litoral de SC, em relação ao verificado 12 horas antes (**Figura 4.4a**). Conforme os valores de temperatura nos campos em 500 hPa, o declínio foi de $-9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para $-12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ neste período.

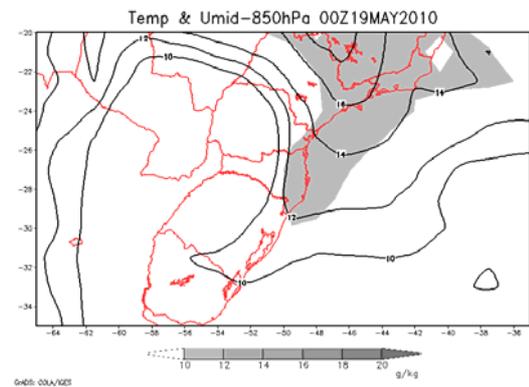
Os campos diagnósticos em 850 hPa apresentaram um bom indicativo do deslocamento e atuação do ciclone em SC. Às 12 UTC de 18/05, a presença deste sistema atmosférico, no oeste de SC, foi identificada na extensa área de movimento ascendente entre baixos (**Figura 4.3c**) e médios níveis (**Figura 4.4a**). Com o

deslocamento do ciclone na direção leste, elevados valores nos campos em 850 hPa passaram a ser identificados no litoral de SC, às 00UTC do dia 19/05, em uma área concentrada entre a GF e LS: advecção quente de $1,6 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (**Figura 4.3d**) e *omega* de $-1,2 \text{ Pa s}^{-1}$ (**Figura 4.4b**).

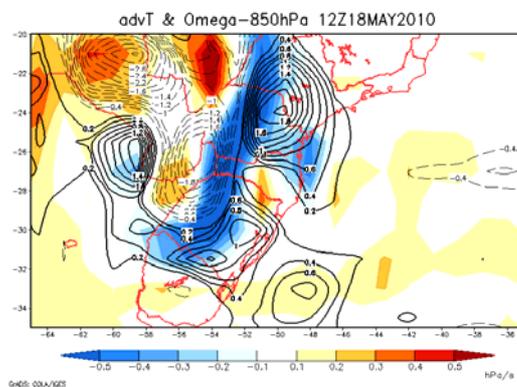
Neste evento, a chuva atingiu os diversos municípios em todo o litoral de SC, sendo mais intensa entre a GF e 100 km ao sul. O registro do dia 19/05 foi de 253 mm dia^{-1} na GF (**Tabela 3.1**). Em município próximo, o total diário chegou a 284,5 mm, e a 100 km de distância, em 100 mm (**ANEXO II**). Nas demais áreas do litoral catarinense, incluindo o LN, os totais diários ficaram entre 20-50 mm. Doze horas antes do início da chuva intensa (12 UTC de 18/05), valores concentrados em 850 hPa, de advecção quente ($0,6 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e movimento ascendente ($-0,4 \text{ Pa s}^{-1}$), foram observados na área marítima do LN (**Figura 4.3c**), na mesma região de ar mais úmido no litoral com valores de 10 g kg^{-1} (**Figura 4.3a**).



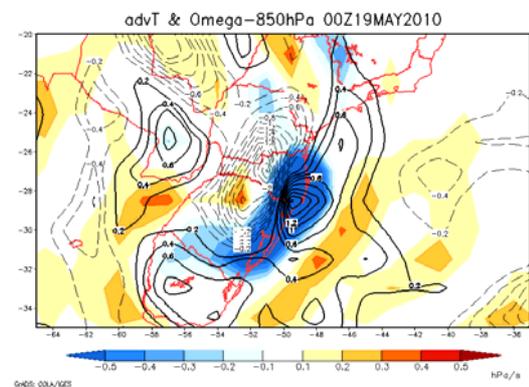
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3. Campos em 850 hPa, em 18/05/2010-12 UTC e 19/05/2010-00 UTC: (a, b) temperatura (intervalo de contorno de 2 °C) e umidade específica (hachurado em intervalo de 2 g kg⁻¹ e iniciando em 10 g kg⁻¹); (c, d) advecção de temperatura (X 10⁻⁴ °C m⁻² s⁻¹, intervalo de 0,2 e iniciando em 0,2) e omega (hachurado em intervalo de 0,1 Pa s⁻¹ e iniciando em 0,1 Pa s⁻¹). Positivo em linha sólida e negativo em linha tracejada (Fonte: ECMWF).

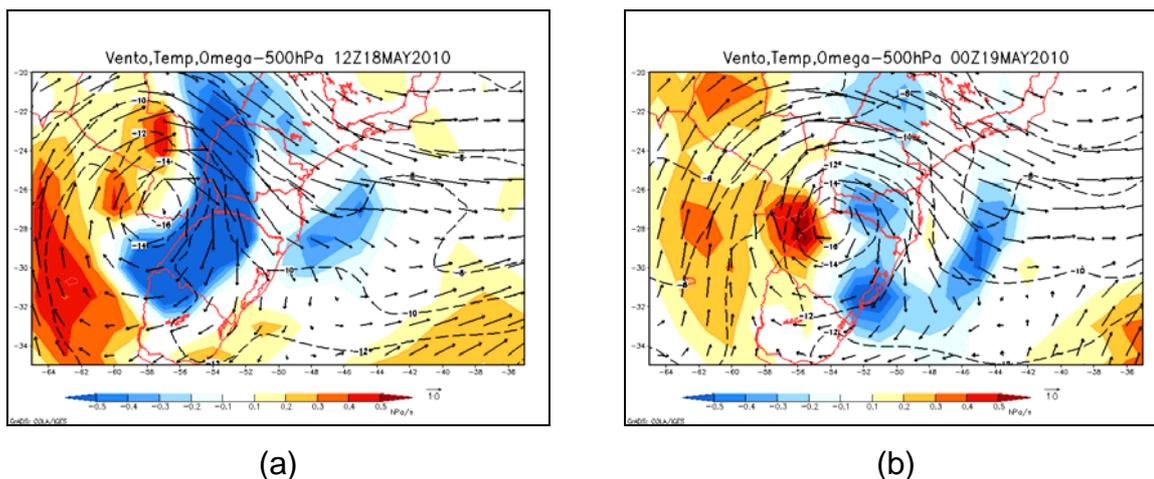


Figura 4.4. Campos de temperatura (intervalo de contorno de 2 °C); omega (hachurado em intervalo de 0,1 Pa s⁻¹ e iniciando em 0,1 Pa s⁻¹) e vento (m s⁻¹) em 500 hPa, em (a) 18/05/2010-12 UTC e (b) 19/05/2010-00 UTC (Fonte: ECMWF).

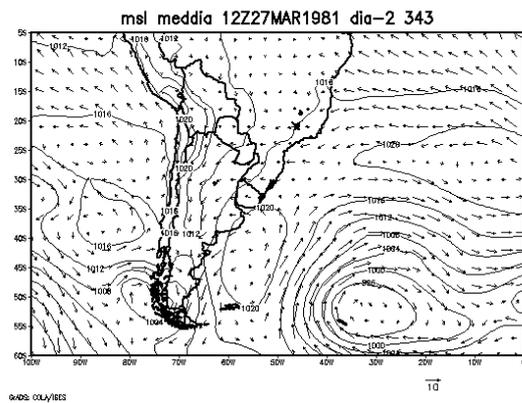
4.2 – GRUPO G2: MARÇO/1981, FEVEREIRO/1990, NOVEMBRO/1991 E FEVEREIRO/2001.

- vento sudeste-leste no pós-frontal (um dia)
- cavados de onda curta com inclinação nordeste-sudoeste

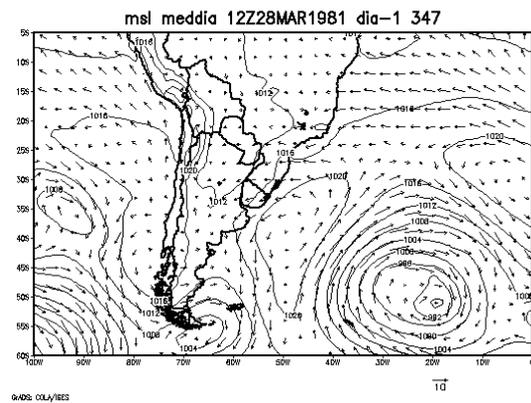
Estes casos ocorreram entre o final da primavera e início do outono, de novembro a março. O registro da precipitação intensa é verificado em um período de 24 horas (**Tabela 3.1**), totalizando cerca de 150 mm, em 1981 e 1990, e aproximadamente 300-400 mm em 1991 e 2001. A chuva tem início após uma passagem frontal no litoral de SC, a qual pode ser observada nos campos médios de PNMM e vento a 10 m, apresentados nas **Figuras 4.5a, 4.5c, 4.5e, 4.5g**, para cada um dos quatro casos. Somente para 2001 foi observada chuva intensa neste período (**Figura 4.5g**). O fluxo de vento na costa de SC passa a predominar de sudeste a leste, no pós-frontal, em associação à circulação proveniente do anticiclone na retaguarda da frente fria. Este sistema de alta pressão posiciona-se no Atlântico Sul com centro próximo do litoral da Argentina. No dia seguinte à passagem frontal, nos campos médios do período de ocorrência de chuva intensa na GF (**Figuras 4.5b, 4.5d, 4.5f, 4.5h**), observa-se o lento deslocamento do anticiclone migratório, ainda

posicionado próximo da área continental, em torno de 45-35°S e 50°W. Com exceção de 2001, nos demais casos um ciclone é verificado no mar, em torno de 20°W, em associação ao sistema frontal. Entre ambos os horários da **Figura 4.5**, a circulação entre um cavado que se aprofunda no litoral de São Paulo (25-20°S) e o anticiclone no mar posicionado mais ao sul, favorece um escoamento de leste direcionado à costa de SC. Em latitudes acima de 20°S, a borda do anticiclone subtropical do Atlântico Sul posiciona-se próximo da costa brasileira.

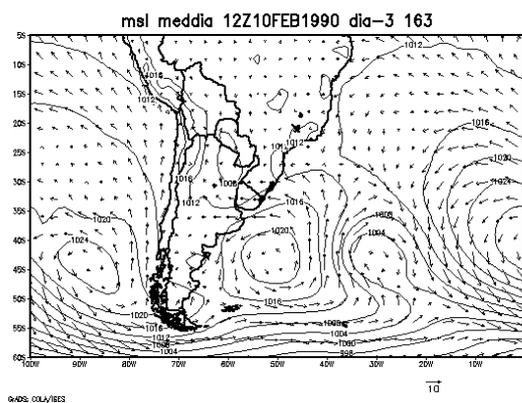
Os campos em 500 hPa, dos eventos do grupo G2, são apresentados para o horário aproximado de início da chuva intensa (**Figuras 4.6a, 4.6c, 4.6e, 4.6g**) e 24 horas depois (**4.6b, 4.6d, 4.6f, 4.6h**). Uma extensa área de alta pressão domina a costa do Brasil e o escoamento de oeste é verificado em latitudes acima de 30°S. O cavado em médios níveis, associado ao sistema frontal no mar, pode ser observado em torno de 30°W, em ambos os horários. Cavados de onda curta cruzam os Andes na altura do norte da Argentina, perdendo intensidade e inserindo-se no escoamento de oeste em latitudes acima de 30°S. Baixos valores de advecção de vorticidade relativa em 500 hPa, inferiores a $-1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, são verificados em associação a estes sistemas. Somente no caso de 1981 (**Figuras 4.6a e 4.6b**), o cavado de onda curta avança no Sul do Brasil, em direção ao litoral de SC, com inclinação nordeste-sudoeste. Entre ambos os horários da **Figura 4.6**, observa-se o predomínio do anticiclone subtropical na costa do Brasil, em latitudes mais baixas, como verificado nos campos de PNMM da **Figura 4.5**, e uma crista na costa Sul do Brasil, associada ao anticiclone migratório.



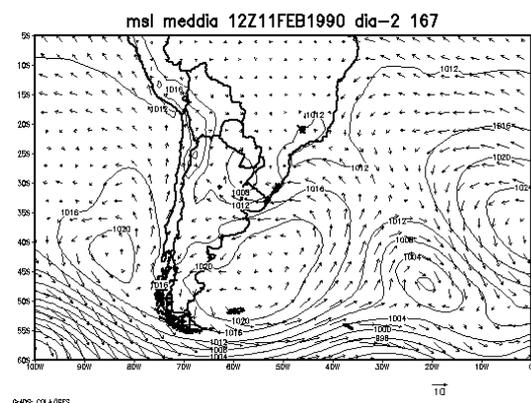
(a)



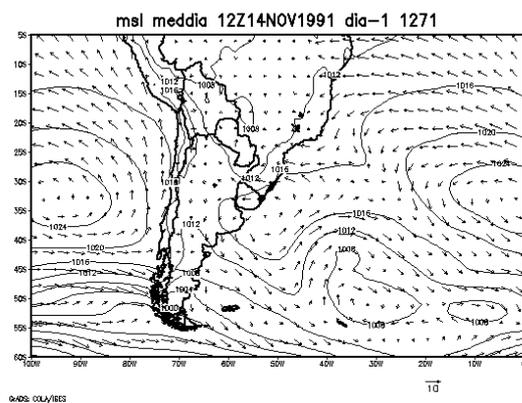
(b)



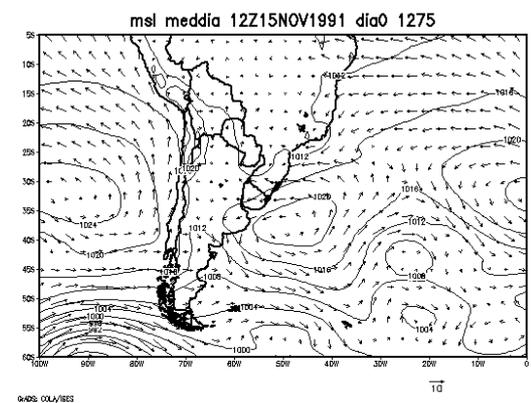
(c)



(d)

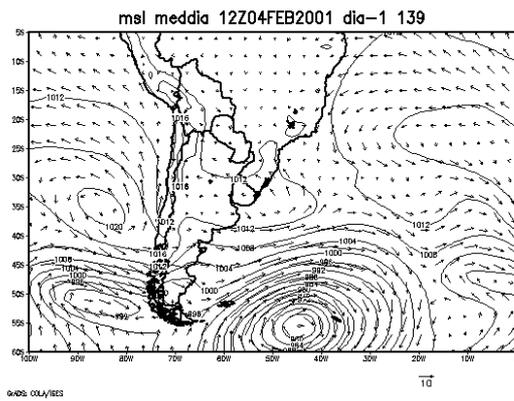


(e)

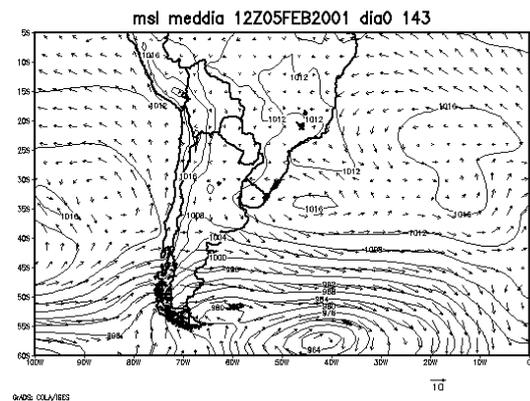


(f)

Figura 4.5. Campo médio da pressão ao nível médio do mar (intervalo de contorno de 4 hPa) e do vento a 10 metros de altura (m s^{-1}), nas últimas 24 horas, em: (a, b) 27 e 28/03/1981-12 UTC; (c, d) 10 e 11/02/1990-12 UTC; (e, f) 14 e 15/11/1991-12 UTC; (g, h) 04 e 05/02/2001-12 UTC (Fonte: ECMWF).

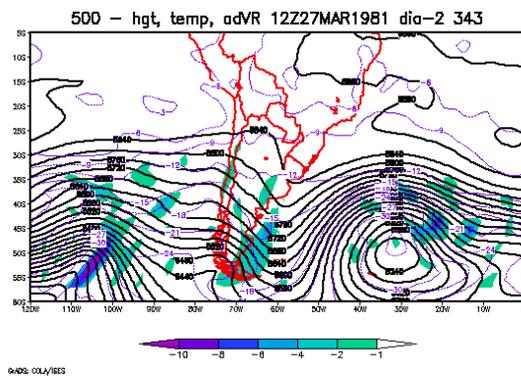


(g)

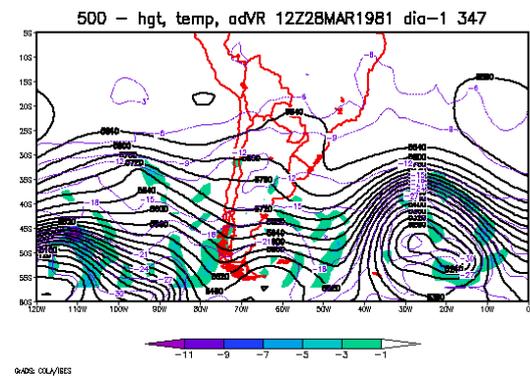


(h)

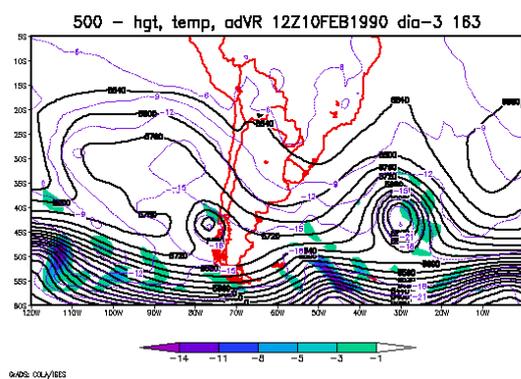
Conclusão da **Figura 4.5.**



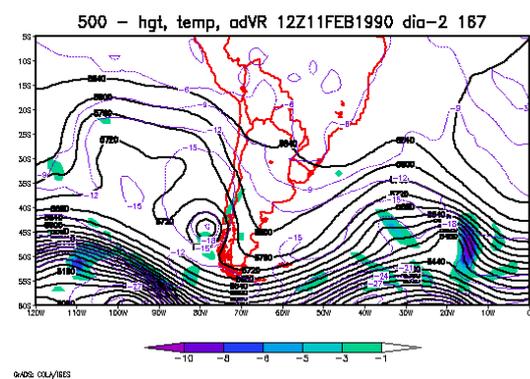
(a)



(b)

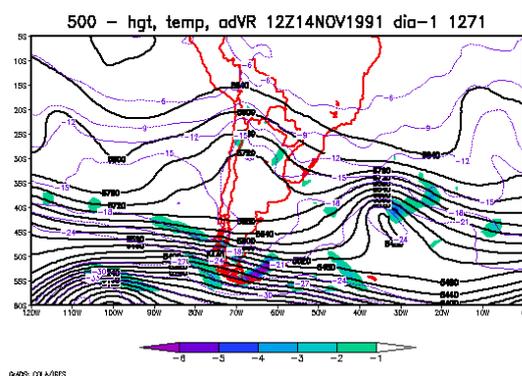


(c)

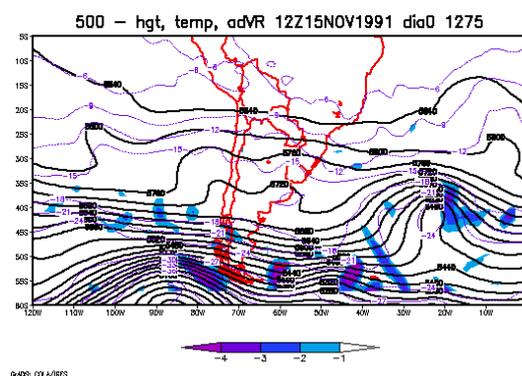


(d)

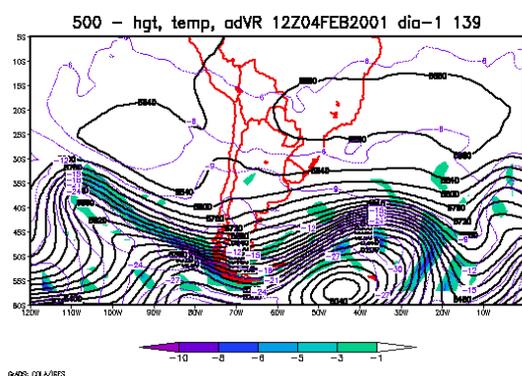
Figura 4.6. Altura geopotencial (intervalo de contorno de 30 mgp) e advecção de vorticidade relativa negativa ($\times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, hachurado em intervalo de 1 e iniciando em -1) em 500 hPa: (a, b) 27 e 28/03/1981-12 UTC; (c, d) 10 e 11/02/1990-12 UTC; (e, f) 14 e 15/11/1991-12 UTC; (g, h) 04 e 05/02/2001-12 UTC (Fonte: ECMWF).



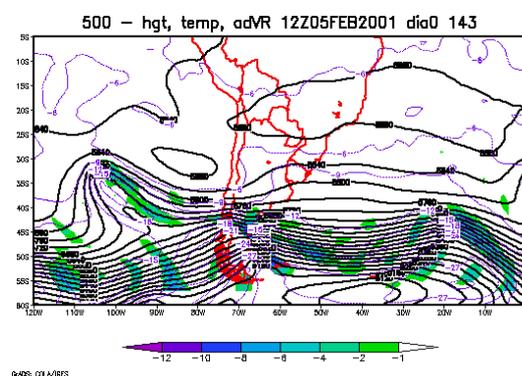
(e)



(f)



(g)



(h)

Conclusão da **Figura 4.6**.

4.2.1 – O caso de fevereiro/2001

Durante a ocorrência da chuva intensa na GF, entre 00-18 UTC do dia 04/02 (**Figuras 4.7a e 4.7c**, para 00 UTC e 06 UTC), horários posteriores à passagem frontal, o litoral de SC divide uma região de crista no continente e de baixa pressão no mar, posicionada na altura do litoral de São Paulo, em 24-22°S. Neste período, os ventos são mais intensos na parte litorânea da GF ao LS, onde o fluxo predominante é de sudeste. Às 00 UTC do dia 04/02 (**Figura 4.7a**), a velocidade do vento na área marítima do LS chega a 8-10 m s⁻¹. Nos horários seguintes, dentro do período da chuva intensa (**Figura 4.7e**, para 06 UTC), a velocidade do vento foi inferior a 8 m s⁻¹ no litoral de SC e área marítima adjacente.

O vento em 850 hPa, no litoral da GF e LS, às 00 UTC do dia 04 (**Figura 4.7b**), também apresentou direção sudeste, como verificado no vento a 10 m neste

mesmo horário (**Figura 4.7a**), porém com intensidade menor, inferior a 8 m s^{-1} , sendo ainda mais fraco às 06 UTC (**Figura 4.7d**). Em 850 hPa, os ventos mais intensos são observados no escoamento de noroeste no Paraguai e oeste do Paraná, direcionado ao Estado de Santa Catarina, favorecendo o transporte de umidade das regiões tropicais. Esta configuração aparece especialmente às 06 UTC (**Figura 4.7d**) e 12 UTC (figura não mostrada), horários de ocorrência da chuva intensa.

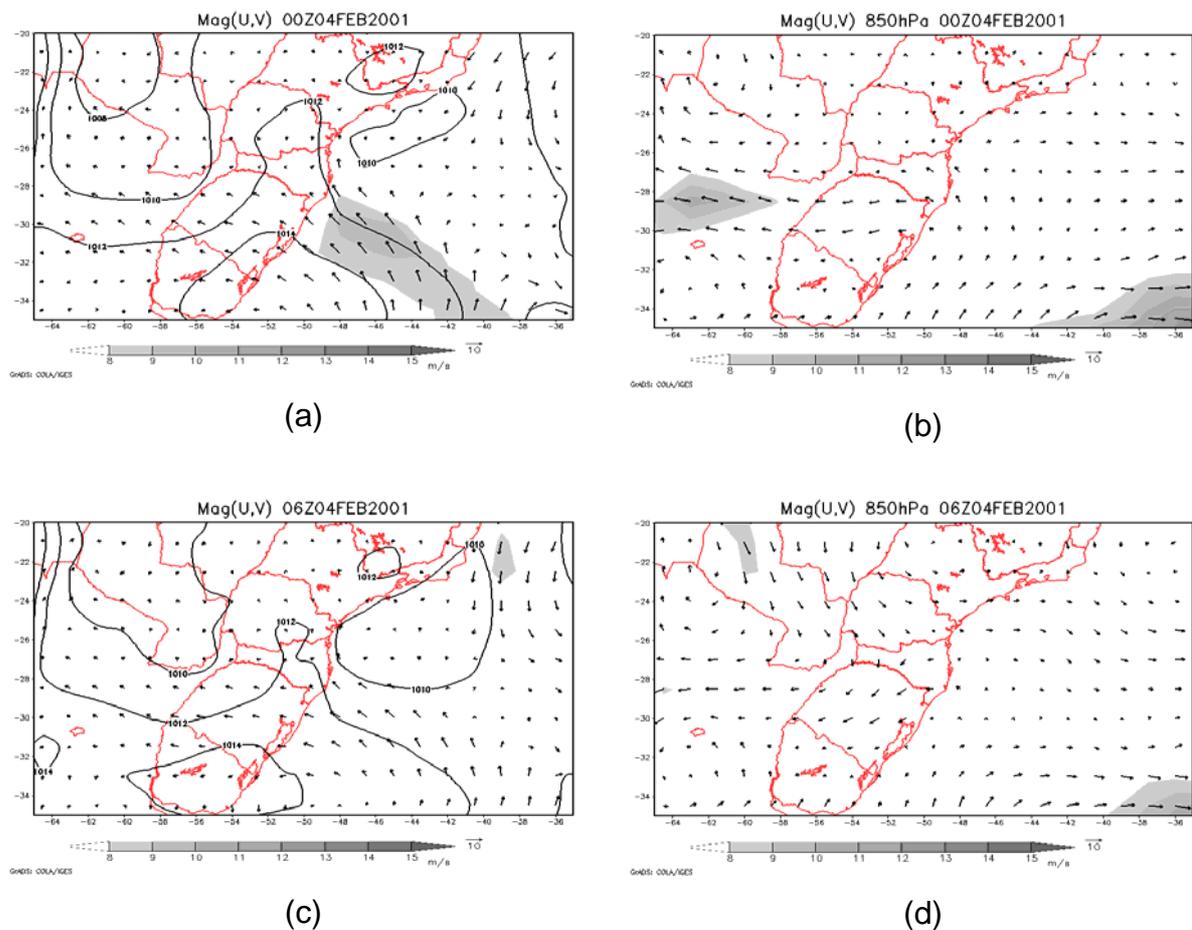


Figura 4.7. Campos de vento a 10 metros de altura (m s^{-1}) e em 850 hPa (m s^{-1}): (a, b) 03/02/2001-18 UTC; (c, d) 04/02/2001-00 UTC; (e, f) 04/02/2001-06 UTC. Velocidade do vento acima de 8 m s^{-1} (hachurado em intervalo de 1 m s^{-1}) (Fonte: ECMWF).

Em todo o Estado de Santa Catarina, os valores de umidade específica em 850 hPa permaneceram de $12\text{-}14 \text{ g kg}^{-1}$ no dia da passagem frontal e dia de ocorrência da chuva intensa, respectivamente 03 e 04/02 (**Figuras 4.8a e 4.8b**, para 12 UTC). Valores acima de 10 g kg^{-1} são observados no Sul e Sudeste do Brasil, em

latitudes inferiores a 32°S, onde predomina uma extensa área de baixa pressão nos casos do grupo G2 (**Figura 4.5**). Ainda em 850 hPa, nas **Figuras 4.8a e 4.8b**, observa-se temperatura de 18-20 °C no dia 03/02, em todo o litoral de SC, diminuindo para 16-18 °C no dia 04/02, com a entrada do anticiclone no pós-frontal. A temperatura em 500 hPa manteve-se com valores de -4 a -6 °C nos dias 03 e 04/02 (**Figuras 4.9c e 4.9d**), quando uma atmosfera de baixa baroclinia predominou no Sul do Brasil.

Nas **Figuras 4.9a e 4.9b**, dos campos de advecção de temperatura em 850 hPa, às 18 UTC do dia 03 e 00 UTC do dia 04, é possível identificar a presença do sistema frontal no mar, dividindo as áreas de advecção quente e advecção fria associada à presença do anticiclone na retaguarda frontal. A advecção fria com baixos valores ($-0,2 \times 10^{-4} \text{ °C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) no litoral de SC, na **Figura 4.9b**, está associada à condição de pós-frontal, quando uma crista proveniente do anticiclone no mar passa a atuar na região (**Figura 4.7a**). Em ambos os horários das **Figuras 4.9a e 4.9b**, período do pós-frontal e de algumas horas antes do início da chuva intensa (**Tabela 3.1**), observa-se movimento ascendente em 850 hPa no litoral de SC, com valores acima de -0,2 Pa/s entre a GF e LS. Às 18 UTC do dia 03 (**Figura 4.9a**), destaca-se um núcleo em torno de -0,5 Pa/s no LS. Nos campos em 500 hPa, no entanto, não há indicativo de movimento ascendente na área da GF ao LS. Na **Figura 4.9c**, o movimento ascendente é verificado no litoral de São Paulo, área de atuação da baixa pressão em superfície (**Figura 4.7a**). Às 00 UTC do dia 04 (**Figura 4.9d**), fraco movimento ascendente (-0,1 a -0,2 Pa/s) é observado da GF ao LN.

Neste evento de fevereiro de 2001, foram 323,10 mm na GF entre os dias 04 e 05 (**Tabela 3.1**). Registros de 70-80 mm dia⁻¹ foram verificados em estações próximas da GF, em direção ao LS (**ANEXO II**). Nas demais áreas do litoral de SC, a chuva nesses dias foi inferior a 20 mm dia⁻¹ (**ANEXO I**).

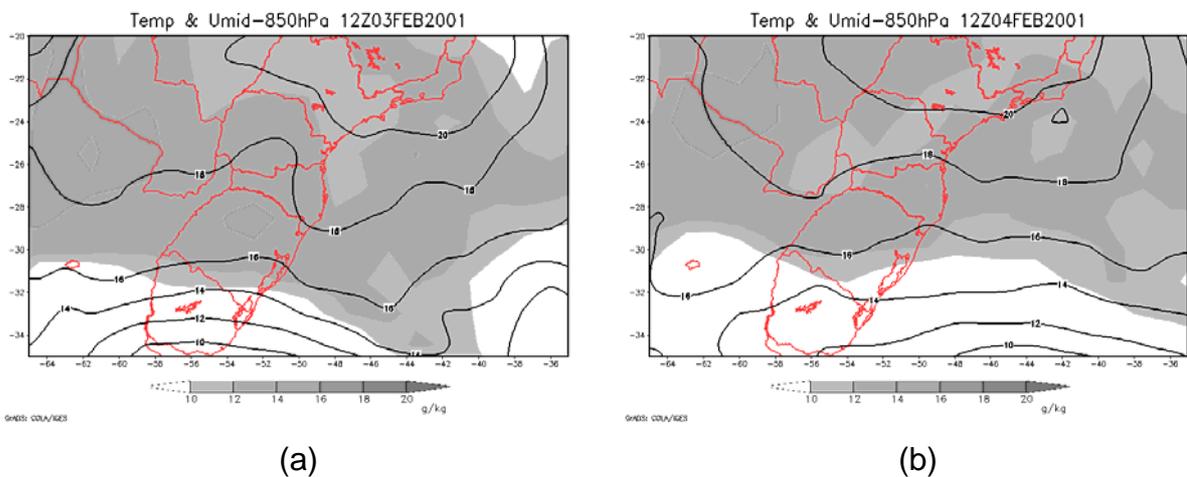


Figura 4.8. Campos em 850 hPa de temperatura (intervalo de contorno de 2 °C) e umidade específica (hachurado em intervalo de 2 g kg⁻¹ e iniciando em 10 g kg⁻¹) em (a) 03/02/2001-12 UTC e (b) 04/02/2001-12 UTC (Fonte: ECMWF).

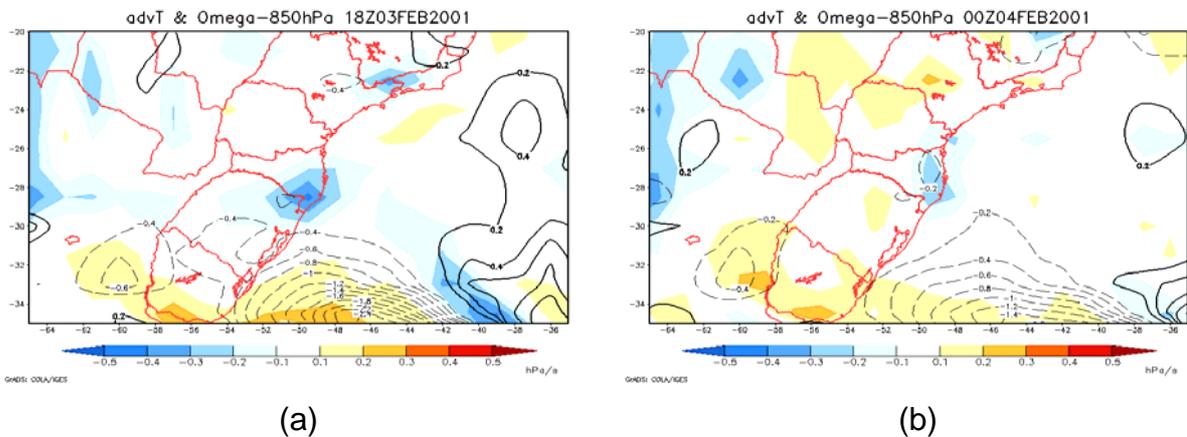
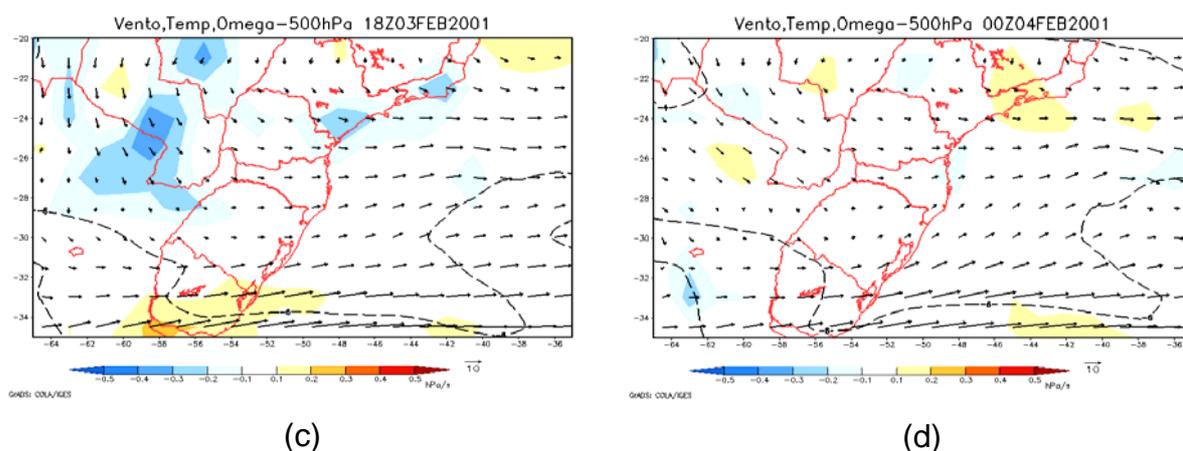


Figura 4.9. Campos em 03/02/2001-18 UTC e 04/02/2001-00 UTC, para (a,b) advecção de temperatura ($\times 10^{-4}$ °C m⁻² s⁻¹, intervalo de 0,2 e iniciando em 0,2, positivo em linha sólida e negativo em linha tracejada) e omega em 850 hPa (hachurado em intervalo de 0,1 Pa s⁻¹ e iniciando em 0,1 Pa s⁻¹); temperatura (intervalo de contorno de 2 °C), omega (hachurado em intervalo de 0,1 Pa s⁻¹ e iniciando em 0,1 Pa s⁻¹) e vento (m s⁻¹) em 500 hPa (Fonte: ECMWF).



Conclusão da **Figura 4.9**.

4.3 – GRUPO G3: DEZEMBRO/1995, JANEIRO/2008, DEZEMBRO/2008, ABRIL/2009.

- ciclone em superfície no litoral sudeste do Brasil
- *cutoff low* no Sul do Brasil em 3 dias

Estes casos ocorreram nas duas últimas décadas do período analisado (1969-2010) e concentraram-se entre o ano de 2008 e primeiro semestre de 2009. Exceto para abril de 2009, quando a chuva ficou distribuída em quatro dias, nos demais eventos, registrados em meses de verão, a chuva concentrou-se em um dia (**Tabela 3.1**). A precipitação mais intensa em 24 horas foi de aproximadamente 300 mm, em 1995 e jan/2008, quando o total em cinco dias ficou em cerca de 400 mm.

Nos campos médios de PNMM e de vento a 10 m das **Figuras 4.10a, 4.10c, 4.10e, 4.10g**, observa-se uma frente fria deslocando-se rapidamente no mar, altura do litoral Sul do Brasil. Neste dia da passagem frontal, como verificado no grupo G2, não houve registro de chuva intensa no litoral de SC. Os campos médios para dois dias depois são apresentados nas **Figuras 4.10b, 4.10d, 4.10f, 4.10h**, e correspondem ao período da chuva intensa na GF. Exceto para dezembro de 2008, nos demais casos a chuva intensa teve início no dia seguinte ao da passagem frontal.

No período de 48 horas entre os dois dias que representam cada um dos

eventos da **Figura 4.10**, observa-se que o sistema de alta pressão no Atlântico Sul, na retaguarda frontal, desloca-se zonalmente em direção ao Oceano com centro em torno de 40-35°S, enquanto um cavado em superfície aprofunda-se no litoral Sudeste do Brasil, entre 24-22°S. Em relação ao grupo G2, nestes casos do grupo G3, o fluxo de leste, no litoral de SC, permanece em um período mais prolongado no pós-frontal, entre dois a três dias. Uma extensa área de baixa pressão predomina no centro-sul do Brasil, com um cavado pronunciado no continente, na direção do interior de SC e RS (56°W). Nos quatro eventos analisados no grupo G3, em torno de 24 horas depois da ocorrência da chuva intensa (figuras não mostradas), observa-se a formação/intensificação de um ciclone em superfície, na região do cavado no mar entre 20-25°S, litoral de São Paulo.

Em médios níveis, uma baixa pressão despreendeu-se do escoamento zonal (*cutoff low*) algumas horas antes do início da chuva intensa (**Figuras 4.11a, 4.11c, 4.11e, 4.11g**), posicionando-se no Sul do Brasil ou áreas vizinhas. Os baixos valores de advecção de vorticidade relativa em 500 hPa, verificados na **Figura 4.11**, indicam o lento deslocamento ou estacionaridade destes sistemas. Quando se encerra o período da chuva (**Figuras 4.11b, 4.11d, 4.11f, 4.11h**), o ciclone ainda permanece nestas regiões.

No caso de 1995, a baixa pressão é observada no continente, em 27°S/60°W, no sul do Paraguai e oeste do Rio Grande do Sul, nos dias 23 e 25/12 (**Figuras 4.11a-b**), mantendo-se nesta área entre estes dias, durante o período da chuva intensa. Advecção de vorticidade relativa é observada a oeste do ciclone no dia anterior à ocorrência da chuva (**Figura 4.11a**). Ainda se observa uma atuação da alta subtropical do Atlântico Sul próximo da costa brasileira em latitudes inferiores a 20°S. Nos outros três casos, jan/2008, dez/2008 e 2009 (**Figuras 4.11c-h**), a baixa pressão em médios níveis está localizada no Sul do Brasil, embebida em um cavado de onda longa, e seu setor nordeste afeta o litoral de SC no período da chuva intensa.

Em jan/2008, como em dez/1995, o ciclone permanece semiestacionário por cerca de 3 dias, entre 30/01 e 01/02, um dia antes da chuva intensa e um dia depois (**Figuras 4.11c-d**), em posição de dipolo com o anticiclone/crista na Argentina, em 40-35°S. Em ambos os eventos verifica-se um eixo do cavado, no qual o ciclone está embebido, direcionado ao litoral de SC (**Figuras 4.11a e 4.11d**).

Em dez/2008 e abr/2009, a chuva intensa tem início a partir do desprendimento do ciclone, observado nas **Figuras 4.11e e 4.11g**. Nestes casos, o sistema segue trajetória conforme a advecção de vorticidade nas **Figuras 4.11f e 4.11h**. Ou seja, a baixa pressão no caso dez/2008 também apresenta um deslocamento leste-oeste, em direção ao continente, e ainda mais acentuado (figuras não mostradas) do que o ocorrido em dez/1995 (**Figuras 4.11a-b**).

Em todos estes eventos do grupo G3, o cavado, no qual o ciclone em médios níveis está embebido, cruzou os Andes nas ondas de oeste em latitudes de 40-35°S, deslocando-se no litoral da Argentina até seu desprendimento na altura do Sul do Brasil.

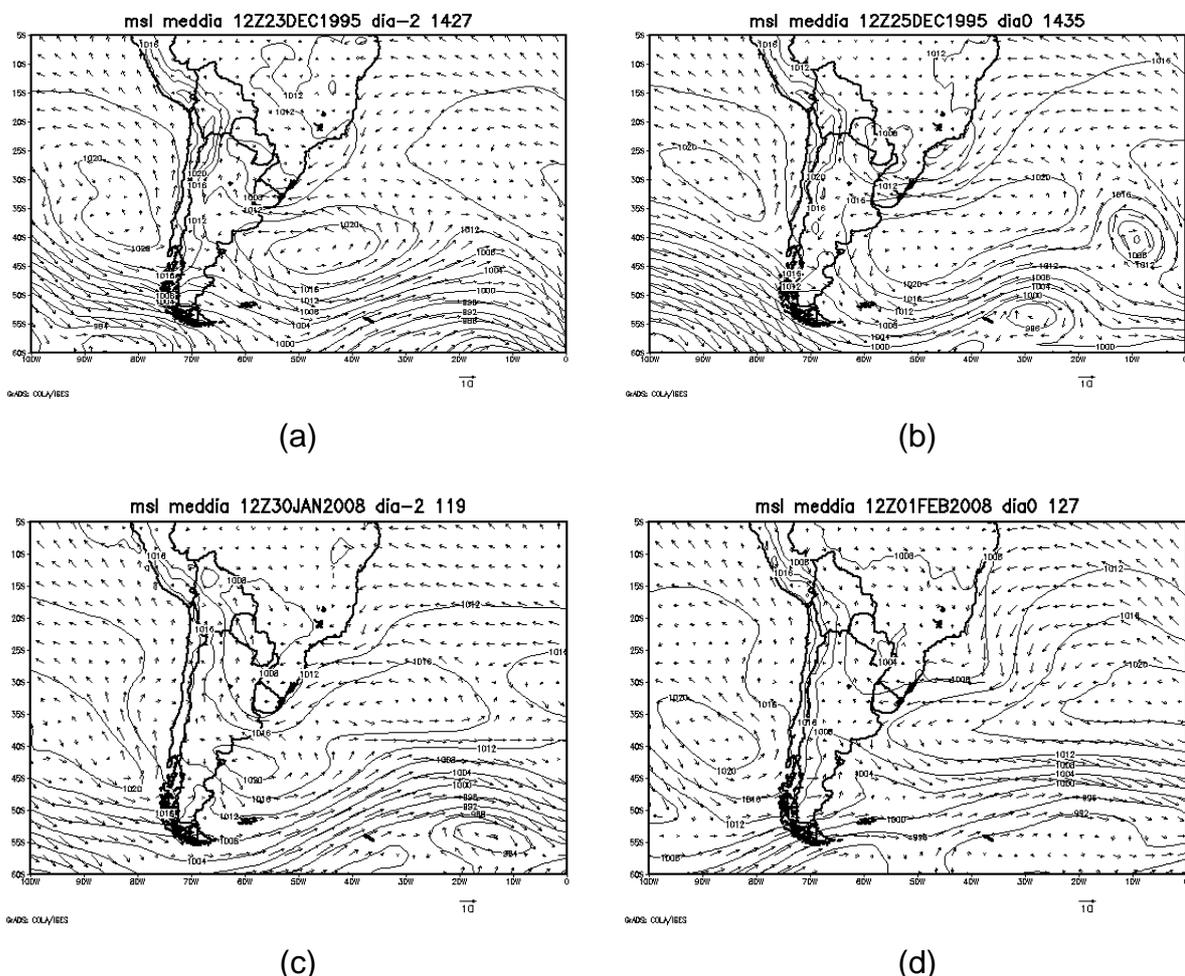
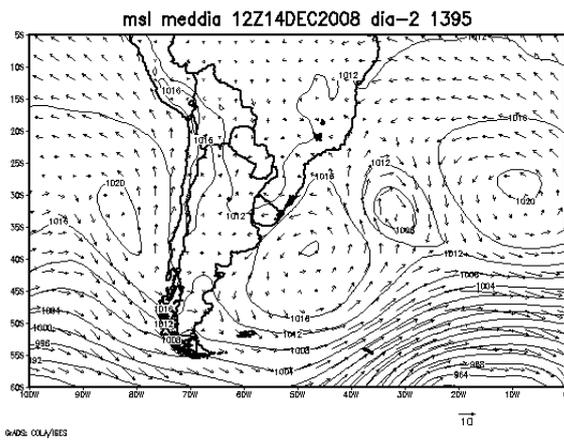
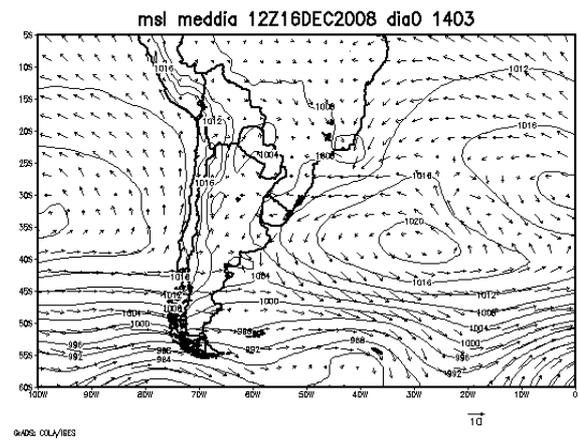


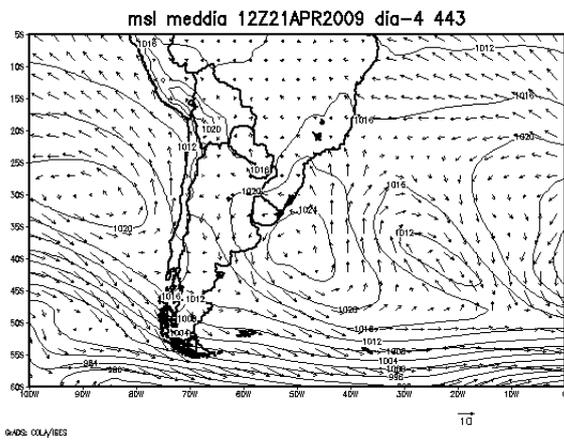
Figura 4.10. Campo médio da pressão ao nível médio do mar (intervalo de contorno de 4 hPa) e do vento a 10 metros de altura (m s^{-1}), nas últimas 24 horas: (a, b) 23 e 25/12/1995-12 UTC; (c, d) 30/01 e 01/02/2008-12 UTC; (e, f) 14 e 16/12/2008-12 UTC; (g, h) 21 e 23/04/2009-12 UTC (Fonte: ECMWF).



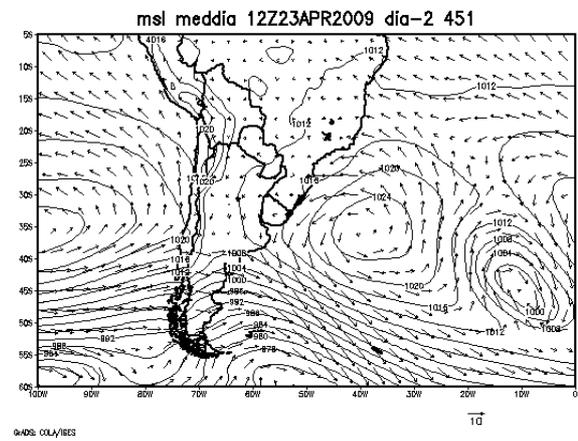
(e)



(f)



(g)



(h)

Conclusão da **Figura 4.10.**

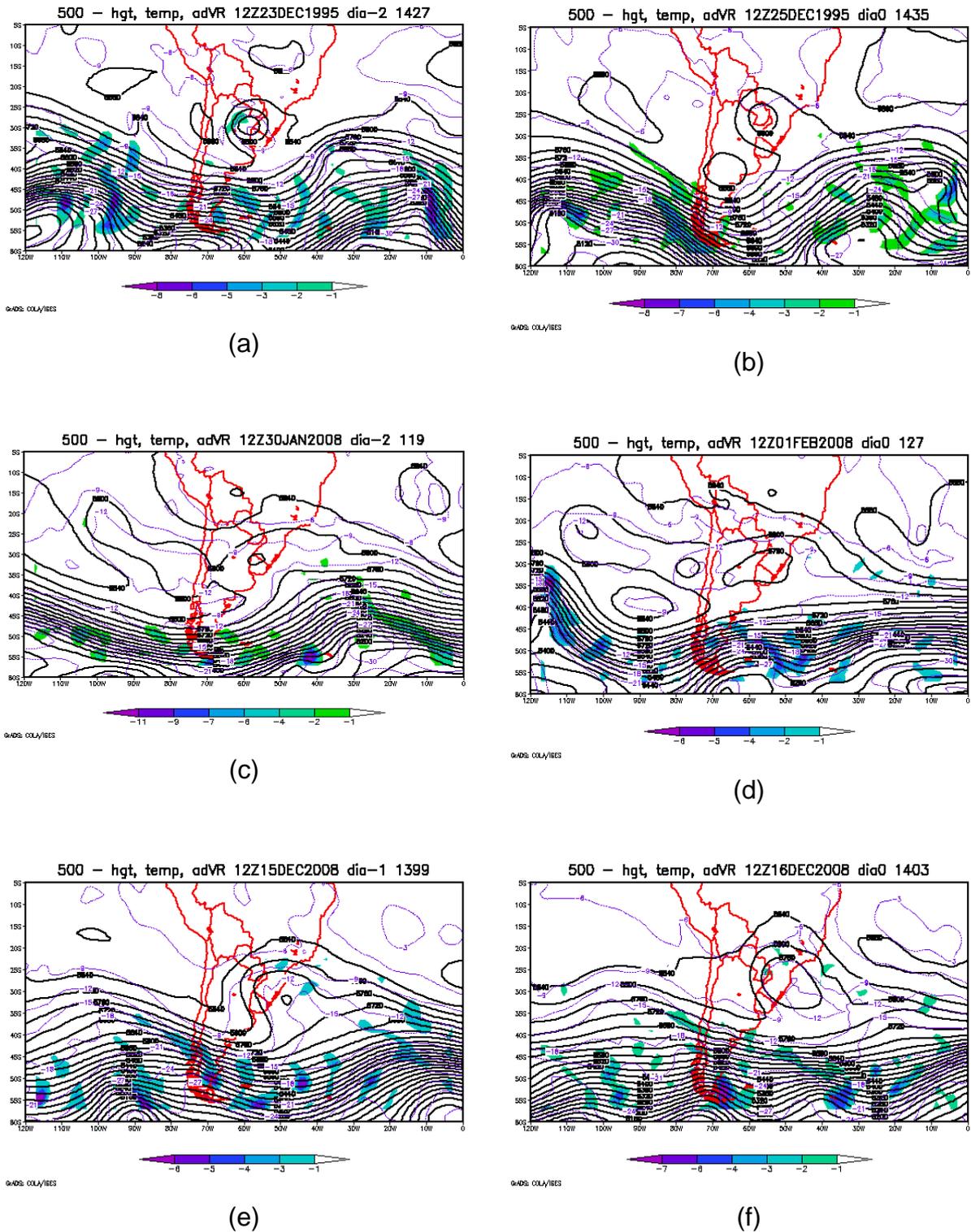
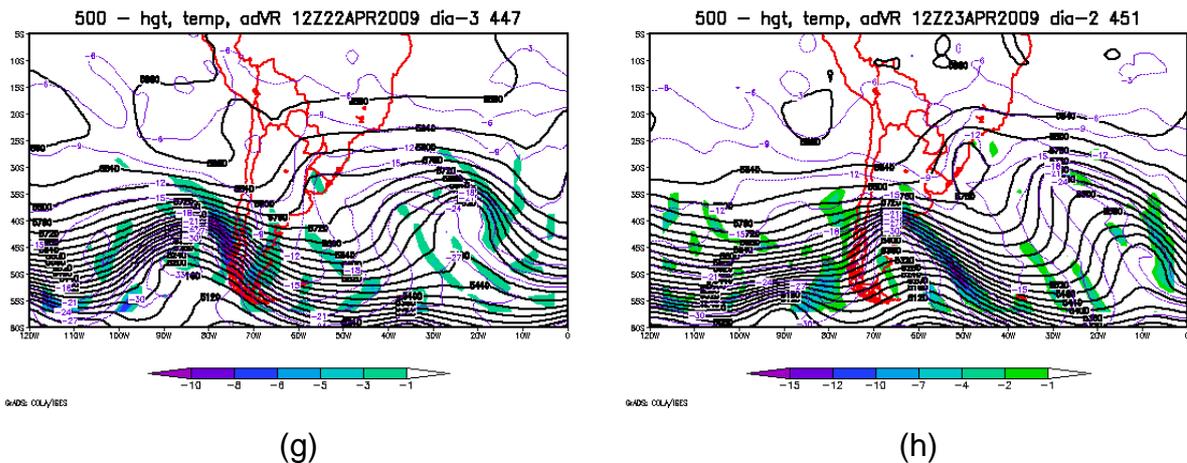


Figura 4.11. Altura geopotencial (intervalo de contorno de 30 mgp) e advecção de vorticidade relativa negativa ($\times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, hachurado em intervalo de 1 e iniciando em -1) em 500 hPa: (a, b) 23 e 25/12/1995-12 UTC; (c, d) 30/01 e 01/02/2008-12 UTC; (e, f) 15 e 16/12/2008-12 UTC; (g, h) 22 e 23/04/2009-12 UTC (Fonte: ECMWF).



Conclusão da **Figura 4.11**.

4.3.1 – O caso de janeiro/2008

Nos campos de PNMM do dia da chuva intensa (**Tabela 3.1**), em 31/01 (**Figura 4.12a**) e dia anterior, 30/01 (**Figura 4.12b**), o litoral de SC divide uma região de crista no continente e de cavado no mar. Neste período, o vento a 10 m, aproximadamente de leste, assim como o vento em 850 hPa (**Figuras 4.12c e 4.12d**), de leste/nordeste, permaneceu em uma extensa área de mar entre a costa de SC e longitudes de 40°W. Em ambos os níveis, a intensidade do vento aumentou de 6-8 m s⁻¹ no dia 30/01, para 8-10 m s⁻¹ no dia 31/01, devido à intensificação do ciclone no mar (25-20°S) com deslocamento na direção sul. Às 12 UTC do dia 31/01, a circulação em baixos níveis favoreceu um transporte de ar mais aquecido e úmido para o LN e GF, como indicado nos campos em 850 hPa da **Figura 4.12f**. Neste dia, os valores de temperatura e umidade específica na região foram de 14-16 °C e 12-14 g kg⁻¹, respectivamente. Esta condição não foi observada no dia 30/01, 12 UTC (**Figura 4.12e**), quando a entrada de ar quente e úmido ficou direcionada às áreas de baixa pressão no mar, em 25-20°S, e de baixa pressão no continente, em 55°W (**Figuras 4.12a e 4.12c**).

Em 850 hPa, advecção quente e movimento ascendente foram observados no litoral de SC no dia da chuva intensa, em 31/01 (**Figura 4.13**). Às 00 UTC (**Figura 4.13a**), esta região divide uma área de advecção quente no mar e de advecção fria no continente. Os maiores valores de advecção quente no litoral, de

$0,4-0,6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, são observados às 06 UTC e 12 UTC (**Figuras 4.13b e 4.13c**), mesmo intervalo de tempo de início da chuva intensa na GF, conforme a distribuição temporal da precipitação na **Figura 3.9a**. O movimento ascendente em 850 hPa, no dia 31/01 (**Figura 4.13**), é observado em uma área concentrada na GF e LN. Entre 00 UTC e 06 UTC (**Figuras 4.13a e 4.13b**), iniciou-se um aumento nos valores de *omega* na região (-0,3 a -0,4 Pa s⁻¹), chegando a -0,6 Pa s⁻¹ nos horários de maior pico de chuva, 12 UTC e 18 UTC (**Figuras 4.13c e 4.13d**).

Em todo o litoral de SC foi observada a ocorrência de chuva (**Anexo I**). Os totais diários mais elevados, porém, com valores acima de 100 mm (**Anexo II**), foram verificados nas áreas entre a latitude de 28°S (ao sul da GF) e o LN. Os totais diários acima de 150 mm ocorreram entre a GF e 100 km ao sul.

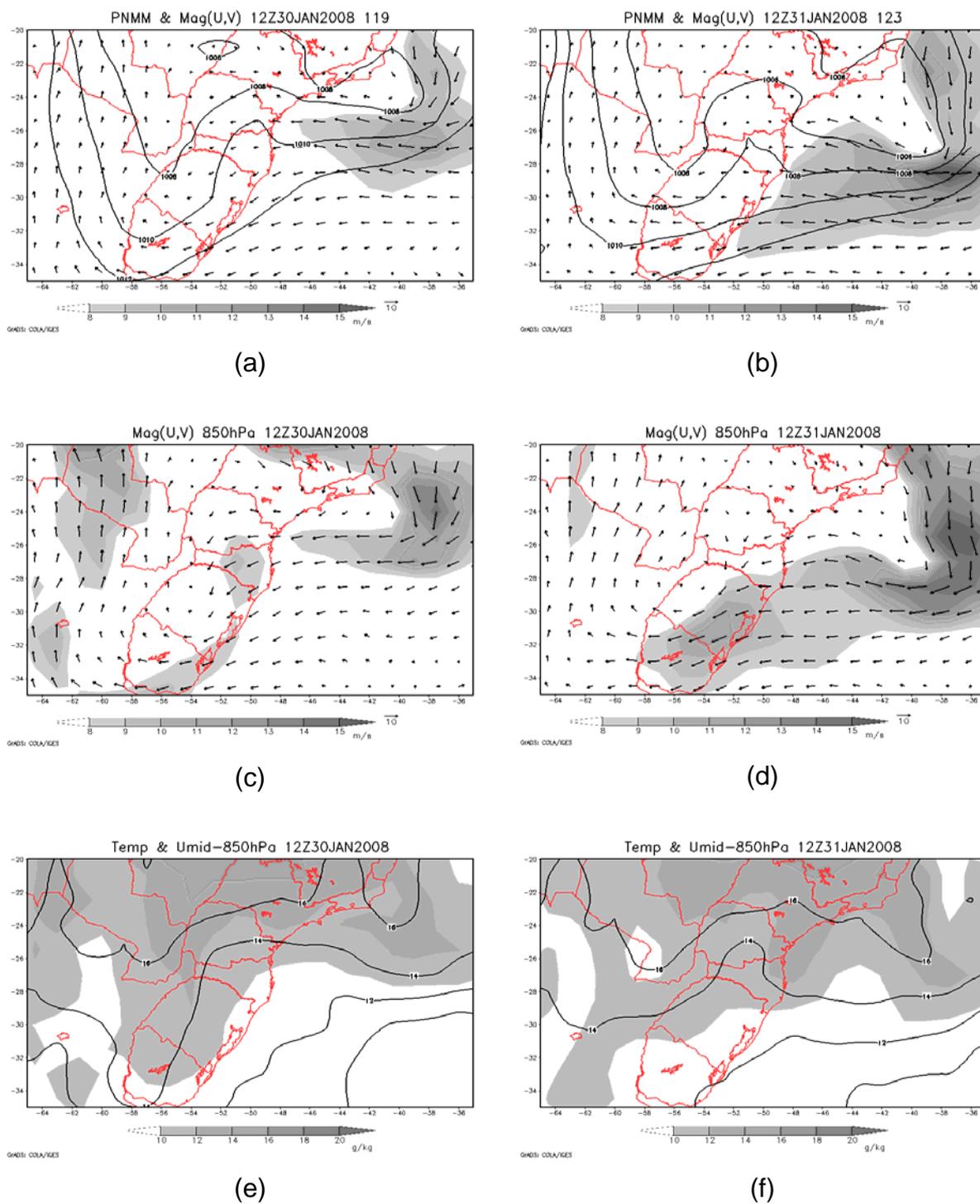


Figura 4.12. Campos em 30 e 31/01/2008-12 UTC: (a, b) vento a 10 metros de altura (m s^{-1}) e (c, d) em 850 hPa (m s^{-1}); (e, f) temperatura (intervalo de contorno de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$) e umidade específica (hachurado em intervalo de 2 g kg^{-1} e iniciando em 10 g kg^{-1}). Velocidade do vento acima de 8 m s^{-1} (hachurado em intervalo de 1 m s^{-1}) (Fonte: ECMWF).

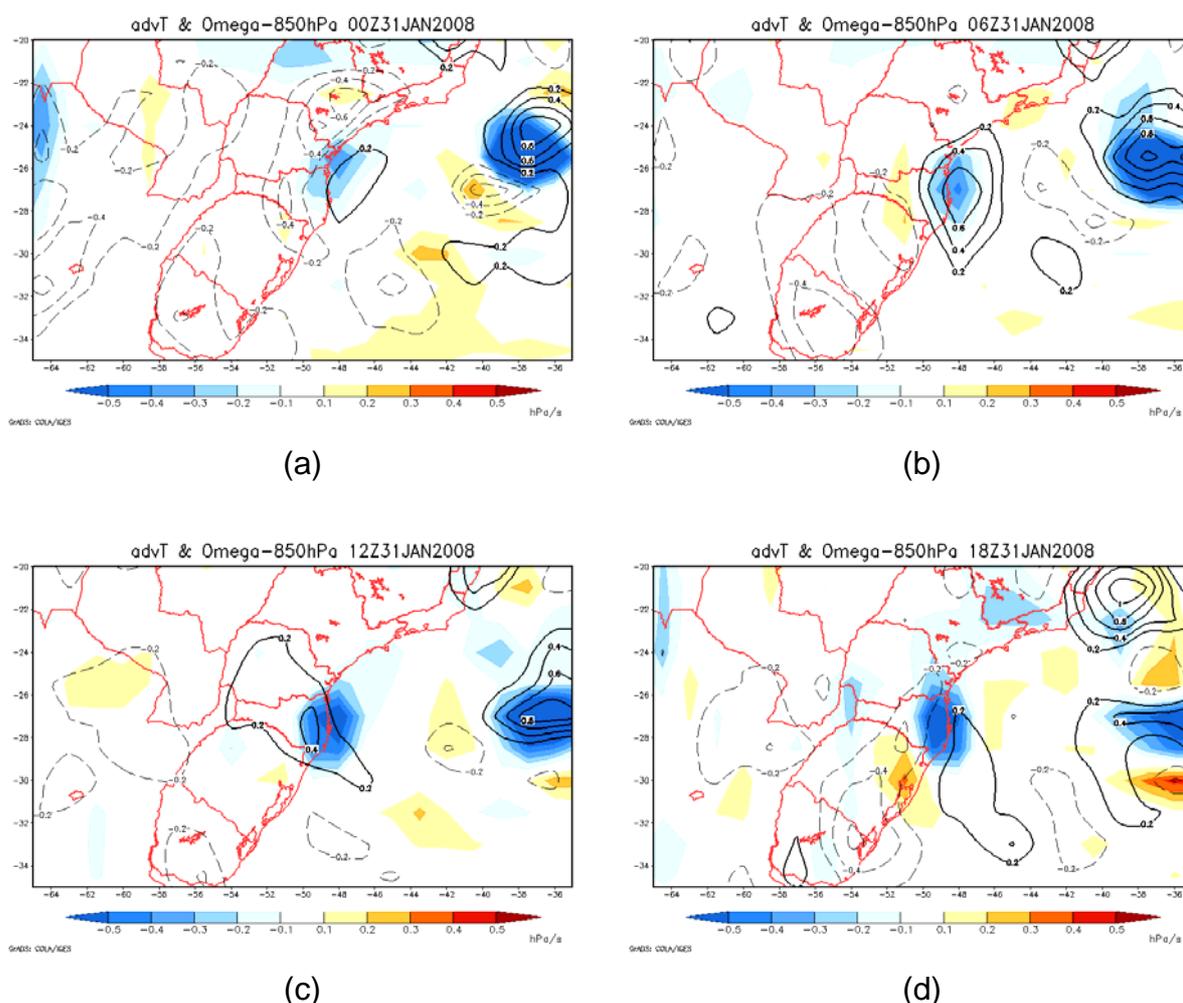


Figura 4.13. Campos de advecção de temperatura ($\times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, intervalo de 0,2 e iniciando em 0,2) e omega (hachurado em intervalo de 0,1 Pa s^{-1} e iniciando em 0,1 Pa s^{-1}), em 31/01/2008: (a) 00 UTC; (b) 06 UTC; (c) 12 UTC e (d) 18 UTC. Positivo em linha sólida e negativo em linha tracejada (Fonte: ECMWF).

Ainda no LN de SC, às 12 UTC do dia 31/01 observou-se convergência de umidade em 850 hPa (figura não mostrada) e movimento ascendente em 500 hPa (**Figura 4.14b**) em torno de $1,5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ e $-0,3 \text{ Pa s}^{-1}$, respectivamente. Estes valores, no entanto, foram duas vezes mais elevados no sul do Estado, a leste do ciclone observado nos campos de vento e temperatura em 500 hPa (**Figura 4.14b**), embebido em cavado com eixo inclinado no sentido nordeste-sudoeste (**Figura 4.11d**). Mesmo assim, os totais de chuva no LS foram inferiores a 100 mm dia^{-1} (**ANEXO I** e **ANEXO II**). Ainda na **Figuras 4.14**, verifica-se que a temperatura em

500 hPa permaneceu em torno de $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ nos dias 30 e 31/01, quando uma atmosfera de baixa baroclinia predominou no Sul do Brasil.

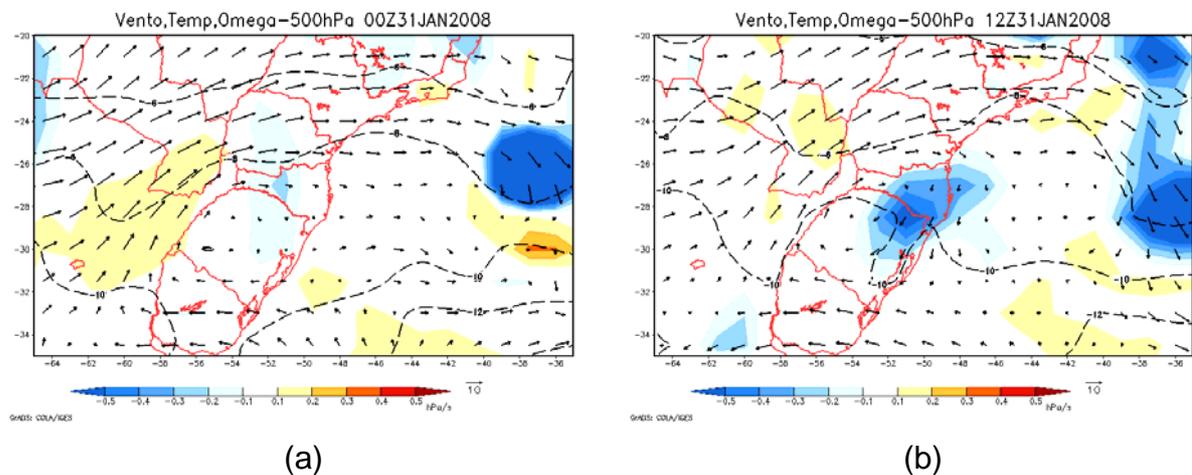


Figura 4.14. Campos de temperatura (intervalo de contorno de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$); omega (hachurado em intervalo de $0,1\text{ Pa s}^{-1}$ e iniciando em $0,1\text{ Pa s}^{-1}$) e vento (m s^{-1}) em 500 hPa, em 31/01/2008: (a) 00 UTC e (b) 12 UTC (Fonte: ECMWF).

4.4 – GRUPO G4: FEVEREIRO/1979, FEVEREIRO/1987, FEVEREIRO/1994, JANEIRO/2004, NOVEMBRO/2008.

- anticiclone em superfície estacionário no Atlântico Sul
- *cutoff low* estacionária no continente em $60^{\circ}\text{W}-27^{\circ}\text{S}$

A maior parte dos casos do grupo G4 ocorreu no verão, como em G3, mas em meses de fevereiro. A chuva intensa concentrou-se em 12 a 24 horas (**Tabela 3.1**). Exceto para 1994, nos demais eventos os totais em 12 horas ficaram em torno de 100 mm, menos elevados em relação aos casos anteriores. Os totais acumulados em cinco dias chegaram, no máximo, em torno de 270 mm (nov/2008). Em novembro/2008, a precipitação foi bem distribuída em três dias. Em 1987 e 2004, totais diários entre 20-40 mm contribuiriam para os elevados acumulados de 5 dias superiores a 200 mm.

Os campos médios de PNMM e vento a 10 m são apresentados para o dia de ocorrência da chuva intensa (**Figuras 4.15b, 4.15d, 4.15f, 4.15h**) e dias

anteriores (**Figuras 4.15a, 4.15c, 4.15e, 4.15g, 4.15i**). Nos casos de 1979, 1987 e 2008, as **Figuras 4.15a, 4.15c, 4.15i** correspondem ao dia posterior à passagem frontal no litoral Sul do Brasil, quando o anticiclone migratório posiciona-se no litoral da Argentina. Nos dias seguintes, este sistema desloca-se lentamente em direção ao mar, em trajetória zonal em latitudes de 40-35°S, em torno de 2 a 4 dias antes da ocorrência da chuva intensa, favorecendo um fluxo de leste na costa catarinense.

Nos casos de 1994 e 2004, também se observa a passagem de frentes frias no Sul do Brasil (**Figuras 4.15e e 4.15g**), as quais adquirem um desvio para latitudes acima de 35°S, na sua trajetória em direção ao mar, devido à presença de uma alta pressão no Atlântico Sul. A chuva intensa ocorre entre 2 a 4 dias depois (**Figuras 4.15f e 4.15h**), quando se verifica o avanço da borda oeste do anticiclone em direção ao litoral do Brasil, favorecendo um fluxo de nordeste no litoral de SC. O centro do sistema está posicionado em 35-30°S e 30-20°W, enquanto nos outros três casos o anticiclone posiciona-se mais próximo da costa, em 40-30°W.

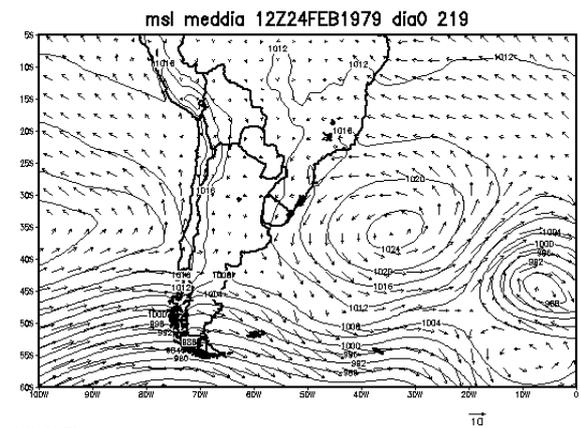
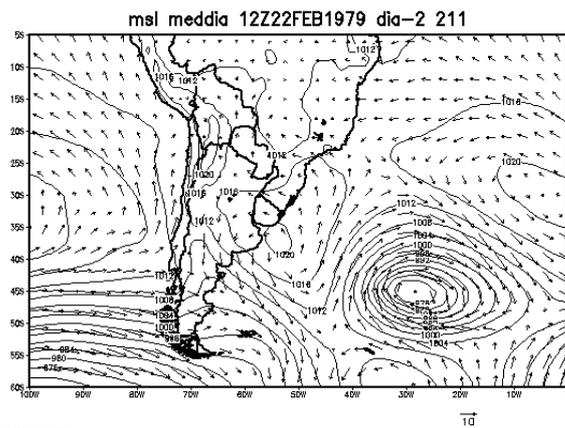
Em todos os cinco casos do grupo G4, os sistemas de alta pressão predominaram próximo à costa sul do Brasil em período prolongado (**Figura 4.16**), favorecendo o predomínio de uma pista de vento (leste ou nordeste), mais persistente na costa catarinense em relação aos eventos dos grupos G1, G2 e G3. No G4, no dia da chuva intensa ainda se observa uma intensificação do anticiclone no mar, com centro em torno de 1026 hPa nos casos das **Figuras 4.15b, 4.15d, 4.15h**. Em novembro de 2008 (**Figura 4.15j**), o centro do anticiclone chegou a 1032 hPa.

Como em G3, a presença de uma baixa despreendida é verificada em médios níveis, posicionando-se no Sul do Brasil ou em área continental, no horário aproximado de início da chuva intensa (**Figuras 4.16b, 4.16d, 4.16f, 4.16h, 4.16j**) e dias anteriores (**Figuras 4.16a, 4.16c, 4.16e, 4.16g, 4.16i**), com valores de advecção de vorticidade relativa em 500 hPa próximos de zero. O despreendimento do ciclone em 500 hPa ocorreu entre um (nov/2008 nas **Figuras 4.16i e 4.16j**) e quatro dias (fev/1987 nas **Figuras 4.16c e 4.16d**) antes da chuva intensa, permanecendo estacionário por no mínimo três dias.

O padrão verificado em médios níveis, em 1979, 1987, 1994 e 2004 (**Figuras 4.16a-h**) apresenta algumas similaridades com o caso de 1995 do grupo G3, quando o setor leste de SC esta posicionado na área entre a borda do

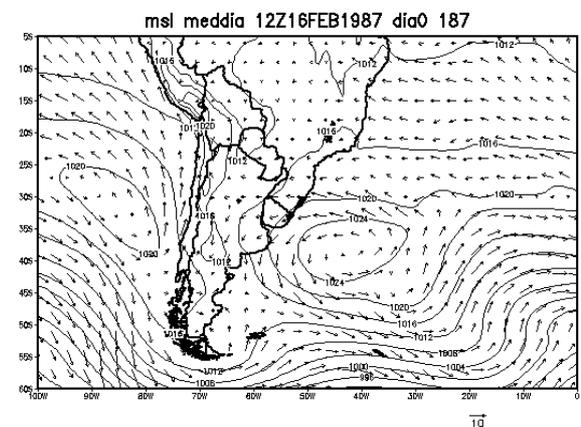
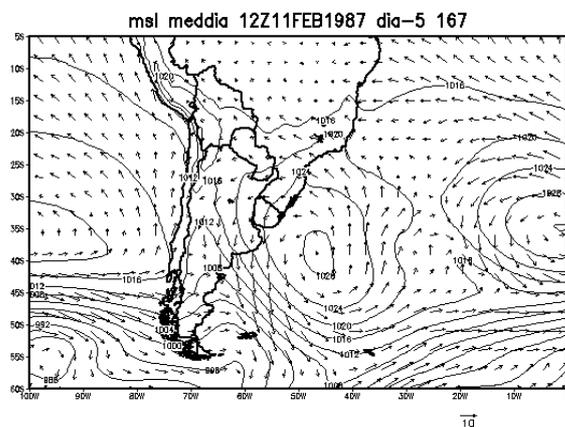
anticiclone no Atlântico e o ciclone no continente. Esta condição favorece um fluxo de norte direcionando à área litorânea, advectando ar mais aquecido. A borda do anticiclone subtropical do Atlântico Sul avança em direção ao continente brasileiro, na altura de latitudes tropicais, em 1979 e 1987 (**Figuras 4.15a-d**), ou na altura de 25-20°S, em 1994 e 2004 (**Figuras 4.15e-h**), quando o vento predominante em superfície é de nordeste na costa de SC (**Figuras 4.16e-h**). O caso de 1987 apresenta um padrão de dipolo, como em 1995, formado entre o ciclone no continente e o anticiclone ao sul. No evento de nov/2008, o ciclone em 500 hPa posiciona-se no litoral Sul do Brasil, e o cavado de onda longa, no qual o ciclone está embebido, predomina no centro-sul do país, padrão identificado nos casos ocorridos entre 2008 e 2009, no grupo G3.

Como nos casos do G3, nos eventos do grupo G4 o ciclone cruzou os Andes na corrente de oeste em 500 hPa, em latitudes de 40-35°S. Nos casos de 1979, 1987 e nov/2008 (**Figuras 4.16a-d e 4.16i-j**), ocorreu um ligeiro deslocamento do sistema na direção leste-oeste.



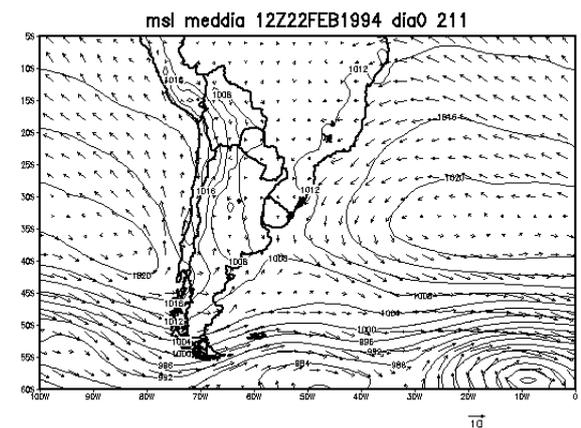
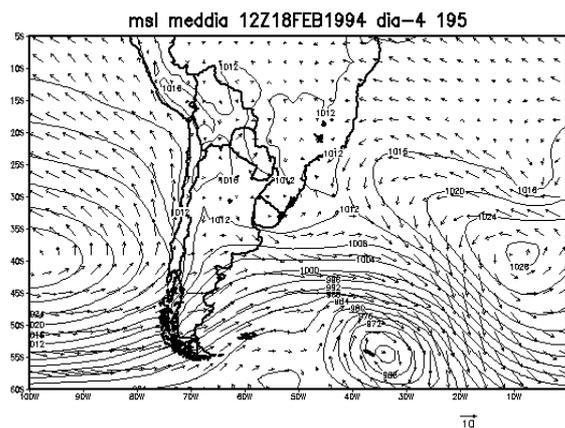
(a)

(b)



(c)

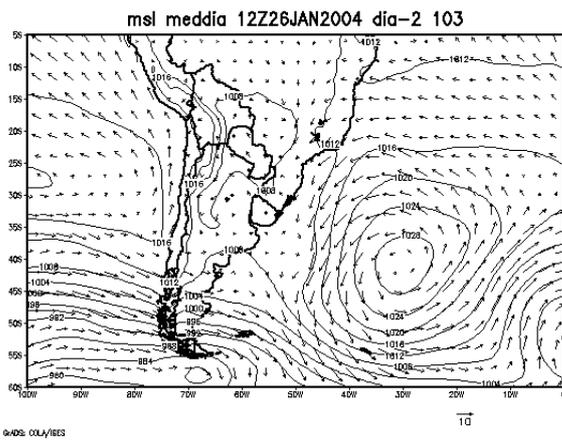
(d)



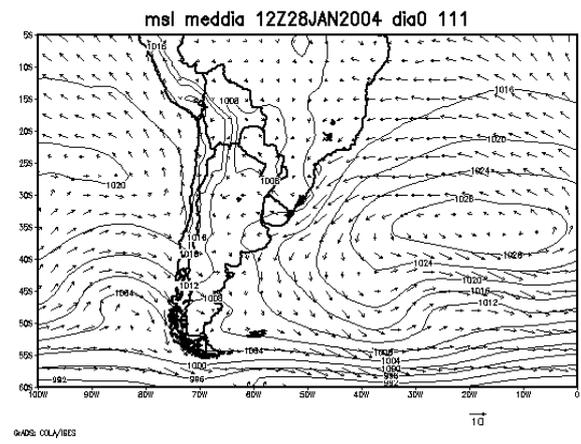
(e)

(f)

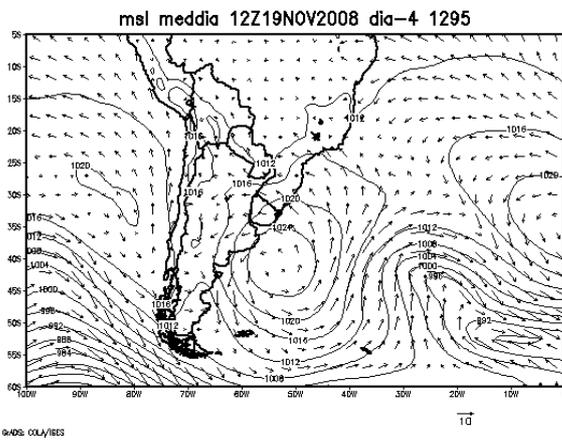
Figura 4.15. Campo médio da pressão ao nível médio do mar (intervalo de contorno de 4 hPa) e do vento a 10 metros de altura (m s^{-1}), nas últimas 24 horas: (a, b) 22 e 24/02/1979-12 UTC; (c, d) 11 e 16/02/1987-12 UTC; (e, f) 18 e 22/02/1994-12 UTC; (g, h) 26 e 28/01/2004-12 UTC; (i, j) 19 e 23/11/2008-12 UTC (Fonte: ECMWF).



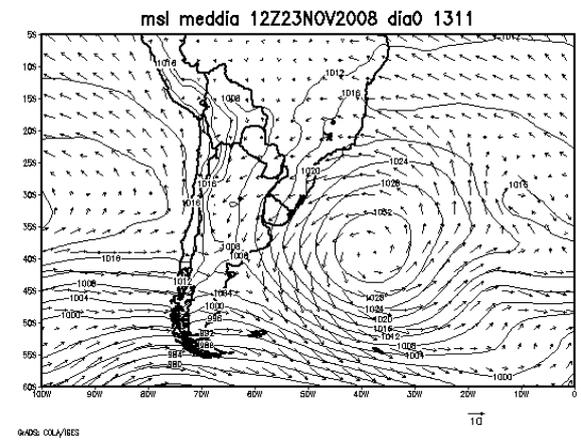
(g)



(h)



(i)



(j)

Conclusão da **Figura 4.15.**

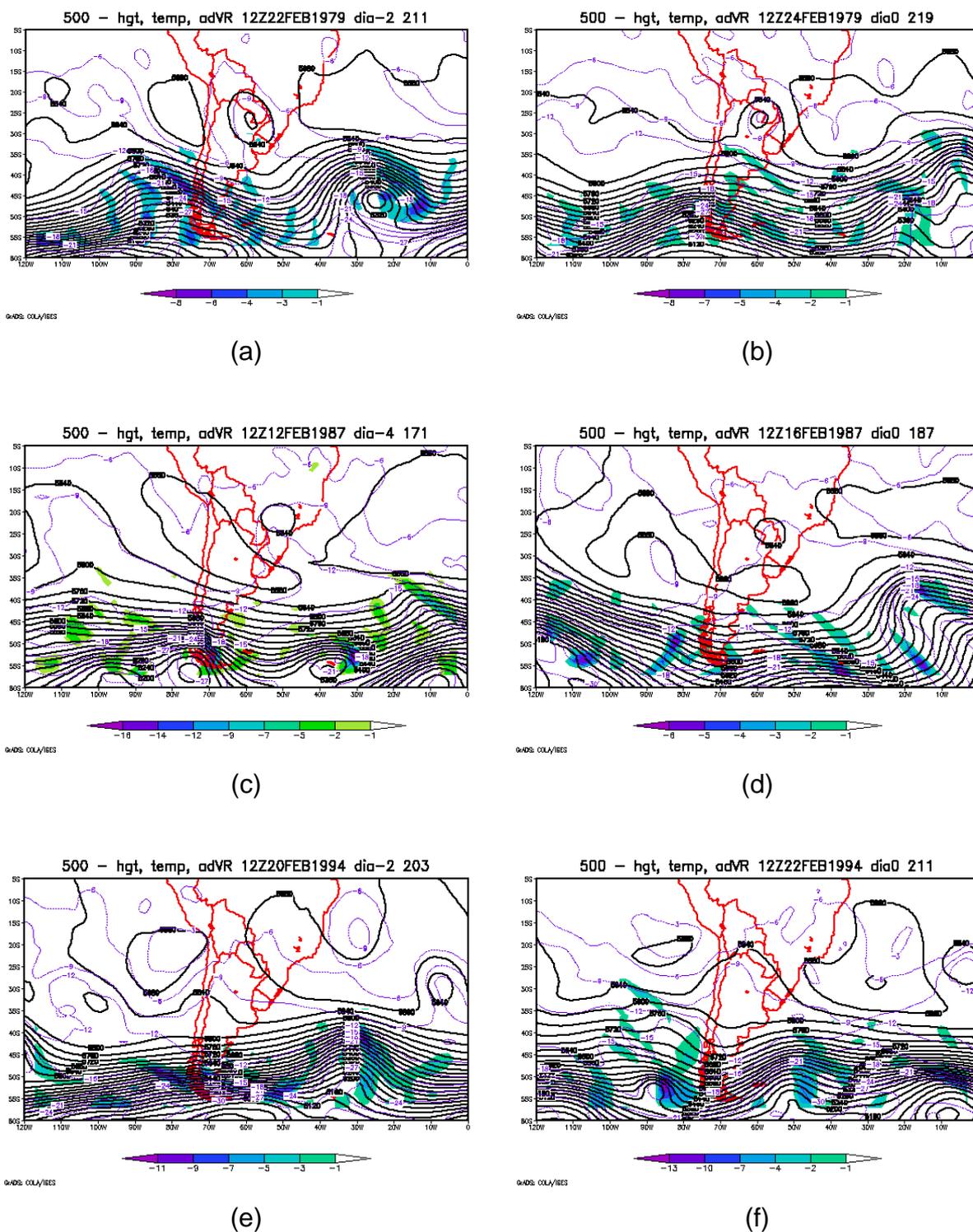
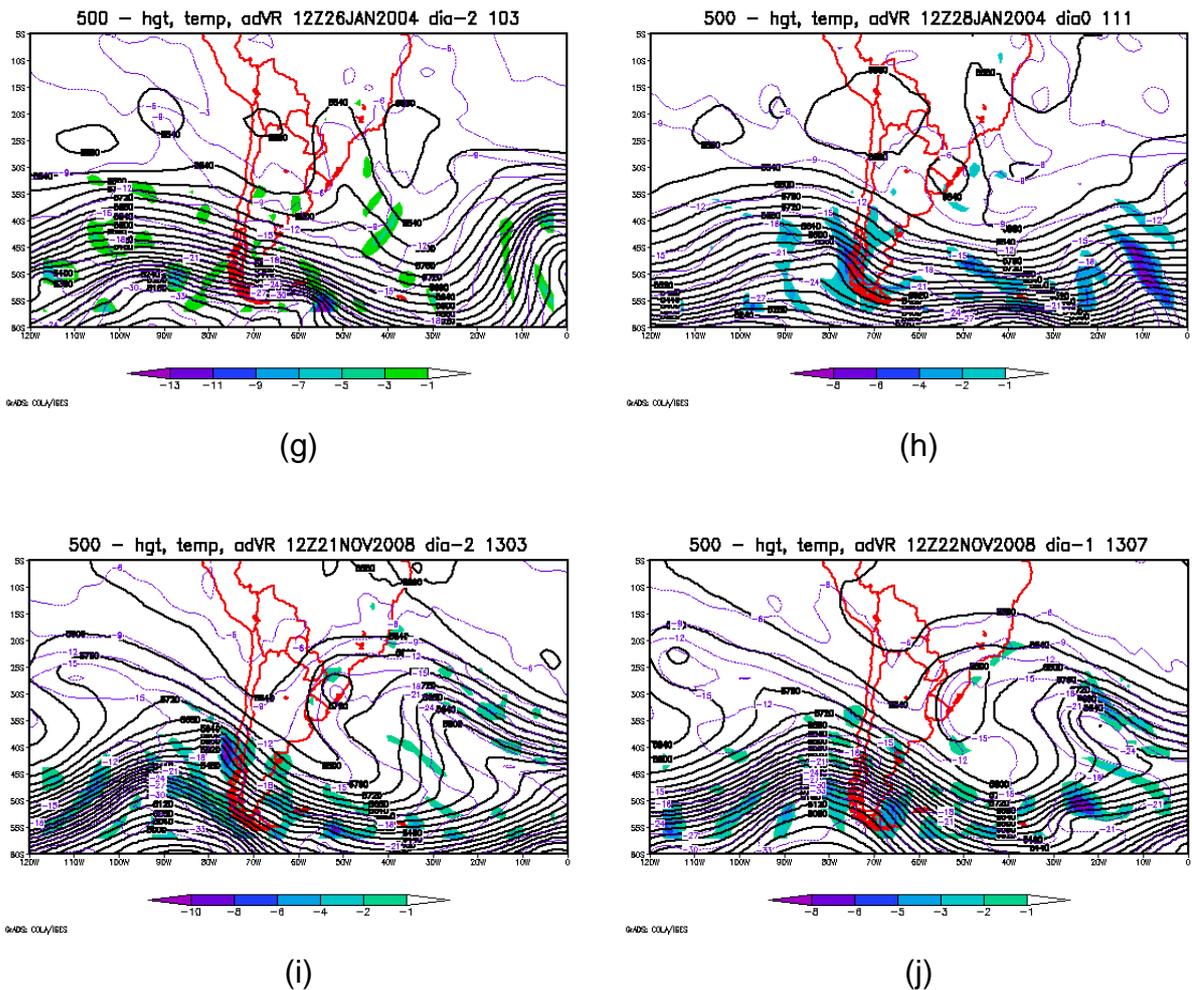


Figura 4.16. Altura geopotencial (intervalo de contorno de 30 mgp) e advecção de vorticidade relativa negativa ($\times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, hachurado em intervalo de 1 e iniciando em -1) em 500 hPa: (a, b) 22 e 24/02/1979-12 UTC; (c, d) 12 e 16/02/1987-12 UTC; (e, f) 20 e 22/02/1994-12 UTC; (g, h) 26 e 28/01/2004-12 UTC; (i, j) 21 e 23/11/2008-12 UTC (Fonte: ECMWF).



Conclusão da **Figura 4.16**.

4.4.1 – O caso de fevereiro/1979

Como verificado em jan/2008 (grupo G3), neste caso de 1979 do grupo G4, o LN de SC também divide uma crista no continente e um cavado no mar, no horário aproximado de início da chuva intensa e 24 horas antes. Esta configuração pode ser observada no campo de PNMM das **Figuras 4.17a-b**. Tanto o vento a 10 m (**Figuras 4.17a-b**) como em 850 hPa (**Figuras 4.17c-d**), virou de leste para nordeste entre esses dias, no litoral de SC, intensificando-se no segundo dia. Às 00 UTC do dia 24/02, o vento de nordeste a 10 m (**Figura 4.17b**) ficou em torno de 8-9 m s^{-1} na área marítima próxima do litoral de SC, contribuindo no transporte de ar úmido e mais aquecido para a região. Em 850 hPa (**Figuras 4.17d**), os ventos mais

intensos, de 8-10 m s⁻¹, foram observados no LS e GF, superando os 10 m s⁻¹ no interior do Sul do Brasil.

Também no horário de 00 UTC de 24/02 (início da chuva intensa), os valores de umidade específica em 850 hPa (**Figura 4.17f**) ficaram mais elevados, entre 12-14 g kg⁻¹, em todo o Estado de SC. No dia anterior (**Figura 4.17e**), este valor era de 10-12 g kg⁻¹ em SC, em uma configuração similar à verificada no caso de jan/2008 (**Figura 4.12e** no grupo G3), um dia antes da ocorrência da chuva intensa, quando a entrada de ar quente e úmido ficou direcionada à área de mar entre 25-20°S e área continental em 55°W. Na **Figura 4.17f**, também se observa, em relação ao dia anterior (**Figura 4.17e**), temperatura mais elevada (14-16 °C) no litoral de SC e área de mar próxima. Este aumento nos valores de umidade específica e de temperatura, em 850 hPa, foi verificado a partir de 18 UTC do dia 23/02 (figura não mostrada), 6 horas antes do horário aproximado de início da chuva intensa.

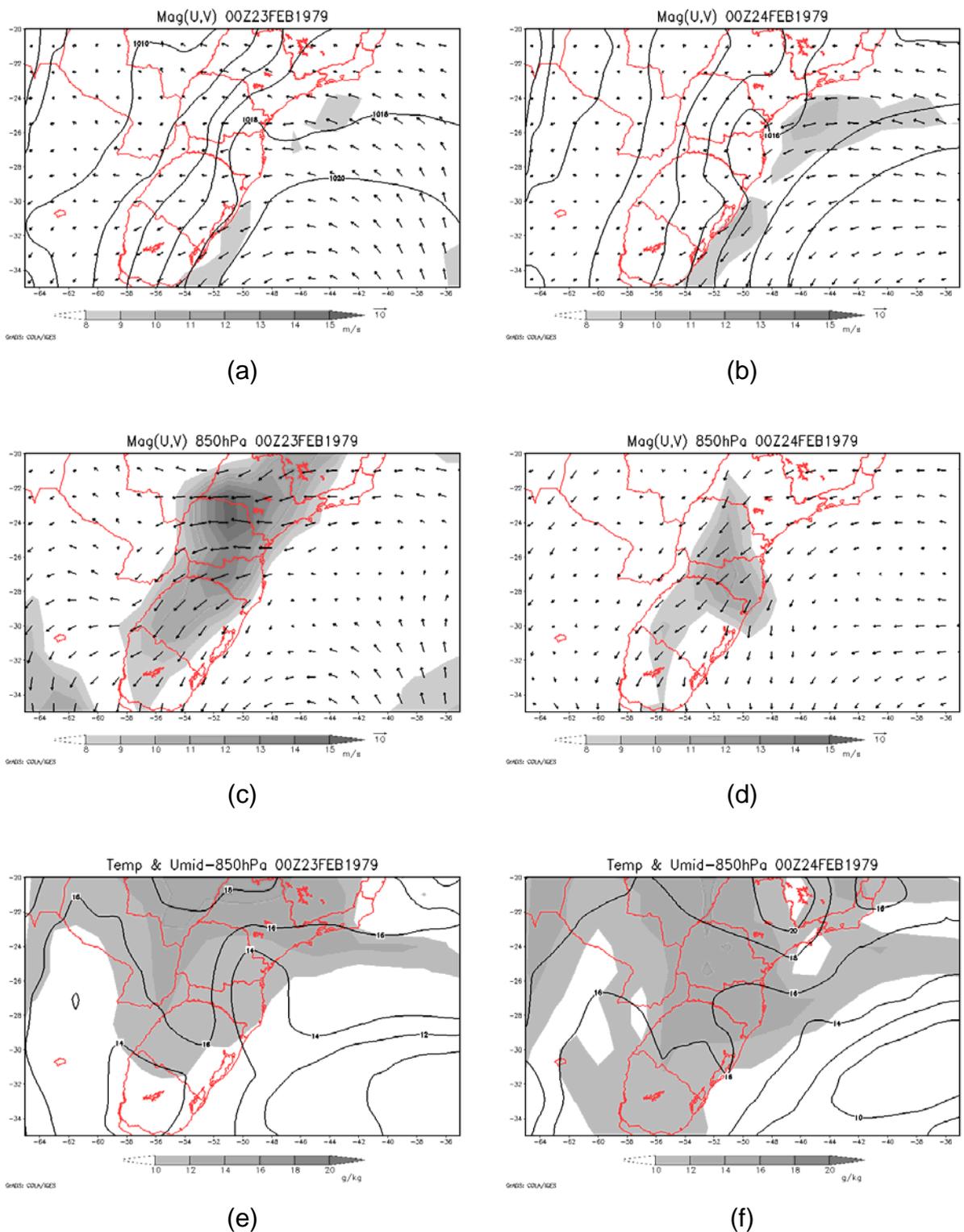


Figura 4.17. Campos em 23 e 24/02/1979-00 UTC: (a, b) vento a 10 metros de altura (m s^{-1}) e (c, d) em 850 hPa (m s^{-1}); (e, f) temperatura (intervalo de contorno de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$) e umidade específica (hachurado em intervalo de 2 g kg^{-1} e iniciando em 10 g kg^{-1}). Velocidade do vento acima de 8 m s^{-1} (hachurado em intervalo de 1 m s^{-1}) (Fonte: ECMWF).

Os campos de advecção de temperatura e *omega* em 850 hPa (**Figura 4.18**) foram analisados nos horários que antecederam o início da chuva intensa. A partir de 00 UTC do dia 23/02, uma área de advecção quente é observada na porção de mar adjacente ao LN de SC e GF (**Figura 4.18a**). Às 06 e 12 UTC (**Figuras 4.18b-c**), a advecção quente intensifica-se na região com valores de $0,4-0,6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. A presença de advecção positiva de temperatura, no norte de SC e área marítima adjacente, ainda pode ser observada na **Figura 4.18d**, de 18 UTC, permanecendo esta mesma configuração até 12 UTC do dia 24/02 (figura não mostrada). Em grande parte do Estado de SC, predomina advecção fria no dia 23/02 (**Figura 4.18**), bem mais intensa com isolinhas de $-1,6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nos horários de 00 e 06 UTC (**Figura 4.18a-b**). Às 00 UTC do dia 23/02 a entrada de ar frio, no leste de SC, onde predomina uma crista (**Figura 4.17a**), pode ser observada nos campos de temperatura da **Figura 4.17e**.

Em termos de movimento vertical, em 850 hPa observa-se ascendência de ar concentrada na GF e LN no dia 23/02 (**Figura 4.18**), com valores máximos ($-0,3 \text{ Pa s}^{-1}$) às 12 UTC (**Figura 4.18c**). Neste mesmo horário, em 500 hPa (**Figura 4.19a**), o movimento é ascendente no norte de SC com valores, de $-0,1$ a $-0,2 \text{ Pa s}^{-1}$, enquanto valores mais intensos são observados em uma área distante do litoral, em 55°W , a leste do ciclone, cujo núcleo frio, em $62-60^\circ\text{W}$, pode ser visualizado nos campos de temperatura da **Figura 4.19**.

Um persistente fluxo de norte em médios níveis, direcionado à região Sul do Brasil, é observado nos campos de vento da **Figura 4.19**, intensificando-se na área leste e litorânea de SC (em torno de 10 m s^{-1}) às 00UTC do dia 24/02 (**Figura 4.19b**). Esta circulação de vento, verificada desde o dia 22/02 (figuras não mostradas), é formada na área entre o ciclone no continente e o anticiclone no mar, bem próximo da costa. Doze horas antes do horário aproximado de início da chuva intensa, às 12 UTC do dia 23/02 (**Figura 4.19a**), identifica-se uma entrada de ar mais aquecido no litoral de SC, em 500 hPa.

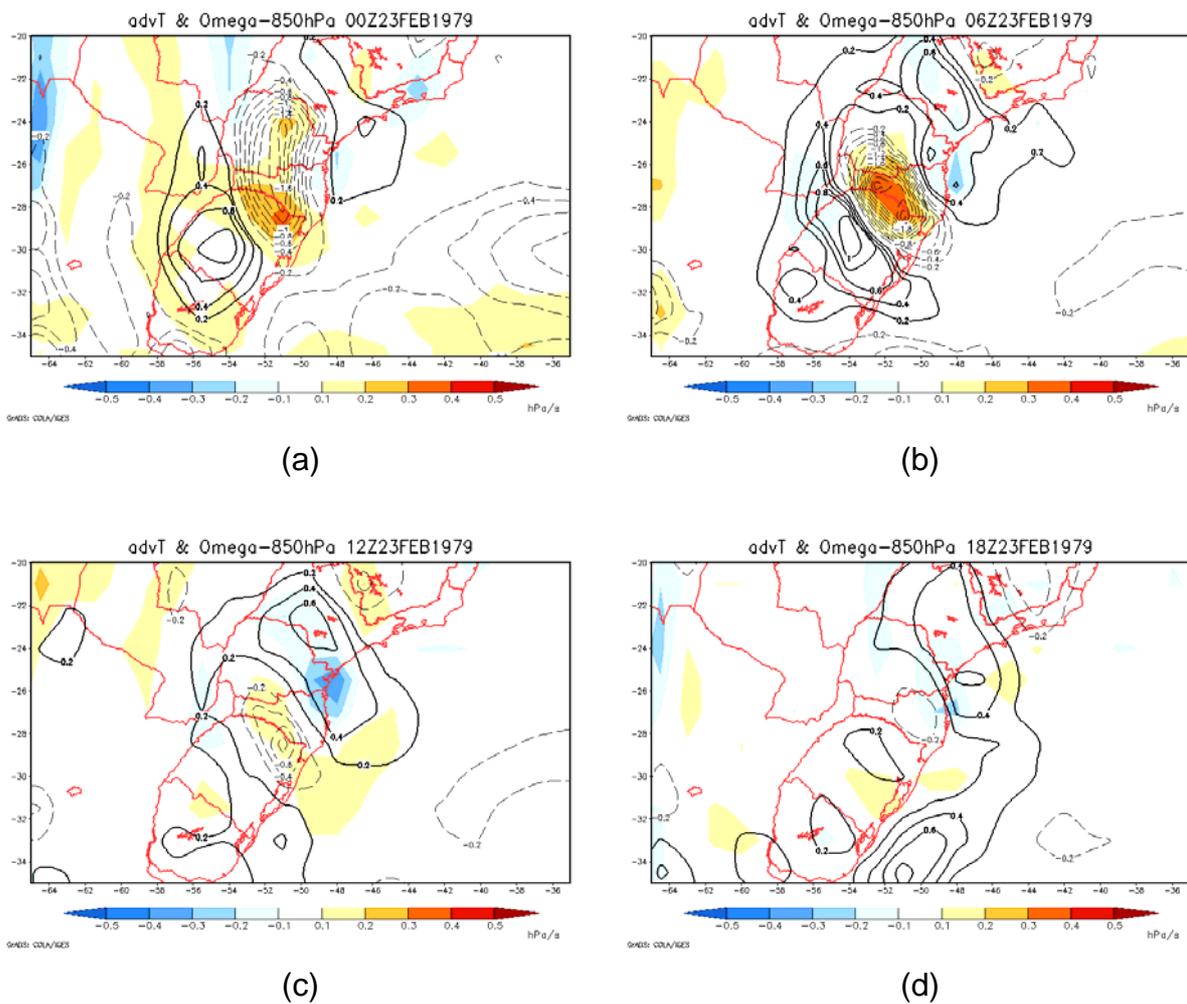


Figura 4.18. Campos de advecção de temperatura ($\times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, intervalo de 0,2 e iniciando em 0,2) e omega (hachurado em intervalo de 0,1 Pa s^{-1} e iniciando em 0,1 Pa s^{-1}), em 31/01/2008: (a) 00 UTC; (b) 06 UTC; (c) 12 UTC e (d) 18 UTC. Positivo em linha sólida e negativo em linha tracejada (Fonte: ECMWF).

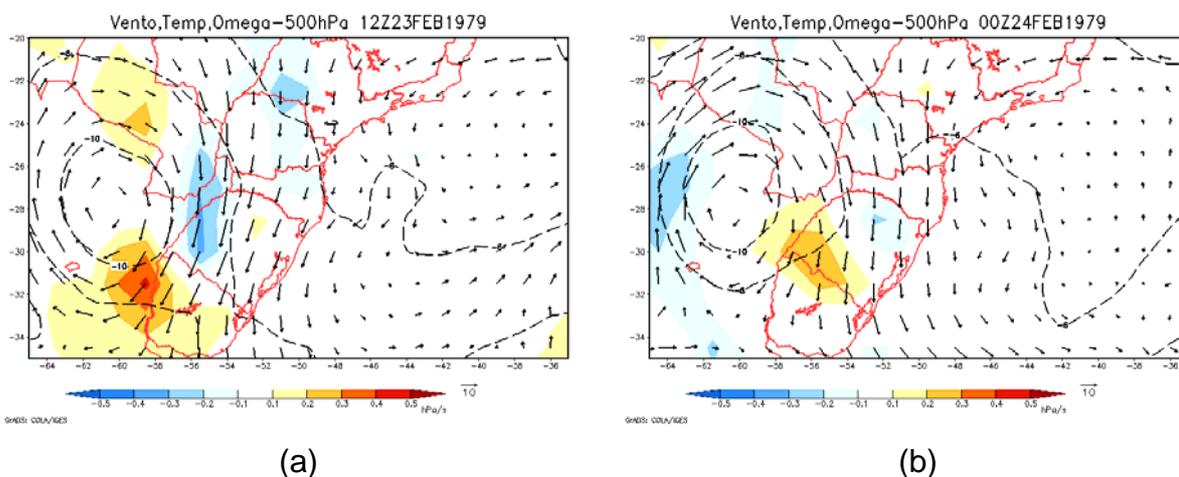


Figura 4.19. Campos de temperatura (intervalo de contorno de 2 °C); omega (hachurado em intervalo de 0,1 Pa s⁻¹ e iniciando em 0,1 Pa s⁻¹) e vento (m s⁻¹) em 500 hPa, em (a) 23/02/1979-12 UTC e (b) 24/02/1979-00 UTC (Fonte: ECMWF).

4.5– SIMILARIDADES E DIFERENÇAS ENTRE OS CASOS

Os 15 casos de chuva extrema analisados nos grupos G1, G2, G3, G4, ocorreram na presença de um anticiclone semiestacionário ou em lento deslocamento no Atlântico Sul, com centro em torno de 35-45°S, depois de afastar-se do litoral da Argentina na retaguarda de uma passagem frontal.

Os casos em G1, no outono austral, foram diferenciados pela presença de um ciclone em superfície no litoral Sul do Brasil. Em G2, G3 e G4, a ocorrência da chuva é verificada na presença de uma crista no leste de SC, associada ao anticiclone no mar, e de um cavado que se estende desde o litoral de SP à região marítima próxima de SC. Nestes três grupos, a circulação entre o cavado e o anticiclone favorece ventos mais intensos na costa de SC, com direção predominante leste-nordeste, próximo da superfície e em baixos níveis, diferenciando-se entre si pelo período de permanência.

Rodrigues et al. 2004 identificaram um período médio de 24 horas com predomínio de vento leste após a passagem de frentes frias no litoral de SC em meses de verão (**Figura 4.20**). Esta circulação está associada ao anticiclone migratório no oceano, que rapidamente se desloca para incorporar-se à alta subtropical do Atlântico Sul (Rodrigues et al. 2004). A presença de um cavado no

litoral do Brasil, altura de SP, associado ao sistema frontal no oceano, também aparece como característica da condição de pós-frontal na **Figura 4.20**. Esta área de localização do cavado na costa brasileira, em 24-22°S, foi identificada como ciclogênica em meses de verão (Sugahara 2000), favorável ao desenvolvimento de ciclones de menor intensidade, para vorticidade relativa inferior a $-1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (Reboita et al. 2009).

Nos casos do grupo G3, ciclones intensificaram-se na costa entre SP e SC após a ocorrência de chuva intensa na GF. O ambiente sinótico em tais eventos, onde o ciclone em superfície posiciona-se em dipolo com o anticiclone ao sul (**Figuras 4.10b, 4.10d, 4.10f**), apresenta similaridades com o ambiente encontrado por Gozzo (2014), favorável ao desenvolvimento de ciclones subtropicais na costa sul/sudeste do Brasil. O autor classificou os ciclones dos eventos de jan/2008 e abr/2009 como do tipo subtropical. É possível que algumas das condições propícias à ocorrência de chuva orográfica intensa no litoral de SC, nos casos do G3, sejam também favoráveis à formação destes sistemas híbridos.

Em médios níveis, a presença de ciclones é a principal característica observada, exceto para o grupo G2. Em G1, seguem trajetória zonal, em lento deslocamento no norte da Argentina e Sul do Brasil, favorecendo a ciclogênese em superfície. Em G3 e G4, os ciclones se desprendem em latitudes próximas de SC e permanecem semiestacionários por cerca de 3 dias no Sul do Brasil ou no interior do continente, mesmo após o término da chuva intensa. Antes do desprendimento do ciclone em 500 hPa, o cavado atravessa a porção da América do Sul em latitudes superiores a 35°S e desloca-se ao longo do litoral da Argentina. Alguns sistemas apresentam ligeiro deslocamento na direção leste-oeste, e alguns são observados em posição de dipolo com o anticiclone ao sul de 35°S.

As principais características identificadas nos grupos são resumidas a seguir:

G2 - vento leste por um dia, chuva concentrada em um dia.

G3 – vento leste de 2 dias, registro dos maiores totais em 24 horas e em cinco dias. Em G3, uma extensa área de baixa pressão predominou no centro-sul do Brasil.

G4 — vento leste de 3 dias ou mais, chuvas mais distribuídas no tempo, registro dos menores totais em 5 dias.

G3 e G4 - jan/2008, dez/2008 e 2009 (G3), 2004 e nov/2008 (G4) - ciclone no litoral Sul do Brasil.

G3 e G4 - 1995 (G3), 1979,1987 e 1994 (G4) – ciclone no sul do Paraguai e oeste do Rio Grande do Sul (em torno de 27°S/60°W).

G3 e G4 - 1995, 1979 e 1987 - ciclone na direção leste-oeste.

G3 e G4 - 1995 e jan/2008 (G3), 1987 e nov/2008 (G4) - ciclone em posição de dipolo com o anticiclone/crista ao sul do Uruguai.

O escoamento em baixos níveis, na área marítima próxima da costa de SC, contribui no transporte de umidade e calor para o litoral no dia da chuva intensa. No grupo G3, o escoamento em 850 hPa, aproximadamente de leste, é proveniente da região do ciclone no mar. Em G1 e G4, o fluxo de nordeste, neste nível, foi originado em uma área mais aquecida e úmida em latitudes mais baixas. A borda noroeste da alta subtropical do Atlântico Sul, entre baixos e médios níveis, penetra no continente brasileiro em latitudes inferiores a 22°S. Conforme Teixeira e Satyamurty (2007), a convergência do fluxo de umidade em baixos níveis, direcionada ao Sul do Brasil, desloca-se da área continental (fluxo de noroeste) para a área costeira de SC (fluxo de nordeste), durante eventos de chuva intensa no litoral de SC em meses de verão.

Nos casos G3 e G4, o movimento vertical de ar em 850 hPa, em associação à advecção de temperatura, foi o parâmetro que melhor indicou o ambiente sinótico favorável ao desenvolvimento da precipitação no litoral de SC. Os valores de *omega* neste nível ficaram concentrados entre o LN e GF, região com precipitação mais elevada em relação ao LS e com maior aporte de calor e umidade em horários próximos ao da chuva intensa. Em ambiente de baixa baroclinia, o escoamento em 500 hPa favoreceu um aquecimento neste nível, no litoral de SC, no dia da chuva intensa.

Em G1, os valores elevados nos campos diagnósticos, de advecção quente e movimento ascendente de ar entre a baixa e média troposfera, foram bons indicativos do deslocamento dos sistemas atmosféricos causadores de chuva. A orografia provavelmente contribuiu para intensificar, na área da GF, um processo de levantamento já estabelecido pela passagem dos sistemas atmosféricos.

De modo geral, nos três eventos as características observadas nos

campos de vento, temperatura e umidade, assim como nos principais campos diagnósticos, no horário da chuva intensa, podem ser assim resumidas:

- o vento próximo da superfície, aproximadamente de leste na costa de SC e oceano adjacente, intensificou-se com velocidade entre 8 m s^{-1} e 10 m s^{-1} . Em 850 hPa, o vento no litoral, entre leste e nordeste, foi aproximadamente ou superior a 10 m s^{-1} . O escoamento em ambos os níveis foi persistente desde 12 a 24 horas antes do início da chuva intensa.

- em 850 hPa, aporte de calor e umidade proveniente de latitudes mais baixas, favorecendo temperatura de 14-16 °C, entre o litoral e área marítima próxima, e umidade específica de 10-12 g kg^{-1} .

- em 850 hPa, máximos de advecção quente e de movimento ascendente entre a GF, LN e área marítima próxima, desde 6 a 12 horas antes.

- o valor de *omega* em 500 hPa, no litoral de SC, foi sempre inferior ao encontrado em 850 hPa.

Em eventos de chuva intensificada pela orografia em localidades dos EUA, Ásia e Europa (Lin et al. 2001): (1) presença de montanha íngreme contribuindo na ascensão de ar úmido; (2) lento deslocamento ou estacionaridade de sistemas sinóticos, contribuindo para manter a precipitação em período prolongado, ocasionando chuva local excessiva; (3) intenso escoamento em baixos níveis (JBN) transportando ar com umidade elevada para a área afetada; (4) ar potencialmente instável colidindo na montanha. Outras características dos casos do litoral de SC foram também encontradas em eventos dos EUA e Alpes na Europa (Maddox et al. 1978; Pontrelli et al. 1999; Lin et al. 2001), e oeste do Mediterrâneo (Ramis et al. 1995; Doswell et al. 1998). São elas: (1) fraco movimento na corrente de ar entre 500-300 hPa, favorecendo o lento movimento dos sistemas; (2) chuva intensa localizada entre uma crista de alta pressão na atmosfera superior (este é o sistema sinótico quase-estacionário) e um cavado de onda curta, que pode estar mais próximo ou mais afastado da área afetada.

A ausência de sistemas frontais em superfície e de movimento ascendente evidente em 500 hPa, assim como a presença de ciclone fechado em médios níveis, em atmosfera barotrópica equivalente, com fraca influência no desenvolvimento da precipitação no litoral, torna o caso C3 similar a alguns eventos

no oeste do Mediterrâneo (Doswell et al. 1998), em especial na Catalonia (Ramis et al. 1994, Ramis et al. 1995). Em estudo de chuva orográfica nesta localidade da costa leste da Espanha, Ramis et al. (1998) identificaram uma frente de mesoescala em superfície separando uma mesoalta no continente e uma mesobaixa no mar, e um aquecimento em toda a coluna, desde superfície até níveis superiores. Ambas as regiões, GF e Catalonia, estão situadas entre o mar e áreas de montanha de 800 m. Llasat e Puigcerver (apud Ramis et al. 1995) ressaltam o decisivo papel que a orografia exerce em casos de precipitação em áreas costeiras com altitudes médias de 800 m.

CAPÍTULO V – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

As simulações foram realizadas com o uso do MM5 para 10 eventos de chuva extrema na GF, cujos campos sinóticos foram analisados no Cap. 4. Dentro dos casos selecionados no Cap. 3, onde a distribuição temporal da precipitação é apresentada, os experimentos foram realizados para aqueles de anos mais recentes (1991-2010).

5.1 – EXPERIMENTOS DE SENSIBILIDADE

A partir dos testes de sensibilidade, foi definido o período de inicialização e integração dos experimentos, apresentado na **Tabela 5.1**. A simulação da precipitação foi melhor representada, especialmente em termos de localização, quando se considerou um período mínimo de 24 horas antes do início da chuva intensa.

Tabela 5.1 – Simulações de casos de chuva extrema na GF com o MM5

Casos - Data inicialização - Período integração - Experimentos sensibilidade - Chuva observada - Grupo (Cap. 4).

Novembro/1991	13/11–18 UTC	48 horas		GF	G2
Fevereiro/1994	21/02-00 UTC	48 horas		GF-LS	G4
Dezembro/1995	22/12-18 UTC	54 horas	x	GF-LS	G3
Fevereiro/2001	03/02-00 UTC	48 horas	x	GF	G2
Janeiro/2004	26/01-12 UTC	54 horas	x	GF	G4
Janeiro/2008	30/01-00 UTC	60 horas	x	GF-LN	G3
Novembro/2008	19/11-12 UTC	108 horas	x	GF-LN	G4
Dezembro/2008	14/12-18 UTC	48 horas		GF-LN	G3
Abril/2009	21/04-00 UTC	66 horas	x	GF-LN	G3
Mai/2010	17/05-12 UTC	48 horas	x	GF-LS	G1

Entre os 10 experimentos realizados, definidos como do tipo controle (f_{12}), foram selecionados sete casos (**Tabela 5.1**) para a realização dos experimentos de sensibilidade. Para tal, considerou-se a distribuição dos mesmos entre os grupos determinados no Cap. 4 (G1, G2, G3, G4) e a representatividade do modelo em relação aos campos de precipitação simulados. Os experimentos de sensibilidade foram realizados considerando ausência da orografia (f_2), ausência da evaporação do mar (f_1) e ausência de ambos os fatores (f_0) (**Tabela 2.1**).

As saídas dos campos de chuva e vento em 925 hPa, das quatro simulações realizadas para cada um dos sete eventos são apresentados a seguir (**Figuras 5.1-5.7**), para o domínio D2. O campo de vento representa o horário de início da chuva intensa ou horário próximo, cerca de 6-12 horas antes, quando o fluxo de vento em baixos níveis é mais intenso no litoral de SC, conforme resultados obtidos no Cap. 4. O campo de precipitação representa o total acumulado em todo o período de integração da simulação (**Tabela 5.1**).

A distribuição espacial da precipitação ocorrida em SC, durante estes eventos (**ANEXO I**), foi obtida de dados observacionais, e a baixa densidade da rede de estações deve ser considerada. Na maior parte dos eventos, a precipitação atinge todo o litoral de SC, sendo mais intensa em direção ao LN ou LS. Em ambos os casos, no entanto, com exceção de nov/2008, a precipitação na GF foi bem mais elevada. Em outros casos, a chuva só foi elevada na GF.

5.1.1 Dezembro de 1995

As chuvas registradas entre os dias 23 e 25 de dezembro de 1995 resultaram em um total acumulado de quase 400 mm na GF (**Tabela 3.1**) e em elevados totais no LS de SC (Haas, 2002). De modo geral, as chuvas do evento foram bem representadas no experimento controle (**Figura 5.1d**), com presença da orografia e da evaporação no mar. Tanto a distribuição espacial da chuva mais intensa, entre a GF e LS, como os totais elevados nestas regiões, de 200-250 mm, com pontuais de 300-350 mm são verificados na simulação.

Quando a evaporação do mar é retirada (**Figura 5.1a**), a precipitação permanece entre a GF e LS de SC, região considerada entre as de relevo mais

acidentado no Estado (**Figura 2.1**). A área da chuva intensa fica mais reduzida nesta simulação, mas permanecem totais acumulados elevados no LS, como verificado no experimento controle (**Figura 5.1d**). Ainda no experimento com ausência da evaporação do mar, observa-se uma redução expressiva na quantidade de precipitação na GF. E, no mar, a chuva praticamente desaparece.

Ao ser retirada a topografia (**Figura 5.1b**), a quantidade de chuva é reduzida drasticamente entre a GF e LS de SC. Os valores mais elevados, em torno de 40-70 mm, são simulados entre a GF e LN, o que não foi verificado no experimento controle (**Figura 5.1d**). Um núcleo de precipitação de 200-250 mm chega a ser verificado próximo do LN. Neste experimento da **Figura 5.1b**, a área de precipitação no mar, próxima do LS, fica um pouco reduzida em relação ao experimento controle (**Figura 5.1d**), enquanto precipitação é acrescida em uma extensa área de mar em latitudes próximas do LN, embora com baixos valores, de 10-40 mm.

No experimento com ausência de ambos os fatores (**Figura 5.1c**), tanto o campo de chuva como de vento em baixos níveis (925 hPa) aproximam-se do experimento com ausência da topografia (**Figura 5.1b**). Em relação ao experimento controle (**Figura 5.1b**), a quantidade de chuva é reduzida no LS e GF, enquanto os valores mais elevados aparecem no LN (**Figura 5.1d**). O núcleo mais intenso de chuva verificado na **Figura 5.1b**, no LN, também aparece na **Figura 5.1c**. Comparando com o experimento controle, observa-se que, na ausência de orografia e evaporação do mar, desaparece a chuva no mar adjacente ao LS, e aparece chuva no mar do LN.

Em ambas as **Figuras 5.1b-c**, nas quais estão ausente a orografia, um fluxo de vento de noroeste é direcionado ao LN de SC, o que não aparece nas **Figuras 5.1a e 5.1d**, onde a orografia está presente com um fluxo de vento de nordeste direcionado ao LN. A presença do relevo, que se estende desde a costa de Santa Catarina, prolongando-se em direção a latitudes mais baixas, nos Estados do Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro, parece inibir a circulação de ar, na área continental, que transporta umidade de latitudes mais baixas em um fluxo de noroeste. A ausência da orografia (**Figura 5.1b**) parece favorecer a formação de uma área de convergência e de chuva na área marítima do LN, assim como precipitação mais intensa nesta área de SC.

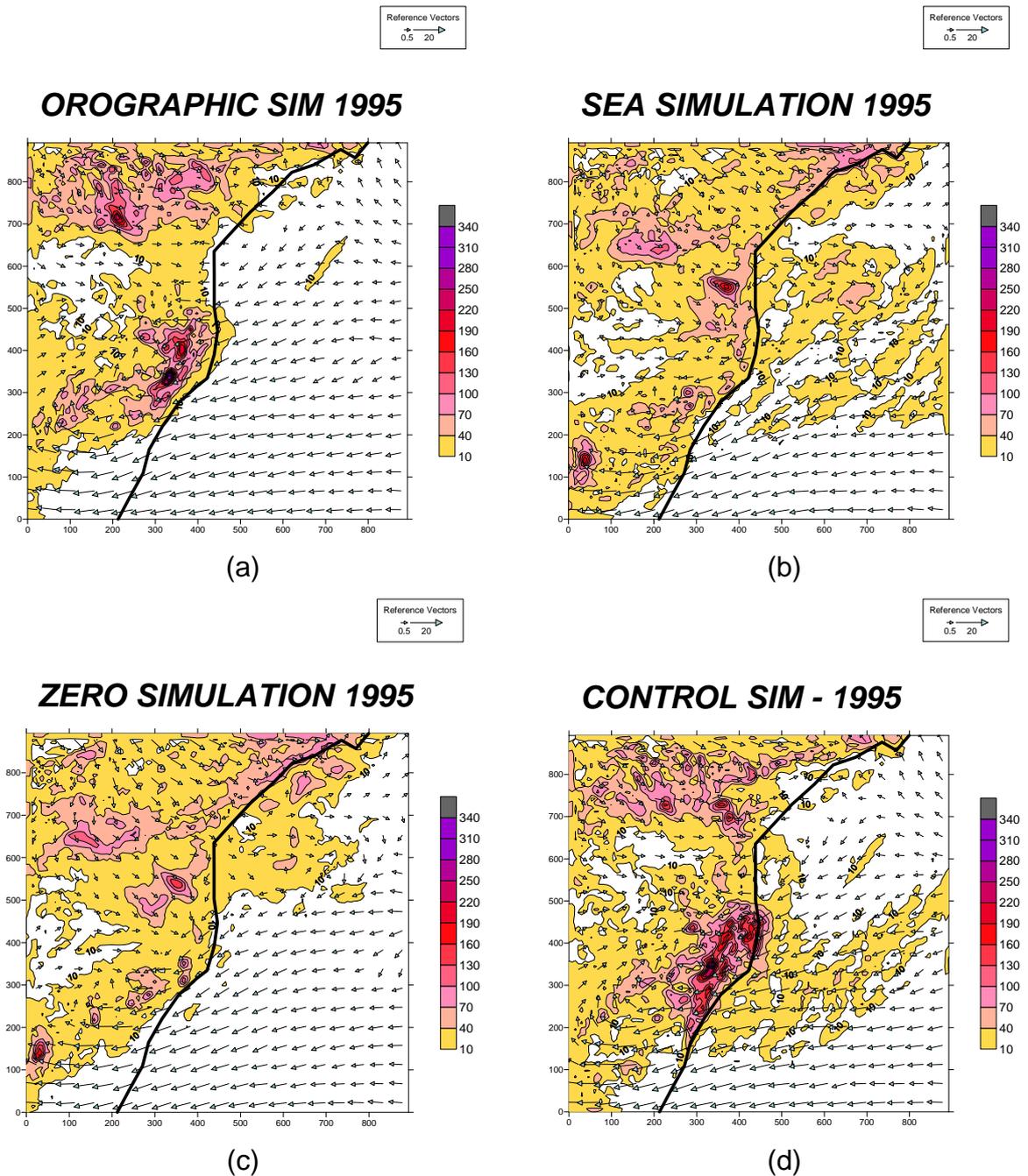


Figura 5.1 – Campos de vento em 925 hPa (23/12/1995 - 18 UTC) e de precipitação (acumulada entre 22/12 - 18 UTC e 25/12/1995 - 00 UTC) obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

5.1.2 Abril de 2009 (G3)

No evento de abril de 2009, também do grupo G3 (ver Cap. 4), o total diário na GF, no dia 23/04, de 120 mm, foi bem superior aos demais registros no litoral de SC, no mesmo dia, de 45-90 mm (**Tabela 3.1** e **ANEXO I**), atingindo tanto o LN como LS. O total acumulado na GF ficou em cerca de 170 mm entre os dias 21 e 23 (**Tabela 3.1**).

A chuva, de modo geral, foi bem simulada no experimento controle (**Figura 5.2d**), especialmente em termos espaciais, sendo observada em todo o litoral de SC e área oeste da GF. Um núcleo mais intenso entre a GF e LN chega a 200 mm. Os valores mais intensos de precipitação foram simulados na área de mar, próximo do LS e especialmente em uma extensa área na mesma latitude do LN. Estas chuvas ocorreram, de fato, em associação à intensificação de um ciclone entre o litoral de SP e litoral norte de SC (ver Cap. 4).

Como em 1995 (**Figura 5.1**), no experimento com ausência da evaporação no mar do caso 2009 (**Figura 5.2a**), a precipitação acima de 40 mm fica restrita à área continental. A precipitação no mar e ao longo do litoral de SC é praticamente suprimida neste experimento em comparação com o experimento controle da **Figura 5.2d**. Na ausência da topografia (**Figura 5.2b**), no entanto, permanece a intensa chuva em latitudes mais ao norte, tanto no mar como no litoral. Verifica-se, inclusive, um aumento da chuva na extensa área da parte continental. Na GF, e principalmente no LS, o que se observa é uma redução da chuva. A precipitação ao sul da GF, no litoral e área de mar, só foi detectada no experimento controle (**Figura 5.2d**), com presença da topografia e evaporação do mar.

Ao contrário do verificado em 1995 (**Figura 5.1**), neste caso de 2009 a simulação com ausência de topografia e evaporação do mar (**Figura 5.2c**), que apresenta uma redução considerável da precipitação na área de mar, está mais próxima do experimento que considera a ausência de evaporação do mar (**Figura 5.2a**). O fluxo de vento de nordeste no litoral de SP e de leste-nordeste no litoral de SC também é verificado em ambos os experimentos. Isto indica que tal circulação, encontrada no experimento controle da **Figura 5.2c**, e com ventos mais intensos, é favorecida a partir da presença da topografia presente ao longo de todo o litoral.

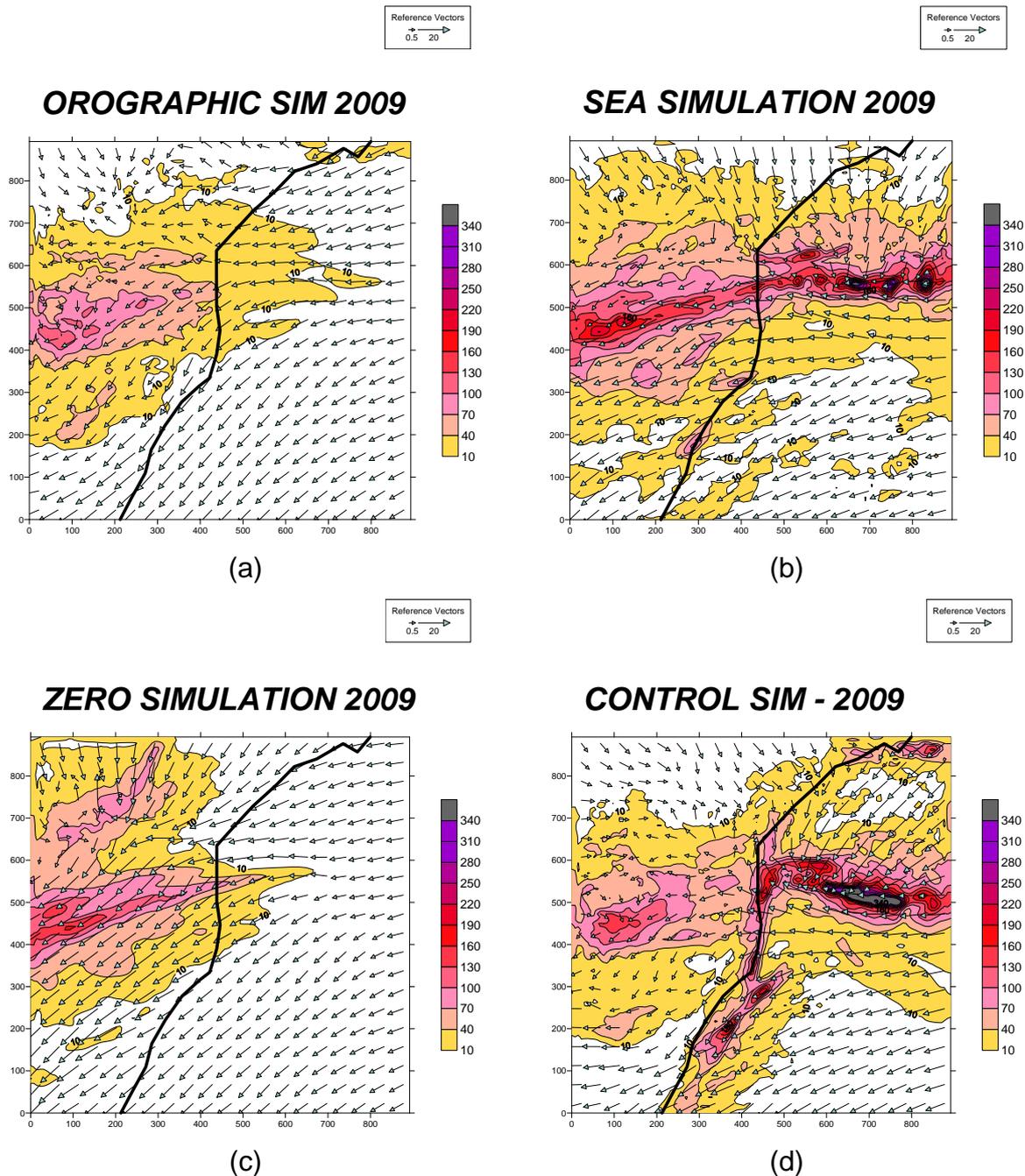


Figura 5.2 – Campos de vento em 925 hPa (23/04/2009 - 00 UTC) e precipitação (acumulada entre 21/04 - 00 UTC e 23/04/2009 - 12 UTC) obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

5.1.3 Janeiro e Novembro de 2008 (G3 e G4)

As simulações para os casos de janeiro, do grupo G3, e novembro de 2008, do grupo G4, apresentaram resultados muito similares e, assim, seus resultados foram apresentados em conjunto. Na GF (**Tabela 3.1**), os totais de chuva foram em torno de 350 mm acumulados em dois dias (janeiro), e 250 mm em três dias consecutivos (novembro). Como verificado em 2009 (**Figura 5.2**), em 2008 a chuva também ocorreu em todo o litoral, atingindo o LN com maior intensidade (**ANEXO I**). No caso de novembro, os valores de chuva no LN foram acentuadamente mais elevados.

A localização e valores de precipitação foram bem representados no experimento controle de janeiro (**Figura 5.3d**). A simulação indicou em torno de 100 mm no LS e de 200 mm no LN. Estes valores estão próximos do ocorrido, exceto para a GF, cuja precipitação foi de 350 mm. Em novembro (**Figura 5.4d**), a chuva da GF foi simulada em 200 mm, um valor próximo do ocorrido. Mas os totais do LN, que chegaram a 500 mm em 3 dias, foram subestimados consideravelmente pelo modelo.

O destaque nestes casos de 2008 é o fato da chuva no litoral de SC ter sido bem reduzida nos três experimentos de sensibilidade. Na ausência da evaporação no mar, em janeiro (**Figura 5.3a**), permanece com chuva ao longo de todo o litoral, mas com valores de menos de 40 mm. Na ausência de ambos os fatores (**Figura 5.3c**), a precipitação desaparece totalmente no oceano e litoral de SC. Em novembro, em ambos os experimentos, com ausência de orografia e ausência dos dois fatores (**Figuras 5.4a e 5.4c**), a chuva desaparece não só da parte marítima, mas também da parte continental.

Na ausência da orografia (**Figuras 5.3b e 5.4b**), a chuva é detectada no litoral e área marítima, mas com valores abaixo dos apresentados no experimento controle (**Figuras 5.3d e 5.4d**). Em novembro de 2008 (**Figura 5.4b**), a chuva entre a GF e LS foi bem reduzida. No LN, porém, esta redução no valor da chuva foi menor. Ocorreu, inclusive, um aumento da chuva no mar. (Mas é preciso considerar que o total de chuva simulado para o norte de SC foi bem inferior ao ocorrido (**ANEXO I**)). Em janeiro de 2008, na **Figura 5.3b**, do experimento com ausência da orografia, a redução da precipitação é verificada em todo o litoral. Na GF e LN, a

chuva de 200 mm no experimento controle (**Figura 5.3d**) é reduzida para valores de 40-70 mm (**Figura 5.3b**). Neste caso, diferente dos anteriores, com a retirada da orografia verifica-se uma redução considerável no valor da chuva no LN. Este é o único dos quatro casos em que o fluxo de vento leste, no experimento controle (**Figura 5.3d**), é observado em todo o litoral entre SC e SP. Em 2009 e em novembro de 2008 (**Figuras 5.2d e 5.4d**), no litoral de SP e em uma parte do LN, o vento é de nordeste.

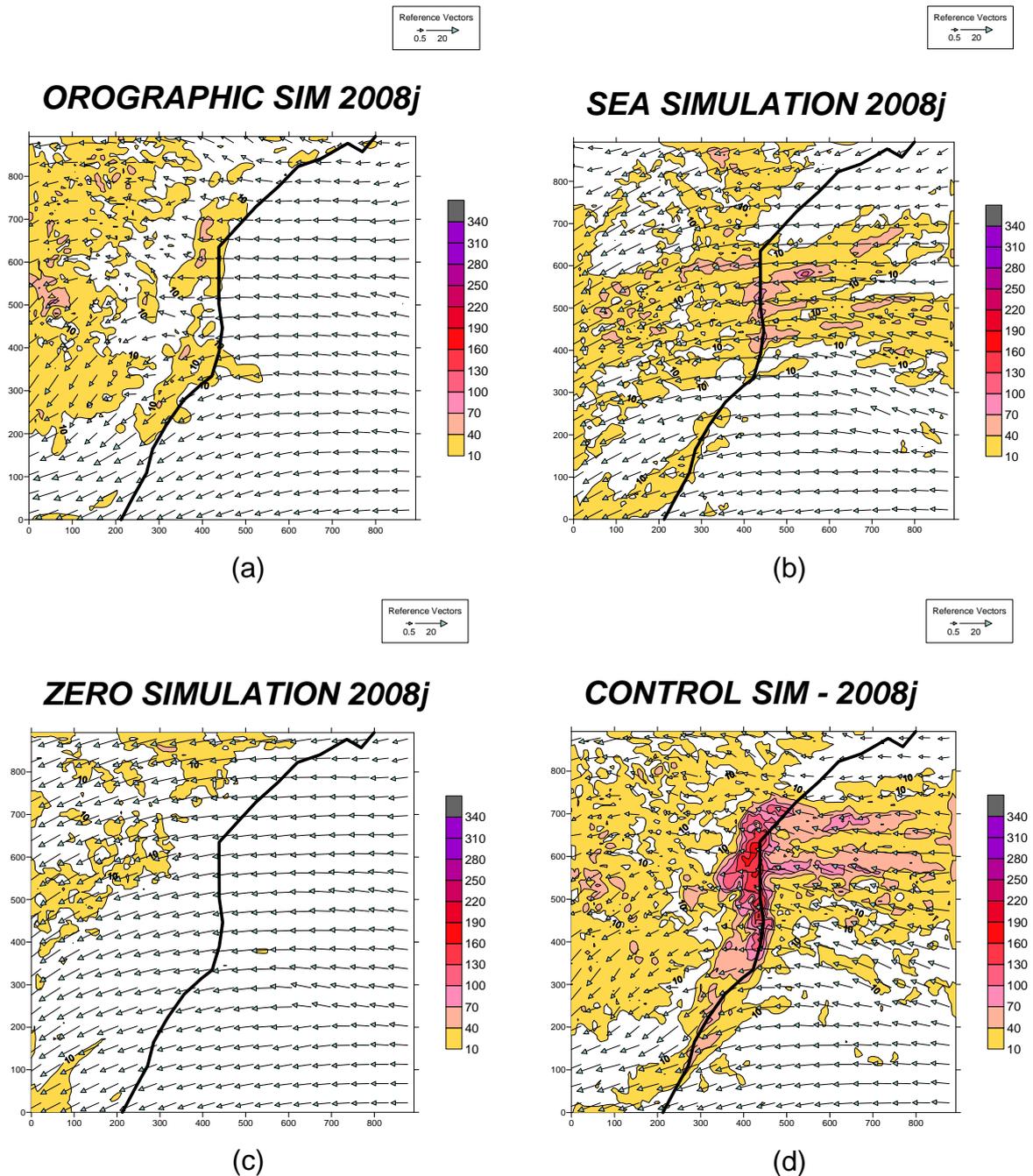


Figura 5.3 – Campos de vento em 925 hPa (31/01/2008 - 06UTC) e de precipitação (acumulada entre 30/02 - 00 UTC e 01/02/2008 - 12 UTC), obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

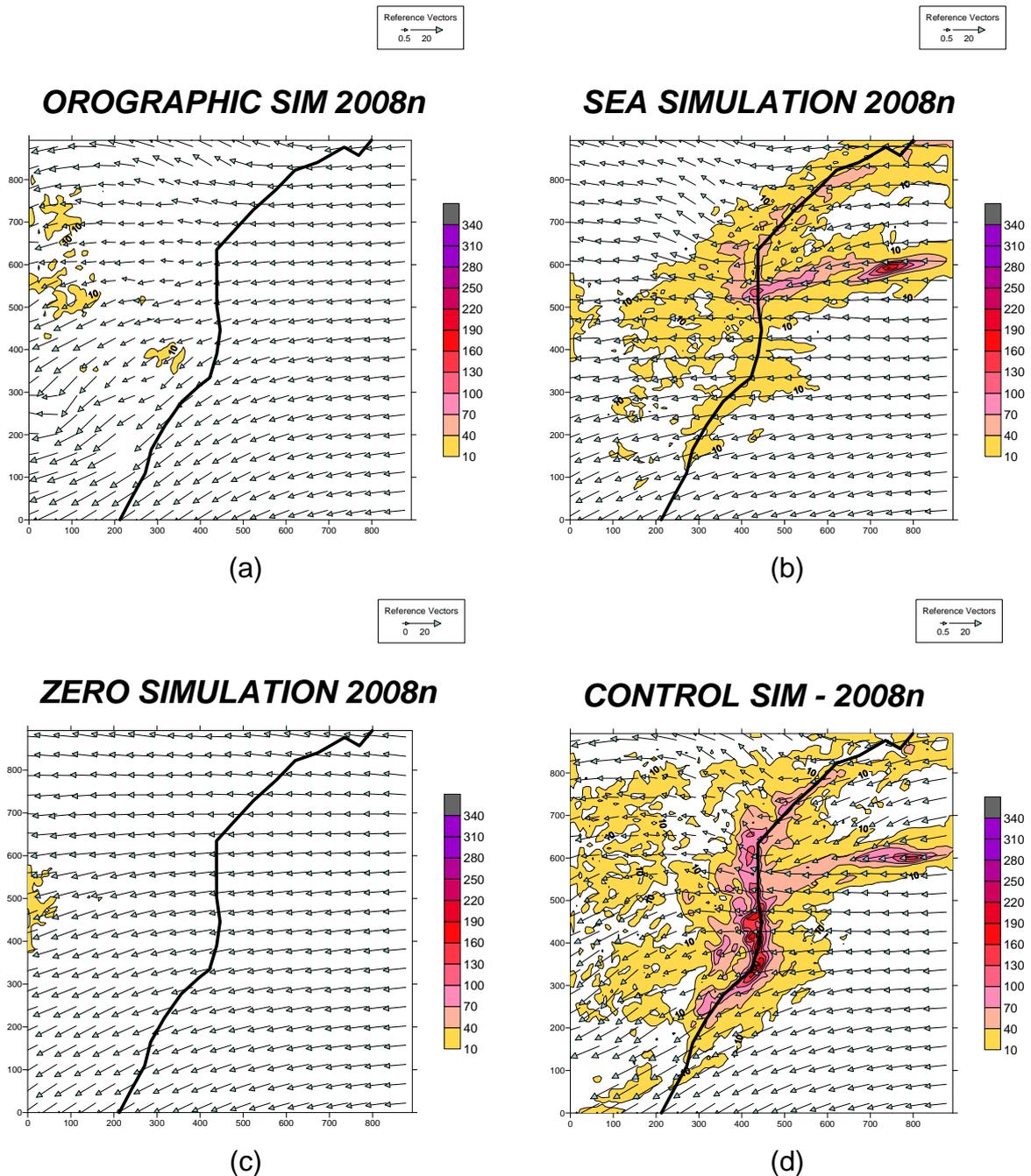


Figura 5.4 – Campos de vento em 925 hPa (22/11/2008 - 00 UTC) e de precipitação (acumulada entre 19/11 - 12 UTC e 23/11/2008 - 12 UTC) obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

5.1.4 Janeiro de 2004

No evento de janeiro de 2004, grupo G4 (ver Cap. 4), o total diário na GF foi de 140 mm no dia 28/01 (**Tabela 3.1**), um registro extremamente localizado (**ANEXO I**). Nas demais estações observacionais no litoral de SC, os registros de chuva foram inferiores a 10 mm. Somente em municípios a cerca de 50 km da GF, houve registro de chuva entre 40-100 mm.

A chuva da GF foi bem simulada no experimento controle (**Figura 5.5d**), para o qual foi estimado um total de 100-130 mm. Os maiores valores de chuva no LN, não correspondem ao observado. Na verdade, a precipitação ocorreu no setor nordeste-leste do ciclone em 500 hPa (**Figuras 4.16g-h**), atingindo especialmente a área de mar próximo da costa de SC, o que foi bem simulado pelo modelo. No experimento com ausência da evaporação no mar (**Figura 5.5a**), a precipitação foi reduzida (valores de 10-40 mm) na GF, LN e em toda a área de mar, exceto no LS. Na ausência da topografia (**Figura 5.5b**), a chuva no mar intensifica-se, enquanto no continente, em toda a área leste de SC, verifica-se uma redução da chuva. O experimento com ausência de ambos os fatores (**Figura 5.5c**), é um pouco similar ao da **Figura 5.5b**, por apresentar uma redução da chuva em toda a área continental e manter a chuva no mar. A chuva na área de mar próxima do litoral também é reduzida. Neste caso, a chuva no mar é provavelmente associada ao ciclone em 500 hPa, enquanto a maior parte da chuva no litoral é influenciada pela presença da evaporação do mar e orografia.

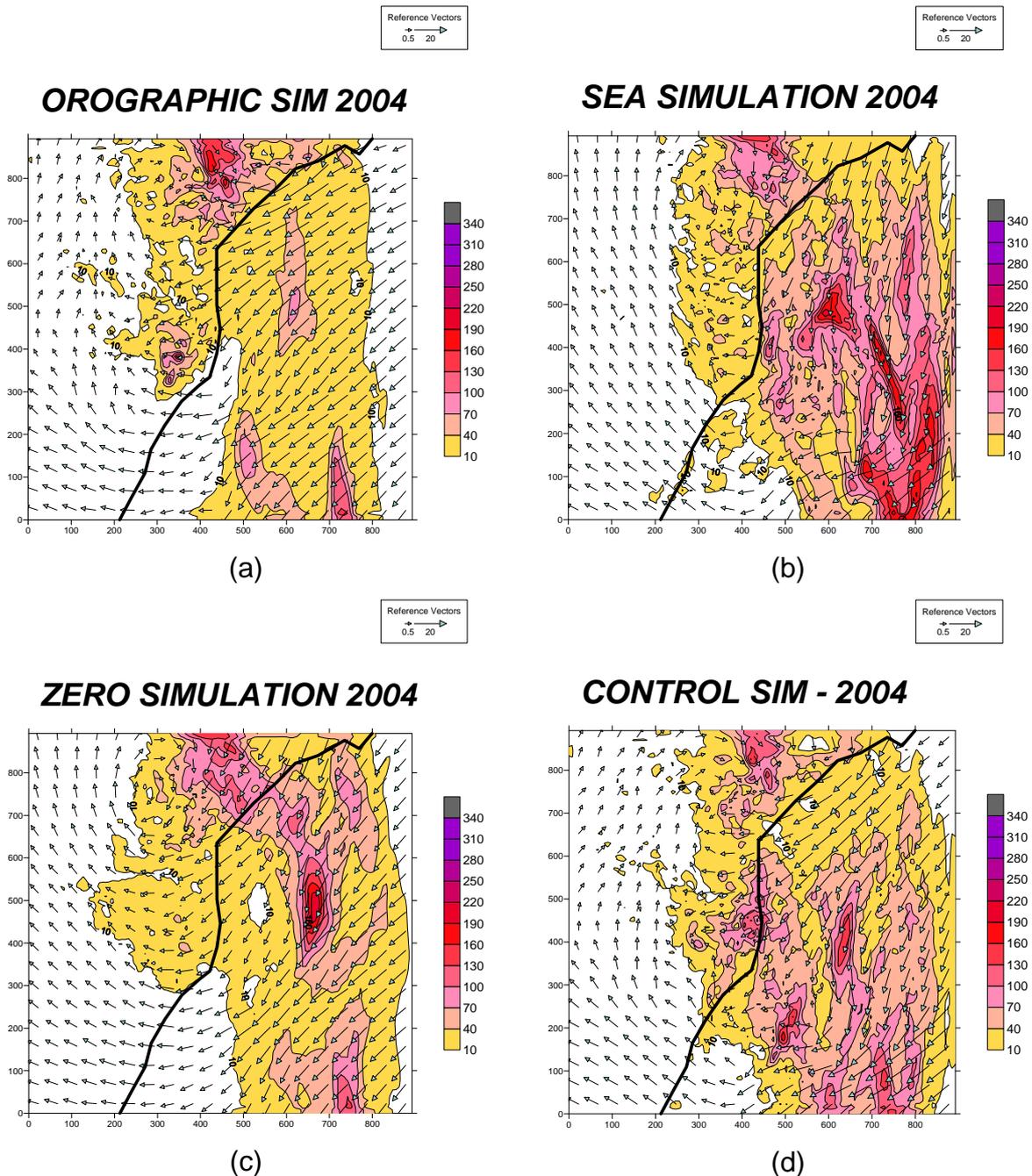


Figura 5.5 – Campos de vento em 925 hPa (27/01/2004 - 18 UTC) e de precipitação (acumulada entre 26/01 - 12 UTC e 28/01/2004 - 12 UTC) obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

5.1.5 Fevereiro de 2001 e Maio de 2010

No evento de fevereiro de 2001, grupo G2 (ver Cap. 4), o total diário na GF foi de aproximadamente 200 mm no dia 04/02 (**Tabela 3.1**), com acumulados em torno de 350 mm, outro registro extremamente localizado (**ANEXO I**).

O valor da chuva da GF não chega a ser bem simulado no experimento controle (**Figura 5.6d**), sendo subestimado. No litoral de SC, o modelo estima valores máximos de 160-190 mm. Como no caso 2004, apesar da chuva intensa ser extremamente localizada na GF, a mesma é simulada em todo o litoral, exceto mais ao sul, e essencialmente na parte continental. Ao contrário dos casos anteriores, neste de 2001 a chuva do experimento controle não difere muito do que é simulado nos três experimentos de sensibilidade da **Figura 5.6**. Inclusive se observa um aumento na intensidade da precipitação, tanto no mar como no continente, nos experimentos com ausência da topografia e ausência de ambos os fatores (**Figuras 5.6b-c**). Este caso do grupo G2 difere dos demais por apresentar um vento de leste menos intenso em relação aos outros grupos, nas horas que antecedem o início da chuva intensa. E também é o único entre os casos que não apresenta um fluxo de leste-nordeste entre o LN de SC.

No caso de maio de 2010, grupo G1 (ver Cap. 4), o total diário na GF foi de aproximadamente 200 mm no dia 19/05 (**Tabela 3.1**). com acumulados em torno de 250 mm, outro registro extremamente localizado (**ANEXO I**).

No experimento controle (**Figura 5.7d**), os valores de mais de 350 mm em todo o litoral de SC e áreas vizinhas foram superestimados. Mesmo assim, é possível verificar, nos três experimentos de sensibilidade da **Figura 5.7** que a ausência da topografia ou da evaporação do mar, ou mesmo de ambos os fatores, provocam uma redução considerável nos valores de precipitação no litoral. Com a retirada da topografia (**Figura 5.7b**), a chuva permanece na mesma área entre o continente e mar, mas é bem reduzida para valores máximos de 150-200 mm. Nos experimentos com ausência da evaporação do mar e ausência de ambos os fatores (**Figuras 5.7a e 5.7c**), especialmente a chuva no litoral de SC e no mar ficam ainda mais reduzidas. Na **Figura 5.7c**, os valores de chuva no litoral ficam reduzidos para 40-70 mm com ausência simultânea da evaporação do mar e da orografia.

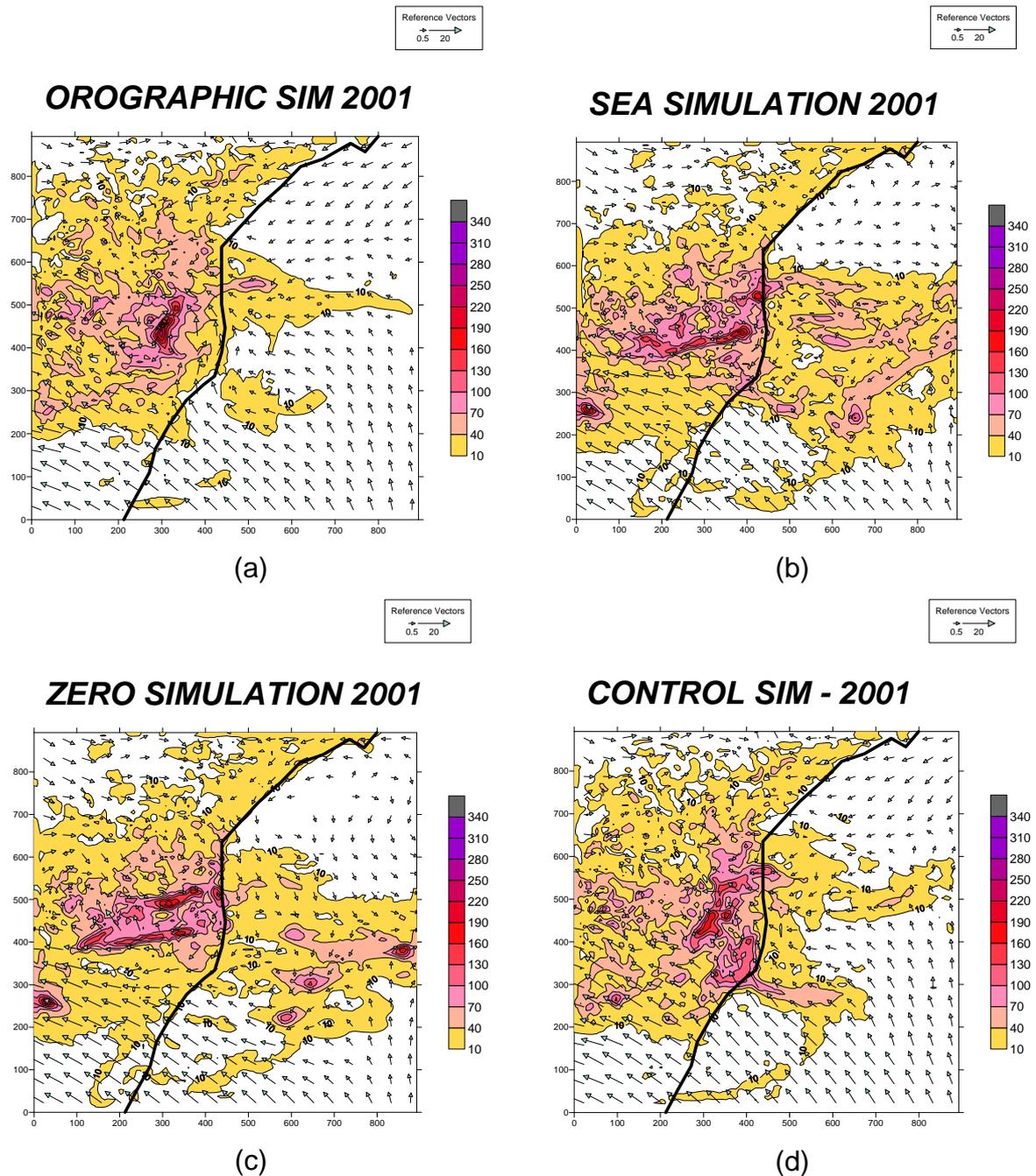


Figura 5.6 – Campos de vento em 925 hPa (04/02/2001 - 00 UTC) e de precipitação (acumulada entre 03/02 - 00 UTC e 05/02/2001 - 00 UTC) obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

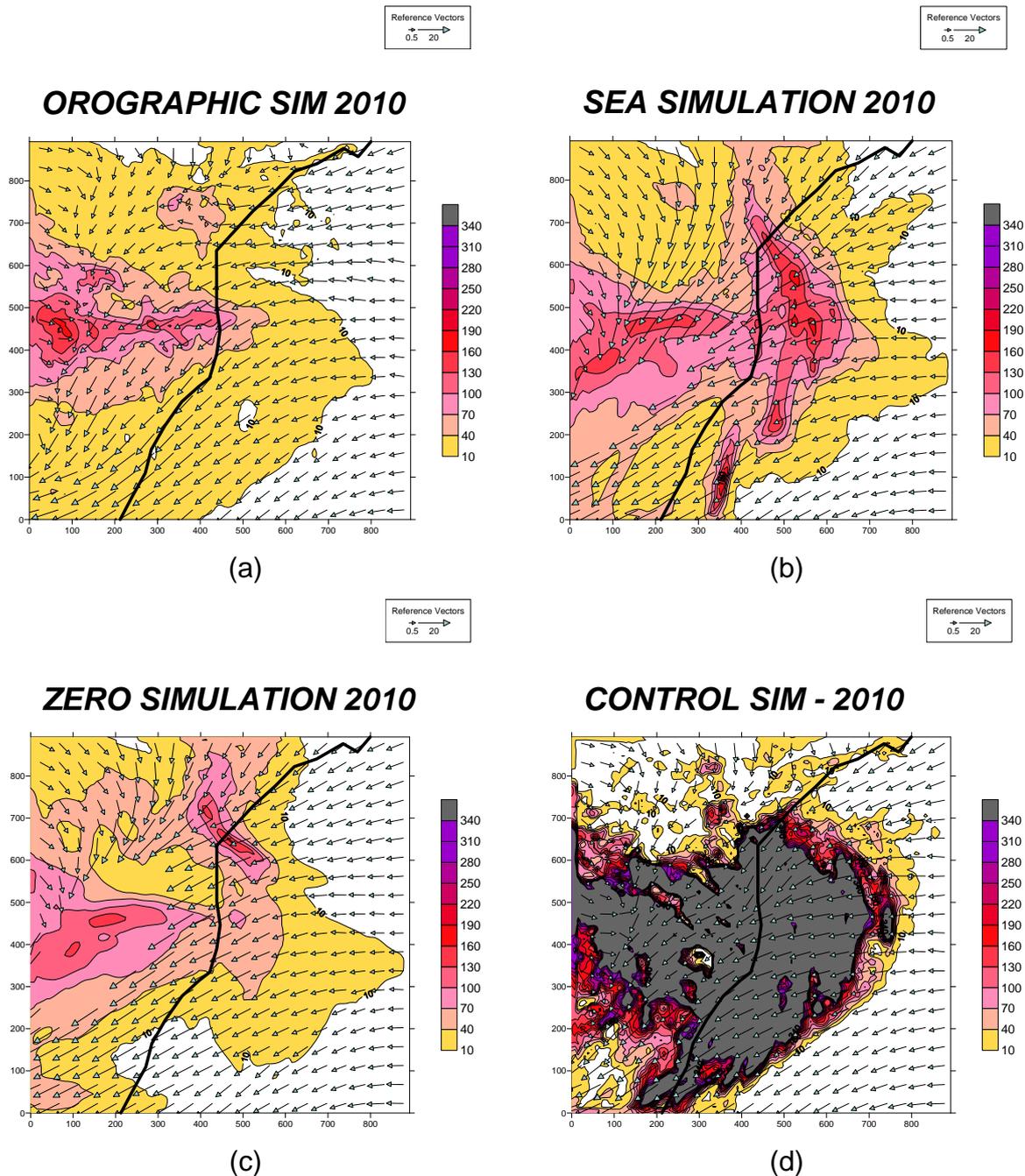


Figura 5.7 – Campos de vento em 925 hPa (18/05/2010 - 18 UTC) e de precipitação (acumulada entre 17/05 - 12 UTC e 19/05/2010 - 12 UTC) obtidos de experimentos com (a) ausência da evaporação do mar (f_1); (b) ausência da topografia (f_2); (c) ausência (f_0) e (d) presença (f_{12} , experimento controle) simultânea de ambos os fatores.

Os campos de chuva da simulação controle (f_{12}) dos três eventos para os quais não foram realizados os experimentos de sensibilidade, são apresentados no **ANEXO II**: casos de 1991 (G2), 1994 (G4) e dez/2008 (G3).

Em dois eventos (1991 e 1994), a precipitação registrada na GF (**Tabela 3.1**) foi subestimada na simulação. Em novembro de 1991, a chuva extrema, em torno de 400 mm em 24 horas, ocorreu de forma localizada na região. O modelo simula chuva na área da GF, com valores máximos de 120-150 mm, enquanto os maiores totais de precipitação são identificados em áreas mais afastadas. Esta mesma condição pode ser também observada no caso de fevereiro de 1994, quando o total diário de precipitação na GF ficou em torno de 200 mm.

No caso de dezembro de 2008, a precipitação foi melhor simulada pelo modelo na área da GF e LN de SC, onde os dados observacionais registraram em torno de 200 mm em 24 horas.

5.2 – MÉTODO DE SEPARAÇÃO DE FATORES (SF)

Os resultados obtidos nos experimentos de sensibilidade foram melhor avaliados com a aplicação do Método de SF (ver Metodologia, Cap. 2, ítem 2.5). A SF foi aplicada aos casos de dez/1995, abr/2009, jan/2008, nov/2008, jan/2004 (**Tabela 5.1**), cujas análises são apresentadas a seguir.

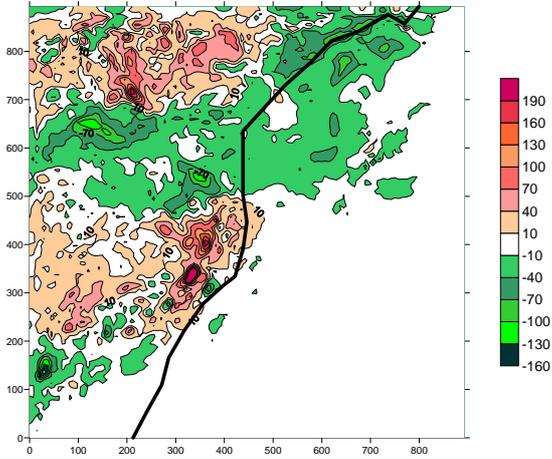
- Dezembro de 1995

A presença da topografia (**Figura 5.9a**) favorece, para dezembro de 1995, o aumento da precipitação entre a GF e LS de SC, região afetada neste evento conforme os dados observacionais. Uma diminuição da chuva, no entanto, pelo efeito da topografia, é observada na área de litoral que se estende desde o norte de SC em direção ao Rio de Janeiro, e área marítima próxima. Esta é a região da Serra do Mar que contorna a faixa litorânea, e provavelmente inibe o escoamento de noroeste que favorece a precipitação na área continental do interior de SP.

A presença da evaporação do mar (**Figura 5.9b**) favorece um pequeno aumento da chuva no mar, na área da GF e um núcleo mais intenso no LN de SC. Uma diminuição da chuva é observada nas mesmas áreas da **Figura 5.9a**.

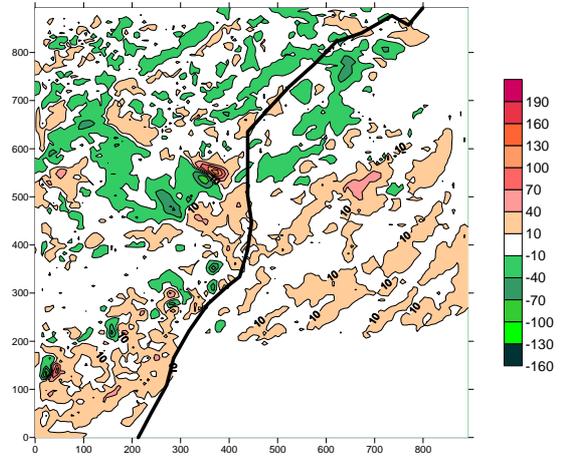
É no efeito da interação entre topografia e evaporação no mar (**Figura 5.9c**), entretanto, que aparece uma área mais extensa de precipitação ao longo do litoral de SC, e mais próxima da costa em relação ao observado no caso do efeito da topografia (**Figura 5.5a**). Especialmente na área da GF, chuva mais intensa aparece quando se considera o efeito da interação entre ambos os fatores (**Figura 5.5c**).

ORO EFFECT 1995



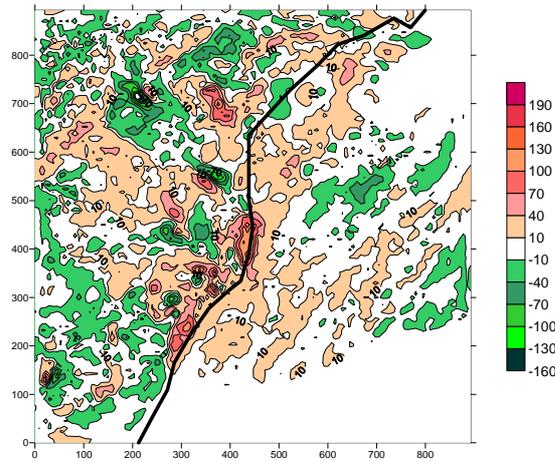
(a)

SEA EFFECT 1995



(b)

ORO-SEA EFF 1995



(c)

Figura 5.9 – Contribuição do (a) efeito da topografia (F1), (b) evaporação do mar (F2) e (c) interação entre ambos (F12), nos campos de precipitação do evento dez/1995.

- Abril de 2009

No evento de abril de 2009, cuja precipitação atingiu entre o LN e GF, observa-se que a evaporação no mar (**Figura 5.10b**) contribuiu para um aumento da precipitação no litoral de SC, especialmente LN, e na extensa porção de mar na costa de SC. O efeito da topografia (**Figura 5.10a**), no entanto, é menor na área do litoral catarinense.

O maior efeito nas chuvas da região, para este caso, foi encontrado quando se considerou a interação entre os fatores topografia e evaporação do mar (**Figura 5.10c**). O aumento da chuva foi observado em todo o litoral de SC, na GF e demais áreas, tanto no LN como LS. Na área de mar em latitudes próximas do LN de SC, onde se verifica a presença de um ciclone (ver Cap. 4), também foi verificado o efeito da interação evaporação-topografia. Como no evento anterior, de 1995, neste de 2009 a chuva na área da GF aparece com maior intensidade nos campos que representam a interação entre os fatores (**Figura 5.10c**). Neste experimento, ainda se verifica uma diminuição da chuva em uma extensa área no interior de SC e em uma a área de mar próxima ao litoral de São Paulo.

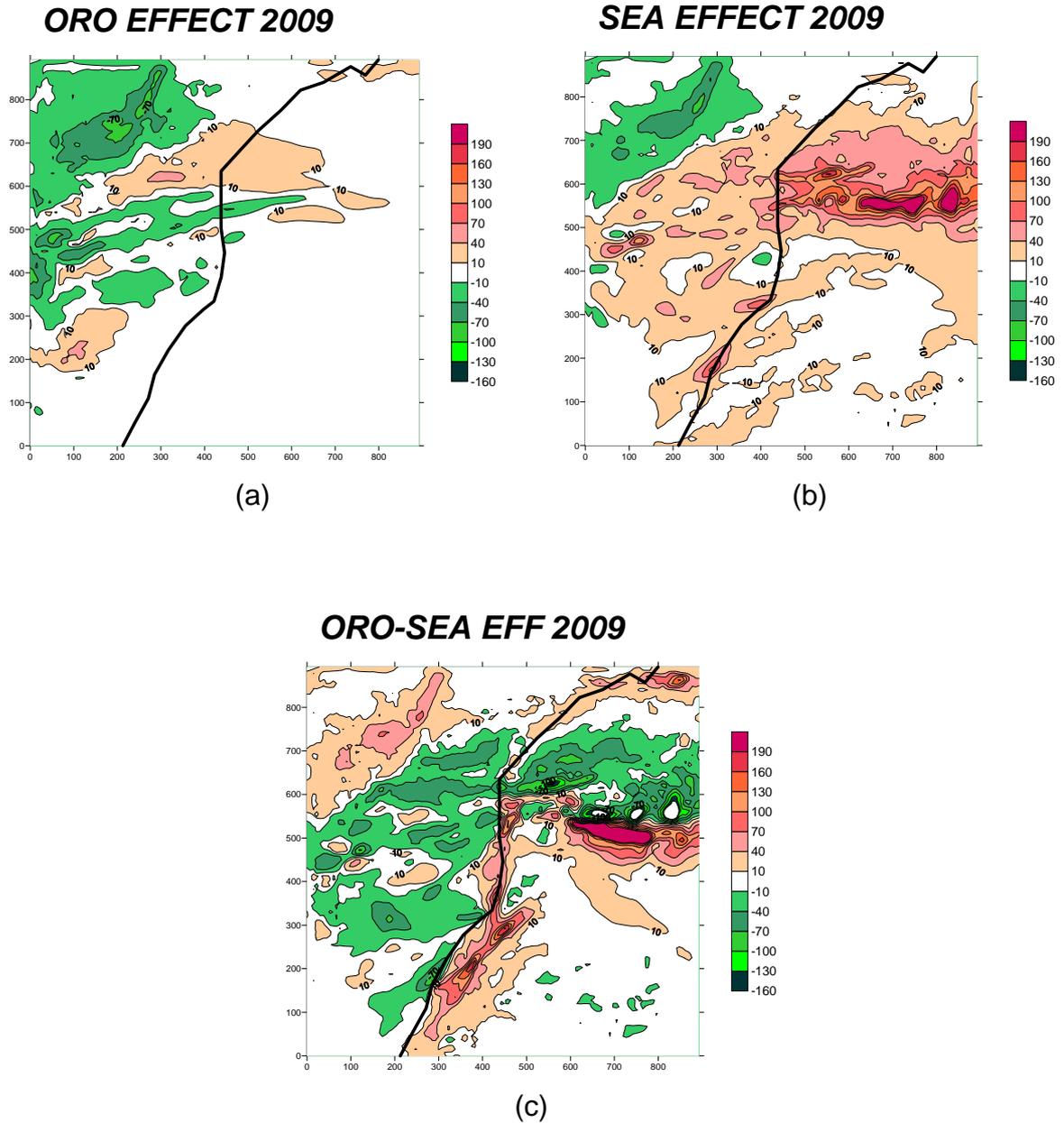


Figura 5.10 – Contribuição do (a) efeito da topografia (F1), (b) evaporação do mar (F2) e (c) interação entre ambos (F12), nos campos de precipitação do evento abr/2009.

- Janeiro de 2008

Neste evento de janeiro de 2008, como em 2009, a chuva atingiu com maior intensidade o LN. A evaporação no mar (**Figura 5.11b**) contribuiu para um aumento da precipitação no litoral de SC e em uma extensa porção de mar na costa de SC.

O efeito da topografia (**Figura 5.11a**) é um pouco menor na área do litoral catarinense, e praticamente não aparece na GF nem na área de mar.

O efeito nitidamente maior é da interação entre ambos os fatores, topografia e evaporação do mar (**Figura 5.11c**), nas áreas do litoral de SC entre a GF e LN. Neste caso, a chuva aumenta em mais de 100 mm, enquanto nas áreas ao redor, tanto no continente como no mar, ocorre uma redução da chuva. Na área de mar entre o litoral de SP e litoral de SC, onde se tem a presença de um ciclone (ver Cap. 4), o efeito da interação é de aumento da precipitação. Assim, na GF o efeito que mais contribui no aumento da precipitação é aquele que representa a interação entre os fatores (**Figura 5.11c**).

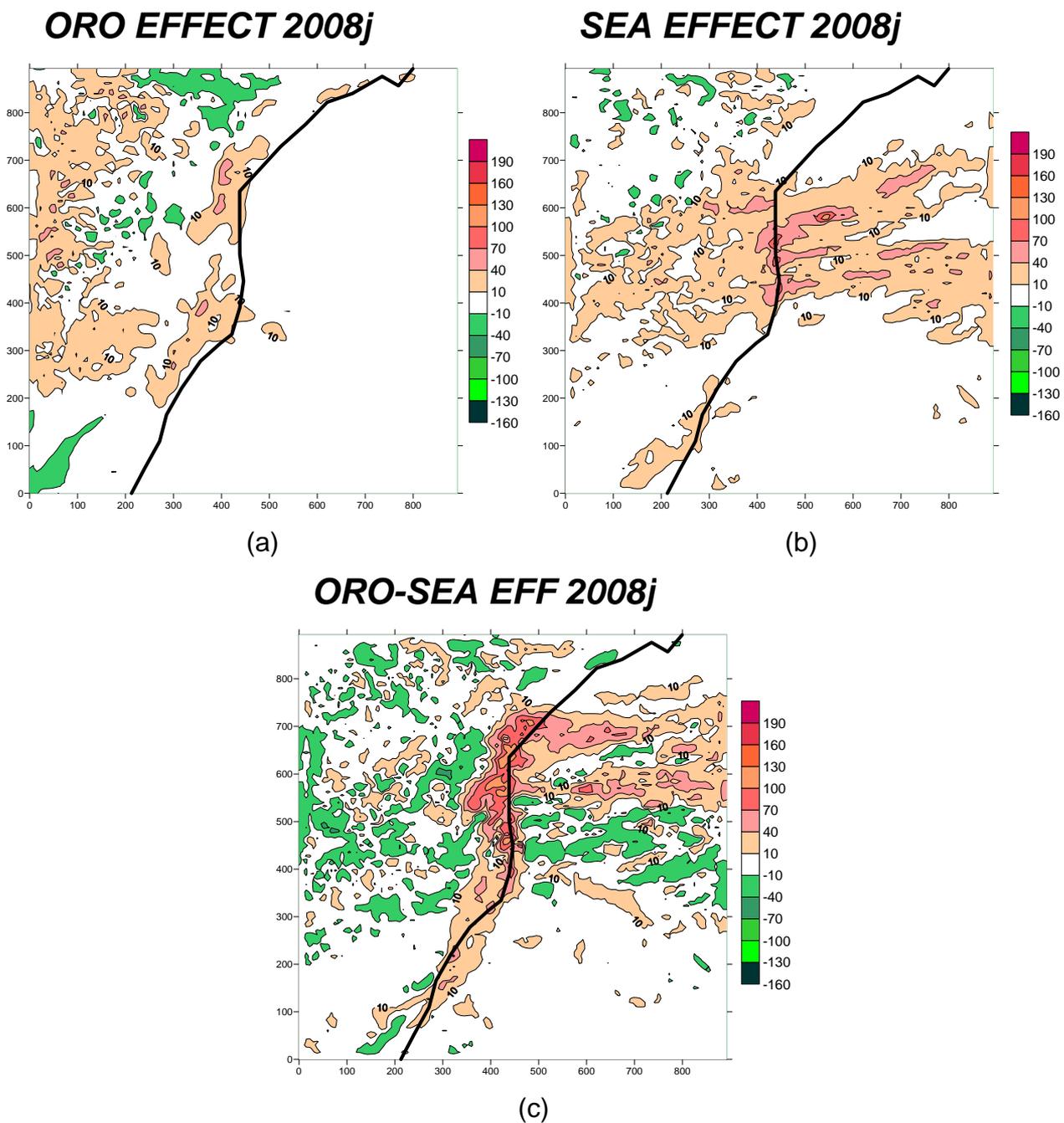


Figura 5.11 – Contribuição do (a) efeito da topografia (F1), (b) evaporação do mar (F2) e (c) interação entre ambos (F12), nos campos de precipitação do evento jan/2008.

- Novembro de 2008

O evento de novembro de 2008 diferenciou-se dos demais em relação ao efeito da topografia (**Figura 5.12a**). Em 2009 e janeiro de 2008, quando a chuva mais intensa ocorreu no LN, o efeito da topografia atingiu uma área mais reduzida no litoral catarinense, em comparação com o evento de 1995, no qual a chuva mais intensa atingiu o LS de SC. Neste caso de novembro de 2008, o efeito da topografia é praticamente zerado, não apenas no litoral de SC como em toda a área do domínio.

Como nos outros eventos de chuva no LN (abril de 2009 e janeiro de 2008), a evaporação no mar contribuiu para um aumento da precipitação no litoral de SC (**Figura 5.12b**), no LN e área de mar em latitudes da costa norte de SC. Neste caso, no entanto, diferente de 2009 e janeiro de 2008, o efeito da evaporação no mar foi reduzido nas áreas continentais.

Mais uma vez, como nos casos anteriores, o efeito da interação entre a topografia e a evaporação do mar (**Figura 5.12c**) é o que contribui para um grande aumento da chuva nas áreas do litoral de SC. Lembrando que, neste caso, a simulação do modelo subestimou os elevados volumes de chuva observados no LN de SC, como visto no item anterior. Ainda na **Figura 5.12c**, verifica-se um efeito de retirada da precipitação em áreas próximas do LN de SC. E, como, nas outras figuras do mesmo caso, os efeitos dos fatores concentraram-se nas áreas do litoral, sendo bem reduzidos no continente.

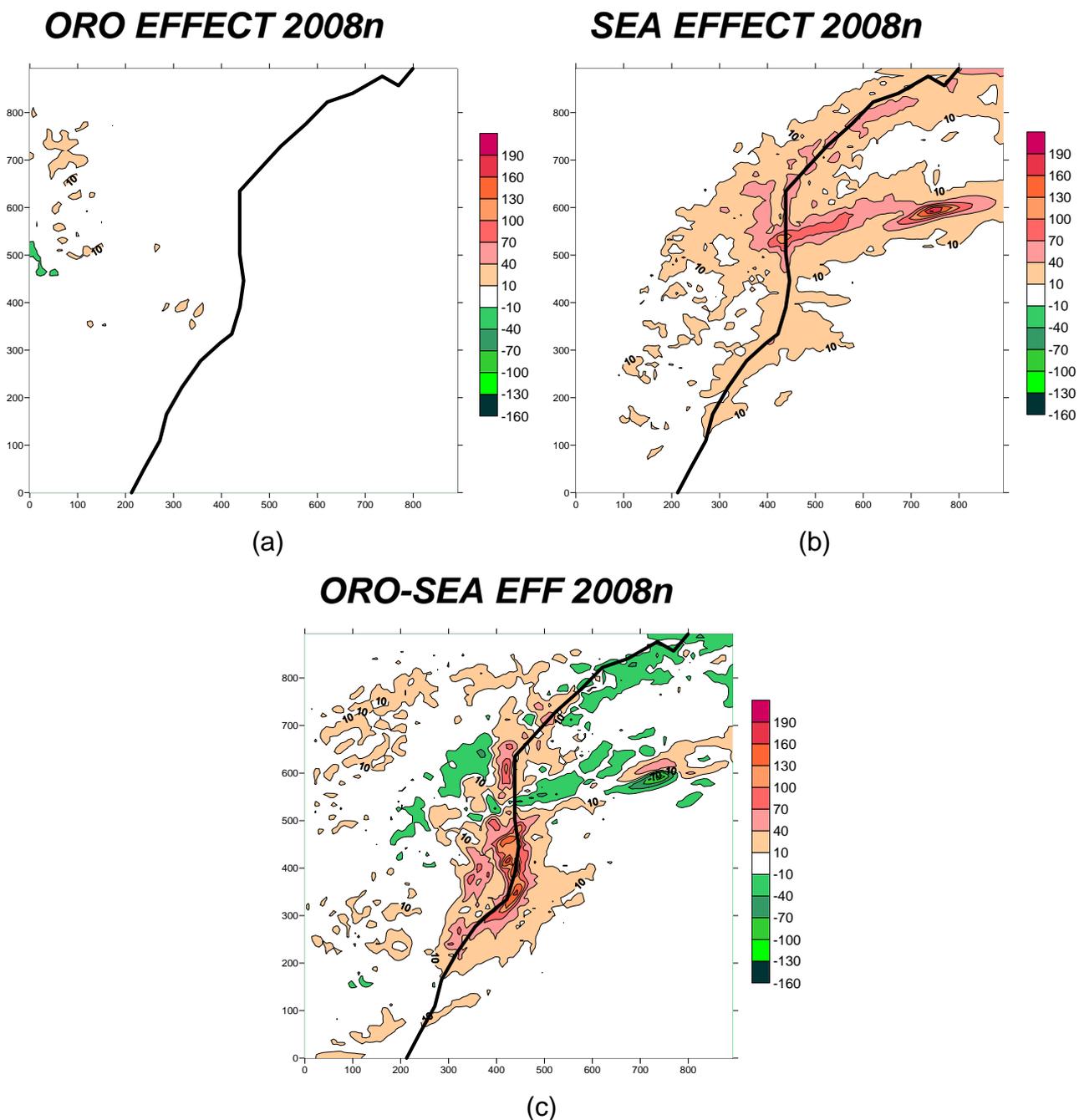


Figura 5.12 – Contribuição do (a) efeito da topografia (F1), (b) evaporação do mar (F2) e (c) interação entre ambos (F12), nos campos de precipitação do evento nov/2008.

- Janeiro de 2004

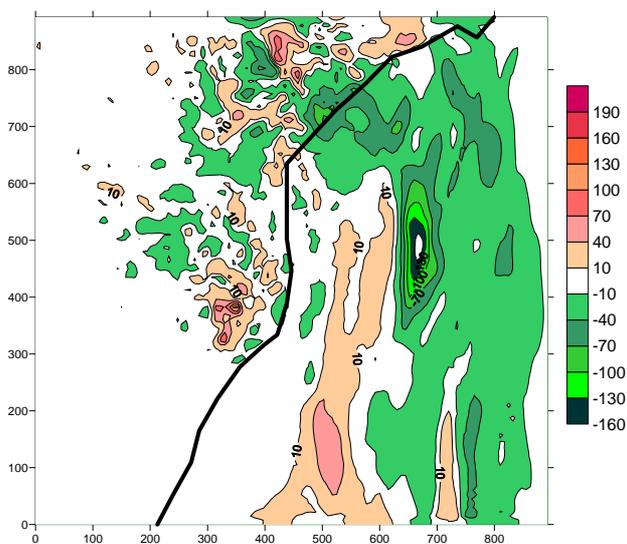
Este caso de janeiro de 2004 diferenciou-se dos demais por apresentar um intenso fluxo de vento nordeste em superfície, na costa de SC (ver Cap. 4). Nos casos anteriores o fluxo era aproximadamente de leste no LS (1995) ou LN (2009 e casos de 2008). Na própria **Figura 5.13** observa-se o efeito dos fatores no sentido longitudinal, indicando a associação com o fluxo de vento.

O efeito da topografia (**Figura 5.13a**) é o de retirada da precipitação no litoral de SC e, principalmente, litoral de SP, e ao longo de toda a costa. A presença do relevo, no litoral de SP, parece inibir o transporte de calor e umidade dirigido de áreas continentais em direção ao mar. O efeito de aumento da chuva é verificado no LS de SC, região de acentuado relevo no Estado.

O efeito da evaporação no mar (**Figura 5.13b**), ao contrário da topografia, é de aumento da chuva na área de mar em toda a costa. No continente, este efeito é mais reduzido.

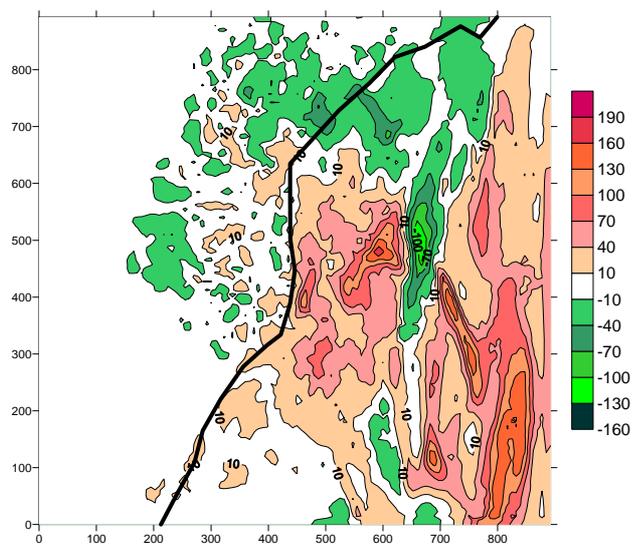
E neste caso, o aumento da chuva no litoral de SC é verificado no efeito da interação entre os fatores (**Figura 5.13c**), especialmente da GF ao LN, áreas mais afetadas pelo vento de nordeste.

ORO EFFECT 2004



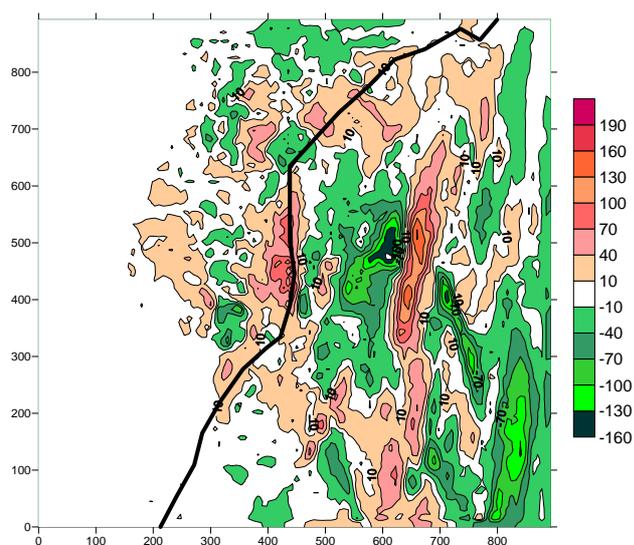
(a)

SEA EFFECT 2009



(b)

ORO-SEA EFF 2004



(c)

Figura 5.13 – Contribuição do (a) efeito da topografia (F1), (b) evaporação do mar (F2) e (c) interação entre ambos (F12) nos campos de precipitação do evento jan/2004.

5.3 - CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Pode-se dizer que em geral a precipitação no litoral de SC foi razoavelmente bem simulada nos experimentos controle, especialmente em termos de localização da chuva.

Na maior parte dos eventos, a chuva atingiu, além da GF, outras áreas no litoral de Santa Catarina. Em geral, ocorrem com maior intensidade ou no LN ou no LS de SC. Para os eventos em que os maiores totais de chuva foram registrados nas áreas entre o litoral central e sul, o efeito da topografia é verificado no aumento da quantidade de precipitação. A presença da evaporação do mar, no entanto, produz um efeito de aumento da precipitação entre o litoral central e norte de SC, e na área marítima entre estas latitudes. Nesta mesma região, a topografia ao longo do litoral sudeste do Brasil, considerada isoladamente, influencia no sentido de reduzir a precipitação.

O principal efeito no aumento da precipitação no litoral de SC, no entanto, é aquele produzido pela interação entre topografia e evaporação o mar, tanto nos casos de chuva no litoral sul como litoral norte. E, entre todas as áreas do litoral, é justamente na área da GF que este efeito da interação entre ambos os fatores é maior.

Em simulações numéricas com o MM5, Romero et al. (2000) verificaram uma boa distribuição espacial e temporal da chuva, e até mesmo uma boa localização da chuva forte, mas a quantidade média de chuva e os picos de chuva forte foram subestimados. Em estudos realizados para a região oeste do Mediterrâneo, Romero et al. (1998) e Romero et al. (2000) verificaram, em casos similares, que a presença da montanha favorece a distribuição de umidade na coluna e pode contribuir significativamente na quantidade de chuva simulada. Romero et al. (2000) verificaram um transporte de movimento ascendente entre superfície e 300hPa, provocado a partir da circulação em baixos níveis que chega à montanha. Esta condição permanece por um período longo e pode favorecer a eficiência da precipitação.

CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Considerando ser o litoral de Santa Catarina uma região vulnerável à ocorrência de eventos de inundação/enchente e de deslizamentos de encosta, este trabalho teve como objetivo determinar as características sinóticas e físicas associadas a eventos de chuva extrema na região. Para tal, foi determinada a climatologia sinótica em tais eventos e realizadas simulações numéricas, avaliando o papel da orografia e da evaporação no mar.

Foram selecionados 18 casos a partir de dados observacionais no litoral central de Santa Catarina, entre 1969-2010, considerando os extremos no quantil 99,5% de chuva acumulada em cinco dias consecutivos. Os campos atmosféricos foram obtidos das reanálises do ERA-Interim. As simulações foram realizadas com o MM5 em dois domínios aninhados: 22,5 km e 7,5 km.

A maior parte dos eventos ocorreu no verão (56%), em fevereiro. Mais de 80% do total de chuva acumulada em 5 dias concentrou-se entre 1 e 3 dias. Em geral a chuva intensa concentra-se em 24 horas. Em apenas 3 dos 18 eventos a precipitação ficou distribuída em 3-4 dias. Na distribuição horária, é possível observar o caráter persistente da precipitação nestes eventos, com características do tipo estratiforme.

Em todos os casos analisados verificou-se uma alta pressão no Atlântico Sul, favorecendo ventos persistentes e mais intensos de leste/nordeste em baixos níveis, que resulta no transporte de calor e umidade para a costa catarinense. Em alguns eventos, um cavado prolonga-se do continente, altura do litoral Sudeste do Brasil (Estado de São Paulo, em torno de 20-25°S), em direção ao oceano, associado a um sistema frontal ancorado no Atlântico Sul. A circulação formada na região marítima, entre o cavado e o anticiclone, favorece ventos mais intensos na costa de SC, com direção predominante leste-nordeste, próximo da superfície e em baixos níveis. Na maior parte dos eventos, predominam sistemas semiestacionários de alta pressão no mar e de ciclones em médios níveis, no Sul do Brasil ou área continental próxima, caracterizando um padrão de bloqueio de 3-4 dias. Isto explica porque estes eventos extremos ocorrem em períodos prolongados com ausência de precipitação no oeste de Santa Catarina.

Experimentos de sensibilidade foram realizados considerando ausência da evaporação do mar (f_1), da orografia (f_2) e de ambos os fatores (f_0), enquanto o experimento controle (f_{12}) considerou a presença conjunta da topografia e evaporação do mar. O método de Separação de Fatores foi empregado para avaliar os efeitos dos fatores, da orografia, da evaporação no mar e da interação entre ambos.

Na maior parte dos eventos, a chuva atingiu, além da GF, outras áreas no litoral de Santa Catarina. Em geral, ocorrem com maior intensidade ou no LN ou no LS de SC. Para os eventos em que os maiores totais de chuva foram registrados nas áreas entre o litoral central e sul, o efeito da topografia é verificado no aumento da quantidade de precipitação. A presença da evaporação do mar, no entanto, produz um efeito de aumento da precipitação entre o litoral central e norte de SC, e na área marítima entre estas latitudes. Nesta mesma região, a topografia ao longo do litoral sudeste do Brasil, considerada isoladamente, influencia no sentido de reduzir a precipitação.

O principal efeito no aumento da precipitação no litoral de SC, no entanto, é aquele produzido pela interação entre topografia e evaporação o mar, tanto nos casos de chuva no litoral sul como litoral norte. E, entre todas as áreas do litoral, é justamente na área da GF que este efeito da interação entre ambos os fatores é maior.

O mês de fevereiro foi o que apresentou o maior número de casos, o que pode ser explicado por ser um dos meses, assim como março, em que a temperatura da superfície do mar está mais aquecida e, ao mesmo tempo, é um dos meses em que, juntamente com janeiro, verifica-se uma maior frequência de formação de cavados no litoral de SP.

SUGESTÕES

Analisar dados observacionais horários de vento para estes eventos, juntamente com a precipitação. Em evento de chuva orográfica intensa em Florianópolis/SC, Haas (2002) verificou que o início da precipitação, às 21h, foi coincidente com o giro anticiclônico da direção do vento, de quadrante leste para oeste, sugerindo uma possível confluência da brisa terrestre com a circulação sinótica de leste predominante.

Analisar dados observacionais horários de superfície, de temperatura e umidade, no litoral de SC, com o objetivo de identificar sistemas de mesoescala e melhor caracterizar a região de crista no setor leste de SC, identificada nos eventos.

Identificar o padrão sinótico nos eventos no quantil de 99%, para comparação com este estudo.

Analisar a temperatura da superfície do mar no Atlântico Sul durante os eventos, considerando que a evaporação no mar tem um grande efeito na precipitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLANCO, C. M. R., 1999. Processos de intensificação orográfica da precipitação na Serra do Mar em São Paulo. São Paulo, Dissertação de Mestrado, IAG-USP, 149pp.
- BOUSQUET, O.; SMULL, B., 2003. Observations and impacts of upstream blocking during a widespread orographic precipitation event. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129, 391-409, doi:10.1256/qj.02.49.
- CASARIN, D. P.; KOUSKY, V. E., 1986. Anomalias de precipitação no Sul do Brasil e variações na circulação atmosférica. *Rev. Bras. Meteorol.*, 1, 83-90.
- DOSWELL, C. A. III; BROOKS, H. E.; MADDOX, R. A., 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Wea. Forecasting*, 11, 560-581.
- DOSWELL, C. A. III; RAMIS, C.; ROMERO, R.; ALONSO, S., 1998. A diagnostic study of three heavy precipitation episodes in the western Mediterranean region. *Wea. Forecasting*, 13, 102-124.
- DUCROCQ, V.; NUISSIER, O.; RICARD, D.; LEBEAUPIN, C.; THOUVENIN, T., 2008. A numerical study of three catastrophic precipitating events over southern France. II: Mesoscale triggering and stationarity factors. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 134, 131-145.
- FRANCO, A. C.; CZARNOBAI, A. F.; PRUDÊNCIO, R. S., 2006. Estudo do regime de ventos para Florianópolis/SC. In: VII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Rondonópolis, MT. Anais.
- FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.;
- KLEIN TANK, A. M. G.; PETERSON, T., 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim Res*, 19, 193-212.
- GAN, M. A.; RAO, V. B., 1991. Surface Cyclogenesis over South America. *Mon. Wea. Rev.*, 119(5), 1293-1302.
- GOZZO, L. F., 2014: Ciclones Subtropicais Sobre o Sudoeste do Atlântico Sul: Climatologia e Fontes de Umidade. 129 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GOZZO, L. F.; ROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; SUGAHARA, S., 2014. Subtropical cyclones over the Southwestern South Atlantic: Climatological aspects and case study. *J. Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00149.1 (accept).
- Grell, G.; Dudhia J.; Stauffer D., 1994. A description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR.
- GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J., 1998. Precipitation anomalies in

Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *J. Climate*, AMS, 11(11), 2863-2880.

GRIMM, A. M.; TEDESCHINI R. G., 2009. ENSO and extreme rainfall events in South America. *J. Climate*, AMS, 22(11), 1589-1609.

HAAS, R., 2002. Simulações da chuva orográfica associada a um ciclone extratropical no Litoral sul do Brasil. Tese de Doutorado, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 172 pp.

HERRMANN, M. L. de P. (Org.), 2007. *Atlas de Desastres Naturais de Santa Catarina*. 1º. ed. Florianópolis, SEA/DEGED-CopyLlaser Gráfica Digital, 148pp.

HIGGINS, R. W.; KOUSKY, V. E., 2013. Changes in observed daily precipitation over the United States between 1950-1979 and 1980-2009. *J. Hydrometeorol*, 14, 105-121. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-12-062.1>

HOLTON, J. R., 2004. *An Introduction to dynamic meteorology*, 4th edition. Academic Press, 535 pp.

HOMAR V.; ROMERO, R.; RAMIS, C.; ALONSO, S., 2002. Numerical study of the October 2000 torrential precipitation event over eastern Spain: analysis of the synoptic-scale stationarity. *Annales Geophysicae*, 20, 2047-2066.

IWABE, C. M. N.; REBOITA, M. S.; CAMARGO, R., 2011. Estudo de caso de uma situação atmosférica entre 12 e 19 de setembro de 2008, com algumas características semelhantes ao evento Catarina. *Rev. Bras. Meteorol.*, 26, 67-84.

KIM, J.; SOONG, S.-T., 1996. Simulation of a precipitation event in the western United States. *Regional Impacts of Global Climate Change*, Ed. S. Ghan et al., Battelle Press, 73-84.

KOUSKY, V. E.; CAVALCANTI, I. F. A., 1984. Eventos Oscilação Sul / El Niño. Características, evolução e anomalias de precipitação. *Ciência e Cultura*, 36(11): 1888-1899.

LIMA, M.; RODRIGUES, M. L. G.; SACCO, F.; ARAÚJO, G.; ALVES, M., 2009. Análise da configuração atmosférica associada a eventos extremos de chuva no litoral do Estado de Santa Catarina, Sul do Brasil. In: III Simpósio Internacional de Climatologia, Canela, RS, Sociedade Brasileira de Meteorologia. Anais...[Available online at <http://sbmet.org.br/sic2009/port/index.php>.]

LIN, Y-L; CHIAO S.; WANG, T-A; KAPLAN, M. L.; WEGLARZ, R. P., 2001. Some common ingredients for heavy orographic rainfall. *Wea. Forecasting*, 16, 633-660.

LOPES, F. Z.; RODRIGUES, M. L. G., 2008. As estiagens no oeste de Santa Catarina entre 2002-2006. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, SP, Sociedade Brasileira de Meteorologia. Anais.

MADDOX, R. A.; CHAPPEL, C. F.; HOXIT, L. R., 1979. Synoptic and meso- α scale aspects of flash flood events. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 60, 115-123.

MADDOX, R. A.; HOXIT, L. R.; CHAPPEL, C. F.; CARACENA, F., 1978. Comparison of Meteorological Aspects of the Big Thompson and Rapid City Flash Floods. *Mon. Wea. Rev.*, 106, 375-389.

NIMER, E. Clima. In: Geografia do Brasil: Região Sul, 1979. Série Recursos Naturais e Meio Ambiente. 4, Rio de Janeiro: IBGE, 151-187.

PATHIRANA, A.; HERATH, S.; YAMADA, T., 2004. Simulating orographic rainfall with a limited-area, non-hydrostatic atmospheric model under idealized forcing. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 40, 5625-5653.

PINHEIRO, H. R., 2010. Validação do método track para identificação objetiva dos vórtices ciclônicos de altos níveis em regiões subtropicais. São José dos Campos, Dissertação de Mestrado, INPE, 130 pp.

PISSI, E., 2010. Análise da precipitação intensa associada aos desastres naturais no Vale do Itajaí e no Litoral de Santa Catarina, no período de 1998 a 2009: circulação marítima. Monografia, FAED-Universidade Estadual de Santa Catarina.

PONTRELLI, M. D.; BRYAN, G.; FRITSCH, J. M., 1999. The Madison County, Virginia, flash flood of 27 June 1995. *Wea. Forecasting*, 14, 384-404.

PRUDÊNCIO, R. S.; GEREMIAS, R.; VEADO, R. W. A., 1999. Análise do ritmo pluviométrico do litoral catarinense. In: XI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Florianópolis. Anais..., 1055-1063.

RAMIS, C.; ALONSO, S.; LLASAT, M. C., 1995. A comparative study between two cases of extreme rainfall events in Catalonia. *Surv. Geophys*, 16, 141-161.

RAMIS, C.; LLASAT, M. C.; GENOVÉS, A.; JANSÀ, A., 1994. The October-1987 floods in Catalonia: synoptic and mesoscale mechanisms. *Meteorol. Appl.*, 1, 337-350.

RAMIS, C.; ROMERO, R.; HOMAR V.; ALONSO, S.; ALARCÓN, M., 1998. Diagnosis and numerical simulation of a torrencial precipitation event in Catalonia (Spain). *Meteor. Atmos. Phys.*, 69, 1-21.

RAY, P. S., 1986. Upslope precipitation events. In: *Mesoscale Meteorology and Forecasting*, American Meteorological Society, Boston, 437-471.

REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T; SUGAHARA, S., 2009. South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by Regional Climate Model (RegCM3). *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-009-0668-7.

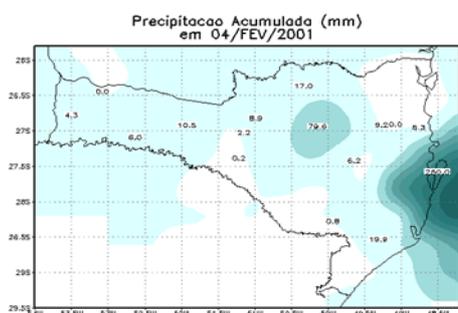
RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA S., 2004. Climatologia de frentes frias no Litoral de Santa Catarina. *Rev. Bras. Geofís.*, 22(2), 135–151.

RODRIGUES, M. L. G.; YNOUE, R.; ALVES, M. P., 2011. Episódios de chuva intensa na região da grande Florianópolis/SC: análise preliminar dos eventos e caracterização sinótica. IV Simpósio Internacional de Climatologia, João Pessoa, PB, Sociedade Brasileira de Meteorologia. Anais.

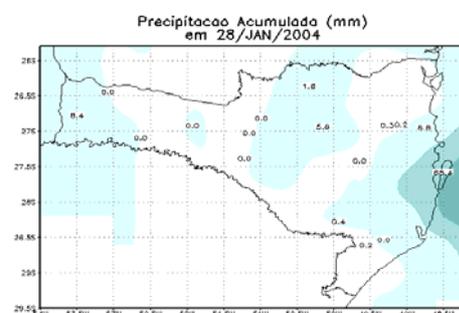
- ROMERO, R.; DOSWELL, C. A. III; RAMIS, C., 2000. Mesoscale numerical study of two cases of long-lived quasi-stationary convective systems over eastern Spain. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 3731-3751.
- ROMERO, R.; RAMIS, C.; ALONSO, S.; DOSWELL, C. A. III; STENSRUD, D. J., 1998. Mesoscale model simulations of three heavy precipitation events in the western Mediterranean. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1859-1881.
- ROMERO, R.; SUMNER, G.; RAMIS, C.; GENOVÉS, A., 1999. A classification of the atmospheric circulation patterns producing significant daily rainfall in the Spanish Mediterranean area. *Int. J. Climatol.*, 19, 765-785.
- SACCO, F. G., 2010. Configurações atmosféricas em eventos de estiagem de 2001 a 2006 na mesorregião oeste catarinense. Florianópolis, Dissertação de Mestrado, CFCH/UFSC, 106 pp.
- SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; SILVA DIAS, P. L., 1998. Tropics - South America. In: *Meteorology of the Southern Hemisphere*, (Ed) Kauly, D. J. and Vincent, D. G., *Meteorological Monographs*. American Meteorological Society, Boston, 119-139.
- SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C., 2009. Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. *Theor. Appl. Climatol.*, 98, 67-77.
- SEVERO, D. L., 1996. Modelos conceituais para situações de chuvas intensas no Estado de Santa Catarina. *Dynamis – Revista Tecno-Científica*, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 4(14), 7-20.
- SILVA DIAS, M. A. F., 2009. As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: Um estudo de caso visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos. Relatório Técnico INPE-16631-RPQ/255, 67 pp. [Available online at <http://mtc-m19.sid.inpe.br>.]
- SMITH, R. B., 1979. The influence of mountains on the atmosphere. *Adv. Geophys.*, 21, 87-230.
- STEIN, V.; ALPERT, P., 1993. Factor separation in numerical simulations. *J. Atmos. Sci.*, 50, 2107-2115.
- TANK, A. M. G.; PETERSON, T., 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim. Res.*, 19, 193-212.
- TEIXEIRA, M. S., 2010. Caracterização física e dinâmica de episódios de chuvas intensas nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 167 pp.
- TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P., 2007. Dynamical and Synoptic Characteristics of Heavy Rainfall Episodes in Southern Brazil. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 598-617.
- XAVIER, T. M. B. S.; DA SILVA, J. F.; REBELLO, E. R. G., 2002. *A técnica dos quantis e suas aplicações em Meteorologia, Climatologia e Hidrologia, com ênfase para as regiões brasileiras*. Ed. Thesaurus. Brasília-DF.

ANEXOS

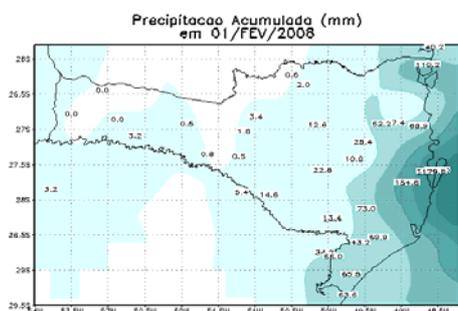
ANEXO A - Distribuição espacial da precipitação diária na GF: a) 04/fev/2001; b) 28/jan/2004; c) 01/fev/2008; d) 23/nov/2008; e) 16/dez/2008; f) 23/abr/2009; g) 19/mai 2010.



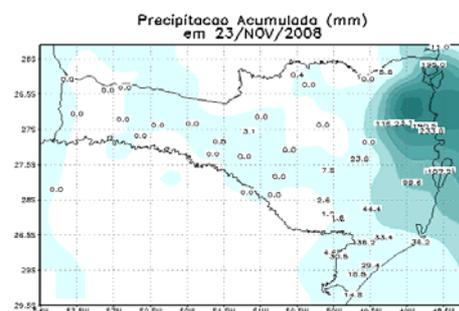
(a) Fevereiro/2001.



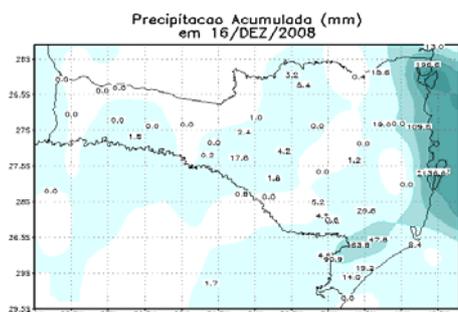
(b) Janeiro/2004.



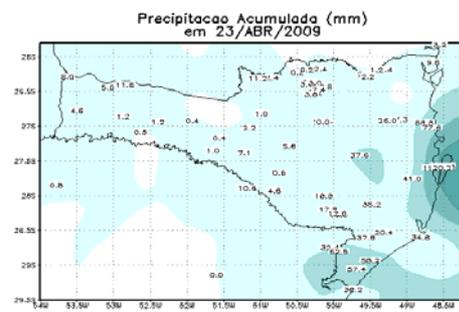
(c) Janeiro/2008.



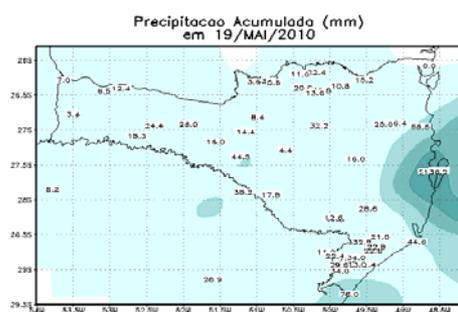
(d) Novembro/2008



(e) Dezembro/2008.

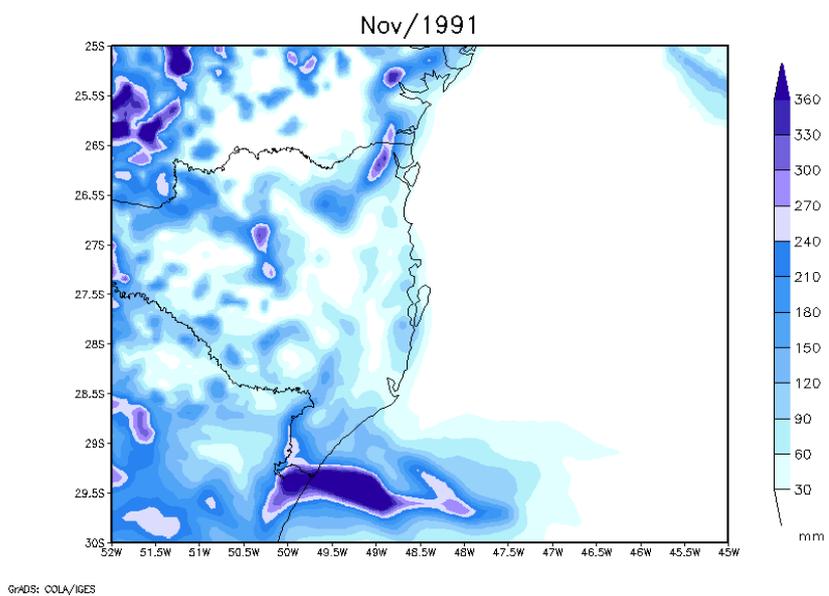


(f) Abril/2009.

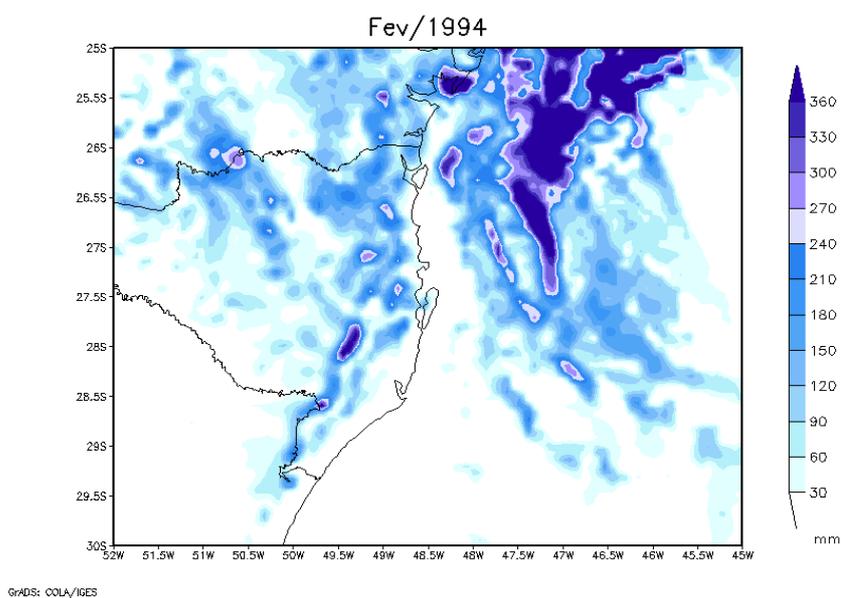


(g) Maio/2010.

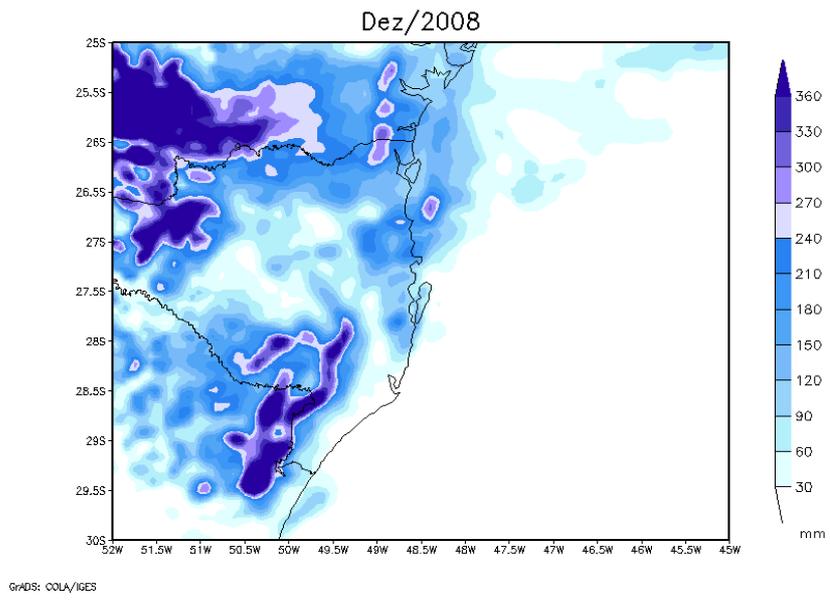
**ANEXO B - Campos de precipitação acumulada para as simulações numéricas:
a) entre 13/11 - 18 UTC e 15/11/1991 - 18 UTC; b) entre 21/02 - 00 UTC e 23/02/1994 - 00 UTC; c) entre 03/02 - 00 UTC e 05/02/2001 - 00 UTC.**



(a)



(b)



(c)