Universidade Federal do Rio de Janeiro

CHUVAS INTENSAS EM SANTA CATARINA: Análise sinótica de um evento extremo e experimentos numéricos com o modelo atmosférico WRF

Vinícius Albuquerque de Almeida

Monografia do Curso de graduação em Meteorologia, do Departamento de Meteorologia, do Instituto de Geociências, do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Edilson Marton

Rio de Janeiro Dezembro de 2013 CHUVAS INTENSAS EM SANTA CATARINA: Análise sinótica de um evento extremo e experimentos numéricos com o modelo atmosférico WRF

Vinícius Albuquerque de Almeida

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM METEOROLOGIA.

Avaliada por:

Prof. Dr. Edilson Marton

Cigato

Orientador/UFRJ/Rio de Janeiro

fra MBAuns

Membro da Banca/UFRJ/Rio de Janeiro

Maria Gulades a. Juste

Membro da Banca/UENF/Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, RJ - Brasil Dezembro de 2013

Prof. Dra. Ana Maria B. Nunes

Prof. Dra. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva

Almeida, Vinícius Albuquerque de

CHUVAS INTENSAS EM SANTA CATARINA: Análise sinótica de um evento extremo e experimentos numéricos com o modelo atmosférico WRF/Vinicius Albuquerque de Almeida. – Rio de Janeiro: IGEO/CCMN/UFRJ, 2013

72p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ.

1. Santa Catarina 2. Bloqueio 3. Análise 4. Simulação 5. Reprevisão

"…

Não será o que faças, que te tornará grande e importante, porém como faças cada coisa que te transformará em valioso.

A árvore gigante se origina em pequenina semente.

O Cosmo é resultado de partículas e moléculas invisíveis.

Torna-te grande nas pequeninas coisas, a fim de que não te apequenes nas grandiosas.

... "

Divaldo Pereira Franco (pelo Espírito Joanna de Ângelis)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, causa primária de todas as coisas, que a cada dia fornece a mim todas as ferramentas necessárias para que eu encare as provas a que sou submetido e possa tirar delas o conhecimento necessário ao meu aperfeiçoamento.

À minha familia, pela companhia, auxílio e compreensão em meus longos períodos de estudo durante a semana e nos finais de semana.

À minha namorada, pela paciência, sabedoria, apoio e carinho, que ao longo dos últimos anos ajudaram-me a me tornar uma pessoa com mais calma, foco e determinação. Eu te amo! por muitas razões que essas poucas palavras não seriam capazes de descrever.

Ao Prof. Dr. Edilson Marton pela orientação e amizade ao longo de todo o período de graduação. Principalmente por sua paciência em relação a minha dificuldade de agendamento de reuniões devido aos horários em que encontrava-me trabalhando; muitas discussões foram feitas através de e-mails para possibilitar que o trabalho pudesse se desenvolver como esperado.

À Prof. Dra. Claudine Pereira Dereczynski pela orientação nos primeiros anos da universidade, que me auxiliou na elaboração dos primeiros trabalhos científicos que foram importantes ao longo de todo o curso de graduação, bem como na elaboração do trabalho final.

A minha grande amiga e orientadora Dra. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva que esteve presente desde o primeiro período da universidade e serviu em todos os momentos como exemplo de pessoa e profissional a ser seguida. É gratificante ver a amizade construída que hoje, mesmo distantes, permite que continuemos a trabalhar em pesquisa juntos com grande perspectiva futura. Além disso, pela indicação a vaga do emprego no terceiro período, onde estou até hoje.

Aos demais professores por todo o conhecimento passado durante todos os anos da graduação e as constantes conversas em suas salas e pelos corredores.

Aos meus amigos: Alice Sayão, Carolina Maués, Tiago Souza, Rodrigo Carvalho, Nathalia Moura e Jéssica Panisset que me ajudaram, principalmente nos primeiros anos de universidade, a criar um equilíbrio entre toda a minha dedicação aos estudos e os momentos de lazer que até hoje, mesmo com o afastamento natural devido ao trabalho, continuam próximos através de e-mails e das redes sociais.

Aos meus colegas de trabalho e empresa que ao longo dos últimos 4 anos e meio permitiram que eu assistisse às aulas do curso de graduação, aceitando que eu fizesse home office durante os períodos de ausência, e me forneceram grande parte do conhecimento tecnológico que possibilitou o desenvolvimento de diversas pesquisas em Meteorologia.

RESUMO

CHUVAS INTENSAS EM SANTA CATARINA: Análise sinótica de um evento extremo e experimentos numéricos com o modelo atmosférico WRF

Vinícius Albuquerque de Almeida

Dezembro / 2013

Orientador: Prof. Dr. Edilson Marton

Entre os eventos de precipitação relatados nos registros históricos da Defesa Civil do estado de Santa Catarina, o evento de chuvas intensas ocorrido no mês de novembro de 2008 teve grande repercussão, por ter sido considerado o pior desastre da história do estado; segundo relatório do CEPED/UFSC (2009), até o dia 02/04/2009 estavam confirmados os seguintes dados oficiais: 135 óbitos, 2 desaparecidos, 99 municípios em situação de emergência, e 14 municípios em estado de calamidade pública. Dados de precipitação das estações do Ciram/Epagri indicam grandes acumulados de precipitação durante o evento, principalmente entre os dias 22 e 23. Como exemplo, no dia 23 foram registrados: 337 mm em Blumenau, 279,4 mm em São Francisco do Sul, 246,2 mm em Camboriú, 202,2 mm em Itapoá, 160,1 mm em Florianópolis e 112,6 mm em Angelina. Devido a importância do evento para a região, os objetivos do presente trabalho são: i) discutir os aspectos de grande escala associados ao evento, utilizando-se dados da reanálise do Era Interim e ii) conduzir experimentos com o modelo atmosférico WRF nos modos simulação e reprevisão, com a finalidade de avaliar o impacto das condições iniciais e de fronteira referentes a cada modo. Os resultados da análise sinótica indicam que o fenômeno de chuvas intensas analisado esteve associado a padrões sinóticos bem definidos entre a superfície e os altos níveis, com destaque para a persistência de um anticiclone de bloqueio em superfície durante todo o mês de novembro e a existência de um vórtice ciclônico em níveis médios, sendo este último apontado como o principal responsável pelas chuvas intensas. A rodada do WRF no modo simulação, em geral, permitiu detalhamento maior das condições dinâmicas e termodinâmicas que contribuíram para a intensidade do fenômeno; além disso, permitiu um maior detalhamento dos núcleos de precipitação sobre o litoral de Santa Catarina, mesmo que a intensidade dos núcleos tenha sido subestimada. Por outro lado, o experimento no modo reprevisão mostrou campos subestimados, comparando-se com os resultados da simulação, evidenciando a grande

dependência dos modelos em relação às condições iniciais e de contorno. Conclui-se, portanto, que a qualidade das condições iniciais e de contorno, diferentes entre a simulação e a reprevisão, apresentam-se como importante fator para as diferenças nos resultados apresentados.

ABSTRACT

HEAVY RAIN IN SANTA CATARINA: Synoptic analysis of a extreme event and numerical experiments using WRF Model

Vinícius Albuquerque de Almeida

December / 2013

Advisor: Edilson Marton

Considering rainfall events recorded by the civil defense of Santa Catarina, the extreme rainfall event in November 2008 was noteworthy, since it was considered the worst disaster ever. According to the CEPED/UFSC (2009) report, on April 4th, 2009 the official data were confirmed: 135 deaths, 2 missing persons, 99 municipalities declared a state of emergency, and 14 municipalities declared a state of public disaster. Rain gauge data from Ciram/Epagri stations

suggest there were great daily precipitations during the extreme event, mainly between November 22nd and 23rd. For instance, on November 23rd stations registered: 337 mm in Blumenau, 279.4 mm in São Francisco do Sul, 246.2 mm in Camboriú, 202.2 mm in Itapoá, 160.1 mm in Florianópolis and 112.6 mm in Angelina. Due to the importance of the event, the objectives of this work are: i) discuss the large scale aspects of the raifall event and ii) perform numerical experiments using WRF Model for simulation and reforecast, to evaluate the impact of initial and boundary condition on both runs. Synoptic analysis results show that the heavy rainfall event was associated to synoptic patterns from surface to upper levels, especially the persistence of a blocking high during November 2008 and a cyclone in middlelevels, the main responsible for the intense rainfall event. The WRF simulation results detailed the dynamical and thermodynamic conditions that contributed to the intensity of the phenomenon. Further, it allowed the identification of the organized precipitation over the coast, even though their intensification was underestimated. On the other hand, the WRF reforecast has shown a majority of underestimated fields, compared to simulation, showing the great dependency of the Model in relation to initial and boundary conditions. Therefore, the sudy shows that the quality of initial and boundary conditions, different in WRF simulation and reforecast runs, are one of the major reasons for the presented results.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estruturas típicas de bloqueios atmosféricos no Hemisfério Sul. a) Bloqueio do tipo dipolo, b) Bloqueio do tipo ômega invertido. As setas significam a bifurcação do escoamento zonal em altos níveis associado a presença da alta de bloqueio.

Figura 3.2 - Cortes utilizados para detalhamento do evento no período entre 19 e 24 de

novembro de 2008. O quadrado vermelho representa a localização média (27S, 49W) do centro do ciclone em 500 hPa onde foi feito o corte vertical. O quadrado azul representa a localização média (40S, 40W) do centro do anticiclone de bloqueio em 500 hPa onde foi feito o corte vertical. A linha vermelha representa a latitude média (27S) do ciclone onde foi feito o corte zonal. A linha azul representa a latitude média (40S) do anticiclone de bloqueio onde foi feito o 222

Figura 4.1 – Divisão do estado de Santa Catarina em regiões......27

Figura 5.2 – Evolução temporal do deslocamento espacial do centro aproximado do anticiclone de bloqueio a partir da análise subjetiva do campo de pressão ao nível médio do

Figura 5.6 – Campo referente ao fluxo de umidade verticalmente integrado na camada entre 1000 e 300 hPa para o dia 22 de novembro de 2008......40

Figura 5.7 – Corte longitudinal ao longo da latitude de -27º S dos campos de altura geopotencial e temperatura no nível de 500 hPa......41

Figura 6.1 – Campos de vorticidade e linha de corrente em 500 hPa referentes a grade 2 (de 30 km de resolução), para simulação realizada com o modelo regional WRF. São apresentados

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABMS Associação Brasileira de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica
- AFWA Air Force Weather Agency
- ANA Agência Nacional de Águas
- ASAS Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
- CAPPI Constant Altitude Plan Position Indicator
- CEPED Centro Universitário de Estudos e Pesquisas
- CIRAM Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina
- CPTEC Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

DF – Distrito Federal

- ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- EPAGRI Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
- EUA Estados Unidos da América
- FAA Federal Aviation Administration
- FNL Final Operational Global Analysis
- FSL Forecast Systems Laboratory
- GDAS Global Data Assimilation System
- GFS Global Forecast System
- GOES Geostationary Operational Environmental Satellite
- GTS Global Telecommunications System

HS – Hemisfério Sul

- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- INEA Instituto Estadual do Ambiente
- INMET Instituto Nacional de Meteorologia
- MCGA Modelo de Circulação Geral da Atmosfera
- MMM Mesoscale and Microscale Meteorology
- MOS Model Output Statistics
- NCAR National Center for Atmospheric Research
- NCEP National Centers for Environmental Prediction
- NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration
- NRL Naval Research Laboratory

RS – Rio Grande do Sul

SEDEC – Secretaria de Estado de Defesa Civil

SC – Santa Catarina

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

USGS – United States Geological Survey

UTC – Universal Time Coordinated

VCAN – Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

VD – Vórtice desprendido

WRF – Weather Research and Forecast

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada uma introdução para o tema abordado ao longo do presente trabalho.

1.1 Considerações Iniciais

Segundo Kobiyama et al. (2006), os fenômenos naturais que causam desastres podem trazer, além de prejuízos, benefícios para as sociedades. Por exemplo, as inundações fornecem grandes quantidades de fertilizantes para os campos agrícolas, e os escorregamentos deixam as terras mais porosas e aráveis. Às vezes, o homem pode até gerar tais fenômenos com o intuito de compreender e se beneficiar dos mesmos. Por exemplo, na região do Grand Canyon nos EUA, foram realizados diversos experimentos visando produzir inundações controladas (USGS, 2003). Os resultados permitem concluir que é necessária uma alteração drástica e dinâmica do regime fluvial para manutenção da saúde do ecossistema fluvial. A inundação retira sedimento antigo e gera uma nova estrutura com sedimentos. De modo geral, os desastres naturais são determinados a partir da relação entre o homem e a natureza. Em outras palavras, desastres naturais resultam das tentativas humanas em dominar a natureza, que, em sua maioria, acabam derrotadas. Além do que, quando não são aplicadas medidas para a redução dos efeitos dos desastres, a tendência é aumentar a intensidade, a magnitude e a frequência dos impactos. Assim, grande parte da história da humanidade foi influenciada pela ocorrência de desastres naturais, principalmente os de grande magnitude. Nas últimas décadas, o número de registro de desastres naturais em várias partes do mundo vem aumentando consideravelmente. Isto se deve, principalmente, ao aumento da população, a ocupação desordenada e ao intenso processo de urbanização e industrialização. Dentre os principais fatores que contribuem para desencadear estes desastres nas áreas urbanas destacam-se a impermeabilização do solo, o adensamento das construções, a conservação de calor e a poluição do ar. Enquanto que nas áreas rurais, destaca-se a compactação dos solos, o assoreamento dos rios, os desmatamentos e as queimadas.

Além disso, Kobiyama et al. (2006) definem que inundações, escorregamentos, secas, furações, entre outros, são fenômenos naturais severos, fortemente influenciados pelas características regionais, tais como, rocha, solo, topografia, vegetação, condições meteorológicas. Quando estes fenômenos intensos ocorrem em locais onde os seres humanos vivem, resultando em danos (materiais e humanos) e prejuízos (socioeconômico) são considerados como "desastres naturais". Segundo Castro (1998), desastre é definido como resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema (vulnerável), causando danos humanos, materiais e/ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais. Aqui nota-se que o termo "adverso" significa hostil, inimigo, contrário, aquele que traz infortúnio e infelicidade. Os desastres são normalmente súbitos e inesperados, de uma gravidade e magnitude capaz de produzir danos e prejuízos diversos, resultando em mortos e feridos. Portanto, exigem ações preventivas e restituidoras, que envolvem diversos setores governamentais e privados, visando uma recuperação que não pode ser alcançada por meio de procedimentos rotineiros. White (1974) propôs cinco itens para estudo de desastres naturais: (1) estimar a área ocupada pelo ser humano nas áreas de perigo; (2) determinar a faixa de ajuste possível contra eventos extremos; (3) examinar como a população percebe os desastres naturais; (4) examinar os processos de seleção de medidas adequada; e (5) estimar os efeitos da política sobre essas medidas. Além desses cinco itens, Hewitt (1983) adicionou mais um item, isto é, entender como aspectos socioeconômicos da sociedade contribuem à geração de desastres. Para as pesquisas científicas, Burton et al. (1978) sugeriram sete parâmetros relacionados aos eventos naturais que estão diretamente vinculados aos desastres naturais: magnitude (alta - baixa); frequência (frequente - rara); duração (longa - curta); extensão areal (ampla - limitada); velocidade de ataque (rápida – lenta); dispersão espacial (difusa – concentrada); espaço temporal (regular – irregular). Entretanto, ressalta-se que os desastres naturais também possuem aspectos positivos e negativos. Sidle et al. (2004) e Silva et al. (2003) comentaram que fenômenos naturais responsáveis pelos desastres podem oferecer algumas vantagens. Por exemplo, o rio que inunda é perigoso, mas fornece água, sedimento e nutrientes. Assim, o perigo tem sido observado como aspecto ocasionalmente desvantajoso, podendo às vezes, ser beneficente à atividade humana variando conforme escala temporal.

1.2 Motivação e objetivo do trabalho

O clima da região Sul do Brasil apresenta grandes contrastes nos regimes de precipitação e temperatura. Esta variabilidade deve-se à situação geográfica da região, na transição entre os trópicos e as latitudes médias, além do relevo acidentado que também fornece uma considerável contribuição. O regime de precipitação do Sul do Brasil apresenta transição bem clara: ao norte domina o típico regime de monção, com estação chuvosa iniciando-se na primavera e terminando no início do outono, resultando em grande diferença de precipitação entre verão e inverno, enquanto ao sul há distribuição aproximadamente uniforme de chuva ao longo do ano e o regime é mais característico de latitudes médias, com chuvas relativamente mais fortes no inverno. Efeitos topográficos também são notáveis, e as maiores precipitações da região associam-se à ascensão sobre a barreira topográfica (Cavalcanti *et al.*, 2009).

Segundo Satyamurty & Mattos (1989) a região centro-sul do continente, localizada entre os dois anticiclones subtropicais, do Pacífico e Atlântico Sul, é uma região altamente frontogenética (favorável à formação e intensificação de frentes). O desenvolvimento da zona frontal é verificado em associação aos distúrbios baroclínicos provenientes do Pacífico, que atravessam os Andes em latitudes médias.

O estado de Santa Catarina é frequentemente afetado por eventos de chuvas intensas. Estes eventos são causados por diversos sistemas meteorológicos e normalmente estão associados a diversos prejuízos nos mais variados setores da economia e sociedade. Segundo histórico da Defesa Civil do Estado de Santa Catarina, diversos eventos de chuvas intensas afetaram a região nas últimas décadas:

- 1974 Enchente Tubarão: o desastre mais trágico ocorreu em 1974, quando o nível do Rio Tubarão, no sul catarinense, subiu mais de 10 metros e inundou o município, resultando em 199 pessoas mortas e 65 mil desabrigadas/desalojadas.
- 1983 Enchente Vale do Itajaí: em julho de 1983, cinco dias de chuvas intensas fizeram o rio Itajaí-Açu subir mais de 15 metros, inundando 90 municípios, entre eles Blumenau, Itajaí e Rio do Sul. Ao todo foram 49 mortes e aproximadamente 198 mil desabrigados.

- 1984 Enchente Vale do Itajaí: o rio Itajaí-Açu novamente inundou as cidades do Vale do Itajaí. Foram 150 mil desalojados, 70 mil desabrigados, o que representou, na época, em média 40% da população de Blumenau, Brusque, Gaspar e São João Baptista. As enchentes de 1984 fizeram 16 vítimas fatais.
- 1997 Inundações e Deslizamentos: o El Niño atuou em 1997 e causou inundações de grandes proporções nos meses de janeiro e outubro. Nas enchentes de janeiro, 35 municípios foram afetados, 14.267 pessoas ficaram desabrigadas e 7 morreram. Em outubro as cheias inundaram 37 cidades, deixando 8.777 desabrigados e 2 mortes.
- 2004 Furação Catarina: o Furação Catarina atingiu o litoral e o sul com ventos de até 150 Km/h. Ao menos 40 municípios foram atingidos, 35.873 casas foram danificadas e 993 destruídas. Quatro pessoas morreram, pelo menos 518 ficaram feridas e 33 mil pessoas ficaram desabrigadas.
- Desastre 2008: Com uma das primaveras mais chuvosas das últimas décadas, mais de três meses seguidos de chuva intensa, o ano de 2008 registrou o pior desastre da história de Santa Catarina. Em apenas cinco dias de chuva, no município de Blumenau, caiu água suficiente para abastecer a cidade de São Paulo durante três meses (300 bilhões de litros de água). O desastre resultou em mais de 80 mil pessoas desalojadas e desabrigadas, com 63 municípios em Situação de Emergência, 14 em Estado de Calamidade Pública e 135 mortes.
- 2009 Tornado Guaraciaba: em setembro ocorreram fortes temporais com granizo e ventos de mais de 100 km/h em vários municípios do oeste ao norte do Estado. No município de Guaraciaba (oeste) o forte temporal durou aproximadamente 1h30min, deixando 310 desabrigados, 852 desalojados, 209 edificações destruídas ou danificadas e 4 mortos.
- 2011 Fortes chuvas (deslizamentos): as fortes chuvas nos meses de janeiro e fevereiro, deixaram 20.970 pessoas desabrigados/desalojados e 6 mortes. O município de Mirim Doce foi o mais atingido. A enchente de setembro deixou 984.205 pessoas afetadas e 178.509 desabrigados/desalojados. Houve 3 mortes, nos municípios de Guabiruba, Itajaí e Laurentino. Foram 77 cidades em situação

de emergência e 10 que decretaram estado de calamidade pública. O município de Rio do Sul foi o mais atingido.

Entre os eventos extremos de precipitação relatados pelos registros históricos da Defesa Civil, o desastre de 2008 teve grande repercussão por ter sido considerado o pior desastre da história do Estado. Segundo o relatório do Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres / Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED/UFSC, 2009), até o dia 02/04/2009 estavam confirmados 135 óbitos e 2 desaparecidos (97% das mortes causadas por soterramento). Entre os municípios do estado, 99 decretaram situação de emergência e 14 decretaram estado de calamidade pública.

Os municípios mais afetados no desastre, segundo números oficiais da Defesa Civil, foram: Ilhota: 41 mortos; Blumenau: 24 mortos; Gaspar: 17 mortos; Luis Alves: 10 mortos; Rodeio: 4 mortos; Benedito Novo: 2 mortos. Neste evento, a concentração excessiva de chuvas em poucos dias, antecedida por um período longo de precipitações, provocou o escorregamento de milhares de cortes de terreno e de encostas naturais e uma grande e rápida enchente na bacia do Rio Itajaí. Estes deslizamentos atingiram indiscriminadamente morros cobertos de vegetação nativa e desmatados, bairros pobres e de classe média alta.

Ainda segundo o estudo do CEPED/UFSC(2009), entre os dias 22 e 23 de novembro de 2008 choveu mais do que o dobro da média climatológica para todo o mês em alguns municípios. Na Figura 1.1 estão representados os recordes diários do mês de novembro e respectivas datas de ocorrência - dia/ano- segundo a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, EPAGRI, e Agência Nacional de Águas, ANA.

Diversos recordes pluviométricos foram quebrados na região do Vale do Itajaí, litoral Norte e na Grande Florianópolis em novembro de 2008. Em Blumenau, por exemplo, foi registrado um total de 1002 mm, do dia 1 ao dia 27 de novembro, sendo que o recorde anterior obtido era de 281,8 mm, registrados em 1961. Na Figura 1.2 estão representados os recordes anteriores de novembro (precipitação acumulada em 30 dias) e respectivos anos de ocorre□ncia nas estac□ões da Epagri e ANA.



Figura 1.1 - Recordes diários de novembro. As barras vermelhas representam o total diário máximo no mês de novembro de 2008, as barras verdes representam os recordes diários anteriores registrados pelas estações do Epagri as barras azuis representam os recordes diários anteriores registrados pelas estações da ANA. Os números dentro das barras significam o DIA/ANO de ocorrência do recorde anterior na estação. Fonte: Minuzzi e Rodrigues, 2009.

A chuva intensa em Santa Catarina foi causada pelo estabelecimento de um bloqueio atmosférico no oceano que atuou durante grande parte do mês de novembro. O bloqueio atmosférico que afetou a região ficou configurado por uma circulação anticiclônica na coluna atmosférica que esteve acompanhada por um vórtice ciclônico de ar superior no período de precipitação mais intensa (entre os dias 22 e 24 de novembro de 2008).

Outra característica típica de bloqueio atmosférico é que o anticiclone fica geralmente localizado em latitudes mais altas (mais ao sul no caso do Hemisfério Sul) em relação a posição climatológica do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e o ciclone fica localizado em latitudes mais baixas (mais ao norte no caso do Hemisfério sul). Os ventos de sudeste a nordeste, provenientes dos anticiclones sobre o Atlântico Sul, transportam muita umidade do oceano para o litoral de Santa Catarina. A imagem de satélite do dia 22 de novembro de 2008 (Figura 1.3) mostra a condição atmosférica daquele momento, quando havia a combinação da circulação marítima e vórtice ciclônico (CEPED/UFSC, 2009).



Figura 1.2 - Recordes de novembro (precipitação acumulada em 30 dias) em anos anteriores. As barras vermelhas representam o total acumulado no mês de novembro de 2008, as barras verdes representam os recordes anteriores registrados pelas estações do Epagri as barras azuis representam os recordes anteriores registrados pelas estações da ANA. Os números dentro das barras significam o ANO de ocorrência do recorde anterior na estação. Fonte: Minuzzi e Rodrigues, 2009.

Devido a importância histórica do evento de chuvas intensas em Santa Catarina no mês de novembro de 2008, questões relevantes surgiram em busca do entendimento dos fatores meteorológicos associados à formação e intensificação do fenômeno.



Figura 1.3 - Imagem do satélite GOES-12 no canal infravermelho referente ao dia 22/11/2008. Fonte: Epagri, 2009.

As chuvas provenientes do vórtice em níveis médios, combinadas com a chuva precedente desde o começo do mês de novembro de 2008, volume excessivo de chuva entre 22 e 24 de novembro de 2008, mais a elevação do nível do mar (aspecto desfavorável ao escoamento da água dos rios para o oceano), são alguns dos fatores que configuraram o fenômeno na faixa leste do estado de Santa Catarina naquele período.

Desta forma, os objetivos do presente trabalho são:

- discutir os aspectos de grande escala que influenciaram o surgimento e manutenção do fenômeno atmosférico que provocou elevados registros de precipitação;
- utilizar o modelo numérico WRF para simulação do fenômeno buscando um melhor detalhamento espaço-temporal;
- utilizar o modelo numérico WRF para reprevisão para o região de estudo (região Sul do Brasil) buscando verificar o desempenho do modelo no caso de utilização

das condições iniciais e de contorno do modelo global no período do evento. Desta forma será possível identificar se o modelo poderia ter previsto o evento, possibilitando alertar a população com maior antecedência.

Os termos simulação e reprevisão encontram-se detalhados na metodologia (Capítulo 3). Em linhas gerais, são integrações do modelo WRF com condições iniciais e de contorno diferentes para cada caso; reprevisão é empregado quando uma versão – atual ou antiga - de um modelo é utilizada para refazer uma previsão do passado, ou seja, com a análise e previsões dos modelos de escala maior; de fato, tanto as previsões como as reprevisões utilizam, respectivamete, análise e previsões de modelo (global, por exemplo) como condição inicial e de contorno; todavia, o uso do termo simulação ocorre somente quando essas condições iniciais e de contorno não tenham como origem a análise e previsão de um outro modelo, mas sim de condições iniciais e de contorno contendo em todos os instantes dados observados (não previstos): reanálise, análises, etc.

1.3 Estrutura do trabalho

Após a apresentação das considerações iniciais do tema abordado no presente estudo e da definição da motivação e objetivo do trabalho, o Capítulo 2 fornece uma Revisão Bibliográfica sobre os trabalhos científicos publicados sobre este mesmo tema com objetivo de fornecer a fundamentação teórica para as análises apresentadas. No Capítulo 3, são apresentados os dados utilizados para a análise do evento e a metodologia proposta no estudo para avaliação dos dados da reanálise e a modelagem numérica utilizada para simulação e reprevisão do caso investigado. No Capítulo 4, é feita uma caracterização do evento de novembro de 2008 buscando descrever os dados observacionais de precipitação obtidos das estações da região e as imagens de satélite disponíveis no período. No Capítulo 5, é apresentada uma análise sinótica do evento com base nos dados da reanálise do Era Interim descrevendo as condições sinóticas de grande escala que contribuíram para a formação e desenvolvimento do sistema. Nos capítulos 6 e 7, são apresentados os resultados da simulação numérica e da reprevisão, respectivamente, do evento estudado utilizando o modelo regional WRF. No Capítulo 8, são apresentadas as conclusões a

partir de todas as discussões apresentadas no trabalho. Posteriormente, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos relacionados a origem e manutenção de eventos de bloqueios, principalmente aos que afetam a América do Sul; além disso, serão discutidos trabalhos que descrevem os mecanismos responsáveis pela origem e desenvolvimento de vórtices de ar frio. Adicionalmente, serão apresentados alguns resultados de trabalhos que envolvem a utilização do modelo atmosférico WRF.

2.1 Situações de Bloqueio no Hemisférico Sul

Segundo Berbery (1989), eventos de bloqueio ocorrem frequentemente na região sudeste da América do Sul (van Loon 1956; Tremberth e Mo 1985). Este fenômeno influencia bastante o tempo nesta região, pois fornece condições favoráveis a ciclogênese ao norte da região onde está localizado (Grandoso e Núnez 1955), e devido à frequente presença de baixas desprendidas (*cutoff low*) que podem produzir chuvas em uma grande área e enchentes (Taljaard 1972).

De forma oposta, Malaka e Núñez (1980) mostraram que a seca no sul da Argentina em 1962 foi consequência de uma situação persistente de bloqueio no Atlântico Sul. Estes dois resultados não são inconsistentes: a ocorrência de seca ou chuva intensa depende da localização da região afetada em relação ao bloqueio.

Enquanto bloqueios no Hemisfério Norte já foram estudados extensivamente (ex: Shukla e Mo 1983; Dole e Gordon 1983; Dole 1986) e também os que acontecem na região da Austrália-Nova Zelândia (ex: Baines 1983; Trenberth 1986; Mo *et al.* 1987), poucos detalhes são conhecidos sobre a origem e manutenção de situações de bloqueio na região da América do Sul. Evidências observacionais mostram que algumas cristas que avançam a partir do Oceano Pacífico podem se intensificar, se tornar estacionária e se desenvolver em uma situação de bloqueio. Um segundo mecanismo para a atividade de bloqueio é o surgimento e consolidação da alta de bloqueio no Oceano Atlântico (Grandoso e Núñez 1955). Este segundo mecanismo, está associado a sistemas de alta pressão que existem previamente no oceano atlântico e se intensificam de tal forma que se transformam em altas de bloqueio. Segundo Figueroa *et al.* (2010), a importância de se estudar a presença dos bloqueios advém do fato desses permanecerem por vários dias ocasionando ondas de frio/calor e períodos de estiagens, afetando, assim, de forma significativa as características da variabilidade climática sobre as regiões do globo onde esses se apresentem. Por outro lado, tem-se ainda que, uma vez formado um bloqueio, a previsibilidade da atmosfera, nas regiões por ele afetadas, apresenta, em geral, um aumento significativo na qualidade das previsões (Trenberth e Mo, 1985; Tibaldi *et al.*, 1994). Diversos estudos têm sido publicados sobre os bloqueios, particularmente interessados em fornecer uma climatologia das áreas preferenciais de atividade de bloqueios em diferentes áreas do hemisfério Sul (HS). Marques (1996) e Sinclair (1996) encontraram uma nova área preferencial de formação de bloqueios próximo a costa sudoeste da América do Sul, além da região a oeste da Austrália e Nova Zelândia (Lejenas e Oakland, 1983; Lejenas, 1984; Trenberth e Mo, 1985) e oeste da América do Sul (Casarin, 1982; Marques, 1996; Sinclair, 1996).

Devido a necessidade de se avaliar a capacidade dos modelos de circulação geral da atmosfera (MCGA) em reproduzir as principais características desse evento (localização, amplitude, frequência, impactos, etc.), bem como, de inferir eventuais alterações das características num clima futuro associada a tal fenômeno, Figueroa *et al.* (2010) fez um estudo com objetivo de avaliar a capacidade de um versão do MCGA do CPTEC em reproduzir os eventos de bloqueio sobre o hemisfério Sul, utilizando uma parametrização diferenciada de convecção daquela utilizada de forma operacional. Em linhas gerais, o modelo foi capaz de simular as áreas de anomalias positivas da altura geopotencial em 500 hPa, anomalias essas associadas a alta de bloqueio. Em relação aos totais de eventos e de dias com bloqueios foi possível notar que o modelo simulou perfeitamente a sazonalidade observada nos dados do ERA-40, isto é, uma ocorrência maior de bloqueios no inverno e uma menor atividade nos meses de verão. Porém, nota-se que o modelo tende a subestimar a quantidade de eventos e de dias bloqueados.

Segundo Oliveira (2011), bloqueios atmosféricos são comumente observados onde o escoamento zonal característico de latitudes médias é interrompido por um intenso e persistente escoamento meridional, associado à estrutura de uma célula anômala de alta pressão quase-estacionária e barotrópica resultando na bifurcação do jato. Tais estruturas de bloqueio são, em grande parte, responsáveis pela persistência do tempo, induzindo a condições atmosféricas

extremas que variam desde secas e ondas de calor a invasões de ar frio. Dois tipos de bloqueio são frequentemente observados no HS conforme representados na Figura 2.1:

a) Bloqueio do tipo dipolo: Quando uma baixa fria desprendida ("*cut-off low*", em inglês) posiciona-se no flanco equatorial de uma alta de bloqueio, caracterizando uma estrutura de dipolo (Figura 2.1a). Associado a esses dois centros de altura geopotencial há uma zona de deformação, representado pelo ponto na Figura 2.1a. Este padrão é representado por uma corrente de ar anômala de leste para oeste com uma pluma difluente a oeste que reforça a zona de deformação. Corrente acima da região bloqueada e a oeste da zona de deformação o escoamento é tipicamente zonal, enquanto que no lado leste do bloqueio são esperadas condições de calor e ar seco, típicos de uma crista progressiva.

b) Bloqueio do tipo ômega (Ω): Trata-se de um tipo de bloqueio de grande extensão espacial e de grande longevidade, caracterizado pela combinação entre duas baixas frias desprendidas e uma alta de bloqueio que são similares em tamanho e intensidade, e cuja forma se assemelha à letra grega Ω (Omega invertido no caso do HS) (Figura 2.1b). Associado a seus três centros de altura geopotencial, deverá haver duas zonas de deformação, representadas pelos pontos na Figura 2.1b. Neste padrão de bloqueio o escoamento de altos níveis é deslocado na direção oeste e para o flanco polar da primeira circulação ciclônica (B₁), criando a primeira zona de deformação. A segunda zona de deformação surge justamente ao norte da alta de bloqueio contornando anticiclonicamente a alta de bloqueio na direção dos pólos. Isto também se estende ciclônicamente na direção equatorial da segunda baixa fria (B₂). A este tipo de bloqueio estão associados sistemas persistentes de tempo quente e seco e/ou frio e úmido sobre grandes áreas continentais e marítimas.



Figura 2.1 - Estruturas típicas de bloqueios atmosféricos no Hemisfério Sul. a) Bloqueio do tipo dipolo, b) Bloqueio do tipo ômega invertido. As setas significam a bifurcação do escoamento zonal em altos níveis associado a presença da alta de bloqueio. Fonte: Oliveira, 2011.

2.2 Vórtices de ar frio

Segundo Gan (1982), as baixas frias da alta troposfera recebem esse nome por serem sistemas de baixa pressão em grande escala, formadas na alta troposfera e cuja circulação ciclônica fechada possui o centro mais frio que sua periferia. Na literatura meteorológica também se encontram, para as baixas frias, as seguintes denominações: baixas desprendidas, ciclones subtropicais, baixa de Palmén, vórtices ciclônicos da alta troposfera, ciclones tropicais dos altos níveis e ciclones Kona.

Ainda segundo Gan (1982), a maioria das baixas frias estão confinadas na alta troposfera (acima de 500 mb), pois cerca de 60% não atingem o nível de 700 mb e somente em torno de 10% atingem a superfície (Frank 1966 e 1970). Sua circulação surge inicialmente nas partes mais altas da troposfera, estendendo-se gradualmente para baixo (Palmer, 1951).

Segundo Ramirez (2000), os vórtices ciclônicos podem ser classificados como de tipo Palmém ou Palmer. Estes tipos diferem um do outro devido a região e época do ano de formação. Os do tipo Palmer originam-se em latitudes tropicais e são mais frequentes no verão. No Brasil, esse tipo de sistema é encontrado na região Nordeste do Brasil. Os aspectos observacionais sobre sua formação e deslocamento foram documentados por Kousky e Gan (1981), Gan (1982) e Ramírez *et al.* (1999). Por outro lado, os vórtices do tipo Palmén, formam-se em latitudes subtropicais e são comumente observados no inverno e primavera. Na literatura, eles também são conhecidos como vórtices desprendidos (VDs). Quando um cavado de latitudes médias penetra nos trópicos com uma inclinação meridional bem acentuada, essa inclinação faz com que a sua parte norte, que tem velocidade de deslocamento menor, atrase-se até desprender-se completamente. Como consequência, forma-se uma circulação ciclônica fechada nessa parte (Palmén, 1949). Weldon (1991) define um tipo de mecanismo de formação para os VDs no Hemisfério Norte chamado de *"Roll-over cycle"*. Este mecanismo segue o modelo de Palmén, mas os VDs associados originam-se em situações de bifurcação, onde as correntes dos jatos polar e subtropical possuem um papel muito importante. A Figura 2.2 ilustra este mecanismo de formação adaptado para o Hemisfério Sul.

Os VDs tipo Palmén que afetam a América do Sul geralmente originam-se no Pacífico Sudeste ao sul de 20° S. Tipicamente, após cruzarem a Cordilheira dos Andes, eles deslocam-se sobre a Argentina, Paraguai e Sul do Brasil. Muitas das tempestades severas sobre o Rio de la Plata - Argentina (conhecidas como "Sudestadas") e sul e sudeste do Brasil tem sido associadas a este tipo de sistema (Necco, 1989; Cavalcanti; 1985, Silva Dias e Grammelsbacher, 1991). Lourenço (1996) apresenta uma climatologia de VDs, na qual descreve os aspectos relacionados ao deslocamento e formação desse tipo de sistema. Ramirez *et al.* (2000) apresenta dois estudos de caso de VD, dando ênfases ao processo de formação. Acredita-se que toda pesquisa relacionada a um melhor entendimento deste sistema e consequentemente a sua previsão é de grande importância, por ser um sistema que atinge numa escala espacial maior, alterando consideravelmente as condições de tempo sobre países como Chile, Argentina, Uruguai, Paraguai e Sul de Brasil.

Segundo Gan (1982) o mecanismo de formação dos ciclones do tipo Palmén ocorre a partir da pré-existência de um cavado frio no ar superior, o qual foi desligado de sua região fonte polar (Palmén e Newton, 1969). Desse modo, um cavado frio superior de latitudes médias ao penetrar nos subtrópicos pode ter uma inclinação meridional bem acentuada. Essa inclinação faz com que a parte do cavado, nas baixas latitudes, tenha uma velocidade zonal inferior ao resto do cavado, atrasando-se até que se desprenda completamente deste. Assim, nesta parte desprendida forma-se uma circulação ciclônica (Simpson, 1952).



Figura 2.2 - Mecanismo de formação "*Roll-over cycle*", adaptado para o Hemisfério Sul. As setas indicam ventos fortes associados ao jato nos ventos do oeste (Weldon, 1991).

2.2.1 Estudo de caso de Vórtices Desprendidos (Ramirez, 2000)

Ramirez *et al.* (2000) analisaram duas situações meteorológicas associadas à presença de vórtices desprendidos (VDs). O primeiro deles atuou no período de 8 a 14 de agosto de 1993 e originou-se em 300 hPa, com a circulação fechada estendendo-se até 500 hPa. O segundo caso de VD desenvolveu-se no período de 19 a 27 de outubro de 1999. Neste caso o VD forma-se da preexistência de uma bifurcação sobre o Pacífico Tropical Sul. Os dois casos de VD descritos por Ramirez *et al.* (2000) ilustram um mecanismo de formação em concordância com Palmén (1949). Desta forma, ocorre um deslocamento rápido do setor sul do cavado, devido a amplificação da crista, tal que o setor norte do mesmo fica defasado e ocorre o desprendimento de ar frio. No primeiro caso, o avanço de uma circulação ciclônica que estende-se até 850 hPa a sudoeste da bifurcação, e a presença de um jato intenso no seu setor norte, contribuíram para a intensificação e a amplificação da crista. Isto deslocou o setor sul do cavado para leste até desprender-se de seu setor norte. Assim, ocorreu uma fratura do cavado que originou o VD. Em escala sinótica geralmente os jatos incrementam o gradiente horizontal de temperatura, cizalhamento do vento e

vorticidade relativa, corrente acima do cavado do qual fazem parte. O jato com curvatura ciclônica contribuiu para a intensificação da vorticidade ciclônica corrente abaixo de V1, onde por sua vez o jato ao se estender anticiclonicamente ao redor da crista também contribuiu para a intensificação da vorticidade anticiclonica corrente acima da crista, amplificando-a. Isto contribuiu para a intensificação do setor norte do cavado dando origem ao VD. Dinamicamente este mecanismo de transporte de energia do jato para a onda pode ser explicado através da teoria de conservação da vorticidade potencial (Bell e Bossart, 1993). No segundo caso, exceto pela escala espacial envolvida e pela presença de uma bifurcação já existente, é similar ao primeiro caso estudado por Ramirez *et al.* (2000). Observou-se que a amplificação e a intensificação da crista associada a intensificação do jato contribuiu para a formação do VD.

2.2.2 Climatologia dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis que afetam o Sul do Brasil

De acordo com Severo *et al.* (2010), foram identificados 946 sistemas [Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) que se formaram nas vizinhanças da América do Sul no período de 1979 a 2008], formados na vizinhança da América do Sul, que apresentaram alta variabilidade interanual. Notou-se um aumento dos casos na última década do período analisado, entretanto a tendência aparente não pode ser atribuída a uma mudança no comportamento da circulação atmosférica. Pode ser apenas uma consequência da melhoria na qualidade dos dados que passaram a incorporar mais informações obtidas de satélites e no aumento do desempenho dos modelos numéricos de previsão de tempo. Os VCAN's que se formam no Oceano Pacífico seguem uma trajetória quase zonal (oeste-leste) até alcançar a costa da América do Sul. Ao cruzar os Andes, o VCAN descreve uma curva, inicialmente em direção ao norte da Argentina e depois, passando pelo sul do Brasil, encaminha-se para o Oceano Atlântico. Notou-se através de um estudo de caso, que a precipitação produzida pelo VCAN durante sua passagem pelo continente está concentrada nos setores leste e sul do centro ciclônico. Com o deslocamento do sistema para o oceano, rapidamente as condições do tempo sobre o continente melhoram.

2.3 Simulação com o modelo WRF

Neste estudo, foi adotado o modelo WRF (Weather Research and Forecast) que atualmente é uma ferramenta gratuita vastamente difundida em todo o mundo, com mais de 6.000 usuários registrados (SKAMAROCK *et al.*, 2008). Esse modelo foi desenvolvido com a colaboração de diversos centros de pesquisa, tais como: NCAR (National Center for Atmospheric Research), NCEP (National Centers for Environmental Prediction), MMM (Mesoscale and Microscale Meteorology), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration's), FSL (Forecast Systems Laboratory), AFWA (Air Force Weather Agency), NRL (Naval Research Laboratory), University of Oklahoma, e FAA (Federal Aviation Administration).

Em seguida são apresentados alguns trabalhos recentes que utilizaram o modelo WRF para a simulação de fenômenos meteorológicos e que discutem a qualidade dos resultados obtidos por tais simulações. Desta forma, estes trabalhos também podem ser considerados como motivação para o presente estudo.

Macedo *et al.* (2011) utilizaram o modelo WRF configurado com dois domínios aninhados (D1 e D2), cobrindo a região do Sul do Brasil. O domínio D2, com resolução espacial de 6 km, foi estabelecido sobre uma região próxima a cidade de Jaguarão- Estado do Rio Grande do Sul; a integração teve como objetivo simular o evento dos fortes ventos e tempestades com precipitação intensa e de curta duração ocorridos ao longo da rodovia BR-116, testemunhada por viajantes no dia 09/01/2011, por volta das 21-22 UTC. Segundo o estudo, as simulações realizadas apresentaram resultados relativamente compatíveis com os registros observados pela estação automática do INMET instalada na cidade de Jaguarão/RS. O modelo retratou com fidelidade a penetração da frente fria que passou sobre o Uruguai, e que afetou - com pouca intensidade – a região próxima à cidade de Jaguarão/RS, caracterizadas pelas análises feitas com os resultados para o domínio D1, com resolução menor.

Padilha (2011), em sua dissertação de mestrado, avaliou os resultados que o modelo de previsão atmosférica de alta resolução WRF oferece como ferramenta para a previsão do tempo para o Estado do Rio de Janeiro, principalmente para a região Metropolitana. Para alcançar este objetivo, foram feitas simulação de eventos de chuvas intensas no Estado do Rio de Janeiro usando o Modelo de previsão numérica WRF com grades aninhadas. No primeiro momento,

quando foram estudados os casos Angra dos Reis - evento caracterizado por uma chuva intensa ocorrida em Angra dos Reis na passagem do ano de 2009 para 2010 - e Morro do Bumba - evento caracterizado por chuvas intensas que atingiram, principalmente, as cidades do Rio de Janeiro, Niterói e São Gonçalo no início de abril de 2010 -, foram utilizadas duas grades, a maior com 54 km e a menor 18 km de espaçamento e posicionadas em 43°W e 23°S. No segundo momento, no estudo do caso do Morro do Bumba, onde foi feito um teste com três grades com espaçamento (18 km, 6 km e 2 km). Neste segundo momento também foi estudado o caso da Região Serrana – evento caracterizado por chuvas intensas na região serrana, que no dia 12 de janeiro de 2011, sofreu a maior tragédia natural já observada no país (CPTEC/INPE) - , onde foram escolhidas duas grades com espaçamento (18 km e 6 km) posicionadas nas mesmas coordenadas. Nos três casos estudados, Caso Angra dos Reis, Caso Morro do Bumba e Caso Região Serrana, a previsão do modelo quanto à aproximação do sistema frontal e/ou afastamento do mesmo para o Estado do Rio de Janeiro foi muito eficiente e satisfatória. Porém, quando foi relevante prever a intensidade da precipitação o modelo WRF subestimou os valores em todos os três casos estudados neste trabalho.

Hackerott (2013), em sua dissertação de mestrado, detalhou como se comporta o vento (direção e magnitude), em superfície, na região da Baía de Guanabara, no Estado do Rio de Janeiro. Os fenômenos meteorológicos de mesoescala, destacados nos dados observados de temperatura, de temperatura do ponto de orvalho e do vetor vento, foram explicados com base na topografia, no tipo de cobertura do solo e nas circulações sinóticas da região. Para expandir o estudo do escoamento em superfície para as regiões além do domínio de representação das estações meteorológicas (poucos metros além de cada anemômetro), em especial para a região sobre a Baía de Guanabara, foi utilizado o modelo WRF, validado a partir da comparação com dados observacionais e pela análise da raiz do erro quadrático médio e do erro médio (desvio). Assim, o modelo WRF também foi aprovado como uma ferramenta precisa para a previsão de 72h para o vento em superfície na região estudada, sendo indicadas e comentadas suas principais falhas. O estudo, como um todo, foi idealizado e realizado para meteorologistas ou interessados pelas competições de vela que ocorrerão nas Olimpíadas de 2016.

2.4 Reprevisão

Em seguida são apresentados alguns trabalhos recentes que discutem o papel da reprevisão na melhoria dos resultados de previsões operacionais do tempo. Desta forma, estes trabalhos também podem ser considerados como motivação para o estudo desenvolvido no presente trabalho.

Whitaker e Wei (2006) desenvolveram um trabalho com objetivo de mostrar os benefícios das reprevisões para o desenvolvimento de diversos tipos de modelos: independentemente de suas resoluções. Estendendo o trabalho de Hamill *et al.* (2004) - onde analisaram o benefício das reprevisões, a partir de um único modelo, para as previsões estatísticas de médio prazo (8 a 14 dias) -, foram analisados os benefícios da combinação dos resultados de duas reprevisões - NCEP e European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) – também para as previsões de médio prazo; evidenciaram, em suas conclusões, que os resultados obtidos a partir desta combinação apresentam melhorias significativas das previsões estatísticas, principalmente para as previsões feitas para 8 a 14 dias. Independentemente da utilização de um ou mais modelos para as reprevisões, mostra-se que as estatísticas geradas dos resultados do modelo (MOS, sigla em inglês), computadas a partir de grandes conjuntos de dados de reprevisões, podem auxiliar, significativamente, as previsões operacionais dos modelos.

Hamill e Whitaker (2007) examinaram os benefícios de calibração de previsões, utilizando-se dados de reprevisão, para três variáveis: altura geopotencial em 500 hPa, temperatura em 850 hPa e temperatura a 2 m. Os principais resultados foram: 1) a altura geopotencial em 500 hPa era a variável com os melhores resultados antes da calibração, de forma que foi a menos afetada pela calibração; 2) para a temperatura em 850 hPa, que possuía resultados razoáveis a partir da previsão original, observou-se um aumento significativo da qualidade dos resultados; 3) para a temperatura de 2 m, a qualidade original das previsões era muito baixa, de forma que a calibração produziu um aumento dramático na habilidade do modelo de fazer as previsões. A partir dos resultados, os benefícios das reprevisões são claros. Portanto, o trabalho mostra a importância de se acrescentar um procedimento de calibração estatística ao processo de previsões numéricas de tempo – desenvolvido em diversos centros de previsão –

utilizando-se um conjunto de dados de reprevisão objetivando-se a correção dos dados das previsões operacionais.
CAPÍTULO 3 DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os dados e a metodologia que foram utilizados para o desenvolvimento do trabalho. Serão apresentadas as fontes utilizadas para elaboração da análise sinótica do evento estudado e os dados utilizados como condições iniciais e de contorno para elaboração das simulações e reprevisões utilizando o modelo regional WRF.

Este capítulo estará dividido em três seções de forma a explicar detalhadamente os dados e a metodologia utilizada para: análise sinótica (3.1), simulação (3.2) e reprevisão (3.3) do evento em estudo na presente pesquisa. Neste ponto, é importante ressaltar a diferença entre os termos previsão, reprevisão e simulação. O termo previsão se refere a aplicação de conceitos matemáticos e físicos para determinação da evolução das condições atmosféricas de determinada área de estudo a partir da utilização de dados da análise de modelos de maior área (utilizado como condição inicial) e dados de previsão do mesmo modelo (utilizados como condições de contorno). O termo reprevisão se refere a utilização de modelos numéricos para gerar a previsão retroativa a partir de dados de previsões de modelos de maior área disponíveis no passado (período que será analisado na integração de reprevisão), usando sua análise como condição inicial e as suas previsões como condições de contorno, buscando identificar as tendências nos resultados que possibilitem a melhorias do modelo (pelos desenvolvedores responsáveis) e a definição da previsibilidade dos fenômenos atmosféricos de interesse (importante para os previsores que utilizam o modelo operacionalmente). Em outras palavras, a reprevisão significa reproduzir no momento atual, uma previsão feita no passado com aquelas mesmas condições iniciais e de contorno. Já o termo simulação se refere a utilização de modelos numéricos para gerar o maior detalhamento espaço-temporal de fenômenos a partir da utilização de dados disponibilizados por um modelo de área maior. Neste caso, as condições iniciais e de contorno utilizadas contém dados observados, podendo ser oriundos de dados de reanálises, análises, etc.

3.1. Análise Sinótica do evento

a) *Dados:* Para a determinação dos padrões de escala sinótica associados ao evento de chuvas intensas estudado, foram utilizados dados de superfície e dados em níveis de pressão da Reanálise do ECMWF, denominada ERA-Interim (Dee *et al.* 2011) disponibilizados em uma grade regular de 1,5 x 1,5 graus de latitude-longitude. O período de dados utilizados foi de 1 a 30 de novembro de 2008. Em relação aos dados de superfície, foram utilizadas as variáveis: pressão ao nível médio do mar, componentes zonal e meridional do vento a 10 metros, temperatura a 2 metros e temperatura do ponto do orvalho a 2 metros, disponibilizadas em resolução temporal de 6h (0Z, 6Z, 12Z e 18Z). Em relação aos dados em níveis de pressão, foram utilizadas as variáveis: divergência de vento, geopotencial, umidade específica, temperatura, componentes zonal e meridional do verto a 900 hPa, 975 hPa, 850 hPa, 500 hPa, 300 hPa e 200 hPa e resolução temporal de 6h (0Z, 6Z, 12Z e 18Z). O domínio dos dados utilizados da reanálise é apresentado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Domínio dos dados da Reanálise do Era Interim utilizados para a análise sinótica.

b) Metodologia: Para a análise sinótica do evento em estudo foram gerados campos compostos das variáveis de superfície e em níveis de pressão de forma a descrever os aspectos de grande escala que influenciaram o fenômeno. Os campos gerados foram: pressão ao nível médio do mar, temperatura com altura geopotencial em 500 hPa, vorticidade com linha de corrente em 500 hPa, linha de corrente com jato em 300 hPa e fluxo integrado de umidade entre 1000-300 hPa com divergência do fluxo. Além de campos horizontais, foram gerados cortes zonais e verticais – exibidos na Figura 3.2 - na região do ciclone em níveis médios sobre a região de Santa Catarina e cortes zonais – também exibidos na Figura 3.2 - sobre a região do anticiclone de bloqueio mais ao sul da região de estudo. Foram gerados campos de precipitação acumulada em 3h e em 24h para comparação com os dados observados disponíveis no período sobre a região.



Figura 3.2 – Cortes utilizados para detalhamento do evento no período entre 19 e 24 de novembro de 2008. O quadrado vermelho representa a localização média (27S, 49W) do centro do ciclone em 500 hPa onde foi feito o corte vertical. O quadrado azul representa a localização média (40S, 40W) do centro do anticiclone de bloqueio em 500 hPa onde foi feito o corte vertical. A linha vermelha representa a latitude média (27S) do ciclone onde foi feito o corte zonal. A linha azul representa a latitude média (40S) do anticiclone de bloqueio em 500 hPa onde foi feito o corte zonal.

3.2 Simulação do evento

- a) Dados: Para a simulação do evento em estudo, foi utilizado o modelo regional The Weather Research & Forecast (WRF). Foram utilizadas, como condições iniciais e de contorno para as simulações, os dados denominados Final Operational Global Analysis (FNL), disponibilizados pelo NCEP em grade regular de 1,0 x 1,0 grau de latitude-longitude, preparados operacionalmente a cada 6h. Este é um produto do Global Data Assimilation System (GDAS) que coleta continuamente dados observacionais do Global Telecommunications System (GTS), e outras fontes, para várias análises. Os dados do FNL são gerados com o mesmo modelo que o NCEP utiliza para o Global Forecast System (GFS), mas estes dados são preparados aproximadamente 1h após a inicialização do GFS. Este atraso tem como objetivo que o FNL possa conter mais dados observacionais. Em outras palavras, os arquivos FNL representam uma análise melhorada. A integração do modelo global GFS é feita sempre mais cedo do que o FNL com objetivo de atender necessidades de previsão operacional.
- b) Metodologia: Para a simulação apresentada no presente trabalho, foram utilizadas 3 grades aninhadas (Figura 3.6) com resolução horizontal de 90km, 30km e 10km, respectivamente. O modelo foi rodado utilizando 28 níveis na vertical. O modelo foi inicializado em 19 de novembro de 2008 às 00Z e foi integrado até 24 de novembro de 2008 às 00Z totalizando 120h (5 dias) de simulação. Para a integração realizada, foi utilizado um passo de tempo de 600s. Em relação à física do modelo, foram utilizadas as seguintes opções: para microfísica a opção WSM 3-class simples ice scheme, para radiação de onda longa a opção RRTM scheme, para radiação de onda curta a opção Dudhia scheme, para camada limite superficial a opção Monin-Obukhov scheme, para solo-superfície a opção Noah land-surface model, para a camada limite a opção YSU scheme e para cumulus a opção Kain-Fritsch (new Eta) scheme. No pós-processamento dos resultados do modelo, os dados calculados a cada 10 min (600s) na fase de processamento do modelo foram ajustados para que o grib final do modelo tivesse uma resolução temporal de 3h. Na vertical, o modelo foi interpolado em níveis de pressão para os seguintes níveis: 1000 hPa, 950 hPa, 900 hPa, 850 hPa, 800 hPa, 750 hPa, 700 hPa,

650 hPa, 600 hPa, 550 hPa, 500 hPa, 450 hPa, 400 hPa, 350 hPa, 300 hPa, 250 hPa, 200 hPa, 150 hPa e 100 hPa. Para a análise dos resultados da simulação do evento em estudo, foram gerados campos compostos das variáveis de superfície e em níveis de pressão de forma a entender de forma detalhada quais mecanismos foram responsáveis pela ocorrência do fenômeno. Os campos gerados foram: pressão ao nível médio do mar, temperatura com altura geopotencial em 500 hPa, vorticidade com linha de corrente em 500 hPa, linha de corrente com jato em 300 hPa e fluxo integrado de umidade entre 1000-300 hPa com divergência do fluxo. Além de campos horizontais, foram gerados cortes zonais e verticais – exibidos na Figura 3.2 - na região do ciclone em níveis médios sobre a região de Santa Catarina e cortes zonais e verticais – também exibidos na Figura 3.2 - sobre a região do anticiclone de bloqueio mais ao sul da região de estudo. Foram gerados campos de precipitação acumulada em 3h e em 24h para comparação com os dados observados disponíveis no período sobre a região.



Figura 3.3 – Domínio das integrações aninhadas utilizadas na simulação e reprevisão do evento.

3.3 Reprevisão do evento

- a) Dados: Para a reprevisão do evento em estudo, foi utilizado o modelo regional *The Weather Research & Forecasting* (WRF) (melhor descrito na seção 3.2 do presente capítulo). Foram utilizadas, como condições iniciais e de contorno para as reprevisões, os dados históricos de previsão do repositório do GFS disponibilizados pelo NCEP em grades de 1,0 x 1,0 graus. Neste repositório são armazenados históricos de previsão de 180 h (em intervalos de 3h) do GFS do período entre 15 de Fevereiro de 2005 e 7 de Julho de 2012. São guardados os ciclos de previsão a cada 6h (00, 06, 12 e 18) totalizando 4 integrações de 180h de previsão por dia.
- b) Metodologia: É importante destacar que o termo reprevisão aqui utilizado se refere a previsão do tempo retrospectiva, ou seja, de períodos no passado utilizando-se modelos numéricos fixos (estáveis). Para desenvolvedores dos modelos, este tipo de integração possibilita a identificação de tendências do modelo, permitindo o desenvolvimento de novas versões corrigidas. Para previsores do tempo, estas integrações servem para a definição da previsibilidade de fenômenos a partir de estatísticas detalhas dos resultados obtidos a partir dos modelos (Hammil et al., 2006). As integrações denominadas de reprevisão utilizam como condições iniciais e de contorno as condições de modelos disponíveis no período estudado e não condições geradas posteriormente, de forma a representar os resultados que seriam obtidos pelo modelo caso o mesmo estivesse disponível operacionalmente no período estudado. Para a reprevisão apresentada no presente trabalho, foram utilizadas as mesmas configurações de integração do WRF e pósprocessamento dos resultados como descrito na seção 3.2 (Simulação do evento). Em relação à análise dos resultados da reprevisão, foram gerados os mesmos campos que foram gerados na simulação para possibilitar a comparação dos resultados encontrados para as duas rodadas.

CAPÍTULO 4 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO E DO EVENTO

Neste capítulo será feita uma caracterização do evento de precipitação intensa na porção leste do estado de Santa Catarina em novembro de 2008. Primeiramente, será apresentada uma caracterização da região de estudo com a definição das principais regiões nas quais o estado encontra-se dividido. Após a caracterização da região, serão discutidos os aspectos geológicos e geomorfológicos e os dados observacionais obtidos para o evento em questão.

4.1 Caracterização do estado de Santa Catarina

A caracterização do estado de Santa Catarina apresentada nesta seção do capítulo conterá informações obtidas a partir de dados oficiais extraídos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e do site oficial do governo do estado de Santa Catarina (http://www.sc.gov.br/).

Segundo dados do IBGE extraídos do último Censo Demográfico realizado no ano de 2010, o estado de Santa Catarina possui como capital a cidade de Florianópolis, população estimada em 6.248.436 habitantes, uma área total de 95.736,165 km², uma densidade demográfica de 65,29 habitantes por km² e um total de 295 Municípios.

Segundo informações disponibilizadas na página oficial do estado de Santa Catarina, a diversidade geográfica e humana de Santa Catarina é surpreendente para um território de apenas 95,4 mil km², o menor Estado do Sul do Brasil. Uma viagem de poucas horas de carro é suficiente para experimentar mudanças radicais no clima, na paisagem, nos sotaques e culturas. O Estado é dividido em oito principais regiões (Figura 4.1): Litoral (Grande Florianópolis), Nordeste, Planalto Norte, Vale do Itajaí, Planalto Serrano, Sul, Meio-Oeste e Oeste. Santa Catarina fica no centro geográfico das regiões de maior desempenho econômico do país, Sul e Sudeste, e em uma posição estratégica no Mercosul. O Estado faz fronteira com o Paraná (ao Norte), Rio Grande do Sul (ao Sul), Oceano Atlântico (Leste) e Argentina (Oeste). O horário é o de Brasilía (DF). Uma vez por ano - geralmente entre outubro e fevereiro - adota-se o horário de verão, quando os relógios são adiantados uma hora para poupar energia. O clima subtropical úmido, predominante em SC, proporciona temperaturas agradáveis, que variam de 13 a 25° C,

com chuvas distribuídas durante todo o ano. Ao contrário da maior parte do território brasileiro, aqui as quatro estações são bem definidas. Os verões são quentes e ensolarados. E no inverno, a região do Planalto Serrano, com altitudes que atingem 1.820 metros, é onde há a maior ocorrência de neve no Brasil. A vegetação é variada, sendo encontrados mangues, restingas, praias, dunas e Mata Atlântica. O Estado tem 295 municípios e a capital é Florianópolis. Entre as maiores cidades, destacam-se Joinville, Blumenau, Itajaí, Balneário Camboriú, Chapecó, Criciúma, Lages e Jaraguá do Sul.



Figura 4.1 – Divisão do estado de Santa Catarina em regiões.

4.2 Aspectos Geológicos e Geomorfológicos do evento

Segundo relatório do CEPED/UFSC (2009), a grande maioria dos deslizamentos aconteceu nos dias 22 e 23 de novembro, período em que ocorreram as precipitações mais intensas e concentradas. Esse pico máximo de chuvas foi antecedido por um período de cerca de três meses de precipitações contínuas que provocaram a saturação do solo e culminaram em numerosos movimentos de massa. A região costeira de Santa Catarina, entre o oceano e o Planalto da Serra Geral, se constitui, generalizadamente, em área de alto risco de ocorrência de desastres naturais dos tipos inundações e movimentos de massa, devido às suas condições regionais climáticas, geológicas, geomorfológicas e de uso da terra. A distribuição das localidades mais atingidas, no evento de 2008, mostra que os movimentos massa ocorreram

predominantemente nas encostas da Serra do Mar. A Serra do Mar é um grande sistema montanhoso que corre pela costa brasileira desde o Espírito Santo até o Sul de Santa Catarina, esculpido em rochas graníticas cristalinas da Província Mantiqueira. Segundo Rosa (1991) esta é a área mais afetada pelos escorregamentos no estado. Devido às suas características geológicas e climáticas, o manto de intemperismo que recobre as rochas nesta região pode atingir até várias dezenas de metros de espessura, sendo este um dos importantes fatores contribuintes para a ocorrência de movimentos de massa de grande amplitude. A escarpa do Planalto da Serra Geral, com seus mais de 1.500 m de altitude e orientação paralela à costa se constitui em um verdadeiro paredão que dificulta a interiorização das nuvens e provoca a precipitação da chuva nas encostas da Serra do Mar. Aqui, a água em excesso infiltra-se muito depressa, encharcando o profundo manto de alteração das pouco permeáveis rochas cristalinas, provocando a corrida de massa nas áreas com cobertura vegetal alterada e acúmulo de material inconsolidado, ou escoa rapidamente em direção às baixadas, onde seu acúmulo, em planícies de sedimentação urbanizadas, se conFigura em inundações. Segundo relatório da Associação Brasileira de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS, 2009) os inúmeros escorregamentos deste evento ocorreram tanto em áreas urbanas, quanto em áreas rurais. Nas áreas urbanas ocorreram milhares de escorregamentos que danificaram e destruíram residências e infra-estrutura pública e privada. Pode-se dizer que a ocupação desordenada de certas áreas contribuiu no aumento do número e da magnitude dos acidentes nas regiões urbanas. No entanto diversas áreas com ocupação regularizada também apresentaram problemas. Nas áreas rurais, foram observadas rupturas de grandes proporções, em locais com intervenção humana, mas também onde não havia ação antrópica e sim vegetação nativa. As rupturas nas áreas rurais envolveram volumes de dezenas de milhares de toneladas de solo, com destruição de residências, indústrias, estradas e acessos e causando grande número das mortes. Envolveram ainda muitas áreas com mata virgem e outras com plantações, não havendo um padrão preferencial claro, fato que merece estudo mais aprofundado. Diversas destas rupturas tiveram características classificadas como "corridas" por causa da grande velocidade da massa deslizante. Tais corridas criaram enxurradas que destruíram pontes e drenagens, causando algumas vezes o barramento de corpos de drenagem, o que agravou, por sua vez, as enchentes.

4.3 Descrição do caso de chuvas intensas em Novembro de 2008

A Figura 4.2 apresenta a sequência temporal dos acumulados diários de precipitação extraídos da página de Clima do CPTEC para o período entre 19 e 24 de Novembro de 2008. Nota-se que a precipitação acumulada do evento esteve ao longo de todo o período confinada na porção leste do estado (litorânea) afetando as mesorregiões Nordeste, Vale do Itajaí, Grande Florianópolis e Sul. Os maiores acumulados de precipitação ao longo do período foram observados nos dias 21/11/2008 (Figura 4.2c), 22/11/2008 (Figura 4.2d) e 23/11/2008 (Figura 4.2e). Nota-se que no dia 24/11/208 (Figura 4.2e), a precipitação ficou concentrada entre as mesorregiões Nordeste e do Vale do Itajaí.



Figura 4.2 – Acumulados diários de precipitação do CPTEC para o período de 19 a 24 de Novembro de 2008.

A Figura 4.3 apresenta a série temporal de acumulados diários de precipitação de 16 cidades atingidas pelo evento de precipitação intensa em estudo do dia 1 ao dia 30 de Novembro de 2008. Em concordância com os dados da Figura 4.2, nota-se que os maiores acumulados de precipitação ficaram concentrados entre os dias 22 e 24 de Novembro de 2008. No dia 23 de Novembro, foram registrados os seguintes acumulados diários máximos: 337 mm em Blumenau, 297,4 mm em São Francisco do Sul, 246,2 mm em Camboriú, 202,2 mm em Itapoá,160,1 em Florianópolis e 112,6 mm em Angelina.



Figura 4.3 – Série temporal de precipitação acumulada em 24h das cidades atingidas pelo evento extremo em Santa Catarina no período de 1 a 30 de Novembro de 2008. Estações Ciram/Epagri. (Sousa, 2010)

A Figura 4.4 apresenta a imagem de satélite realçada para o dia 22 de Novembro de 2008 para o horário das 15Z. Nota-se a presença de um anticiclone com centro situado aproximadamente em 40S de latitude e 40W de longitude. A circulação anticiclônica desse sistema ao nível da superfície é responsável por transportar umidade do oceano em direção à costa leste do estado de Santa Catarina. Associado a este sistema em superfície, um ciclone em níveis médios (campo não apresentado) contribuiu para a formação da nebulosidade não muito profunda (não convectiva) observada na imagem de satélite. Este ciclone frio em níveis médios originou-se devido à presença de um anticiclone de bloqueio e a configuração do padrão dipolo (Figura 4.5) no qual o escoamento de leste de níveis médios se bifurca formando uma circulação ciclônica no ramo equatorial da alta de bloqueio (apresentado em mais detalhes no Capítulo 5).



Figura 4.4 – Imagem de Satélite realçada para o dia 22 de Novembro de 2008 às 15Z.



Figura 4.5 – Padrão de escoamento do tipo dipolo associado a uma situação idealizada de bloqueio. A letra "L" (*Low* em inglês) representa um centro de baixa pressão no campo de geopotencial e o "H" (*High* em inglês) representa um centro de alta pressão no campo de geopotencial (Nascimento e Ambrizzi, 2011).

4.4 Previsibilidade

Segundo a nota técnica do INPE/INMET/EPAGRI, os modelos de previsão numérica capturaram com relativa precisão os principais sistemas atmosféricos envolvidos. Em particular, os modelos globais (previsão de mais longo prazo com resolução mais baixa) capturaram especialmente o sistema de bloqueio com muito boa antecedência (aproximadamente 10 dias). Os modelos regionais, mais sofisticados, de maior resolução e de prazo mais curto, permitiram também prever o vórtice ciclônico, cujo diâmetro foi de apenas 500-1000 km. Contudo, todos os modelos consultados (inclusive os rodados no exterior) subestimaram significativamente o volume das chuvas, especialmente para os dias 22 e 23 de novembro. Por essa razão, embora tenham sido emitidos avisos advertindo sobre a gravidade da situação meteorológica, não foi possível alertar as autoridades da Secretaria de Estado de Defesa Civil (SEDEC) e da Defesa Civil de SC sobre a verdadeira dimensão da catástrofe. Embora o modelo Eta, que na época era rodado no CPTEC/INPE com uma resolução horizontal de 20 km, tenha conseguido prognosticar com boa precisão a localização das chuvas mais intensas no litoral norte de SC, os volumes previstos foram aproximadamente 50% dos observados. Houve também modelos, como o Global T299 do CPTEC, que previram acumulados mais próximos da realidade, ainda subestimados, porém indicaram de forma deficiente a localização das chuvas. Em síntese, embora os modelos numéricos tenham capturado a situação meteorológica geral, assim como previsto a ocorrência de precipitações consideráveis, nenhum deles teve a precisão necessária para fazer uma previsão quantitativa das chuvas. Essa limitação é comum a todos os modelos numéricos de previsão meteorológica conhecidos, tanto no Brasil como no resto do mundo.

4.5 Observações finais

Segundo o Boletim Climanálise de Novembro de 2008 (CPTEC/INPE), o evento meteorológico de maior destaque no mês na Região Sul do Brasil foi a ocorrência de chuvas intensas no nordeste de Santa Catarina, causadas principalmente pela presença de um escoamento anticiclônico anômalo adjacente à costa da região. Na região do Vale do Itajaí e áreas vizinhas, as chuvas intermitentes causaram deslizamentos de encostas e inundações. Somente neste Estado,

foram notificadas cerca de 120 mortes em decorrência dos desabamentos e milhares de desabrigados. Mais de 40 municípios decretaram estado de calamidade pública. Segundo dados do Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (CIRAM) e INMET, no período de 21 a 24 de novembro, o total de precipitação excedeu 500 mm em algumas localidades, sendo que os acumulados diários foram superiores a 200 mm em cidades como Blumenau, Balneário Camboriú, Luiz Alves e Itapoá. Considerando os totais mensais de precipitação, a cidade de Blumenau acumulou 1001,7 mm e, em Joinville, a chuva acumulada atingiu 968,8 mm. Nesta localidade, o último recorde havia sido registrado em fevereiro de 1995, sendo igual a 831,9 mm, (Fonte: EPAGRI/CIRAM).

Dessa forma, devido a importância histórica do evento em estudo, considerado por diversas fontes como o maior desastre natural da história de Santa Catarina e um dos maiores do Brasil, diversos questionamentos surgem acerca dos mecanismos meteorológicos associados a sua formação e manutenção.

CAPÍTULO 5 ANÁLISE SINÓTICA

Neste capítulo será apresentada uma análise sinótica do evento em estudo com base nos campos de pressão ao nível médio do mar, vorticidade, linha de corrente, temperatura, altura geopotencial, fluxo de umidade e divergência de umidade para níveis médios e altos da Reanálise do ECMWF, denominada ERA-Interim (Dee *et al.* 2011). Estes dados são disponibilizados em uma grade regular de 1.5° x 1.5° latitude-longitude, e possuem uma resolução temporal de 6 h.

5.1 Análise geral do fenômeno

As Figuras a seguir, de 5.1 a 5.5, apresentam a evolução temporal a cada 24 h para o horário de 00 Z de campos de variáveis meteorológicas ao longo do período de 19 a 24 de novembro de 2013. Como complemento da análise, são apresentados gráficos ao longo dos dias do posicionamento dos núcleos dos sistemas meteorológicos de interesse e gráficos da evolução da intensidade dos mesmos.

Na análise do campo de pressão ao nível médio do mar ao longo do mês de novembro, nota-se a formação do anticiclone (isóbara de 1024 hPa apresenta-se fechada) no dia 17 sobre a Argentina (Figura não apresentada) a partir da incursão de uma crista associada ao deslocamento de um sistema de alta pressão oriundo do Oceano Pacífico. Este anticiclone se deslocou lentamente para leste até o dia 26, quando se acoplou a um novo sistema de alta pressão e passou a ter características de sistema transiente permitindo o deslocamento dos sistemas frontais para latitudes mais baixas na América do Sul. A Figura 5.1 apresenta os campos para o período de 19 a 24 de novembro que representam o período de maior desenvolvimento do anticiclone em superfície. Os contornos azuis esquematizados, na figura, representam a extensão média da isóbara de 1024 hPa associada ao anticiclone de forma a caracterizar o desenvolvimento do sistema ao longo do período apresentado. Nota-se que entre os dias 19 e 22 o anticiclone mostra-se em intensificação com significativo ganho de amplitude. Na figura, a isóbara de 1024 hPa chega a alcançar a extensão longitudinal média de 55° (55 W a 0) no dia 22 coerente com o período de dias com maiores registros acumulados de precipitação (Figura 4.3) no estado de Santa Catarina. A intensificação do anticiclone estabelece uma grande zona de bloqueio do

escoamento zonal no sudeste da América do Sul impossibilitando o deslocamento de sistemas transientes com origem em latitudes mais altas em direção as regiões situadas ao norte da Argentina. De volta a Figura 5.1, nota-se que a partir do dia 23, há uma redução de intensidade do sistema, mais uma vez coerente com a redução de precipitação observada na Figura 4.3 sobre o estado de Santa Catarina.



Figura 5.1 – Campos de pressão reduzida ao nível médio do mar, construídos a partir dos dados da Reanálise Era Interim do ECMWF. Campos diários no horário das 00Z referentes ao período entre os dias 19 e 24 de novembro de 2008. Em contorno azul, destaca-se a isóbara de 1024 hPa referente ao anticiclone de bloqueio.

A Figura 5.2 destaca o posicionamento aproximado do centro do anticiclone entre os dias 19 a 24, com base no campo de pressão ao nível médio do mar apresentado na Figura 5.1. É possível notar o lento deslocamento do anticiclone ao longo do período, caracterizado pela atuação do bloqueio do escoamento de oeste na região. Com este padrão de bloqueio, os sistemas

sinóticos transientes são obrigados (de acordo com o escoamento) a se desviarem de seu trajeto e com isso as regiões nas proximidades do centro desses anticiclones experimentam dias sem (ou com pouca) nebulosidade e sem precipitação. Como discutido anteriormente no capítulo, regiões nas periferias desse anticiclone (por exemplo, na parte norte) podem sofrer influências da indução de escoamento ciclônico podendo provocar grandes acumulados de precipitação.



Figura 5.2 – Evolução temporal do deslocamento espacial do centro aproximado do anticiclone de bloqueio a partir da análise subjetiva do campo de pressão ao nível médio do mar. Na figura, a letra "A" indica o posicionamento do anticiclone e os números indicam o dia associado à posição representada. As posições foram analisadas sempre no horário 00 Z.

A Figura 5.3 apresenta a evolução temporal do campo de vorticidade e linha de corrente ao longo do período analisado para o nível de 500 hPa. Destacam-se na imagem, de vermelho o núcleo de vorticidade ciclônica e de azul a formação do anticiclone no campo de linha de corrente. No nível analisado, observa-se a formação e desenvolvimento do vórtice que deflagrou a precipitação sobre o estado de Santa Catarina e também a formação do anticiclone, acoplado ao anticiclone de superfície analisado na Figura 5.1 que contribuiu para a mudança do padrão de escoamento de oeste, contribuindo para formação de uma circulação ciclônica fechada no flanco equatorial do sistema. Nota-se que de 19 a 21, houve o deslocamento de um núcleo de vorticidade ciclônica desde a região central da Argentina até a porção sul do estado do Rio Grande do Sul. Associado a este núcleo de vorticidade existe um cavado no campo de linha de corrente ainda sem a configuração de um núcleo bem definido. No dia 22, observa-se a formação do ciclone no litoral do estado do Rio Grande do Sul e a formação de um anticiclone mais ao sul, em latitudes mais altas, caracterizando o padrão de dipolo. Este padrão dipolo persiste até o dia 23 e a partir do dia 24 percebe-se que embora o núcleo de vorticidade ciclônica ainda possa ser observado no litoral do estado do Rio Grande do Sul, observa-se apenas um cavado de pequena amplitude no campo de linha de corrente. Os maiores acumulados de precipitação observados no estado de Santa Catarina estão de acordo com o instante de formação do dipolo mostrando que esta configuração tem grande importância para esta precipitação. Além disso, a perda de configuração do padrão de dipolo é coerente com a redução dos acumulados de precipitação, mostrando que a manutenção dessa configuração está diretamente associada com a manutenção das chuvas.

A Figura 5.4 destaca a evolução média do centro do anticiclone e do vórtice com base nos campos de vorticidade e linha de corrente em 500 hPa apresentados na Figura 5.3. O objetivo dessa análise é mostrar a importância do posicionamento relativo entre o vórtice ciclônico e do anticiclone mais ao sul para o início e manutenção da precipitação da região de estudo. Nota-se, a partir da Figura 5.4, que os maiores acumulados de precipitação são coincidentes com o posicionamento dos sistemas no dia 22. Neste dia, anticiclone e vórtice estão em média ocupando a mesma faixa de longitude. Este posicionamento favorece um escoamento de leste praticamente perpendicular ao litoral do continente contribuindo para o evento de precipitação em estudo de duas formas: suporte termodinâmico caracterizado pelo transporte de umidade para região a partir do oceano e suporte dinâmico para a formação do vórtice, uma vez que o escoamento de leste na porção norte do anticiclone vai de encontro ao escoamento de oeste oriundo do pacífico que força seu desvio em direção ao equador induzindo/intensificando a circulação ciclônica. Nos dias

subsequentes, com o aumento da inclinação relativa (no plano horizontal) entre os sistemas há uma diminuição dos suportes dinâmico e termodinâmico que coincide com a redução de precipitação observada.



Figura 5.3 – Campo de vorticidade (plotados valores menores que 0 s⁻¹, associados a vorticidade ciclônica) e linha de corrente em 500 hPa construídos a partir dos dados da Reanálise Era Interim do ECMWF. Campos diários no horário das 00Z referentes ao período entre o dia 19 e 24 de novembro de 2008. Em contorno vermelho, destaca-se o vórtice ciclônico associado às chuvas intensas em Santa Catarina e em contorno azul, destaca-se o anticiclone de bloqueio formado a partir do dia 22 de novembro caracterizando o padrão dipolo.



Figura 5.4 – Evolução temporal do deslocamento espacial do centro aproximado do vórtice e do anticiclone a partir da análise subjetiva dos campos de vorticidade e linha de corrente em 500 hPa. Na figura, a letra "A" e "C" indicam o posicionamento do anticiclone e do vórtice (ciclone), respectivamente, e os números indicam o dia associado a posição representada. As posições foram analisadas sempre no horário das 0 Z.

A Figura 5.5 apresenta a evolução temporal do campo de jato (destacado em sombreado colorido) e linha de corrente ao longo do período analisado para o nível de 300 hPa. Destaca-se na imagem, de azul a formação do anticiclone no campo de linha de corrente. No nível analisado, observa-se a formação do anticiclone acoplando-se com os anticiclones situados em níveis médios e superfície, coerentes com os instantes de maior atividade do vórtice na região do estado de Santa Catarina. Nota-se entre o período de 19 a 21, a incursão de uma crista sobre o sul da

América do Sul. A partir do dia 22, forma-se um anticiclone no campo de linha de corrente que caracteriza, nesse nível, o bloqueio do escoamento zonal de oeste que normalmente é observado nessa região associado à presença de jatos. Nota-se, nos campos da Figura 5.5, um comportamento dos jatos bem característico da presença da situação de bloqueio. Principalmente a partir do dia 22, a propagação do jato de oeste ao encontrar a região correspondente ao anticiclone de bloqueio é forçada a se desviar para sul, contornando o anticiclone. Dessa forma, o jato que é um dos principais fatores que guiam os sistemas transientes (massas de ar frio, frentes frias, etc.), oriundos de latitudes médias e altas, em direção a latitudes mais baixas é forçado a manter estes sistemas mais ao sul.



Figura 5.5 – Campos de jato destacado em sombreado colorido (para valores maiores que 70 ms⁻¹) e linha de corrente em 300 hPa, construídos a partir da Reanálise Era Interim do ECMWF. Campos diários no horário das 00Z, referentes aos dias 19 a 24 de novembro de 2008. Em

contorno azul, destaca-se o anticiclone de bloqueio formado a partir do dia 22 de novembro caracterizando o padrão dipolo.

A análise das Figuras 5.1 a 5.5 teve como objetivo apresentar as principais características do sistema bloqueio/vórtice para os níveis de superfície, médios e altos, o qual possui relação direta com as precipitações intensas sobre o setor leste do estado de Santa Catarina. A análise dos campos mostra que durante o período de maior intensidade do fenômeno, entre os dias 22 e 24, houve um acoplamento entre a superfície, níveis médios e altos. Este acoplamento ficou caracterizado pelo empilhamento do anticiclone nos três níveis analisados, provocando um bloqueio total do escoamento de oeste e contribuindo para a intensidade do vórtice ciclônico em níveis médios na região de Santa Catarina.

5.2 Análise da estrutura vertical do vórtice

A Figura 5.6 apresenta o campo de fluxo de umidade verticalmente integrado na camada entre 1000 e 300 hPa no dia 22, em que foram registrados os maiores acumulados de precipitação na região de Santa Catarina. Este campo mostra que a região de interesse encontrava-se com grande suporte de umidade caracterizado pelos altos valores de fluxo de umidade observados. Os vetores desse fluxo destacam a presença marcante do anticiclone de bloqueio. Desta forma, os altos valores de fluxo de umidade estão associados à circulação anti-horária do anticiclone levando umidade do oceano para a região. Além disso, o campo apresentado na Figura 5.6 permite visualizar o escoamento de umidade se desviando para sul, na Argentina, associado ao bloqueio do anticiclone estabelecido.

A Figura 5.7 apresenta o corte longitudinal ao longo da latitude de 27° S (proximidades do centro do vórtice ciclônico) dos campos de altura geopotencial e temperatura no nível de 500 hPa. Observa-se no dia 21, dia precedente a ocorrência dos registros máximos de precipitação na região de Santa Catarina, a existência de um núcleo frio a oeste da longitude de 50° W em deslocamento para leste. No dia 22 (às 0 Z), dia em que ocorreram os maiores acumulados de precipitação registrados na região de Santa Catarina, nota-se que as temperaturas mais baixas se encontram no entorno da longitude de 50° W associados ao vórtice formado em 500 hPa. A partir

da metade do dia 22, a temperatura na região passa a aumentar, coincidindo com a perda de intensidade do vórtice e consequente redução de precipitação. Em relação ao campo de altura geopotencial, nota-se a propagação para leste entre os dias 21 e 22 de um centro de valores mais baixos associados ao vórtice ciclônico em níveis médios. Os valores mais baixos na região de 50° W acontecem entre os dias 21 e 22, mais uma vez coerentes com o instante de atividade máxima do sistema ciclônico.



Figura 5.6 – Campo referente ao fluxo de umidade verticalmente integrado na camada entre 1000 e 300 hPa para o dia 22 de novembro de 2008.



Figura 5.7 – Corte longitudinal ao longo da latitude de -27° S dos campos de altura geopotencial e temperatura no nível de 500 hPa.

Uma análise do campo horizontal de temperatura permite inferir importantes informações sobre a estrutura vertical do vórtice de níveis médios. O gradiente horizontal de temperatura pode ser relacionado ao perfil vertical de vento a partir da equação do vento térmico, que é definido por Holton (2004) como a diferença do vento geostrófico entre dois níveis na atmosfera. Esta relação pode ser obtida a partir de considerações físicas baseadas no equilíbrio hidrostático e na própria definição de vento geostrófico em coordenadas isobáricas, que é proporcional ao gradiente horizontal de geopotencial, ou seja, da espessura da camada. Segundo a análise de Holton (2004), adaptada para o Hemisfério Sul, pode-se demonstrar que o vento térmico é um vetor conceitual que flui paralelo as isotermas com as regiões mais quentes a sua esquerda e as regiões mais frias a sua direita. Aplicando esse conceito na análise da Figura 5.7, pode-se notar que o ciclone em 500 hPa possuía, no período de maior intensidade do sistema, entre 21 e 23 de novembro, um núcleo mais frio que sua periferia que, a partir da definição de vento térmico, implica em um vetor contornando no sentido horário o ciclone, mesmo sentido de sua circulação. Além disso, considerando que o vento térmico é uma diferença do vento geostrófico entre dois níveis, pode-se deduzir que o sistema possuía nesse período uma intensificação na vertical, em direção a níveis superiores, já que para que a diferença entre o vento geostrófico entre dois níveis aponte na sentido do vento de menor intensidade, obrigatoriamente o vento de maior intensidade (nível superior) deve possuir mesma direção e sentido do vetor de menor intensidade, com uma maior intensidade. Desta forma, a análise subjetiva da estrutura vertical do ciclone possibilita uma argumentação teórica sobre as condições favoráveis a ocorrência das chuvas observadas.

CAPÍTULO 6 SIMULAÇÃO

Neste capítulo serão analisados os resultados da simulação, construídos a partir da integração do modelo regional WRF para o evento meteorológico estudado no presente trabalho. O modelo foi integrado por 120 h a partir do dia 19 de novembro de 2008 com um total de 3 grades aninhadas, tendo espaçamento horizontal entre pontos de grade de 90 km, 30 km e 10 km para cada domínio de grade, respectivamente. A simulação realizada tem como principal objetivo detalhar a distribuição espacial da precipitação sobre a região, bem como avaliar fatores que possam elucidar diferenças na comparação com resultados de menor detalhamento espacial, como os apresentados no Capítulo 5 sobre os campos da reanálise ERA Interim.

A Figura 6.1 apresenta a sequência temporal dos campos da grade 2 (30 km de espaçamento entre pontos) da simulação para as variáveis vorticidade e linha de corrente em 500 hPa para o período de 9 Z do dia 22 a 0 Z do dia 23, em intervalos de 3 h. A partir da análise dos campos da reanálise apresentada na capítulo 5, nota-se que durante o período de maiores acumulados, o vórtice em níveis médios aparece é observado como um ciclone na costa leste do Rio Grande do Sul. Contudo, a baixa resolução $(1,5^{\circ})$ da reanálise mostra pouco detalhamento da estrutura do escoamento do vórtice e sua influência sobre a região de Santa Catarina. Analisando a Figura 6.1, referente aos campos simulados para a grade 2 do modelo, nota-se que além do vórtice na costa leste do Rio Grande do Sul um vórtice secundário pode ser observado entre 12 Z e 18 Z do dia 22 na região entre o norte do estado do Rio Grande do Sul e a região sul do estado de Santa Catarina. A presença de um segundo vórtice nas proximidades da região afetada pelas chuvas intensas apresenta-se como um fator dinâmico favorável ao desenvolvimento e manutenção do fenômeno responsável pelos altos índices de precipitação. A localização do vórtice possibilita identificar as regiões onde há convergência de massa que, associada à disponibilidade de umidade em baixos níveis, possibilita a formação de nuvens. Nota-se que a partir de 21 Z do dia 22, o vórtice secundário desaparece dos campos e somente o vórtice na costa leste do estado do Rio Grande do Sul pode ser observado. Com isso, pode-se dizer que a partir deste instante nota-se maior semelhança entre os campos simulados e da reanálise. Em relação aos valores de vorticidade para o período, os campos mostram-se semelhantes com os valores observados na reanálise. É importante ressaltar, a partir da análise dos campos da Figura 6.1, que os resultados da simulação apresentados para a grade 2 mostram-se coerentes com os resultados apresentados a partir dos dados da reanálise e, além disso, tem a capacidade de refinar a análise do escoamento da região.

A Figura 6.2 apresenta o corte longitudinal ao longo da latitude de 27º S dos campos de altura geopotencial e temperatura no nível de 500 hPa para a grade 2 da simulação (30 km) ao longo de todo o período da simulação. A análise do campo apresentado na Figura 6.2 apresenta algumas diferenças marcantes em relação a Figura 5.7 apresentada no capítulo anterior onde foi discutido o corte longitudinal para a mesma longitude e mesmos campos com base nos dados da reanálise. Em relação ao campo de altura geopotencial em 500 hPa, nota-se que a simulação indica que no dia 22 sobre a longitude de 50 W (aproximadamente a região leste de Santa Catarina, a região mais afetada pelo evento) existem isolinhas com valores maiores do que as apontadas pelos dados da reanálise indicando que a baixa em geopotencial associada ao vórtice nos campos da simulação apresenta-se menos intensa do que a observada nos dados da reanálise. Em relação ao campo de temperatura em 500 hPa, nota-se que a simulação indica que o núcleo frio associado ao vórtice é mais frio do que o definido nos campos da reanálise. A diferença de intensidade entre os campos da reanálise e os campos da simulação está provavelmente associada à diferença de resolução espacial dos dados. Com a utilização de maior resolução espacial na simulação, fenômenos de menor escala passam a ser incorporados na física do modelo permitindo um maior refinamento do fenômeno. Em resumo, embora os campos de reanálise possibilitem uma avaliação qualitativa das características e comportamento do vórtice, a simulação possui a capacidade de fornecer informações mais precisas acerca da intensidade dos fenômenos em estudo.



Figura 6.1 – Campos de vorticidade e linha de corrente em 500 hPa referentes a grade 2 (de 30 km de resolução), para simulação realizada com o modelo regional WRF. São apresentados campos para os horários (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z para do dia 22/11/08 e o horário (f) 00Z para o dia 23/11/08.



Figura 6.2 – Corte longitudinal ao longo da latitude de -27° S dos campos de altura geopotencial e temperatura no nível de 500 hPa para a grade 2 da simulação (30 km).

A Figura 6.3 apresenta a comparação entre os campos de precipitação acumulada em 3 h, gerados a partir da saída do modelo para a grade mais refinada (grade 3) da simulação, e as imagens CAPPI 5.500 m do radar situado no Morro da Igreja / SC. Para a análise apresentada, foi escolhido o período do dia 22 de 9 Z a 22 Z em intervalos de 3 h. A escolha desse período foi feita com base no gráfico (Figura 4.3) das séries de precipitações observadas de diversas regiões do estado de Santa Catarina afetadas pelo fenômeno meteorológico em estudo, que mostra que o dia 23 foi o dia em que foram observados os maiores acumulados em 24 h. Dessa forma, a precipitação que contribuiu para o acumulado do dia 23 ocorreu em grande parte no dia 22 associada ao vórtice em níveis médios discutido em detalhes no capítulo 5. A análise da Figura 6.3 evidencia que os resultados da simulação do modelo WRF para o período analisado se mostram muito semelhantes com os núcleos de precipitação observados nas imagens de radar para os horários correspondentes. Ao contrário dos campos de precipitação da reanálise (não apresentados) que reproduzem um grande núcleo de precipitação sobre a região leste de Santa Catarina, a simulação permite a identificação de núcleos bem definidos de precipitação em regiões específicas do litoral do estado, coerentes com os núcleos observados nas imagens de

radar. Como exemplo, da imagem de radar do horário 12 Z para a imagem do horário 15 Z, notase um aumento de núcleos de precipitação no centro norte do litoral do estado, enquanto que no campo de simulação nota-se também um aumento da intensidade da precipitação acumulada na mesma região. A sequência dos campos mostra que esta semelhança da distribuição espacial da precipitação pode ser observada em todos os instantes analisados, fator este que mostra o quão importante a simulação demonstra-se ser para fornecer um refinamento da análise dos impactos do fenômeno na região de estudo. Ressalta-se, porém, que a simulação embora capaz de reproduzir a distribuição espacial da precipitação no dia dos acumulados máximos, ela apresenta resultados subestimados para a sua intensidade.

A Figura 6.4 apresenta a comparação entre o campo de precipitação acumulada em 24 h, gerados a partir da saída do modelo para a grade mais refinada (grade 3) da simulação, e o campo de precipitação observada - gerado a partir dos dados do INMET, CIRAM e INPE; ambos os campos são referentes ao período entre às 12Z do dia 22 às 12Z do dia 23 de novembro de 2008: período no qual as precipitações foram mais intensas na região. Primeiramente, ao analisar a distribuição espacial da precipitação, nota-se boa semelhança entre os campos: máximos de precipitação localizados na região litorânea do estado de Santa Catarina, principalmente na porção nordeste do estado. Ao analisar-se a intensidade da precipitação, passamos encontrar uma tendência de subestimação dos campos simulados, em relação aos campos observados; em geral, os campos simulados tendem a reproduzir cerca de 50% da simulação observada na região. Ressalta-se, porém, que os campos observados são gerados a partir de interpolações, onde dados de estações pontuais são inseridos para serem gerados campos horizontais, que muitas vezes levam a valores de precipitação, significativamente superiores aos valores reais da região como um todo.



Figura 6.3 – Comparação das imagens de radar de Morro da Igreja/SC CAPPI 5.500 m e o campo de precipitação acumulada de 3h da simulação do WRF com resolução horizontal de 10 km para os horários 09Z, 12Z, 15Z, 18Z e 21Z para do dia 22/11/08.



Figura 6.3 – Conclusão.



Figura 6.4 – Comparação de (a) precipitação observada (mm) na região de Santa Catarina – campo gerado a partir dos dados do INMET, CIRAM e INPE - e (b) campo de precipitação referente a grade 3 da simulação (10 km). O acumulado apresentado é referente ao período entre às 12Z de 22 a 12Z de 23 de novembro de 2008.

CAPÍTULO 7 REPREVISÃO

Neste capítulo serão analisados os resultados da reprevisão, construída a partir da integração do modelo regional WRF para o evento meteorológico estudado no presente trabalho. O modelo foi integrado por 120 h a partir do dia 19 de novembro de 2008 com um total de 3 grades aninhadas com 90, 30 e 10 km, respectivamente. A reprevisão realizada tem como objetivo analisar a capacidade do modelo WRF – versão 3.4 lançada em 6 de abril de 2013 -, utilizado operacionalmente no Instituto Estadual do Ambiente (INEA) do Rio de Janeiro, em reproduzir o evento das chuvas intensas de novembro de 2008 que afetaram a região leste do estado de Santa Catarina.

A Figura 7.1 apresenta a comparação dos campos de linha de corrente e vorticidade no nível de 500 hPa entre simulação e reprevisão realizadas pelo modelo WRF para a grade com resolução horizontal de 10 km nos horários 09Z, 12Z, 15Z e 18Z do dia 22/11/08. A análise desta Figura tem como objetivo confrontar os resultados da simulação e reprevisão acerca da representação do surgimento (formação) e manutenção do vórtice ciclônico em 500 hPa sobre o estado de Santa Catarina, responsável pelas chuvas intensas observadas ao longo do dia 22. Na primeira coluna da Figura 7.1 faz-se um resumo da análise dos campos de simulação, onde notase, nas linhas de corrente em 500 hPa, a formação de um vórtice no dia 22 às 12 Z no nordeste de Santa Catarina; no instante seguinte apresentado, a partir de 15 Z do mesmo dia, nota-se a formação de um outro vórtice, de maior intensidade, no litoral do estado do Rio Grande do Sul e o deslocamento do vórtice que estava situado no nordeste do estado de Santa Catarina para o norte do Rio Grande do Sul; no final do período apresentado, a partir de 18 Z do mesmo dia, o vórtice mais ao norte perde intensidade e o vórtice no litoral do Rio Grande do Sul permanece aproximadamente na mesma posição do instante anterior. Comparativamente, a segunda coluna da Figura 7.1, apresenta os mesmos campos, nos mesmos horários da primeira coluna, porém para as variáveis previstas a partir da integração de reprevisão; nota-se, em todos instantes analisados, a permanência de um padrão de difluência no campo de linha de corrente em 500 hPa, na região centro-norte do estado de Santa Catarina, com valores de vorticidade negativa (ciclônica) semelhantes aos valores apresentados pelos campos simulados. Em relação a formação do vórtice, percebe-se que a reprevisão subestimou a intensidade do fenômeno, sendo incapaz de caracterizar adequadamente a circulação fechada sobre a região, como observado nos campos de simulação. Este padrão de escoamento, subestimando a intensidade do vórtice, mesmo sem a análise detalhada das demais variáveis meteorológicas, permite inferir que o prognóstico dos acumulados de precipitação, provavelmente apresentar-se-á subestimado: devido a existência de um menor suporte dinâmico na região, importante na formação e manutenção do fenômeno. Ressalta-se porém, que os acumulados de precipitação previstos serão analisados na Figura 7.2 em comparação aos dados de acumulados de precipitação obtidos pela simulação.

A Figura 7.2 apresenta a comparação dos campos de precipitação acumulada de 3h entre simulação e reprevisão realizadas com o modelo WRF para a grade com resolução horizontal de 10 km nos horários 09Z, 12Z, 15Z e 18Z do dia 22/11/08. A análise da Figura 7.2, permite inferir que a reprevisão (coluna direita) não se mostrou eficiente na previsão dos acumulados de precipitação ao longo do litoral do estado de Santa Catarina durante o período analisado. Embora a reprevisão seja capaz de reproduzir os acumulados máximos de precipitação no nordeste do estado, apresenta grande dificuldade para reprodução da distribuição espacial da mesma. Ao longo do litoral, os campos da reprevisão mostram acumulados de baixa intensidade (1 a 3 mm em 3 h) enquanto os campos da simulação (coluna esquerda) apresentam valores superiores a 13 mm no mesmo período de 3 h. Ressalta-se neste ponto que, como discutido no capítulo anterior, os quantitativos simulados já mostram-se bem inferiores aos acumulados máximos apresentados no capítulo 4 - valores observados nas estações pluviométricas em toda a região afetada pelo fenômeno -, o que evidencia, ainda mais, a deficiência dos campos da reprevisão. A baixa qualidade das previsões de acumulados de precipitação, classicamente uma das variáveis que possui o menor grau de previsibilidade, pode estar associada a alguns fatores: deficiências das condições iniciais e de contorno disponíveis na época, do modelo Global GFS; escolha das parametrizações de microfísica de nuvens adequadas para a região de estudo e outras parametrizações físicas envolvidas.



Figura 7.1 – Comparação dos campos de linha de corrente e vorticidade no nível de 500 hPa da simulação (coluna esquerda) e reprevisão (coluna direita) do WRF com resolução horizontal de 10 km nos horários 09Z, 12Z, 15Z e 18Z para do dia 22/11/08.



Figura 7.1 – Conclusão.

Estes resultados destacam o grande potencial de influência que as condições iniciais e de contorno, disponíveis para as integrações do modelo, podem exercer sobre os resultados, independentemente de integrações de simulação ou reprevisão. Analisando-se as condições iniciais e de contorno fornecidas pelo GFS, dois cenários são importantes para a interpretação dos resultados da comparação entre simulação e previsão: a simulação, realizada sempre após a ocorrência do fenômeno em estudo, possui a disposição de dados do FNL – análise final do GFS -, que embora utilize o mesmo modelo rodado operacionalmente pelo GFS, assimila uma quantidade maior de dados observados, porquanto sua integração ocorre diariamente 1h após a integração operacional do modelo GFS; a reprevisão, ou previsão operacional, realizada sempre com as condições anteriores a ocorrência do fenômeno, possui a disposição de dados das rodadas operacionais do GFS, que possuem uma quantidade menor de observações. Esta discussão tem como objetivo destacar que, a existência de condições iniciais e de contorno mais adequadas – assimilando uma maior quantidade de dados observados, por vezes com melhor qualidade -, o resultado final das rodadas, tanto de simulações como previsões, poderá ser significativamente melhorado.


Figura 7.2 – Comparação dos campos de precipitação acumulada de 3h da simulação (coluna esquerda) e reprevisão (coluna direita) do WRF com resolução horizontal de 10 km nos horários 09Z, 12Z, 15Z e 18Z para do dia 22/11/08.



Figura 7.2 – Conclusão.

Nas discussões anteriores desse capítulo, buscou-se caracterizar de forma objetiva o grau de previsibilidade do fenômeno associado às chuvas intensas em novembro de 2008 na região do estado de Santa Catarina. De forma geral, percebe-se uma dificuldade na representação dos campos meteorológicos, evidenciado tanto na deficiência da reprodução das condições dinâmicas associadas à formação do vórtice em níveis médios quanto na distribuição espacial e de intensidade do campo de acumulados de precipitação.

CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES

Neste capítulo, serão apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados apresentados ao longo dos capítulos 5, 6 e 7. Em linhas gerais, o capítulo abordará de forma resumida as características do fenômeno que deflagrou as chuvas intensas na faixa leste do estado de Santa Catarina em novembro de 2008, de acordo com as seguintes abordagens: campos da reanálise Era Interim do ECMWF, resultados da simulação realizada com o modelo regional WRF e, por último, uma análise da previsibilidade do evento a partir dos resultados da reprevisão discutida em detalhes no capítulo 7.

O estudo apresentado tem como objetivo discutir alguns aspectos da dinâmica atmosférica associados ao evento de precipitação intensa que atingiu o estado de Santa Catarina no mês de novembro de 2008, principalmente no período entre os dias 22 e 24 de novembro de 2008. A chuva intensa no estado foi provocada pelo estabelecimento de um bloqueio atmosférico no oceano Atlântico – costa da região sul do Brasil, que atuou durante grande parte do mês de novembro; este bloqueio atmosférico ficou configurado por uma circulação anticiclônica na coluna atmosférica e esteve acompanhada logo ao norte por um vórtice ciclônico de ar superior no período de precipitação mais intensa.

Os resultados da análise sinótica – com base nos dados da reanálise Era Interim - indicam que o fenômeno de chuvas intensas em estudo esteve associado a padrões sinóticos bem definidos entre a superfície e os altos níveis, sendo a existência de um padrão ciclônico em níveis médios considerado o principal responsável pelas chuvas intensas. Em superfície, a formação do anticiclone ocorre no dia 17 sobre a Argentina, a partir da incursão de uma crista oriunda do Oceano Atlântico; entre os dias 19 e 24, houve o período de maior desenvolvimento do anticiclone de bloqueio, caracterizado por seu deslocamento para leste, seu aumento de amplitude e sua intensificação; o dia de maior intensidade do anticiclone foi o dia 22, onde foram observados aos maiores acumulados de precipitação sobre a região em estudo. Em níveis médios, nota-se o deslocamento para leste, desde o dia 19, de um núcleo de vorticidade ciclônica; esta região atinge o estado de Santa Catarina no dia 21, associando-se a um centro de circulação horária no campo de linha de corrente no dia 22 de novembro; destaca-se ainda, entre os dias 22 e

24, a configuração de um padrão de dipolo entre o vórtice na região sul do Brasil e o anticiclone de bloqueio, originado em 22, fornecendo o suporte dinâmico que contribuíram aos maiores acumulados de precipitação no período. No contexto da escala de tempo intrasazonal, esse anticiclone de bloqueio está inserido em um trem de ondas de Rossby, via padrão de teleconexão, conectando o Pacífico tropical com o Atlântico sudoeste (Souza, 2013).

Com objetivo de analisar em mais detalhes a estrutura do vórtice ciclônico formado em níveis médios, fez-se uma análise do fluxo de umidade e o corte longitudinal dos campos de geopotencial e temperatura. Em relação à umidade disponível, nota-se, em 22 de novembro, a existência de forte fluxo de umidade na costa leste do estado de Santa Catarina, escoamento associado à circulação do anticiclone, levando umidade do oceano para o continente. O corte longitudinal permite inferir que no período de maior intensidade do fenômeno existia um núcleo de temperaturas mais frias, com valores mais baixos de geopotencial sobre a região de estudo. Aplicando-se o conceito de vento térmico, tal situação atmosférica retrata a intensificação do sistema (vórtice ciclônico) com a altura. Com efeito, os maiores acumulados de precipitação ocorrem no período em que o centro do ciclone em níveis médios apresentava as menores temperaturas.

A partir da análise dos resultados da simulação, pode-se detalhar o fenômeno em estudo, principalmente no período de maior desenvolvimento do vórtice em níveis médios, no dia 22. Nota-se, nesse dia, a existência de dois vórtices em 500 hPa no período dos maiores acumulados de precipitação; ao contrário dos campos da reanálise, que descreviam apenas um vórtice com núcleo mais intenso no litoral do Rio Grande do Sul, os campos simulados mostram a existência de um núcleo centrado no estado de Santa Catarina; além disso, a região dos maiores acumulados de precipitação – região litorânea do estado – encontra-se a leste do vórtice que, segundo Severo *et al.* (2010), é uma região favorável a ocorrência de precipitação na existência de vórtices ciclônicos em altos níveis (VCAN). Através dos resultados da simulação, principalmente os resultados obtidos para a grade mais fina da integração com resolução espacial de 10 km, pode-se analisar os resultados da análise dos campos de precipitação do modelo; fez-se esta análise comparando os campos simulados com as imagens de radar CAPPI 5.500 m do Morro da Igreja/SC. Foi possível observar que a simulação permite a identificação de núcleos bem definidos de precipitação em regiões específicas do litoral do estado, coerentes com os núcleos

nas imagens de radar e mais detalhados em comparação com a reanálise. Contudo, os resultados simulados apresentam-se subestimados em relação aos dados observados, como analisados na comparação do campo acumulado de precipitação em 24h do dia 23 (Figura 6.4), apresentado no capítulo 6. Em geral, a simulação apresentou-se como uma grande contribuição para a análise do evento, sendo um importante ferramental para detalhar melhor as condições dinâmicas e termodinâmicas que contribuíram para a intensidade do fenômeno. Acrescenta-se a esta contribuição o detalhamento dos núcleos de precipitação sobre o litoral de Santa Catarina, principalmente na porção nordeste, evidenciando a capacidade do modelo em representar a distribuição espacial da precipitação, mesmo que a intensidade apresente-se subestimada. Ressalta-se, neste ponto, que os campos observados geralmente são construídos a partir da interpolação dos dados – por processos puramente matemáticos - disponíveis das estações meteorológicas, o que implica que por vezes os resultados da distribuição da precipitação pelos campos da simulação podem ser mais coerentes, visto que levam em conta a física da atmosfera.

A análise dos resultados da reprevisão, por sua vez, permite inferir parcialmente o grau de previsibilidade do evento em estudo utilizando-se a mesma versão do modelo e com as mesmas configurações utilizadas na integração de simulação, porém com as condições iniciais e de contorno disponíveis no dia 19 de novembro do ano de 2008. Além disso, ao se comparar os resultados da simulação com os dados da reprevisão, é possível definir os efeitos das condições iniciais no desempenho do modelo, visto que a simulação foi realizada com as condições iniciais e de contorno da análise final do modelo global (FNL) em todos os instantes e a integração de reprevisão utilizou-se de dados de análise inicial do modelo global para a condição inicial e dados de previsão do mesmo modelo para os horários seguintes na condição de contorno. Em relação às condições dinâmicas, nota-se que a reprevisão caracterizou, em lugar do vórtice sobre o estado de Santa Catarina observado nos campos de simulação, apenas uma difluência em níveis médios. Desta forma, a ausência de uma correta caracterização dinâmica do vórtice já permitiria inferir uma maior subestimação das demais variáveis prognósticas no decorrer das previsões. Com efeito, ao se analisar os campos de precipitação, nota-se que, embora seja possível caracterizar os sinais dos acumulados máximos de precipitação na porção nordeste do estado, não é possível reproduzir a distribuição espacial ao longo de toda a costa. Estes resultados destacam o grande potencial de influência que as condições iniciais e de contorno, disponíveis para as integrações do modelo,

podem exercer sobre os resultados, independentemente de integrações de simulação ou reprevisão. Nota-se que a simulação, realizada sempre após a ocorrência do fenômeno em estudo, possui a disposição de dados do FNL – análise final do GFS - que, embora utilize o mesmo modelo rodado operacionalmente pelo GFS, assimila uma quantidade maior de dados observados, porquanto sua integração ocorre diariamente 1h após a integração operacional do modelo GFS. A reprevisão, ou previsão operacional, realizada sempre com as condições anteriores a ocorrência do fenômeno, tem a disposição os dados das rodadas operacionais do GFS, que possuem uma quantidade menor de observações. Esta discussão tem como objetivo destacar que a existência de condições iniciais e de contorno mais adequadas – assimilando uma maior quantidade de dados observados, por vezes com melhor qualidade - permite melhora significativa nos resultados, tanto de simulações como de previsões.

Em última análise, destaca-se mais uma vez a importância do evento estudado, que a Defesa Civil do estado de Santa Catarina descreveu como o pior desastre da história do estado, onde, até 2/4/2009 estavam confirmados 135 óbitos, 2 desaparecidos, cerca de 99 munícipios em estado de emergência e cerca 14 decretaram estado de calamidade pública. Em relação à previsibilidade do evento, segundo a nota técnica do INPE/INMET/EPAGRI, os modelos de previsão numérica capturaram com relativa precisão os principais sistemas atmosféricos envolvidos. Contudo, os modelos apresentaram previsões de acumulados de precipitação subestimada em relação aos dados observados nas estações da região e esse fato está de acordo com os resultados da reprevisão com o modelo WRF, apresentados no presente trabalho. Concluise, portanto, que as condições iniciais e de contorno, diferentes em relação a simulações e reprevisões, apresentam-se como importante fator para a defasagem dos resultados apresentados. Dessa forma, a melhoria dos resultados do modelo para a prevenção dos impactos de fenômenos como este, passa também por uma melhoria nas condições iniciais e de contorno fornecidas pelos modelos globais aos modelos de área limitada ou regionais.

Como propostas de trabalhos futuros, podem-se citar:

 análise de outras variáveis diagnósticas e prognósticas dos resultados da simulação para maior detalhamento do evento a partir do modelo WRF, com as conFigurações de integração utilizadas;

- modificação das configurações de integração de simulação utilizadas modificandose algumas parametrizações utilizadas, buscando uma melhor caracterização da intensidade da precipitação;
- utilização da reanálise do Era Interim como condição inicial e de contorno para as simulações, de forma a entender o impacto desses dados nos resultados em comparação com as condições do FNL;
- análise de outras variáveis diagnósticas e prognósticas dos resultados da reprevisão para identificação das tendências, de forma que possam auxiliar aos previsores operacionais;
- iniciar as reprevisões nos dias subsequentes a 19 de novembro de 2008;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica. Boletim internacional de Março de 2009. Disponível em: <http://www.emtermos.com.br/abms/site/issmge/boletimmar%C3%A7o2009-3.1-ISSMGE_BULLETIN_VOLUME3_ISSUE_1.pdf.pdf>. Acesso em 31 de dez. de 2013.

BAINES, P. G. A survey of blocking mechanisms with application to the Australian region. Aust. Meteor. Mag., 31, 27-36, 1983.

BELL, G. D.; BOSART, L.F. A case study diagnosis of the formation of na upper-level cut off cyclonic circulation over the eastern United States. Monthly Veather Review, v.121, n.6, p.1635-1655, 1993.

BERBERY, E. H.; NÚNEZ, M. N. An Observational and Numerical Study of Blocking Episodes near South America. J. Climate, 2, 1352–1361, 1989.

BURTON, I.; KATES, R. W.; WHITE, G. F. The environment as hazard. New York: Oxford Univ. Press, 1978. 240 p.

CASARIN, D. P. Um estudo observacional sobre os sistemas de bloqueios no Hemisfério Sul. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, INPE-2638-TDL/114, 1982.

CASTRO, A. L. C. Glossário de defesa civil: estudo de riscos e medicina de desastres. Brasília: MPO/ Departamento de Defesa Civil, 1998. 283 p.

CAVALCANTI, I. et al. Tempo e Clima no Brasil. Ed. Oficina de Texto, 2009.

CAVALCANTI, I. Casos de intensa precipitação nas regiões sul e sudeste do Brasil no período de inverno de 1979 a 1983. São José dos Campos, INPE, 1985. (INPE-3743-RPE/498).

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES – CEPED.

Resposta ao desastre em Santa Catarina no ano de 2008: avaliação das áreas atingidas por movimentos de massa e dos danos em edificações durante o desastre. Florianópolis: CEPED, 2009.

CLIMANÁLISE. Boletim de Monitoramento e Análise Climática. Vol. 23 – N°11 –Novembro/2008.Disponívelem<</td>http://www6.cptec.inpe.br/revclima/boletim/index_1108.shtml>. Acesso em 7 de nov. 2013.

DEE, D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: conFiguration and performance of the data assimilation system. Quart. J. R. Meteorol. Soc., 137, 553-597, 2011.

DOLE, R. M.; GORDON, N. M. Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation: Geographical distribution and regional persistence characteristics. Mon. Wea. Rev., 111, 1567-1587, 1983.

DOLE, R. M. The life cycles of persistent anomalies and blocking over the North Pacific. In Anomalous Atmmospheric Flows and Blocking. Adv. Geophys., 29, 31-69, 1986.

FIGUEROA, S. N.; DAMIÃO, M. C. M.; SANTOS, R. P. Análise da variabilidade dos bloqueios atmosfericos simulados pelo MCGA do CPTEC/INPE experimental. 2010.

FRANK, N. L. On the energetics of cold lows. Proceedings of the Symposium on Tropical Meteorology, American Meteorological Society, EIV I-EIV 6, jun. 1970.

FRANK, N. L. The weather distribution with upper tropospheric cold lows the tropics. U.S. Weather Bureau, Southern Region, oct. 1966.

GAN, M. A. Um estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera, nas latitudes subtropicais do Atlântico Sul e leste do Brasil. Dissertação de Mestrado – INPE, 1982. 65 p.

GRANDOSO, H.; NÚÑEZ, J. E. Análisis de una situación de bloqueo en la parte austral de América del Sur. Meteoros, 5, 35-54,1955.

HACKEROTT, J. A. Simulação numérica a partir do modelo WRF e análise de ventos em superfície na região da Baía de Guanabara (RJ). Dissertação de Mestrado. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2013.

HAMILL, T. M.; WHITAKER, J. S. Ensemble Calibration of 500-hPa Geopotential Height and 850-hPa 2-m Temperatures Using Reforecasts. Mon. Wea. Rev, 2007.

HAMILL, T. M.; WHITAKER, J. S.; WEI, X. Ensemble Reforecasting: Improving Medium-Range Forecast Skill Using Retrospective Forecasts. Mon. Wea. Rev., 2004.

HAMILL, T. M.; WHITAKER J. S.; MULLEN S. L. Reforecasts: An Important Dataset for Improving Weather Predictions. Bull. Amer. Meteor. Soc., 87, 33–46, 2006.

HEWITT, K. The idea of calamity in a technocratic age. In: HEWITT, K. (Ed.) Interpretations of calamity: from the view point of ecology. London: Allen and Unwin, p.3-32, 1983.

HOLTON, J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Academic Press, 2004. 535 p.

KOBIYAMA, M. et al. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109 p.

KOUSKY, V. E.; GAN, M.A; Upper Tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. Tellus, 36(6):538-551, 1981.

LEJENAS, H. Characteristics of southern hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data. Quart. J. R. Met. Soc., 110, 967-979, 1984.

LEJENAS, H.; OAKLAND, H. Characteristics of northern hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data. Tellus, 35, 350-362, 1983.

LOURENÇO, M. C. Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis que atuam no sul da América do Sul. Dissertação de mestrado. São José dos Campos, INPE, 1996.

MACEDO, L. R.; HENKES, A. F.; YAMAZAKI, Y. Modelo WRF na previsão de um evento severo no Rio Grande do Sul. IV Encontro Sul-Brasileiro de Meteorologia, 2011.

MALAKA, I.; NÚNEZ, S. Aspectos sinópticos de la sequina que afectó a la República Argentina en el año 1962. Geoacta, 10, 1-21, 1980.

MARQUES, R. F. C. Bloqueio Atmosférico no Hemisfério Sul. São José dos Campos. Tese de Doutorado. São José dos Campos, INPE-6742-TDI/632. 1996.

MINUZZI, R.; RODRIGUES, L. Novembro com recordes de chuva em SC: 1000 mm em Blumenau. Setor de Previsão de Tempo e Clima - Epagri/Ciram. Disponível em: http://www.sbmet.org.br/userfiles/recordes_chuva.pdf>. Acesso em 7 de nov. 2013.

MO, K. C.; PFAENDTNER J.; KALNAY E. A GCM study on the maintenance of the June **1982 blocking in the Southern Hemisphere**. J. Atmos. Sci., 44, 1123-1142, 1987.

NECCO, G. **Extratropical Wheather System in South-America**. Fourth International Conference on Southern Hemispheres Meteorology and Oceanography, Buenos Aires, 1989.

OLIVEIRA, F. N. M. Climatologia de Bloqueios Atmosféricos no Hemisferio Sul: observações, simulações do Clima do Século XX e cenários futuros de mudanças climáticas. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, 2011. 141 p.

PADILHA, S. F. Simulações de Eventos de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro usando o Modelo WRF. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

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

PALMÉN, E.; NEWTON, C. W. Three dimensional flow patterns in extratropical disturbances. In: _____ Atmospheric circulations systems. New York, Academic Press, cap. 10, p. 274-278, 1969.

PALMER, C. E. On high-level cyclones originating in the tropics. Transactions of American Geophysics Union, 32(5):683-695, oct. 1951.

RAMÍREZ VALVERDE, M. C.; FERREIRA, N. J.; GAN, M. A. Vórtices Ciclônicos Desprendidos em Altos Níveis que originam-se no leste do Pacífico Tropical Sul – Parte I: Aspectos sinóticos relacionados a sua formação. CBMET RJ, 2000.

RAMÍREZ VALVERDE, M. C.; KAYANO, M.; FERREIRA, N. J. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the viciviyt of northest Brazil during the 1980-1989 period. Atmósfera, 12: 75-88, 1999.

ROSA, E.; BACK, N.; BARCELLOS, C. S. . **Trajetórias Genéricas para Manipuladores através de Polinômios Cúbicos de Hermite**. In: XI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1991. Anais do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1991. SATYAMURTY, P.; L. F. MATTOS. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. Mon. Wea. Rev., 117 (6), 1355-1364, 1989.

SECRETARIA DE ESTADO DA DEFESA CIVIL. Últimas notícias: Criação da Secretaria marca os 38 anos da Defesa Civil em Santa Catarina. Publicado em 17 mai. 2011. Disponível em: http://www.sdc.sc.gov.br/index.php/ultimas-noticias/1180-criacao-da-secretaria-marca-os-38-anos-da-defesa-civil-em-santa-catarina.html>. Acesso em 7 de nov. 2013.

SEVERO, D. L.; CAMPIGOTTO, A. P.; REFOSCO, J. C. Climatologia dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis que afetam o Sul do Brasil. CBMET, 2010.

SHUKLA, J.; MO, K. C. Seasonal and geographic variations of blocking. Mon. Wea. Rev., 111, 388-402, 1983.

SIDLE, R. C.; TAYLOR, D.; LU, X. X.; ADGER, W. N.; LOWE, D. J.; LANGE, W. P.; NEWNHAM, R. M.; DODSON, J. R. Interactions of natural hazards and society in Austral-Asia: evidence in past and recent records. Quaternary International, n.118-119, p.181-203, 2004.

SILVA DIAS, M.A; GRAMMELSBACHER, E.A. A possível ocorrência de tornado em São Paulo no dia 26 de Abril de 1991; um estudo de caso. Revista Brasileira de Meteorologia, 6 (1-2), 1991.

SILVA, A. M. As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos. Nota técnica. São José dos Campos, INPE, 2009. 67 p.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas. São Carlos: RiMa, 2003. 140 p.

SIMPSON, R. H. Evolution of the Kona Storm, a subtropical cyclone. Journal of Meteorology, 9(sf):24-35, 1952.

SINCLAIR, M. R. A. Climatology of anticyclones and blocking for the Southern Hemisphere. Mon. Wea. Rev., 24, 245-263, 1996.

SKAMAROCK, W. C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note, 2008.

SOUSA, T. C. Análise do Padrão de Onda de Rossby associado a um evento de precipitação intensa ocorrido no Estado de Santa Catarina em novembro de 2008. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Rio de Janeiro, 2010.□69p.

SOUSA, T. C. Análise intrassazonal de influências atmosféricas remotas associada ao evento de precipitação intensa no Estado de Santa Catarina em novembro de 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Rio de Janeiro, 2013. 164 p.

TALJAARD, J. J. Synoptic meteorology of the Southern Hemisphere, Meteorology of the Southern Hemisphere. Meteor. Monogr. No. 35, Amer. Meteor. Soc., 139-211, 1972.

TIBALDI, S.; TOSI E.; NAVARRA A.; PEDULLI L. Northern and Southern Hemisphere seasonal variability of blocking frequency and predictability. Mon. Wea. Rev., 122, 1971-2003, 1994.

TREMBERTH, K. E.; MO K. C. Blocking action in the Southern Hemisphere. Mon. Wea. Rev., 113, 3-21, 1985.

TRENBERTH, K. E. An assessment of the impact of transient eddies on the zonal flow diagnostics. J. Atmos. Sci., 43, 2070-2087, 1986.

USGS. Controlled Flooding of the Colorado River in Grand Canyon: the Rationale and Data-Collection Planned. Disponível em: http://water.usgs.gov/wid/FS_089-96/FS_089-96.html> Acesso em: 15 de dezembro de 2003.

VAN LOON, H. Blocking action in the Southern Hemisphere. Part 1. Notos, 5, 171-178, 1956.

WELDON, R.; HELMES, S. Water Vapor Imagery. Interpretation and Aplications to weather Analysis and Forecasting. NOAA Technical Report Nesdis 57. Washington, April, 1991.

WHITAKER, J. S.; WEI, X. Improving Week-2 Forecasts with Multimodel Reforecast Ensembles. Mon. Wea. Rev, 2006.

WHITE, G. F. Natural hazards research: concepts, methods and policy implications. In: WHITE, G. F. Natural hazards: local, national, global. New York: Oxford Univ. Press, p.3-16, 1974.