

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

Vanessa Gehm Rodrigues

**ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DO GRANIZO ATRAVÉS DAS  
SIMULAÇÕES NO MODELO WRF SOBRE O RIO GRANDE DO SUL**

Santa Maria, RS  
2019



**Vanessa Gehm Rodrigues**

**ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DO GRANIZO ATRAVÉS DAS SIMULAÇÕES NO  
MODELO WRF SOBRE O RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Meteorologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Meteorologia**.

ORIENTADOR: Prof. Everson Dal Piva

Santa Maria, RS  
2019

Rodrigues, Vanessa Gehm  
Análise da ocorrência do granizo através das  
simulações no modelo WRF sobre o Rio Grande do Sul /  
Vanessa Gehm Rodrigues.- 2019.  
108 p.; 30 cm

Orientador: Everson Dal Piva  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de  
Pós-Graduação em Meteorologia, RS, 2019

1. Granizo 2. Simulação numérica no Rio Grande do Sul  
I. Dal Piva, Everson II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

---

©2019

Todos os direitos autorais reservados a Vanessa Gehm Rodrigues. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletr.: [vanessagehm@hotmail.com](mailto:vanessagehm@hotmail.com)

Vanessa Gehm Rodrigues

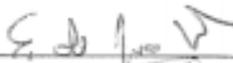
**ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DO GRANIZO ATRAVÉS DAS SIMULAÇÕES NO  
MODELO WRF SOBRE O RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Meteorologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Meteorologia**.

Aprovado em 30 de setembro de 2019:



**Everson Dal Piva, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)



**Ernani de Lima Nascimento, Dr. (UFSM)**



**Mateus da Silva Teixeira, Dr. (UFPEL) (videoconferência)**

Santa Maria, RS  
2019



## AGRADECIMENTOS

*Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Everson Dal Piva, pelo apoio e incentivo neste trabalho. Onde aprendemos juntos sobre o comportamento do granizo na modelagem.*

*Agradeço à minha família, especialmente minha mãe Lauri por sempre me incentivar a estudar e dar forças para não desistir. Agradeço à minha irmã Andressa pelo seu companheirismo e ao meu padrasto pelos churrascos de domingo que aliviaram a pressão da semana. Amo vocês!*

*Agradeço ao meu companheiro e amigo Gustavo, por aguentar todos meus dramas e estresses. Por debater comigo sobre a escrita e principalmente auxiliar na estatística do trabalho. Não poderia deixar de lembrar dos meus sogros, que na reta final me deram base para que pudesse focar nos estudos. Amo vocês família.*

*As “Bentonetes”, Cris e Pri, amigas que a meteorologia me deu. Obrigada pelos puxões de orelha e principalmente pelos conselhos nas horas difíceis. Agradeço também, a todos os colegas do GruMA pela ajuda, pelas risadas e pelas rodas de chimarrão, fizeram do laboratório minha segunda casa nesses quatro anos de “Lab.”.*

*Ao meu colega de turma de mestrado e amigo, Lucas, obrigada pela companhia de passar pelos sofrimentos e alegrias desses dois anos. Também gostaria de agradecer aos meus amigos Murilo e Eliseu que com conversas descontraídas e conselhos ajudaram a passar por todos esses momentos.*

*Agradeço à Secretaria Nacional de Defesa Civil (SEDEC, 2009) por disponibilizarem os registros dos eventos de granizo que foram importantes para este trabalho.*

*Agradeço aos professores da banca pela participação. Assim como aos professores e colegas de curso que de uma forma ou outra contribuíram para realização deste trabalho.*

*Também agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante estes dois anos de mestrado. Incentivos assim, auxiliam em pesquisas avançadas e de qualidade.*

*E por fim, por mais que não tenham sido citados individualmente, saibam que estou grata pela amizade e companheirismo de todos. Muito obrigada!*



## RESUMO

# ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DO GRANIZO ATRAVÉS DAS SIMULAÇÕES NO MODELO WRF SOBRE O RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: Vanessa Gehm Rodrigues

ORIENTADOR: Everson Dal Piva

O granizo é uma forma de precipitação que ocorre a partir da queda de pedaços irregulares de gelo. Ele é um fenômeno meteorológico de curto prazo que pode ocorrer em uma área pequena em acontecimentos isolados. Assim, por ser um evento que varia localmente e espacialmente, buscou-se através do modelo WRF averiguar se é capaz de indicar corretamente o granizo em superfície. Foram utilizados oito experimentos com quatro PMN e duas PCC em três casos selecionados a partir dos relatórios de eventos de granizo disponibilizados pela SEDEC, reportagens de sites de revistas e jornais entre os anos de 2009 a 2016. Para a realização do trabalho foram utilizados dados disponibilizados pelo NCEP e conhecidos como *Final Analysis*. Esses dados servem para serem executados no WRF na simulação que contém 40 níveis  $\eta$ , sendo o nível mais alto  $50 hPa$ . Os dados de condição inicial e de contorno são do NCEP com resolução espacial de 1 grau por 1 grau de latitude por longitude. Foram empregados três domínios no modelo com escalas de grade de 27, 9 e 3  $km$ , com o centro no terceiro domínio (menor) localizado em Santa Maria – RS. As simulações foram inicializadas aproximadamente 12 horas antes dos eventos e as saídas utilizadas na análise dos resultados foram de 10 em 10 minutos para o domínio menor 3  $km$ . Ainda foi utilizada a tabela de contingência 2 x 2 para analisar os pontos de grade do GAS no fim da simulação com os pontos de grade da observação definida como a área das cidades afetadas e com isso os índices estatísticos são utilizados para verificar qual produz melhor o granizo. Analisando o granizo na atmosfera e acumulado na superfície, os resultados indicaram entre todos os experimentos que os Exp1 e Exp2 foram melhores na produção do granizo para os três casos. E individualmente o Caso 3 foi o que produziu melhor o GAS no tempo e no espaço. Pelos índices estatísticos, observou-se um resultado pouco satisfatório ao analisar os experimentos com as PMN com PCC, principalmente aplicando a modelagem em alta resolução. Os índices estatísticos não foram satisfatórios para estudar o evento de granizo principalmente pelo uso da modelagem numérica de alta resolução. Portanto, conclui-se que estudar um evento local como o granizo é de extrema dificuldade, pois ele varia muito no tempo e espaço, principalmente na compreensão dos processos de microfísica de nuvens do modelo para que produza exatamente onde o fenômeno ocorreu em superfície.

**Palavras-chave:** Granizo. Simulação Numérica. Tempo Severo.



## ABSTRACT

### ANALYSIS OF THE OCCURRENCE OF HAIL THROUGH THE SIMULATIONS IN THE WRF MODEL OVER RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: Vanessa Gehm Rodrigues

ADVISOR: Everson Dal Piva

Hail is a form of precipitation that occurs from falling irregular pieces of ice. It is a short-term weather phenomenon that can occur in a small area in isolated events. Thus, as it is an event that varies locally and spatially, it was sought through the WRF model to find out if it is able to correctly indicate surface hail. Eight experiments with four CMP and two CCP were used in three cases selected from reports of hail events by SEDEC, magazine and newspaper website reports from 2009 to 2016. For the accomplishment of the work we used the NCEP data and known as Final Analysis. This data is meant to be run in WRF in the simulation containing 40 levels  $\eta$ , the highest level being  $50 \text{ hPa}$ . The initial condition and boundary data are from NCEP with spatial resolution of 1 by 1 degree latitude by longitude. Three domains were used in the model with grid scales of 27, 9 and 3  $\text{km}$ , with the center in the third (smaller) domain located in Santa Maria - RS. The simulations were started approximately 12 hours before the events and the outputs used in the results analysis were every 10 to 10 minutes for the smaller 3  $\text{km}$  domain. The contingent table 2 x 2 was also used to analyze the GAS grid points at the end of simulation with the observation grid points defined as area of affected cities and thus statical indices are used to verify wich better produces hail. Analyzing the hail in the atmosphere and surface accumulated, the results indicated among all experiments that Exp1 and Exp2 were better in hail production for the three cases. Individually the Case 3 was the one that produced the best GAS in time and space. For the statistical indices, an unsatisfactory result was observed when analyzing the experiments using the CMP with CCP, mainly applying the high resolution modeling. The statistical indices were not satisfactory to study hail events mainly by the use of high resolution numerical modeling. Therefore, it is concluded that studying a local event such as hail is extremely difficult, as it varies greatly in time and space, especially in understanding the model's cloud microphysics processes to produce exactly where the phenomenon occurred on the surface.

**Keywords:** Hail. Numerical Simulation. Severe Weather.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – (a) Formação de granizo através das correntes ascendentes e queda ao atingir o tamanho precipitante e (b) Distribuição dos hidrometeoros em camadas em uma nuvem de tempestade. ....	27
Figura 2.2 – Processos físicos que levam a produção de precipitação. ....	33
Figura 2.3 – Processos convectivos em uma nuvem cumulus. ....	36
Figura 3.1 – Esquema mostrando os dados de entrada e as etapas para execução do WPS e as condições iniciais e de contorno para realizar a simulação numérica no WRF. ....	42
Figura 3.2 – Grades geradas pelo WRF Domain Wizard (NOAA, 2013) para serem utilizadas no modelo WRF, contendo a grade mãe 27 km, a intermediária 9 km e a menor 3 km, sendo o centro do domínio menor localizado em Santa Maria – RS ....	43
Figura 4.2 – Campos meteorológicos para o evento do dia 7 de setembro de 2009 às 18 UTC, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) PRNMM (linha preta, 2 hPa) e espessura de 1000 – 500 hPa (colorido, 60 m); (b) linhas de corrente (preto) e magnitude do vento (colorido, a cada 10 m / s acima de 30 m / s) em 200 hPa; (c) linhas de corrente em 850 hPa (preto), água precipitável (azul tracejada, 10 mm) e CAPE (colorido, acima de 400 J / kg); (d) perfil termodinâmico das 12 UTC; (e) imagem de satélite do GOES-10 do infravermelho realçado e (f) imagem de radar de refletividade (dBZ) às 20 UTC. ....	60
Figura 4.3 – Mesmo que a figura 4.2, mas para o evento do dia 28 de setembro de 2009, contendo os horários das 00 e 12 UTC nos campos meteorológicos (a-b-c-d-e-f), perfil termodinâmico às 00 UTC (g), imagem de satélite do GOES-10 do infravermelho realçado às 00 UTC (h) e 06 UTC (i) e imagem de radar de refletividade (dBZ) às 06 UTC (j). Sendo (a-d) PRNMM e espessura entre 1000 – 500 hPa; (b-e) linhas de corrente e magnitude do vento; (c-f) linhas de corrente, água precipitável e CAPE. ....	61
Figura 4.4 – Mesmo que a Figura 4.2, mas para o evento do dia 14 de outubro de 2015, contendo os horários das 12 UTC do dia 14 e 00 UTC do dia 15 nos campos meteorológicos (a-b-c-d-e-f), perfil termodinâmico às 12 UTC (g), imagens de satélite do GOES-13 do canal infravermelho às 12 UTC do dia 14 (h) e às 00 UTC do dia 15 (i) e imagem de radar de refletividade (dBZ) às 19 UTC (j). Sendo (a-d) PRNMM e espessura entre 1000 – 500 hPa; (b-e) linhas de corrente e magnitude do vento; (c-f) linhas de corrente, água precipitável e CAPE. ....	64
Figura 4.5 – Campos de GAS com o acumulado em 24 h em todos os experimentos (colorido; 0.01, 1, 2, 4, 8 e 16 mm) para o Caso 1, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) Exp1, (b) Exp2, (c) Exp3, (d) Exp4, (e) Exp5, (f) Exp6, (g) Exp7 e (h) Exp8. As letras A e B marcam as duas cidades afetadas pelo evento, sendo Itaara e Lavras do Sul. ....	67
Figura 4.6 – Campos de granizo na atmosfera integrado verticalmente e nas 24 h de simulação (colorido; 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 mm) para o Caso 1, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) Exp1, (b) Exp2, (c) Exp3, (d) Exp4, (e) Exp5, (f) Exp6, (g) Exp7 e (h) Exp8. ....	68

Figura 4.7 – Campos de GAS (colorido; 0, 01, 1, 2, 4, 8 e 16 <i>mm</i> ) utilizando o Exp1 (a-c-e) e o Exp2 (b-d-f) para o Caso 1, sendo o acumulado das 00 UTC às 19 UTC (a-b), das 19 UTC às 21 UTC (c-d) e das 21 UTC às 00 UTC (e-f), constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. ....	69
Figura 4.8 – Mesmo que a figura 4.7, porém com o Exp5 (a-c-e) e o Exp6 (b-d-f). Sendo o acumulado das 00 UTC às 19 UTC (a-b), das 19 UTC às 21 UTC (c-d) e das 21 UTC às 00 UTC (e-f). ....	70
Figura 4.9 – Mesmo que a figura 4.7, porém com o Exp7 (a-c-e) e o Exp8 (b-d-f). Sendo o acumulado das 00 UTC às 19 UTC (a-b), das 19 UTC às 21 UTC (c-d) e das 21 UTC às 00 UTC (e-f). ....	71
Figura 4.10 – Séries temporais horárias integradas verticalmente na atmosfera até 50 <i>hPa</i> e acumulada na área de todo o domínio da grade de 3 <i>km</i> da simulação para o Caso 1. Sendo Exp1 (a), Exp2 (b), Exp3 (c), Exp4 (d), Exp5 (e), Exp6 (f), Exp7 (g) e Exp8 (h). As variáveis apresentadas no gráfico são as razões de mistura de granizo ( <i>m</i> ; círculo vermelho), chuva ( <i>m</i> ; quadrado preto), vapor ( <i>hm</i> ; círculo preto), nuvem ( <i>m</i> ; círculo preto rachurado), neve ( <i>dam</i> ; * preto), gelo ( <i>m</i> ; + preto) e graupel ( <i>dam</i> ; triângulo preto). ....	72
Figura 4.11 – Séries temporais horárias integradas na área com relação à superfície para o Caso 1. Sendo Exp1 (a), Exp2 (b), Exp3 (c), Exp4 (d), Exp5 (e), Exp6 (f), Exp7 (g) e Exp8 (h). As variáveis apresentadas no gráfico são granizo ( <i>m</i> ; círculo vermelho rachurado), chuva ( <i>m</i> ; quadrado preto rachurado) e graupel ( <i>dam</i> ; triângulo preto rachurado). ....	73
Figura 4.12 – Campos de GAS com o acumulado em 24 <i>h</i> em todos os experimentos (colorido; 0.01, 1, 2, 4, 8 e 16 <i>mm</i> ) para o Caso 2, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) Exp1; (b) Exp2; (c) Exp3; (d) Exp4; (e) Exp5; (f) Exp6; (g) Exp7 e (h) Exp8. As letras A, B, C e D marcam as quatro cidades afetadas pelo evento, sendo Engenho Velho, Constantina, São José das Missões e Tabai. ....	75
Figura 4.13 – Campos de granizo na atmosfera integrado verticalmente e nas 24 <i>h</i> de simulação (colorido; 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 <i>mm</i> ) para o Caso 2, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) Exp1, (b) Exp2, (c) Exp3, (d) Exp4, (e) Exp5, (f) Exp6, (g) Exp7 e (h) Exp8. ....	76
Figura 4.14 – Campos de GAS (colorido; 0, 01, 1, 2, 4, 8 e 16 <i>mm</i> ) utilizando o Exp1 (a-c-e) e o Exp2 (b-d-f) para o Caso 2, sendo o acumulado das 12 UTC do dia 27 às 00 UTC do dia 28 (a-b), das 00 UTC às 03 UTC (c-d) e das 03 UTC às 12 UTC (e-f), constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. ....	78
Figura 4.15 – Mesmo que a figura 4.14, porém com o Exp5 (a-c-e) e o Exp6 (b-d-f). Sendo o acumulado das 12 UTC do dia 27 às 00 UTC do dia 28 (a-b), das 00 UTC às 03 UTC (c-d) e das 03 UTC às 12 UTC (e-f). ....	79
Figura 4.16 – Mesmo que a figura 4.14, porém com o Exp7 (a-c-e) e o Exp8 (b-d-f). Sendo o acumulado das 12 UTC do dia 27 às 00 UTC do dia 28 (a-b), das 00 UTC às 03 UTC (c-d) e das 03 UTC às 12 UTC (e-f). ....	80
Figura 4.17 – Séries temporais horárias integradas verticalmente na atmosfera até 50 <i>hPa</i> e acumulada na área de todo o domínio da grade de 3 <i>cm</i> da simulação para o Caso 2. Sendo Exp1 (a), Exp2 (b), Exp3 (c), Exp4 (d), Exp5 (e), Exp6 (f), Exp7 (g) e Exp8 (h). As variáveis apresentadas no	

- gráfico são granizo ( $m$ ; círculo vermelho), chuva ( $m$ ; quadrado preto), vapor ( $hm$ ; círculo preto), nuvem ( $m$ ; círculo preto rachurado), neve ( $dam$ ; \* preto), gelo ( $m$ ; + preto) e graupel ( $dam$ ; triângulo preto). . . . . 81
- Figura 4.18 – Séries temporais horárias integradas na área com relação à superfície para o Caso 2. Sendo Exp1 (a), Exp2 (b), Exp3 (c), Exp4 (d), Exp5 (e), Exp6 (f), Exp7 (g) e Exp8 (h). As variáveis apresentadas no gráfico são granizo ( $m$ ; círculo vermelho rachurado), chuva ( $m$ ; quadrado preto rachurado) e graupel ( $dam$ ; triângulo preto rachurado). . . . . 82
- Figura 4.19 – Campos de GAS com o acumulado em 24 h em todos os experimentos (colorido; 0,01, 1, 2, 4, 8 e 16 mm) para o Caso 3, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) Exp1; (b) Exp2; (c) Exp3; (d) Exp4; (e) Exp5; (f) Exp6; (g) Exp7 e (h) Exp8. As letras A, B, C, D, E, F, G, H e I marcam as nove cidades afetadas pelo evento, sendo Passo do Sobrado, Cachoeira do Sul, Sapucaia do Sul, Caraá, Santo Antônio da Patrulha, Taquara, Cacequi, Formigueiro e São Jerônimo. . . . . 84
- Figura 4.20 – Campos de granizo na atmosfera integrado verticalmente e nas 24 h de simulação (colorido; 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 mm) para o Caso 3, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) Exp1, (b) Exp2, (c) Exp3, (d) Exp4, (e) Exp5, (f) Exp6, (g) Exp7 e (h) Exp8. . . . . 85
- Figura 4.21 – Campos de GAS (colorido; 0,01, 1, 2, 4, 8 e 16 mm) utilizando o Exp1 (a-c-e) e o Exp2 (b-d-f) para o Caso 3, sendo o acumulado das 00 UTC às 17 UTC (a-b), das 17 às 20 UTC (c-d), das 20 às 22 UTC (e-f) e das 22 às 00 UTC (g-h), constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. . 86
- Figura 4.22 – Mesmo que a figura 4.21, porém com o Exp5 (a-c-e) e o Exp6 (b-d-f). Sendo o acumulado das 00 UTC às 17 UTC (a-b), das 17 às 20 UTC (c-d), das 20 às 22 UTC (e-f) e das 22 às 00 UTC (g-h). . . . . 87
- Figura 4.23 – Mesmo que a figura 4.21, porém com o Exp7 (a-c-e) e o Exp8 (b-d-f). Sendo o acumulado das 00 UTC às 17 UTC (a-b), das 17 às 20 UTC (c-d), das 20 às 22 UTC (e-f) e das 22 às 00 UTC (g-h). . . . . 88
- Figura 4.24 – Séries temporais horárias integradas verticalmente na atmosfera até 50 hPa e acumulada na área de todo o domínio da grade de 3 km da simulação para o Caso 3. Sendo Exp1 (a), Exp2 (b), Exp3 (c), Exp4 (d), Exp5 (e), Exp6 (f), Exp7 (g) e Exp8 (h). As variáveis apresentadas no gráfico são granizo ( $m$ ; círculo vermelho), chuva ( $m$ ; quadrado preto), vapor ( $hm$ ; círculo preto), nuvem ( $m$ ; círculo preto rachurado), neve ( $dam$ ; \* preto), gelo ( $m$ ; + preto) e graupel ( $dam$ ; triângulo preto). . . . . 89
- Figura 4.25 – Séries temporais horárias integradas na área com relação à superfície para o Caso 3. Sendo Exp1 (a), Exp2 (b), Exp3 (c), Exp4 (d), Exp5 (e), Exp6 (f), Exp7 (g) e Exp8 (h). As variáveis apresentadas no gráfico são granizo ( $m$ ; círculo vermelho rachurado), chuva ( $m$ ; quadrado preto rachurado) e graupel ( $dam$ ; triângulo preto rachurado). . . . . 90
- Figura A.1 – Imagens de radar de refletividade em dBZ às 20:30 UTC do evento de granizo do dia 7 de setembro de 2009 que atingiu a cidade de Lavras do Sul. . . . . 101
- Figura A.2 – Imagens de radar de refletividade em dBZ do evento do dia 14 de outubro de 2015 que atingiu as cidades de (a) Sapucaia do Sul às 20:30 UTC, (b) Caraá às 20:45 UTC, (c) Santo Antônio da Patrulha às 20:45 UTC, (d) Taquara às 21:00 UTC, (e) Formigueiro às

23:00 UTC e (f) São Jerônimo às 23:30 UTC. ....102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Informações dos três casos definidos para o estudo: (a) Caso 1 para o dia 7 de setembro de 2009 com duas cidades, (b) Caso 2 para o dia 28 de setembro de 2009 com quatro cidades e (c) Caso 3 para o dia 14 de outubro de 2015 com nove cidades. A tabela consta as letras referentes as cidades que serão abordadas nos resultados com data, horário local, população total e a porcentagem de pessoas afetadas pelos eventos de granizo. ....	40
Tabela 3.2 – Experimentos realizados com as PMN e PCC empregadas nas simulações com o modelo WRF. ....	44
Tabela 3.3 – A tabela mostra o par dos pontos de grade das cidades que tiveram observação de granizo com o GAS colocado pela simulação no total de cada caso e experimentos: (a) Caso 1, (b) Caso 2 e (c) Caso 3. "n" é definido como o total de pontos de grade sobre o RS. ....	47
Tabela 3.4 – Exemplo de tabela de contingência, a qual é utilizada para analisar o GAS através dos experimentos de cada simulação e a observação de granizo relatado pela SEDEC. As letras a, b, c e d foram descritas anteriormente. ....	48
Tabela 4.1 – Levantamento dos relatórios de danos de granizo entre os anos 2009 a 2016, contendo as cidades, data, horário local, população total e porcentagem de pessoas afetadas. ....	52



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AMSRE</i>	Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System
<i>ARW</i>	Advanced Research WRF
<i>BMJ</i>	Betts-Miller-Janjic
<i>CAPE</i>	Convective Available Potential Energy
<i>CPTEC</i>	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
<i>DECEA</i>	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
<i>ETS</i>	Equitable Threat Score
<i>FNL</i>	Final
<i>GAS</i>	Granizo Acumulado em Superfície
<i>GCE</i>	Goddard Cumulus Ensemble
<i>GD</i>	Grell-Dévényi
<i>GDAS</i>	Global Data Assimilation System
<i>GFS</i>	Global Forecast System
<i>GOES</i>	Geostationary Operational Environmental
<i>GRIB2</i>	General Regularly-distributed Information in Binary 2
<i>GSS</i>	Gilbert Skill Score
<i>GTS</i>	Global Telecommunications System
<i>HUJI</i>	Hebrew University of Jerusalem-Israel
<i>INMET</i>	Instituto Nacional de Meteorologia
<i>INPE</i>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>KF</i>	Kain-Fritsch
<i>MORR</i>	Morrison
<i>MY2</i>	Milbrandt-Yau Double-Moment
<i>NCAR</i>	National Center for Atmospheric Research
<i>NCEP</i>	Nacional Center for Environmental Prediction
<i>NEXRAD</i>	Next Generation Radar
<i>NMM</i>	Nonhydrostatic Mesoscale Model

<i>NSSL1</i>	National Severe Storms Laboratory Single-Moment
<i>NSSL2</i>	National Severe Storms Laboratory Double-Moment
<i>NSSL2 + CCN</i>	National Severe Storms Laboratory Double-Moment+Cloud Condensation Nuclei
<i>PA</i>	Proporção de Acertos
<i>PCC</i>	Parametrização de Convecção Cumulus
<i>PD</i>	Probabilidade de Detecção
<i>PMN</i>	Parametrização de Microfísica de Nuvens
<i>PRNMM</i>	Pressão Reduzida ao Nível Médio do Mar
<i>QPE</i>	Quantitative Precipitation Estimation
<i>RAF</i>	Razão de Alarme Falso
<i>RS</i>	Rio Grande do Sul
<i>SBM</i>	Spectra - Bin Microphysics
<i>SCM</i>	Sistemas Convectivos de Mesoescala
<i>SEDEC</i>	Secretaria Nacional de Defesa Civil
<i>TRMM</i>	Tropical Rainfall Measuring Mission
<i>V</i>	Viés
<i>WDM6</i>	WRF Double-Moment 6-class
<i>WPS</i>	WRF Preprocessing System
<i>WRF</i>	Weather Research and Forecasting
<i>WSM3</i>	WRF Single-Moment 3-class
<i>WSM5</i>	WRF Single-Moment 5-class
<i>WSM6</i>	WRF Single-Moment 6-class

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
1.1	OBJETIVOS .....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>25</b>
2.1	GRANIZO .....	25
2.1.1	Processos de formação do granizo .....	25
2.1.2	Processos de crescimento do granizo .....	26
2.1.3	Processo de precipitação .....	29
2.1.4	Tamanho do granizo .....	29
2.2	OCORRÊNCIAS DE GRANIZO NO MUNDO E NO BRASIL .....	30
2.3	PARAMETRIZAÇÕES DE MICROFÍSICA DE NUVENS .....	32
2.4	PARAMETRIZAÇÕES DE CONVECÇÃO CUMULUS .....	36
<b>3</b>	<b>DADOS E METODOLOGIA</b> .....	<b>39</b>
3.1	DADOS E DESCRIÇÃO DOS CASOS SELECIONADOS .....	39
3.2	<i>MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF)</i> .....	41
3.2.1	Simulação numérica .....	42
3.2.2	Parametrização de Microfísica de Nuvens .....	44
3.2.3	Parametrização de Convecção Cumulus .....	45
3.3	TABELA DE CONTINGÊNCIA .....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>51</b>
4.1	LEVANTAMENTO DOS RELATÓRIOS DE AVALIAÇÃO DE DANOS DE GRANIZO DA SECRETARIA NACIONAL DE DEFESA CIVIL - SEDEC .....	51
4.2	ANÁLISE SINÓTICA E IMAGEM DE SATÉLITE DOS CASOS DE GRANIZO ....	57
4.3	ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DO GRANIZO EM SUPERFÍCIE E NA ATMOSFERA	66
4.3.1	Caso 1 - 07 de setembro de 2009 .....	66
4.3.2	Caso 2 - 28 de setembro de 2009 .....	75
4.3.3	Caso 3 - 14 de outubro de 2015 .....	83
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>91</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS .....	92
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>95</b>
	<b>APÊNDICE A – IMAGENS DE RADAR DAS DEMAIS CIDADES DOS EVENTOS DE GRANIZO DO DIA 07 DE SETEMBRO DE 2009 E 14 DE OUTUBRO DE 2015.</b> .....	<b>101</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O granizo é uma forma de precipitação que consiste na queda de pedaços irregulares de gelo, podendo ser coloquialmente chamado de pedras de granizo (CHANGON; CHANGON; HILBERG, 2009; MARTINS et al., 2017). Ele é um evento meteorológico de curto prazo que pode ocorrer em uma área pequena em acontecimentos isolados (LI, M. et al., 2017; MARTINS et al., 2017). Através dos relatórios utilizados por Tuovinen et al. (2009), seu tamanho pode variar entre 2 a 7 *cm* de diâmetro.

Todos os anos, em todo o mundo, as tempestades de granizo destrutivas ocasionam sérias perdas econômicas e causam um grande impacto social destruindo plantações, lares, instalações médicas e escolas (PUNGE; KUNZ, 2016; MARTINS et al., 2017). É considerado um fenômeno de extrema importância devido aos danos que pode causar à sociedade e, do ponto de vista meteorológico/científico pelo seu impacto dinâmico e termodinâmico em uma tempestade de convecção profunda (SIOUTAS; FLOCAS, 2003; LI, M. et al., 2017; MARTINS et al., 2017). Por exemplo, os transtornos econômicos e sociais causados por tempestades de granizo e outros eventos severos na China excederam os danos causados por ciclones tropicais, atingindo gastos de 18,61 bilhões de reais em 2012 (LI, M. et al., 2017).

As tempestades de granizo ocorrem geralmente nas estações da primavera e verão, tanto no Hemisfério Sul como no Norte, em regiões de clima temperado (SCHUSTER; BLONG; SPEER, 2005; TUOVINEN et al., 2009; ILIINE; MINUZZI; ROLIM, 2010; CECIL; BLANKENSHIP, 2012; MARTINS et al., 2017). Porém, também já houve episódios de granizo em outras estações do ano (TUOVINEN et al., 2009; MARTINS et al., 2017). A região que compreende médias latitudes e subtropicais da América do Sul, a leste da Cordilheira dos Andes apresenta condições favoráveis à ocorrência de tempestades severas e a provável intensificação da produção de granizo (NASCIMENTO, 2005; CECIL; BLANKENSHIP, 2012). Ainda, núcleos de convecção mais intensos são comumente observados na Bacia do Prata que inclui os estados do sul do Brasil (Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná) (BROOKS, 2006; ZIPSER et al., 2006; MARTINS et al., 2017). Nessas regiões é observada a ocorrência de convecção intensa o que pode originar granizos grandes e com maior impacto social e econômico (MARTINS et al., 2017). Segundo a distribuição espacial dos relatórios de granizo disponibilizados pelo banco de dados da Defesa Civil, mostra-se danos associados a queda de granizo naquelas regiões (RASERA, 2013; MARTINS et al., 2017).

O granizo pode influenciar na precipitação e na evolução das tempestades por meio de mudanças correspondentes nos processos dinâmicos e microfísicos (SIOUTAS; FLOCAS, 2003; CECIL; BLANKENSHIP, 2012; LI, M. et al., 2017; MURTHY; LATHA; MADHUPARNA, 2018). O derretimento e a sublimação do granizo resfriam o ar, o que pode levar a

uma corrente de ar descendente fria e intensa (HOUZE JR., 2014; LI, M. et al., 2017). Assim, a presença de granizos pequenos poderá contribuir para ocorrência de correntes de ar mais fortes em baixos níveis, gerando piscinas frias mais profundas e intensas através da liberação de calor latente durante o processo de fusão do granizo, com maior vortacidade vertical devido a forte convergência de massa de ar em baixos níveis, podendo ser observado em supercélulas (MARKOWSKI; RICHARDSON, 2010; LI, M. et al., 2017). Os padrões atmosféricos de escala sinótica e sua relação com o clima local são de grande relevância, pois são diretamente dependentes dos sistemas meteorológicos que atinge cada região (SIOUTAS; FLOCAS, 2003; GARCÍA-ORTEGA; LÓPEZ; SÁNCHEZ, 2011). Esses sistemas desempenham um papel importante na ocorrência das tempestades de granizo e ainda possuem um efeito controlador sobre a formação dos regimes termodinâmicos locais, através da instabilidade termodinâmica, disponibilidade de umidade na baixa troposfera e um mecanismo de disparo convectivo que auxilia na subida das parcelas de ar.

Os erros na previsão de granizo devem-se ao rápido desenvolvimento e evolução das tempestades, gerando incertezas nos esquemas de parametrização da microfísica e convectiva, devido à demora no ajuste do modelo (LUO et al., 2017). Uma melhor compreensão sobre esses fatores, ajudaria a melhorar a qualidade das previsões e estabelecimento de um sistema de alerta mais eficaz (GARCÍA-ORTEGA; LÓPEZ; SÁNCHEZ, 2011). E assim com uma melhor capacidade de previsão, pode-se diminuir o impacto de eventos de granizo no futuro (SODERHOLM et al., 2017).

## 1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral determinar se as simulações no modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) são capazes de corretamente indicar no espaço e no tempo, a ocorrência de granizo no Rio Grande do Sul. Para assim, abordar os objetivos específicos que são:

- (i) fazer um levantamento dos registros de granizo relatados pela Secretaria Nacional de Defesa Civil (SEDEC, 2009) no período de 2009 a 2016. Dessa maneira, de forma subjetiva, separar três casos onde muitas pessoas sofreram um grande impacto social e econômico;
- (ii) através dos campos meteorológicos, analisar os padrões sinóticos conducentes às tempestades de granizo;
- (iii) realizar simulações com espaçamento de grade de 27, 9 e 3 *km* utilizando as Parametrizações de Microfísica de Nuvens (PMN) e combinando cada uma com as Parametrizações de Convecção Cumulus (PCC);

- (iv) avaliar qual (is) experimento (s) realizado (s) com as PMN e PCC indica (m) melhor o granizo nos casos, utilizando uma tabela de contingência e os índices estatísticos a partir dela.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GRANIZO

Os granizos são hidrometeoros congelados que consistem basicamente do crescimento realizado por riming (CHANGON; CHANGON; HILBERG, 2009; MARTINS et al., 2017). Para a Organização Meteorológica Mundial, pode-se referir como granizo quando esses possuem um diâmetro de  $5\text{ mm}$  ou mais (LACKMANN, 2011). O granizo se desenvolve a partir do choque entre gotículas super-resfriadas e cristais de gelo na parte superior de nuvens convectivas do tipo Cumulonimbus (KNIGHT; KNIGHT, 2001; WALLACE; HOBBS, 2006). Estes tipos de nuvens apresentam intensas correntes ascendentes que mantêm o granizo suspenso em temperaturas abaixo de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (KNIGHT; KNIGHT, 2001; DENNIS; KUMJIAN, 2017).

#### 2.1.1 Processos de formação do granizo

Para o granizo formar-se é importante que existam nuvens convectivas profundas (FOSTER et al., 1968; CHANGON; CHANGON; HILBERG, 2009; TASZAREK; SUWALA, 2013). E para que elas se desenvolvam são necessários quatro ingredientes na atmosfera, são eles: forte instabilidade convectiva, cisalhamento vertical do vento, convergência de umidade em baixos níveis e algum mecanismo dinâmico que sirva como disparo para a convecção (CHANGON; CHANGON; HILBERG, 2009; MARKOWSKI; RICHARDSON, 2010). Esses fatores auxiliam para que a atmosfera fique instável e crie um ambiente favorável à geração de correntes ascendentes intensas (MARKOWSKI; RICHARDSON, 2010; MARTINS et al., 2017). Geralmente as tempestades com granizo são sistemas convectivos bem organizados em termos de multicélulas, Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) ou supercélulas (TASZAREK; SUWALA, 2013; PUNGE; KUNZ, 2016).

A formação de hidrometeoros nas nuvens é dependente do processo de microfísica, sendo também um princípio básico que envolve a formação, crescimento, quebra e precipitação de hidrometeoros (LI, M. et al., 2017). O desenvolvimento das nuvens se dá a partir do Nível de Condensação por Levantamento, onde são encontradas partículas chamadas de núcleos de condensação que ascendem adiabaticamente na atmosfera (WALLACE; HOBBS, 2006; HIRSCH et al., 2017; ROMPS, 2017). Esse nível é classificado como a fase quente da nuvem e os núcleos de condensação auxiliam na formação de gotículas em condições de baixa supersaturação em um processo definido como nucleação heterogênea (WALLACE; HOBBS, 2006; HOUZE JR., 2014).

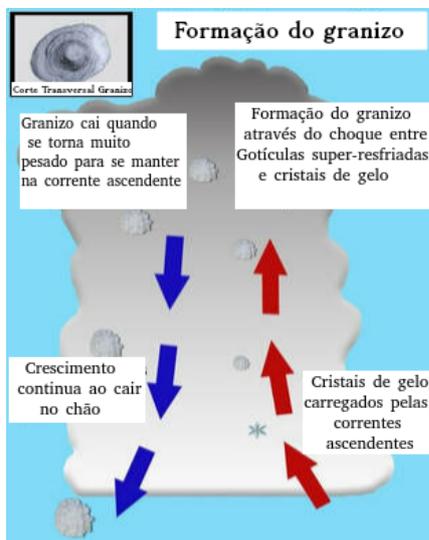
As gotículas vão crescendo por condensação e consumindo o vapor de água do ambiente (HOUZE JR., 2014). Simultaneamente a isso, algumas parcelas de ar encontram correntes ascendentes mais intensas, sendo levadas para regiões de temperaturas inferiores a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (figura 2.1 a), iniciando a fase fria da nuvem (GROENEMEIJER; DELDEN, 2006; WALLACE; HOBBS, 2006). Mesmo que as temperaturas sejam negativas, podem existir hidrometeoros em estado líquido, que são as gotículas super-resfriadas (GLICKMAN, 2000; HOUZE JR., 2014; LI, M. et al., 2017).

Em temperaturas entre  $0$  e  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  encontram-se hidrometeoros na fase líquida e sólida, sendo classificada como a fase mista da nuvem (KNIGHT; KNIGHT, 2001; HOUZE JR., 2014). Conforme os hidrometeoros são transportados para a região mais alta da tempestade (figura 2.1 b), com temperaturas cada vez menores, a formação de hidrometeoros na fase sólida torna-se mais eficiente, devido principalmente pela presença dos núcleos de gelo, onde as moléculas de água acumulam-se na superfície desse núcleos, formando uma estrutura semelhante ao gelo (KNIGHT; KNIGHT, 2001; HOUZE JR., 2014). Ao ocorrer a deposição de vapor sobre os núcleos de gelo, auxiliam no desenvolvimento dos cristais de gelo (HOUZE JR., 2014; SPIRIDONOV; ČURIĆ, 2019). A colisão entre esses cristais, formará os flocos de neve (WALLACE; HOBBS, 2006). O congelamento do graupel e/ou granizo ocorre a partir do choque das gotículas super-resfriadas e os cristais de gelo, sendo mais eficiente quando as temperaturas encontram-se abaixo dos  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ROGERS; YAU, 1996; GROENEMEIJER; DELDEN, 2006; HOUZE JR., 2014). Quando esse congelamento ocorre imediatamente após o choque, forma-se o graupel, porém se não for imediato, o granizo irá se formar (FOSTER et al., 1968; LI, M. et al., 2017). Também nessa mesma faixa de temperatura, porém apenas em nuvens altas, somente gotículas na fase líquida que ainda mantêm-se presentes, congelarão espontaneamente através do processo de nucleação homogênea (WALLACE; HOBBS, 2006; HOUZE JR., 2014).

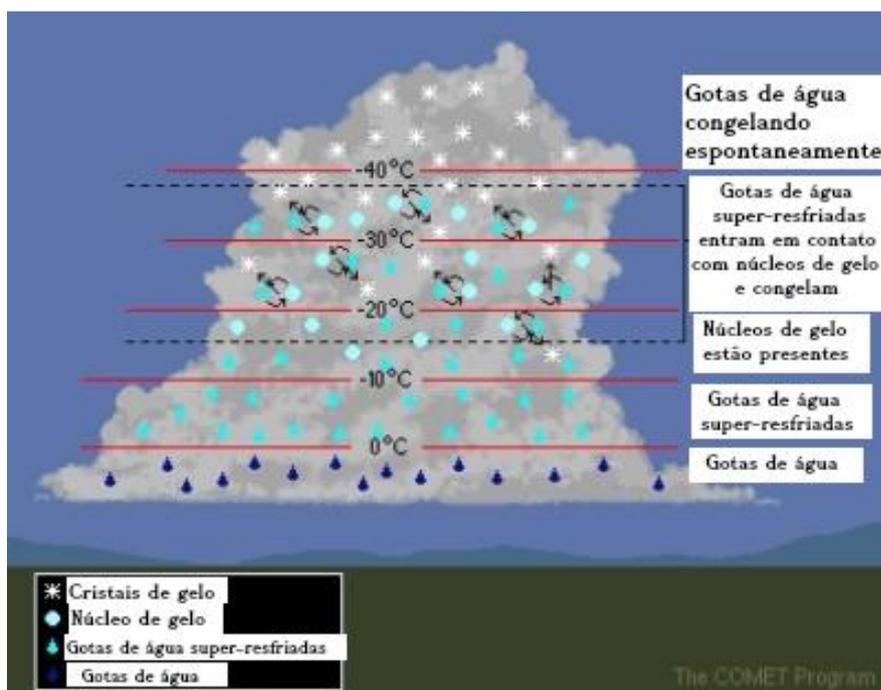
### **2.1.2 Processos de crescimento do granizo**

O crescimento de granizo nas nuvens pode ocorrer conforme uma ordem decrescente de importância, por riming, deposição de vapor ou agregação (HOUZE JR., 2014). O crescimento por riming ou borda ocorre em nuvens mistas e frias (WALLACE; HOBBS, 2006). Nessa etapa, os cristais de gelo colidem com as gotículas super-resfriadas congelando ao contato e aumentando sua massa, formando o graupel (GROENEMEIJER; DELDEN, 2006; HOUZE JR., 2014; SANTOS, 2014). Com isso, formam várias estruturas com arestas, principalmente em nuvens convectivas profundas com alto teor de água líquida (WALLACE; HOBBS, 2006). Quando o granizo coletar gotículas super-resfriadas a uma taxa muito alta, a temperatura em sua superfície aumenta para  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  e parte da água é descongelada (ROGERS; YAU, 1996; WALLACE; HOBBS, 2006; DENNIS; KUM-

Figura 2.1 – (a) Formação de granizo através das correntes ascendentes e queda ao atingir o tamanho precipitante e (b) Distribuição dos hidrometeoros em camadas em uma nuvem de tempestade.



(a)



(b)

Fonte: (a) Adaptadas de *Global Weather e Climate Center* (2017) e (b) *The COMET Program* (2015).

JIAN, 2017). Sendo assim, a superfície do granizo fica coberta por uma camada de água e o restante é incorporada em uma rede de gelo de água formando um granizo esponjoso (HOUZE JR., 2014; DENNIS; KUMJIAN, 2017). Dependendo da quantidade de derretimento que o granizo sofre no crescimento por riming, ele pode consistir de camadas escuras e claras alternadas (WALLACE; HOBBS, 2006). As camadas escuras são gelo

opaco podendo consistir de várias bolhas de ar, e as camadas claras são somente gelo, geralmente formadas pelo desenvolvimento de água descongelada (HOUZE JR., 2014).

O crescimento por deposição de vapor ocorre em nuvens mistas quando há muitas gotículas super-resfriadas e o ar está saturado em relação a água líquida e portanto, supersaturado em relação ao gelo (ROGERS; YAU, 1996; WALLACE; HOBBS, 2006; HOUZE JR., 2014). Assim, como o ar está saturado em relação a água líquida, os cristais de gelo vão crescer por deposição de vapor mais rápido que as gotículas super-resfriadas. Pois, quando os cristais de gelo crescem até um valor abaixo da pressão de saturação em relação a uma superfície líquida, e conseqüentemente as gotículas adjacentes irão evaporar (NELSON, 1983; WALLACE; HOBBS, 2006; DENNIS; KUMJIAN, 2017). Também ressalta-se que os cristais de gelo crescem em um ambiente subsaturado em relação à água, mas somente se estiver supersaturado em relação ao gelo (ROGERS; YAU, 1996; WALLACE; HOBBS, 2006; HOUZE JR., 2014).

O crescimento por agregação, ocorre quando as partículas de gelo crescem no interior da nuvem ao colidir e se agregar umas com as outras (WALLACE; HOBBS, 2006). Esse processo é favorecido quando as velocidades de queda são diferentes, o que aumenta a probabilidade de colisão entre as partículas de gelo. Outro fator que pode influenciar este tipo de crescimento será se as partículas aderem-se ao sofrer a colisão (HOUZE JR., 2014). A possibilidade de adesão vai depender do tipo de partícula de gelo e a temperatura. Sendo assim, a provável adesão ocorrerá com cristais de gelo do tipo intrincados, que se entrelaçam na colisão, e com temperaturas maiores do que  $-5^{\circ}\text{C}$ , as superfícies de gelo ficam pegajosas (WALLACE; HOBBS, 2006; HOUZE JR., 2014).

Conforme as partículas de gelo vão crescendo e tornando-se maiores, caem mais rápido em relação ao ar e conseqüentemente coletam mais gotículas super-resfriadas por causa da sua maior área e porque aumenta a diferença de velocidade terminal entre as partículas de gelo (DENNIS; KUMJIAN, 2017). Mesmo que a temperatura do granizo fique acima de  $0^{\circ}\text{C}$  ao ocorrer o derretimento do gelo, as gotículas super-resfriadas coletadas podem não congelar imediatamente ao haver o contato (DENNIS; KUMJIAN, 2017; SPIRIDONOV; ČURIĆ, 2019). No entanto, podem fluir pela superfície do granizo para o interior dele em locais onde houve congelamentos anteriores e aumentar sua densidade formando uma camada de gelo mais clara (WALLACE; HOBBS, 2006).

Salienta-se que embora a intensidade máxima das correntes ascendentes definam um limite superior ao tamanho do granizo, as correntes ascendentes não possuem uma velocidade tão alta para manter o crescimento de granizos grandes (NELSON, 1983; MILLER; TUTTLE; FOOTE, 1990; DENNIS; KUMJIAN, 2017). Porém, quanto mais amplas forem as correntes ascendentes, mais suporte elas oferecem para o granizo aumentar o seu volume através da conversão por congelamento (DENNIS; KUMJIAN, 2017). Ao combinar as correntes ascendentes amplas com um tempo de residência longo, mais o granizo irá aumentar seu volume e mais tempo de crescimento terá (FOOTE, 1984; DENNIS; KUM-

JIAN, 2017).

O granizo cresce até que as correntes ascendentes consigam manter seu volume, porque quando a velocidade de queda for maior que a velocidade de subida das correntes ascendentes, o granizo precipitará (HOUZE JR., 2014; DENNIS; KUMJIAN, 2017).

### 2.1.3 Processo de precipitação

A precipitação de granizo pode ocorrer de duas formas: o granizo não se encontra mais na região com correntes ascendentes intensas, assim a velocidade de queda do granizo excederá a velocidade de subida da corrente ascendente, não conseguindo mantê-lo mais suspenso e crescendo (HOUZE JR., 2014; DENNIS; KUMJIAN, 2017). Na queda, poderá haver derretimento, chegando ao solo na forma de granizo pequeno, graupel ou chuva (HOUZE JR., 2014; DENNIS; KUMJIAN, 2017). Para segunda forma, se a corrente ascendente for intensa ao ponto de transportar o granizo tão rápido que esse será ejetado na bigorna da tempestade, parando repentinamente seu crescimento (LI, M. et al., 2017).

### 2.1.4 Tamanho do granizo

O granizo pode ser classificado através do tamanho de seu diâmetro após sua queda na superfície, pois seu tamanho possui relação com seu poder destrutivo (CHANGON; CHANGON; HILBERG, 2009; MARTINS et al., 2017). No estudo de Schuster, Blong e Speer (2005) ao analisarem uma tempestade de granizo que ocorreu em abril de 1999 em Sydney, observaram granizos com tamanhos de bolas de golfe (4,2 cm), bolas de tênis (6,3 cm) e até bolas de críquete (7,0 cm). Nesse mesmo estudo, também observou-se uma variação no tamanho do granizo ao comparar com os que ocorreram entre os anos 1976 e 1990, sendo encontrados tamanhos médios máximos de granizo de 3,3 cm, sendo 2,9 cm para todos os 187 casos de granizo, e 3,0 cm, sendo 2,4 cm para todos os 386 casos (SCHUSTER; BLONG; SPEER, 2005). No trabalho de Tuovinen et al. (2009), observou o tamanho do granizo variando de 2 cm a até mais de 5 cm, sendo classificado como pequeno  $\leq 2$  cm; o granizo médio de 2 a 4 cm; grande de 4 a 5 cm e a partir de 5 cm é classificado como granizo gigante. Para o Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos, uma tempestade severa pode ter granizo com 2,5 cm de diâmetro ou mais (CECIL; BLANKENSHIP, 2012). E ainda nos Estados Unidos, em um estudo feito por Witt et al. (2018), analisaram a tempestade El Reno que ocorreu dia 31 de maio de 2013 em Oklahoma, onde uniu-se uma supercélula produzindo um tornado forte e granizo gigante. Através do *El Reno Survey Project*, adquiriu-se a partir de fotos de mídias sociais e observações voluntárias, medições e estimativas do diâmetro dos granizos gigantes formados

nessa tempestade. Os granizos variaram entre 7 *cm* a 16 *cm*.

Outro aspecto interessante é a relação do tamanho do granizo com a velocidade de queda. Matson e Huggins (1980) mostraram que granizos de 1 *cm* de diâmetro, possuem velocidade de queda de 15 a 20 *m / s*. Porém, granizos grandes apresentam velocidades terminais de dezenas de *m / s* (CECIL; BLANKENSHIP, 2012).

## 2.2 OCORRÊNCIAS DE GRANIZO NO MUNDO E NO BRASIL

### a) Austrália:

A primeira climatologia sobre granizo feita na Austrália, foi realizada por Schuster, Blong e Speer (2005). Através de relatórios de observações de granizo entre 1791 a 2003, e também, dados climáticos severos do *Australian Bureau of Meteorology* em Sydney, no período de 1805 a 1998. A partir disso, notaram um total de 1570 tempestades geradoras de granizo. Também observou-se pelos relatos que a maior frequência dessas tempestades ficava entre outubro e fevereiro em Nova Gales do Sul, sendo seu pico em novembro e dezembro. Em Sydney inicia dois meses antes, ocorrendo de agosto a fevereiro. No entanto, nos últimos 14 anos, esse padrão de ocorrência de tempestades de granizo mudou para novembro a março.

### b) Europa:

Uma climatologia realizada na Finlândia, no período que compreende de 1930 a 2006, encontrou 240 casos de granizo severo, com 2 *cm* de diâmetro ou mais. A maior parte dos casos relatados foi do final de junho ao início de agosto, sendo o pico no mês de julho, com quase 66 % dos casos (TUOVINEN et al., 2009).

### c) Mundo:

Cecil e Blankenship (2012) analisaram as tempestades produtoras de granizo de 2003 a 2010 no mundo, sendo estimadas pelo *Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System* (AMSRE), com 36.5 e 89.0 GHz da *polarization-corrected brightness temperature* e pelo *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), com 37.0 e 85.5GHz da *polarization-corrected brightness temperature*. Através desse estudo, observaram que a maior frequência de granizo foi na região norte da Argentina e sul do Paraguai e em uma pequena parte de Bangladesh e leste da Índia. Também estimou-se sobre o centro e sudeste dos Estados Unidos, norte do Paquistão e noroeste da Índia, África central e ocidental e sudeste da África. Algumas regiões continentais mostram uma sazonalidade na produção de granizo, concentrando-se no final da primavera ou no

verão. A monção do sul da Ásia modifica a climatologia da precipitação de granizo no subcontinente indiano, pois 75 % das tempestades de granizo que ocorrem normalmente entre abril e junho, passaram a acontecer no final de junho e julho no norte do Paquistão. Pelo TRMM, notaram que as regiões apresentaram maiores ocorrência de granizo no final da tarde e início da noite. Nos Estados Unidos e África central, o padrão indicou um menor número de ocorrência à noite e início da manhã, no entanto para América do Sul subtropical e Bangladesh a ocorrência de granizo é mostrou-se maior nesse mesmo período.

d) Brasil:

No Brasil, foi elaborada uma climatologia por Iliine, Minuzzi e Rolim (2010) analisando a data de ocorrência, duração dos eventos, quantidade, diâmetro e energia cinética dos granizos na região central do estado de Santa Catarina, no período de 1998 a 2008. Com o levantamento dessa climatologia, observaram que as maiores ocorrências foram entre os meses de outubro a dezembro, no período da tarde, tendo uma duração média de 4 a 5 minutos. Os autores observaram as maiores intensidades de energia cinética no município de Fraiburgo, onde estava presente uma empresa Anti-Granizo Fraiburgo Ltda., instalada para monitorar a precipitação de granizo e avaliar a eficiência do sistema.

Para Defesa Civil do RS, o granizo é o evento severo de maior notificação, principalmente onde existe uma densidade populacional maior (RASERA, 2013; MARTINS et al., 2017). Um dos exemplos foi o estudo realizado por Campos e Maria (2014) que identificaram a formação de um SCM em 15/08/06. Este evento favoreceu a ocorrência de granizo em Victor Graeff, trazendo muitos prejuízos para a cidade que fica na região norte do estado.

Ao se analisar a incidência de granizo na região sul do Brasil, observou-se um total de 1630 eventos, relatados no período de 1991 a 2012 pela SEDEC. Desse, 468 (29 %) no RS, 533 (33 %) em Santa Catarina, 442 (27 %) no Paraná e 187 (11 %) em outras regiões próximas (MARTINS et al., 2017).

No trabalho de Sperling (2018), buscou-se analisar a relação entre os processos físicos e elétricos na formação e ocorrência dos SCM geradores de tempo severo e conseqüente queda de granizo nos estados do RS e SC. O autor realizou uma climatologia de ocorrências de granizo a partir das estações convencionais de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no período de 1970 a 2012, e ainda observou através dos dados de radares meteorológicos Banda-S do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e descargas elétricas atmosféricas em solo da *Earth Networks* as características físicas e elétricas dos SCM entre 2014 e 2015. Os resultados obtidos mostraram que a maior frequência de ocorrência de tempestades de granizo foram nos meses

de primavera (setembro, outubro e novembro), sendo seu auge no mês de setembro. Pelos dados de radar, notou-se que a precipitação de granizo ocorre entre o estágio inicial e maduro do ciclo de vida das tempestades geradoras de granizo. Na análise da atividade elétrica, observou-se um salto da descarga elétrica (*lightning-jump*) antecedendo 45 minutos entre o salto das descargas e os granizos registrados em superfície.

### 2.3 PARAMETRIZAÇÕES DE MICROFÍSICA DE NUVENS

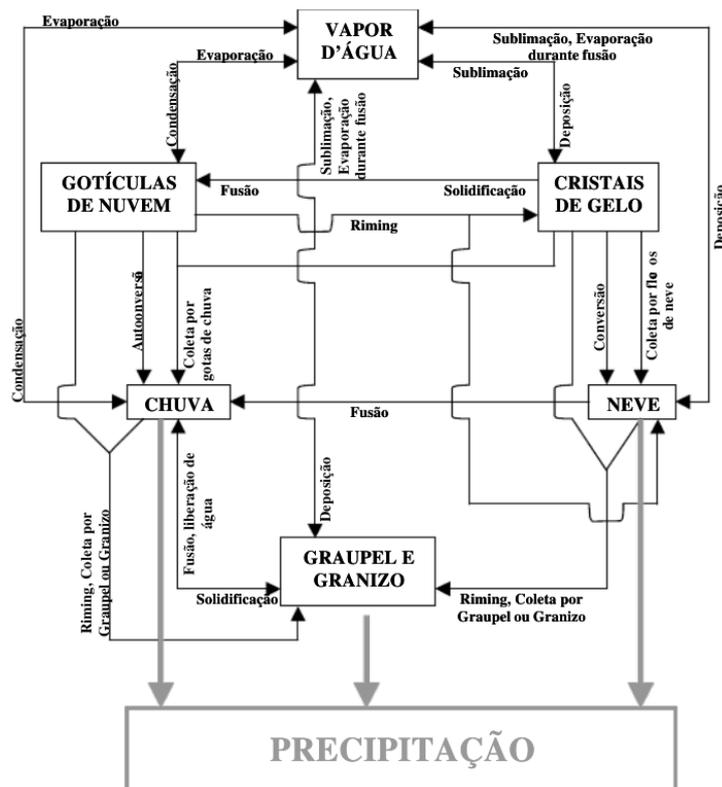
Os processos microfísicos da nuvem são amplamente controlados pelos movimentos atmosféricos e importantes para fenômenos de vida muito curta, como as tempestades (WALLACE; HOBBS, 2006; STENSRUD, 2009). Existem características microfísicas, chamadas de dinâmicas que influenciam na formação e crescimento de nuvens (HOUZE JR., 2014). Essas características são os movimentos realizados através do levantamento das parcelas de ar, auxiliando assim nos processos microfísicos que compõem a nuvem (HOUZE JR., 2014).

Ao tentar representar computacionalmente a atmosfera real através de formulações matemáticas, deve-se obedecer uma ordem específica dos processos que ocorrem na atmosfera (SKAMAROCK et al., 2008). Porém, a atmosfera não age de uma forma tão simples, pois existem várias maneiras de se abordar as formulações de suas parametrizações (SKAMAROCK et al., 2008). A figura 2.2 irá exemplificar as etapas físicas necessárias para a produção da precipitação, e ainda, destaca os processos que auxiliam na interação de uma partícula de gelo com outro hidrometeoro na nuvem (COSTA, 2003; COELHO, 2013).

Os hidrometeoros dentro de uma nuvem evoluem a partir de vapor de água, água líquida, água da chuva, gelo, neve e graupel como pode ser visto na figura 2.2 (HOUZE JR., 2014; SKAMAROCK et al., 2008). Ainda é possível observar as perdas pela queda da precipitação ao solo. Esse esquema de seis categorias é observado principalmente na dinâmica da nuvem, variando em alguns casos entre o graupel e / ou granizo (HOUZE JR., 2014).

As PMN utilizam métodos explícitos para resolver os processos de formação e crescimento dos hidrometeoros da fase líquida e sólida dentro da nuvem (SKAMAROCK et al., 2008; SANTOS, 2014). O modelo WRF é tão geral que mantém em seus cálculos qualquer quantidade de variáveis de razão de mistura de massa e outras quantidades, como por exemplo, concentração numérica (SKAMAROCK et al., 2008). Em uma simulação numérica, a microfísica é efetuada no final de cada passo de tempo como um forma de ajuste da condensação, pois é necessário que os produtos provenientes desta etapa estejam coerentes com os valores de temperatura e umidade, como forma de garantir um balanço

Figura 2.2 – Processos físicos que levam a produção de precipitação.



Fonte: Rutledge e Hobbs (1984), adaptado por Costa (2003).

final da saturação do modelo (SKAMAROCK et al., 2008). Dessa forma, são atualizados após a execução dos outros processos físicos realizados pelo modelo. O aquecimento latente gerado na simulação pelos processos microfísicos também é importante para forçar a temperatura potencial, porque assim fica armazenado para ser utilizado juntamente com os processos dinâmicos dos passos de tempo seguintes (SKAMAROCK et al., 2008; SANTOS, 2014).

Coelho (2013) avaliou a precipitação ocorrida em Brasília entre o período de 01 de junho de 2011 a 31 de maio de 2012 utilizando diferentes PMN como *Kessler*, *Lin* (Purdue), *WRF Single-Moment 3-class* (WSM3), *WRF Single-Moment 5-class* (WSM5), *ETA*, *WRF Single-Moment 6-class* (WSM6), *Goddard* e *New Thompson*. Dessa forma, ele testou esses vários esquemas com intuito de comparar com os dados das estações meteorológicas da região. As simulações realizadas indicaram que o modelo tende a superestimar a precipitação mais que o dobro ao se comparar com a observação. Ainda destacou-se que a precipitação é gerada apenas explicitamente pelo processo de microfísica, ou seja, sem o uso da parametrização convectiva. Pelos índices estatísticos de Razão de Alarme Falso (RAF) e Proporção de Acertos (PA), observou-se que a PMN de WSM3 foi a que melhor simulou a precipitação sobre a região de Brasília.

Wu et al. (2013) investigaram as causas dos processos de neve, graupel e granizo

em linhas de instabilidade simuladas em Oklahoma durante maio de 2007. Utilizaram dados observacionais de radar e de superfície para comparar com as diversas PMN usadas na simulação com resolução espacial de 30 *km*, entre elas, *WRF Single-Moment 5-class* (WSM5), *WRF Single-Moment 6-class* (WSM6), *Goddard Cumulus Ensemble* (GCE) com esquemas *3-ice* com graupel, *Goddard 2-ice* e *Goddard 3-ice* com granizo. Ou seja, os esquemas de microfísica *2-ice* incluem variáveis prognósticas de gelo em nuvem e neve, os esquemas de microfísica *3-ice* incluem gelo de nuvem, neve e graupel, e o esquema *Goddard 3-ice* com granizo inclui gelo de nuvem, neve e granizo. Notou-se que a precipitação na superfície simulada é alterada quando são incluídos graupel ou granizo nos cálculos dos esquemas de microfísica. Nos esquemas *3-ice*, a precipitação total foi maior que nos esquemas de *2-ice*, sendo o WSM6 com melhor destaque. Ainda nesse estudo, percebeu-se que ao aplicar um algoritmo de particionamento convectivo / estratiforme a partir do radar, e somando aos processos de graupel / granizo, a cobertura de área convectiva, intensidade da precipitação convectiva, intensidade das correntes ascendentes e descendentes foram aumentadas, e a cobertura estratiforme e a intensidade de precipitação estratiforme reduziram, porque nessa última área possui hidrometeoros menos densos que se espalham formando uma região estratiforme mais extensa, reduzindo a intensidade mostrada pelo radar. Já nas estruturas verticais, os esquemas de *3-ice* mostraram valores mais altos de refletividade nas partes convectivas e de *2-ice*, nas regiões estratiformes. Esse último ocorre pois, os esquemas de *2-ice* não geram precipitação tão bem quanto os outros esquemas porque não há graupel e granizo nos cálculos, e ainda apresenta mais hidrometeoros no ar, havendo uma maior refletividade de radar em médios níveis, produzindo conseqüentemente uma região estratiforme mais homogênea e estendida. Também a relação da área convectiva e estratiforme se deve a velocidade terminal dos hidrometeoros, pois quando há granizo ou graupel na nuvem, os hidrometeoros vão estar suspensos e crescendo, ou seja, a velocidade de subida da corrente ascendente é maior que a velocidade terminal dos hidrometeoros, mantendo-os suspensos, e conseqüentemente a refletividade de radar mostra-se alta onde esses hidrometeoros estão presentes.

Pu et al. (2018) analisaram as alterações das simulações numéricas no modelo, em um evento de SCM sobre as Grandes Planícies do Sul dos EUA, utilizando três tipos de PMN (*WRF Single-Moment 6-class* (WSM6), *WRF Double-Moment 6-class* (WDM6) e *Morrison double-moment* (MORR)). Esses três esquemas geraram diferentes alterações na estrutura simulada, no ciclo de vida, na cobertura de nuvens e na precipitação do SCM e também, nas piscinas frias. Os resultados indicaram que ao comparar as observações de refletividade de radar do *Next Generation Radar* (NEXRAD) com as simulações, WSM6 gera uma estrutura de convecção menos organizada e possui um tempo de vida mais curto do que o WDM6, enquanto o WDM6 reproduziu melhor a estrutura e o comprimento do SCM. Os esquemas subestimaram a quantidade de precipitação, a altura do topo do eco do radar e as partes estratiformes das nuvens. Mas em MORR, o modelo mostrou um de-

sempenho melhor com relação a previsão do tempo de vida, a cobertura da nuvem, o eco de radar e a quantidade de precipitação da convecção, e também, a estrutura convectiva teve uma melhor previsão ao ocorrer a conversão de graupel para granizo, principalmente no centro da convecção, pois MORR é uma parametrização de duplo momento para fase líquida e sólida e a WDM6 é de momento duplo para fase líquida.

Murthy, Latha e Madhuparna (2018) simularam uma tempestade severa de granizo que ocorreu no oeste da Índia no dia 9 de março de 2014. Para analisar a evolução espaço-temporal desse evento utilizaram a PMN de MORR. Notaram que a precipitação simulada é colocada 1h depois da observação e no seu início, a magnitude da precipitação mostrou-se com aproximadamente 2 vezes mais do que o indicado pela *Quantitative Precipitation Estimation* (QPE). Sabendo-se que QPE é uma aproximação da quantidade de precipitação que foi observado no solo ou próximo da região considerando-se a imagem de satélite Kalpana-1.

Além dos trabalhos acima que utilizaram diferentes parametrizações para diversas análises, tem-se também, estudos que abordaram as PMN utilizadas no presente trabalho para o evento de granizo. Em LI, M. et al. (2017), os autores utilizaram a PMN de *Milbrandt-Yau Double-Moment* (MY2), onde analisaram a dependência da produção de granizo a partir do conteúdo inicial de umidade em um evento convectivo ocorrido no nordeste da China em 10 a 11 de junho de 2005. Com a realização de três experimentos de sensibilidade modificando o perfil inicial da razão de mistura de vapor de água ( $Q$ ) para 90 % ( $Q - 10$  %), 105 % ( $Q + 5$  %) e 110 % ( $Q + 10$  %) da condição inicial utilizada na simulação de controle. Os resultados mostraram que a precipitação total de granizo possui uma resposta não linear significativa resultando em efeitos dinâmicos; por exemplo, a intensidade da tempestade definidos pela velocidade vertical, e microfísicos; por exemplo, fornecimento de água super-resfriada, advindos das mudanças na umidade inicial. E ainda, um aumento do conteúdo inicial de vapor de água fez com que a quantidade de granizo e precipitação aumentassem durante as primeiras 5 h. O resultado de  $Q + 10$  % produziu a maior quantidade de granizo, seguida de  $Q + 5$  %. Concluiu-se que a água líquida super-resfriada surte mais efeito na formação total de granizo nas nuvens do que o próprio movimento vertical, pois em  $Q + 10$  % as correntes ascendentes são mais fracas e porque mesmo que as correntes ascendentes não consigam manter o granizo suspenso para crescer, a alta concentração de água líquida super-resfriada auxilia neste crescimento através da coleta das mesmas. Mas o granizo no chão ainda é dependente da estrutura dinâmica da tempestade.

Através da PMN de *National Severe Storms Laboratory Double-Moment* (NSSL2), LI, XF., Zhang e Xue (2017) investigaram os efeitos da concentração inicial do *Cloud Condensation Nuclei* (CCN), que são partículas de aerossóis de tamanho muito pequeno ( $0,0001$  mm ou mais) servindo como núcleos de condensação nas propriedades do granizo. Mesmo este experimento sendo idealizado para uma tempestade de granizo não

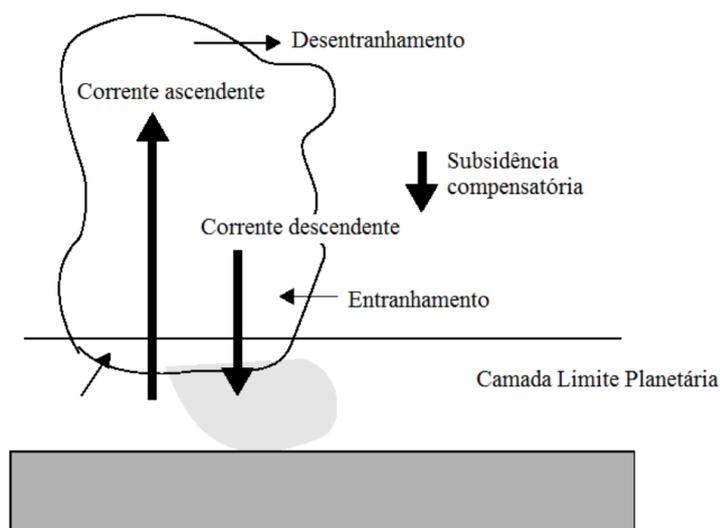
severa, obteve-se tamanho de granizo de até  $6 \text{ mm}$ . De fato, foram encontrados efeitos evidentes da CCN que variam sobre a razão de mistura, o número de concentração e o raio de granizo e graupel, tanto nas nuvens como no solo. Ainda observou-se que um aumento de CCN leva a gotículas de água menores para níveis mais altos, gerando cristais de gelo e neve. Isto pode causar tanto um atraso na formação de granizo quanto na precipitação em superfície.

## 2.4 PARAMETRIZAÇÕES DE CONVECÇÃO CUMULUS

Conforme Teitelbaum e D'Andrea (2015), uma condição necessária para que ocorra nuvens convectivas é a convergência de umidade em baixos níveis, sendo esse um fator essencial na maioria das parametrizações convectivas em previsão do tempo ou modelos climáticos.

Como em todas as parametrizações físicas, as PCC também indicam os efeitos realizados nos processos de escala de subgrade sobre as variáveis da grade maior, podendo ser chamada de parametrização implícita (STENSRUD, 2009). O seu objetivo é reproduzir os fluxos verticais resultantes de correntes ascendentes e descendentes em nuvens convectivas e/ou rasas que não foram resolvidas explicitamente pelo modelo, realizando um movimento compensatório fora das nuvens (figura 2.3) (DUDHIA et al., 2005; SKAMAROCK et al., 2008). Além de representar os processos de aquecimento e resfriamento latente, e ajuste da saturação, e a precipitação convectiva.

Figura 2.3 – Processos convectivos em uma nuvem cumulus.



Fonte: Adaptado de Dudhia et al. (2005).

Quando os tamanhos de grade são maiores que  $10 \text{ km}$ , os resultados da aplica-

ção de esquemas convectivos serão mais satisfatórios, pois contribuem para a distribuição do calor associado à condensação de vapor, e também para o transporte de umidade de níveis baixos para níveis mais altos da atmosfera ao longo das correntes ascendentes (STENSRUD, 2009). O uso desses esquemas também tenta correlacionar os movimentos verticais, a liberação de calor latente e sua interação com a grande escala com variáveis de escalas maiores que também são calculadas pelo modelo, adquirindo assim a precipitação convectiva que acontece na subgrade (SKAMAROCK et al., 2008; OLIVEIRA, 2014; SANTOS, 2014).

Através da relação entre PMN e PCC no modelo WRF com eventos meteorológicos, tenta-se melhorar a previsão de alta resolução (1 a 10 *km*) na distribuição e quantidade de precipitação em superfície. Porém, é incerto o quanto os esquemas de convecção de subgrade precisam ser modificados ao compreender a "grey zone" e assim, melhorar o reconhecimento de escala em uma previsão de curto prazo em modelos de mesoescala (ZHENG et al., 2015). Com o intuito de tentar resolver esses problemas, Zheng et al. (2015) utilizaram no seu trabalho previsões de 48 horas com tratamentos de convecção (Kain-Fritsch (KF); atualização de KF, sendo um reconhecimento da escala para alta resolução; e sem convecção), combinando com duas PMN e dois tipos de condições iniciais nas planícies dos EUA e espaçamentos de grade de 9 e 3 *km* no modelo WRF, durante os verões de 2002 e 2010. Com os resultados, observou-se que as condições iniciais desempenham um papel importante na previsão de precipitação de alta resolução, e que para KF atualizado, a precipitação excessiva colocada pelo modelo é atenuada no espaçamento de grade de 9 *km* e melhorada em 3 *km*. Esse último ocorre, pois há uma redução nos desvios excessivos de precipitação, fazendo com que a convecção seja representada adequadamente na escala de tempo. Por fim, em uma visão geral, utilizando KF atualizado, as previsões foram melhores ao representar a localização e a intensidade da precipitação.

Oliveira (2014) realizou simulações em 26 casos de ciclogênese que geraram precipitação no sudeste / sul da América do Sul, principalmente sobre o estado do RS. A proposta do trabalho foi avaliar a precipitação produzida pela simulação aplicando três parametrizações convectivas, *Betts-Miller-Janjic* (BMJ), *Grell-Dévényi* (GD) e KF e comparar com o campo de precipitação dos dados observados do TRMM e do produto denominado MERGE utilizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Para isso, utilizou-se os índices estatísticos, Razão de Alarme Falso (RAF), Probabilidade de Detecção (PD), *BIAS* e *Equitable Threat Score* (ETS). Os índices RAF, PD e ETS mostraram valores próximos dos ideais quando o WRF representou a precipitação mais fraca. No *BIAS*, a precipitação fraca foi superestimada, e a moderada / forte, indicou diferenças maiores nas simulações de KF e BMJ em comparação com TRMM e MERGE. Pelos resultados foi possível notar que os fluxos convectivos simulados, que foram os processos de entranhamento e desentranhamento e corrente descendente no WRF, causam uma grande influência na precipitação produzida, sendo as maiores discrepâncias entre KF e

BMJ. BMJ produziu uma menor área e volume de precipitação, e em média, apresenta menor precipitação convectiva comparando-se aos outros esquemas.

No presente trabalho expande-se a relação do granizo com as PMN e PCC aplicadas ao modelo WRF e a metodologia empregada é apresentada no próximo capítulo.

### 3 DADOS E METODOLOGIA

#### 3.1 DADOS E DESCRIÇÃO DOS CASOS SELECIONADOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi feito um levantamento dos eventos de tempestades de granizo que ocorreram no RS entre os anos de 2009 a 2016. Para isso, utilizou-se os relatórios disponibilizados pela SEDEC (2009), e reportagens de sites de jornais e vídeos (ESTADÃO, 2009; TERRA, 2009; FOLHA.COM, 2009; S.PAULO, 2009; COMÉRCIO, 2009; AMBIENTAL, 2009; METEOROLOGIA, 2015; VIDA, 2015; G1, 2015; GAÚCHAZH, 2015; LOURENCIANO, 2015; SEPEENSE, 2015; SUL, 2015).

Visando analisar o ambiente sinótico em que as tempestades se formaram, foram gerados campos meteorológicos a partir das seguintes variáveis: a espessura da camada 1000-500 hPa, Pressão reduzida ao Nível médio do Mar (PRNMM), vetor vento horizontal (em 200 hPa, 500 hPa e 850 hPa), *Convective Available Potential Energy* (CAPE da camada nos 180 hPa mais baixos) e água precipitável. Para isso, utilizou-se os dados disponibilizados pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) em <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html?hash=!access> e conhecidos como *Final (FNL) Operational Model Global Tropospheric Analysis* com espaçamento horizontal de 1 grau por 1 grau de latitude por longitude, intervalo temporal de 6 em 6 horas e 26 níveis verticais de 1000 a 50 hPa. Estes dados são resultantes do *Global Data Assimilation System* (GDAS) que realiza coletas frequentes dos dados observacionais do *Global Telecommunications System* (GTS) e outras fontes, para obter-se diversas análises, entre elas a FNL. Os FNLs são gerados do mesmo modelo que o NCEP utiliza no *Global Forecast System* (GFS), porém os FNLs são preparados cerca de uma hora depois que ocorre a inicialização do GFS. Os dados estão em formato *General Regularly-distributed Information in Binary 2* (GRIB2) para execução no *WRF Preprocessing System* (WPS) e depois realizar a simulação no *Weather Research and Forecasting* (WRF) dos três casos definidos.

A partir dos perfis termodinâmicos disponíveis no Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de Wyoming, busca-se analisar a atmosfera verticalmente com relação temperatura e umidade para entender quando a atmosfera estava instável nos eventos de granizo.

Para auxiliar na análise dos campos meteorológicos utilizou-se as imagens do satélite geostacionário da série *Geostationary Operational Environmental* (GOES), no canal infravermelho realçada e em alta resolução (4km), obtidas no banco de dados do CP-TEC / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), para observar as regiões de forte convecção nos três casos. E também, imagens de radar de refletividade da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET).

De forma subjetiva a partir dos relatórios da SEDEC foi analisado na tabela 4.1, nos

resultados, o impacto social e econômico que esses fenômenos de granizo causaram às pessoas. Assim, foram classificados três casos (tabela 3.1) incluindo outras cidades que também relataram o evento próximo do horário de ocorrência das cidades de Itaara, Constantina e Cachoeira do Sul, que apresentaram um grande número de pessoas afetadas com relação a população total.

Tabela 3.1 – Informações dos três casos definidos para o estudo: (a) Caso 1 para o dia 7 de setembro de 2009 com duas cidades, (b) Caso 2 para o dia 28 de setembro de 2009 com quatro cidades e (c) Caso 3 para o dia 14 de outubro de 2015 com nove cidades. A tabela consta as letras referentes as cidades que serão abordadas nos resultados com data, horário local, população total e a porcentagem de pessoas afetadas pelos eventos de granizo.

	Cidade	Data	Horário (local)	População Total	Porcentagem de pessoas afetadas (%)
A	Itaara	07/09/2009	17:00	4794	100
B	Lavras do Sul	07/09/2009	17:30	8015	33

(a)

	Cidade	Data	Horário (local)	População Total	Porcentagem de pessoas afetadas (%)
A	Engenho Velho	28/09/2009	03:00	1530	70
B	Constantina	28/09/2009	03:00	10191	79
C	São José das Missões	28/09/2009	03:00	3000	13
D	Tabaí	28/09/2009	05:00	4046	9

(b)

	Cidade	Data	Horário (local)	População Total	Porcentagem de pessoas afetadas (%)
A	Passo do Sobrado	14/10/2015	15:30	6011	5
B	Cachoeira do Sul	14/10/2015	16:00	83827	97
C	Sapucaia do Sul	14/10/2015	17:30	130988	17
D	Caraá	14/10/2015	17:45	7313	33
E	Santo Antônio da Patrulha	14/10/2015	17:45	39679	52
F	Taquara	14/10/2015	18:00	54656	8
G	Cacequi	14/10/2015	18:30	13685	100
H	Formigueiro	14/10/2015	20:00	7014	12
I	São Jerônimo	14/10/2015	20:30	22141	19

(c)

Fonte: Própria autora.

### 3.2 MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF)

Os modelos tentam representar a realidade através de simulações. Para tal, são utilizados modelos numéricos atmosféricos para entender o comportamento da atmosfera em eventos de granizo, utilizando para este tipo de evento, o modelo de mesoescala (SKAMAROCK et al., 2008). Esse modelo aplica espaçamentos de grade menores do que os utilizados em modelos globais, auxiliando em estudos do tempo em escala regional e/ou local, e ainda possibilitando a análise da evolução de sistemas de tempo de mesoescala, influência da topografia, etc (COSTA, 2003; SKAMAROCK et al., 2008).

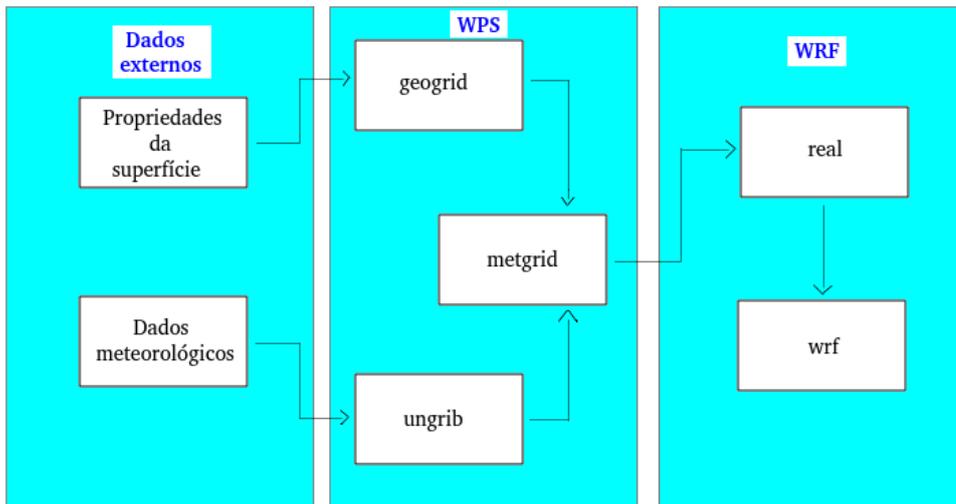
O modelo WRF é totalmente compressível, não hidrostático, com a opção hidrostática e pode ser rodado para simulações de alta resolução (LI, XF.; ZHANG; XUE, 2017). É um sistema de previsão numérica de mesoescala utilizado para aplicações de pesquisa atmosférica e previsão operacional. Ele serve para várias aplicações meteorológicas em escalas de dezenas de metros a milhares de quilômetros (SKAMAROCK et al., 2008). Pode ser utilizado para produzir simulações a partir de condições atmosféricas reais ou condições idealizadas, tendo como objetivo, aperfeiçoar o entendimento e a previsão de sistemas atmosféricos na mesoescala (WANG et al., 2017). Ele possui dois núcleos dinâmicos, o núcleo *Advanced Research WRF* (ARW), desenvolvido pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) e o núcleo *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM), desenvolvido pelo NCEP (SKAMAROCK et al., 2008).

Como em outros modelos, o WRF também não simula explicitamente processos de subgrade, pois é capaz de avaliar somente escalas horizontais superiores a duas vezes o espaçamento de grade horizontal (SKAMAROCK et al., 2008). Tenta-se resolver este problema através de parametrizações nos processos físicos que ocorrem em subgrade (COELHO, 2013). Há algumas possibilidades para cada um dos seguintes processos: radiação de onda longa, radiação de onda curta, microfísica de nuvens, camada superficial, cobertura do solo, Camada Limite Planetária e convecção (WANG et al., 2017).

Existem duas classes de simulações no WRF: com dados idealizados ou reais. As simulações idealizadas “fabricam” um arquivo que contém uma condição inicial para o modelo a partir de uma sondagem 1-D ou 2-D existente e ainda admitem uma orografia analítica simplificada (WANG et al., 2017). Em casos com dados reais, geralmente é necessário o pré-processamento do WPS para que cada campo atmosférico e estático tenha a sua resolução de grade ajustada para o modelo (WANG et al., 2017). Partindo disso, a modelagem da atmosfera (figura 3.1) inicia-se ao proporcionar os dados externos a ela, sendo as propriedades da superfície (topografia, uso do solo, etc.) e os dados meteorológicos que compõem as condições iniciais e de contorno necessárias para o modelo (COELHO, 2013; WANG et al., 2017).

Primeiramente, os dados são executados pelo WPS que ocorre em três etapas: define os domínios do modelo e interpola os dados geográficos estáticos às grades definidas

Figura 3.1 – Esquema mostrando os dados de entrada e as etapas para execução do WPS e as condições iniciais e de contorno para realizar a simulação numérica no WRF.



Fonte: Adaptado de Skamarock et al. (2008).

para a simulação (geogrid); extrai campos meteorológicos dos arquivos em formato GRIB2 (ungrib); e interpola horizontalmente os campos meteorológicos extraídos pelo ungrib para as grades definidas pelo geogrid (metgrid) (WANG et al., 2017; COELHO, 2013). Já a interpolação vertical dos campos meteorológicos é feita ao executar o "real", onde utiliza-se a coordenada vertical de pressão hidrostática seguindo o terreno ( $\eta$ ), sendo esta variável mais conhecida como coordenada sigma ( $\sigma$ ) (SKAMAROCK et al., 2008; OLIVEIRA, 2014).

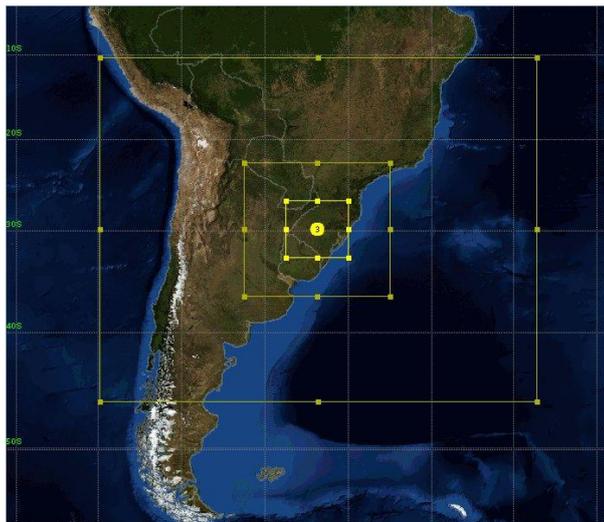
Como neste trabalho foi realizada a simulação baseada em um caso real, então utilizou-se os dados reais, fornecido pelo WPS como dados de entrada para o "real.exe", que foram gerados a partir de uma análise externa. E por fim, foi executado o "wrf.exe" que realiza a simulação numérica (WANG et al., 2017).

### 3.2.1 Simulação numérica

Foram realizadas três simulações numéricas dos casos que podem ser visualizados na tabela 3.1, empregando três domínios com escalas de grade de 27, 9 e 3 km (figura 3.2), com o centro no terceiro domínio (menor) localizado em Santa Maria – RS. A simulação continha 40 níveis  $\eta$  distribuídos em um sistema de coordenadas que segue a topografia, sendo o nível mais alto 50 hPa. Os dados de condição inicial e de contorno são do GFS-FNL com resolução espacial de 1 grau por 1 grau de latitude por longitude. Dessa forma, as simulações foram inicializadas aproximadamente 12 horas antes dos eventos. Os dados utilizados foram: das 00 Z do dia 7 às 00 Z do dia 8 de setembro de 2009; das 12 Z do dia 27 de setembro às 12 Z do dia 28 de setembro de 2009 e 00 Z do dia 14 de outubro às 00

Z do dia 15 de outubro de 2015. O modelo foi executado com as saídas sendo de 10 em 10 minutos para o domínio menor, de 3 km, com o intuito de observar melhor o Granizo Acumulado em Superfície (GAS) que no modelo é colocado em mm.

Figura 3.2 – Grades geradas pelo WRF Domain Wizard (NOAA, 2013) para serem utilizadas no modelo WRF, contendo a grade mãe 27 km, a intermediária 9 km e a menor 3 km, sendo o centro do domínio menor localizado em Santa Maria – RS



Fonte: Própria autora.

Para cada simulação foram realizados experimentos distintos empregando os esquemas de PMN e PCC, mantendo-se constante os outros esquemas de parametrizações físicas, o que totaliza oito simulações como pode ser visto na Tabela 3.2. Após ajustar as parametrizações e inicialmente com uma dificuldade computacional, cada simulação levou entre um dia / um dia e meio em um computador comum. Ao iniciar o uso de um supercomputador, levavam entre 12 e 16 horas. Esses experimentos servem para identificar quais deles reproduzem melhor os fenômenos de granizo que foram relatados pela SEDEC, mostrando sua importância principalmente na interpretação dos resultados. Salienta-se que dois experimentos *Hebrew University of Jerusalem-Israel (HUJI)* (HUJI - BMJ e HUJI - KF) pararam de ser executados repentinamente, não obtendo nenhum resultado. Durante a rodada surgiu o aviso: *Warming FULL SBM, QAA < 0*. Trata-se de um erro associado à microfísica (SBM - *Spectra - Bin Microphysics*) e que ocorre provavelmente devido a umidade específica na atmosfera (QAA) ficar negativa. Também por se tratar de *Bin Microphysics*, a simulação passa a ser pesada computacionalmente. Logo, estas duas simulações foram descartadas do restante das análises. Os experimentos de PMN e PCC utilizados são descritos rapidamente a seguir.

Tabela 3.2 – Experimentos realizados com as PMN e PCC empregadas nas simulações com o modelo WRF.

Experimentos	PMN	PCC
Exp1	MY2	BMJ
Exp2	MY2	KF
Exp3	NSSL1	BMJ
Exp4	NSSL1	KF
Exp5	NSSL2	BMJ
Exp6	NSSL2	KF
Exp7	NSSL2 + CCN	BMJ
Exp8	NSSL2 + CCN	KF

Fonte: Própria autora.

### 3.2.2 Parametrização de Microfísica de Nuvens

O propósito de se desenvolver as PMNs é de representar a partir de aproximações as mudanças que os hidrometeoros sofrem, como por exemplo, os processos de condensação, evaporação, colisão-coalescência de gotas, deposição de vapor sobre cristais de gelo, entre outros (COSTA, 2003; STENSRUD, 2009). Para isso, esses esquemas são encontrados em duas grandes classes nos modelos atmosféricos, tipo "bin", que possuem esquemas mais detalhados e do tipo "bulk", que possuem esquemas de volume (STENSRUD, 2009). Com o tipo "bin" define estatisticamente a distribuição de tamanhos dos hidrometeoros, torna-se mais caro computacionalmente, exigindo um maior número de cálculos e prejudicando seu uso como modelo operacional. O tipo "bulk" é determinado a partir de curvas pré-estabelecidas de espectro da distribuição de tamanhos de cada tipo de hidrometeoros, facilitando o uso nos modelos operacionais (STENSRUD, 2009).

O tipo "bulk" pode ser dividido em momento simples, onde prevê-se apenas a razão de mistura e em momento duplo, que além de calcular a razão de mistura, prevê-se a concentração de hidrometeoros (MILBRANDT; YAU, 2005; STENSRUD, 2009). O primeiro esquema se torna pior que o último, pois depende de diferentes parametrizações para realizar uma simulação melhor considerando a estrutura dos hidrometeoros em sistemas convectivos organizados. No último esquema, são necessários menos pré-especificações dos parâmetros relacionados às concentrações de hidrometeoros, havendo um melhor desempenho nas parametrizações de microfísica advindas das condições atmosféricas (MILBRANDT; YAU, 2005; STENSRUD, 2009).

As PMN utilizadas no trabalho são do tipo "bulk" e serão descritas abaixo:

- a) *Milbrandt-Yau Double-Moment* (MY2): prevê a razão de mistura e a concentração numérica para as seis categorias de hidrometeoros, sendo água de nuvem, chuva, gelo de nuvem, neve, graupel e granizo. Este esquema coloca graupel e

granizo separados, sendo importante na simulação, pois o graupel que é transportado para a região das correntes ascendentes, continua a crescer pela coleta de água líquida super-resfriada até chegar ao tamanho de granizo (LI, M. et al., 2017). Com as versões mais novas do modelo WRF, inclui-se os processos de conversão do gelo à neve e do graupel ao granizo, melhorando nas simulações as regiões de chuvas estratiformes e a estrutura geral da refletividade em linhas de instabilidade (MILBRANDT; YAU, 2005; LI, M. et al., 2017);

- b) *National Severe Storms Laboratory Single-Moment* (NSSL1): utiliza um tratamento explícito de convecção (sem esquema convectivo), ou seja, a PMN atua para gerar a convecção, pois para simulações com espaçamento horizontal menor que 9 km, a PCC não funciona. Esse esquema prevê apenas a razão de mistura dos seis tipos de hidrometeoros, como água de nuvem, chuva, gelo de nuvem, neve, graupel e granizo (MANSELL; ZIEGLER; BRUNING, 2010);
- c) *National Severe Storms Laboratory Double-Moment* (NSSL2): também utiliza um tratamento explícito da convecção (MANSELL; ZIEGLER; BRUNING, 2010; LI, XF.; ZHANG; XUE, 2017). Como o esquema anterior, além de prever a razão de mistura, também prevê a massa e concentração numérica dos hidrometeoros na fase líquida e gelo. Isso permite que o graupel abranja a faixa de gotas congeladas até o graupel de baixa densidade;
- d) *National Severe Storms Laboratory Double-Moment with CCN (Cloud Condensation Nuclei) Prediction* (NSSL2 + CCN): praticamente igual a NSSL2, essa parametrização prevê ainda a concentração em massa dos núcleos de condensação de nuvem, bem como as densidades médias de graupel e granizo, tanto nas nuvens quanto na superfície (MANSELL; ZIEGLER; BRUNING, 2010; LI, XF.; ZHANG; XUE, 2017).

### 3.2.3 Parametrização de Convecção Cumulus

As parametrizações convectivas utilizadas no modelo WRF servem para resolver a influência da convecção profunda na grande escala, fornecendo a componente convectiva da precipitação em superfície. Elas teoricamente funcionam em tamanhos de grade maiores que 10 km, pois assim liberam com eficiência o calor latente para o modelo (STENSRUD, 2009; SKAMAROCK et al., 2008). Porém, quando a escala de grade for menor que 9 km, a precipitação será indicada apenas explicitamente com o uso do esquema de microfísica do modelo (LACKMANN, 2011). Sendo assim, neste trabalho a simulação da PCC foi ativada somente nas escalas de grade de 27 e 9 km, e desativada em 3 km.

A reprodução desses processos convectivos pode ser feita de forma direta, como em KF ou indireta como em BMJ, que utiliza um ajuste convectivo (OLIVEIRA, 2014). Os esquemas de KF e BMJ foram utilizadas nas simulações e serão descritos a seguir, salientando que o melhor esquema para representar convecção severa é a KF:

- a) *Betts-Miller-Janjic* (BMJ) (JANJIC, 1994): contém uma formulação tanto para convecção profunda quanto rasa. Este esquema foi projetado para ajustar a temperatura e a umidade da atmosfera para uma estrutura termodinâmica equilibrada em relação aos processos radiativos e advectivos (JANJIC, 1994). Para ocorrer a produção de precipitação, deve-se haver a redução de umidade ao longo do perfil bem misturado e estando proporcional ao aquecimento latente (STENSRUD, 2009; OLIVEIRA, 2014; WANG et al., 2017).
- b) *Kain-Fritsch* (KF) (KAIN, 2004): utiliza um modelo unidimensional onde ocorre entranhamento e desentranhamento ao longo da extensão vertical da nuvem, com o auxílio de correntes ascendentes e descendentes e fluxo de massa do ambiente, fazendo com que 90 % do *Convective Available Potential Energy* (CAPE) seja removido no tempo de relaxamento. Também são considerados os efeitos de cisalhamento no rendimento da precipitação (SKAMAROCK et al., 2008; OLIVEIRA, 2014; SANTOS, 2014).

### 3.3 TABELA DE CONTINGÊNCIA

Ao se analisar eventos muito locais, a aplicação da tabela de contingência torna-se uma maneira de tentar verificar os erros da simulação. Neste caso, foi empregada a tabela 2 x 2 para cada experimento utilizando a escala de grade com domínio de 3 km. Para tal, foram relacionados os pontos de grade que tiveram GAS no fim da simulação (acumulado das 24 h) com os pontos de grade da observação feita pelos relatórios da SEDEC (tabela 3.3) para cada caso, totalizando 31136 pontos de grade sobre o RS, porém descontando desse total os pontos de grade dos municípios afetados delimitados por uma área retangular. Ou seja, foi realizada uma comparação entre os pontos de grade simulação / observação na área retangular de cada município que observou-se GAS ou não. A partir disso, na tabela 3.4 tem-se um exemplo da tabela de contingência utilizada no trabalho. Sendo "a" referente ao registro de granizo pelo SEDEC nas cidades e pelo GAS na simulação simultaneamente, "b" representa o granizo que não foi relatado pela SEDEC, mas o GAS foi detectado pela simulação, "c" refere-se ao granizo relatado pela SEDEC nas cidades, mas não indicado pela simulação e por fim, "d" representa o granizo que não foi relatado pela SEDEC nem colocado pela simulação (WILKS, 2006; COELHO, 2013; OLIVEIRA, 2014).

Tabela 3.3 – A tabela mostra o par dos pontos de grade das cidades que tiveram observação de granizo com o GAS colocado pela simulação no total de cada caso e experimentos: (a) Caso 1, (b) Caso 2 e (c) Caso 3. "n" é definido como o total de pontos de grade sobre o RS.

<b>Caso 1</b>	<b>Observação</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Observação</b>
<b>Simulação</b>	257	<b>Simulação</b>	111
<b>Total</b>	n = 31136	<b>Total</b>	n = 31136

(a)

(b)

<b>Caso 3</b>	<b>Observação</b>
<b>Simulação</b>	783
<b>Total</b>	n = 31136

(c)

Fonte: Própria autora.

Tabela 3.4 – Exemplo de tabela de contingência, a qual é utilizada para analisar o GAS através dos experimentos de cada simulação e a observação de granizo relatado pela SEDEC. As letras a, b, c e d foram descritas anteriormente.

Experimento	Observação		Total
	Sim	Não	
Sim	a	b	a + b
Não	c	d	c + d
Total	a + c	b + d	n = a + b + c + d

Fonte: Adaptada de Wilks (2006).

Partindo da tabela, são calculados os seguintes índices estatísticos:

(i) *Probability of detection* (Probabilidade de Detecção, PD):

$$PD = \frac{a}{a + c} \quad (3.1)$$

A probabilidade de detecção indica a fração de todos os registros de granizo da SEDEC que foram detectados pela simulação via GAS. Em uma simulação "ideal" o PD seria igual a 1,0, porém quando for menor que 1,0, mostra que a simulação não representou todos os relatos da SEDEC (WILKS, 2006). Calculado pela equação 3.1;

(ii) *Gilbert Skill Score* (GSS):

$$a_{ref} = \frac{(a + b) * (a + c)}{n} \quad (3.2)$$

$$GSS = \frac{a - a_{ref}}{a - a_{ref} + b + c} \quad (3.3)$$

É chamada por Gilbert como proporção de sucesso, pois analisa a fração de granizo relatado pela SEDEC e / ou o GAS detectado pela simulação, sendo ajustados para acertos esperados por acaso. O GSS varia entre -1/3 a 1,0, onde o índice igual a 1,0 representa uma simulação "ideal" e menor ou igual a 0,0 que a simulação não indicou o GAS (WILKS, 2006). Calculado pelas equações 3.2 e 3.3;

(iii) *Bias* (Viés, V):

$$V = \frac{a + b}{a + c} \quad (3.4)$$

É a proporção entre o que a simulação indicou de GAS corretamente e o que foi registrado pela SEDEC. Para tal, se o índice for maior que 1,0, o granizo estará sendo superestimado pelo modelo e menor que 1,0 subestimado (WILKS, 2006). Ele é calculado pela equação 3.4;

(iv) *False Alarm Ratio* (Razão de Alarme Falso, RAF):

$$RAF = \frac{b}{a + b} \quad (3.5)$$

A RAF basicamente é a proporção entre o que a simulação gerou de GAS, mas que não foi relatado pela SEDEC. Se for próximo de 1,0, indica que a simulação não gerou GAS como foi relatado e com RAF igual a 0,0 seria uma simulação "ideal", conforme a equação 3.5 (WILKS, 2006).



## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 LEVANTAMENTO DOS RELATÓRIOS DE AVALIAÇÃO DE DANOS DE GRANIZO DA SECRETARIA NACIONAL DE DEFESA CIVIL - SEDEC**

Analisando a tabela 4.1, pode-se observar que dentre os oito anos de relatórios levantados, o ano de 2015 foi o que teve um maior número de relatos pela SEDEC, somando 75 casos, sendo 50 no mês de outubro. Já em 2012 foi relatado apenas 8 eventos, sendo definido como o ano que teve menos relatos de ocorrência de granizo. Nota-se que os meses de mais frequência desse fenômeno foram setembro, outubro e novembro, período da primavera, com 49, 91 e 34 relatos de granizo, respectivamente.

Tabela 4.1 – Levantamento dos relatórios de danos de granizo entre os anos 2009 a 2016, contendo as cidades, data, horário local, população total e porcentagem de pessoas afetadas.

Cidade	Data	Horário (local)	População Total	Porcentagem de pessoas afetadas (%)
Salto do Jacuí	08/01/2009	19:00	12154	100
União da Serra	08/01/2009	20:30	1666	25
Muçum	08/01/2009	21:00	4723	1
Nova Bassano	08/01/2009	21:00	8683	29
Doutor Ricardo	08/01/2009	22:00	2053	27
Riozinho	11/01/2009	14:00	4406	74
São Francisco de Paula	11/01/2009	16:10	21278	1
Fontoura Xavier	02/02/09	16:00	11064	5
Barros Cassal	02/02/09	17:30	11450	22
Getúlio Vargas	05/02/2009	09:00	15785	4
São Valentim	18/08/2009	17:00	3919	5
Florianópolis	19/08/2009	18:30	2145	37
Porto Xavier	07/09/2009	08:30	11145	3
Itaara	07/09/2009	17:00	4794	100
Lavras do Sul	07/09/2009	17:30	8015	33
Santana da Boa Vista	26/09/2009	21:30	8636	51
Venâncio Aires	26/09/2009	00:00	64442	4
Santa Cruz do sul	27/09/2009	00:30	118287	2
Lagoa Bonita do Sul	27/09/09	03:00	2616	23
Herval	27/09/2009	09:00	6873	73
Vera Cruz	27/09/2009	10:00	115927	11
Engenho Velho	28/09/2009	03:00	1530	70
Constantina	28/09/2009	03:00	10191	79
São José das Missões	28/09/2009	03:00	3000	13
Tabaí	28/09/2009	05:00	4046	9
Mato Leitão	28/09/2009	09:00	3583	26
Cruzeiro do Sul	28/09/2009	10:00	12171	2
Três Palmeiras	28/09/2009	11:30	4388	6
Sagrada Família	28/09/2009	14:00	2595	18
Soledade	05/10/2009	02:00	29927	0
Candelária	05/10/2009	17:00	30369	1
Alto Alegre	05/10/09	21:20	1940	57
Selbach	05/10/09	21:30	4779	7
Espumoso	05/10/2009	21:40	14991	44
Tio Hugo	05/10/2009	22:00	2593	39
Ibirapuitã	05/10/2009	22:45	4182	34
Cerro Branco	06/10/2009	10:30	4465	12
Farroupilha	06/10/2009	19:30	63375	6
Feliz	13/11/2009	14:00	11679	62
Linha Nova	13/11/2009	14:30	1488	41
Rodeio Bonito	25/01/2010	18:30	5698	6
Maximiliano de Almeida	05/03/2010	16:55	5078	14
Viadutos	05/03/2010	17:00	5728	2
Caxias do Sul	15/11/2010	14:30	435482	1

Continua na próxima página...

continuação...

Muitos Capões	15/11/2010	14:30	3104	16
Floriano Peixoto	15/11/2010	15:00	2018	71
São Marcos	15/11/2010	15:30	19641	10
Fontoura Xavier	15/11/2010	17:00	11074	7
Salto do Jacuí	15/11/2010	18:10	11880	1
Santo Antônio da Patrulha	15/11/2010	18:15	39310	0
Roca Sales	28/11/2010	14:00	10280	5
Áurea	01/12/2010	17:45	3658	5
Centenário	01/12/2010	18:00	3026	69
Itaara	02/12/2010	17:00	5011	3
Herval	09/01/2011	20:00	6757	3
Jaguarão	09/01/2011	20:00	27942	72
Chiapetta	05/04/2011	05:40	4044	98
Alegria	05/04/2011	05:50	4301	15
Santo Augusto	05/04/2011	06:00	13970	24
Palmitinho	05/04/2011	06:45	6941	4
Caiçara	05/04/2011	07:00	5071	3
Taquari	08/04/2011	18:30	26135	0
Espumoso	08/04/2011	20:00	15240	8
Piratini	22/04/2011	18:00	19831	9
Catuípe	29/07/2011	18:30	9323	13
Frederico Westphalen	08/08/2011	22:35	28843	7
Coqueiros do Sul	28/08/2011	23:00	2457	10
Coxilha	28/08/2011	23:50	2826	12
Sananduva	29/08/2011	02:00	15359	12
Vacaria	29/08/2011	15:30	61342	1
Barão do Triunfo	25/10/2011	19:00	7018	4
Liberato Salzano	29/11/2011	04:30	5780	5
Venâncio Aires	14/12/2011	18:00	65964	4
Triunfo	14/12/2011	18:47	25811	14
Fazenda Vilanova	14/12/2011	19:00	3697	46
São Jerônimo	14/12/2011	19:00	22134	48
Flores da Cunha	14/12/2011	21:00	27391	7
Caxias do Sul	14/12/2011	22:30	435564	0
General Câmara	15/12/2011	19:00	8425	17
Nova Roma do Sul	16/12/2011	17:30	3343	11
Santa Rosa	08/01/2012	18:30	68587	9
Nova Ramada	18/09/2012	20:30	2437	49
Salto do Jacuí	30/09/2012	19:30	11992	5
São José do Herval	30/09/2012	21:00	2204	5
Putinga	30/09/2012	21:15	4147	6
Fontoura Xavier	01/10/2012	22:00	10719	9
Nova Candelária	26/10/2012	07:20	2751	62
Sede Nova	26/10/2012	07:30	3011	25
Arroio do Padre	01/02/2013	18:00	2730	26

Continua na próxima página...

continuação...

Hulha Negra	02/04/2013	22:30	6048	20
Encruzilhada do Sul	02/05/2013	18:00	24537	1
Aceguá	03/05/2013	07:20	4394	25
Hulha Negra	03/05/2013	08:45	6048	27
Barão do Triunfo	28/05/2013	16:30	7018	4
São Jerônimo	29/05/2013	11:02	22141	3
Santo Antônio do Palma	20/09/2013	21:00	2139	26
Boa Vista das Missões	20/09/2013	21:30	2114	13
Rio do Índios	20/09/2013	23:45	3616	7
Nonoai	21/09/2013	00:20	12076	41
São José do Ouro	21/09/2013	06:10	6906	1
Barracão	21/09/2013	06:30	5355	2
Tenente Portela	03/10/2013	15:00	13716	4
Redentora	03/10/2013	15:30	10222	4
Novo Barreiro	03/10/2013	16:00	3978	15
Rio Pardo	04/10/2013	14:30	37602	0
Triunfo	04/10/2013	17:30	25811	1
Charqueadas	23/10/2013	17:35	35363	0
Manoel Viana	23/10/2013	18:00	7074	0
Coqueiro Baixo	10/11/2013	09:30	1528	25
Vera Cruz	10/11/2013	15:00	23986	40
Segredo	10/11/2013	17:00	7158	45
Lajeado	10/11/2013	19:00	76187	0
Tunas	10/11/2013	19:00	4395	3
Relvado	10/11/2013	19:30	2155	100
Santa Tereza	10/11/2013	20:00	1717	0
Pinto Bandeira	10/11/2013	20:30	2681	0
Nova Bréscia	10/11/2013	20:30	3184	0
Boqueirão do Leão	10/11/2013	20:30	7673	78
Doutor Ricardo	10/11/2013	21:00	2030	0
Monte Belo do Sul	10/11/2013	21:00	2670	0
Bento Gonçalves	10/11/2013	21:00	111384	1
Fontoura Xavier	10/11/2013	22:30	10712	37
Putinga	10/11/2013	23:00	4147	7
Arvorezinha	10/11/2013	23:00	10229	30
Ilópolis	10/11/2013	23:15	4098	9
Vila Flores	10/11/2013	23:30	3341	2
Santa Cruz do Sul	11/11/2013	01:00	118287	13
Passo do Sobrado	11/11/2013	02:00	6011	100
Rio Pardo	11/11/2013	08:30	37602	48
David Canabarro	05/12/2013	01:00	4834	0
São Lourenço do Sul	05/12/2013	03:00	44498	11
Cidreira	05/12/2013	03:30	12654	0
Balneário Pinhal	05/12/2013	03:30	10855	0
Palmare do Sul	05/12/2013	03:40	10971	0

Continua na próxima página...

continuação...

Estrela Velha	13/12/2013	15:30	3628	0
Santo Expedito do Sul	01/02/2014	15:00	2461	3
Cachoeirinha	01/02/2014	18:00	118294	0
Alvorada	01/02/2014	18:00	195718	5
Salvador do Sul	08/02/2014	19:00	6747	0
Gravataí	15/05/2014	18:00	255762	0
Cachoeirinha	15/05/2014	18:00	118294	1
Marques de Souza	04/06/2014	18:45	4068	15
Restinga Seca	02/07/2014	20:45	15850	0
Sobradinho	03/07/2014	20:35	14285	0
Santa Cruz do Sul	30/08/2014	23:10	118287	0
Sério	30/08/2014	23:45	2281	83
Vila Maria	31/08/2014	01:30	4221	10
Soledade	02/09/2014	06:00	30065	1
Getúlio Vargas	02/09/2014	12:30	16156	0
São Lourenço do Sul	20/09/2014	18:20	43114	0
Palmeira das Missões	13/10/2014	14:45	34335	15
Eldorado do Sul	16/10/2014	02:00	34335	10
Santo Ângelo	17/10/2014		76285	10
Rosário do Sul	17/10/2014	01:40	40798	49
Cerro Grande do Sul	17/10/2014	02:30	10280	3
Camaquã	17/10/2014	03:15	62759	2
Pinha Grande	25/11/2014	01:00	4471	10
Pedro Osório	09/12/2014	18:35	7817	0
Capão do Cipó	21/02/2015	21:15	3107	14
Vanini	22/06/2015	16:30	1984	11
Frederico Westphalen	12/07/2015	22:45	30409	2
Porto Vera Cruz	14/07/2015	00:20	1852	1
Boqueirão do Leão	26/08/2015	00:00	7673	1
Santa Maria do Herval	10/09/2015	00:00	6053	3
Sarandi	16/09/2015	00:00	22632	6
Novo Hamburgo	17/09/2015	00:00	239051	0
Salvador do Sul	17/09/2015	00:00	6747	0
Sananduva	17/09/2015	00:00	15373	0
São José do Ouro	17/09/2015	00:00	6906	1
Barracão	17/09/2015	00:00	5355	1
Parobé	17/09/2015	00:00	51481	0
Getúlio Vargas	17/09/2015	00:00	16156	2
Taquara	17/09/2015	00:00	54656	4
Santa Cruz do Sul	17/09/2015	11:45	118287	0
Estação	17/09/2015	16:00	6011	1
Campinas do Sul	17/09/2015	18:00	5506	4
Arroio do Sal	17/09/2015	20:00	7744	4
Itapuca	19/09/2015	10:00	2337	27
Rio Pardo	19/09/2015	15:00	37602	3

Continua na próxima página...

continuação...

Rio Grande	21/09/2015	20:30	197253	30
Cambará do Sul	24/09/2015	17:00	6545	30
Vacaria	24/09/2015	18:00	61345	1
Vacaria	02/10/2015	23:30	61345	0
Jóia	08/10/2015	00:05	8331	0
Itaqui	08/10/2015	00:30	38166	2
Júlio de Castilhos	08/10/2015	04:00	20056	2
Miraguaí	08/10/2015	16:00	4855	47
Redentora	08/10/2015	16:00	10222	20
Santiago	13/10/2015	09:00	49082	10
Travesseiro	14/10/2015	01:30	2314	4
São Sepé	14/10/2015	02:00	23798	0
Passo do Sobrado	14/10/2015	15:30	6011	5
Cachoeira do Sul	14/10/2015	16:00	83827	97
Sapucaia do Sul	14/10/2015	17:30	130988	17
Caraá	14/10/2015	17:45	7313	33
Santo Antônio da Patrulha	14/10/2015	17:45	39679	52
Taquara	14/10/2015	18:00	54656	8
Cacequi	14/10/2015	18:30	13685	100
Formigueiro	14/10/2015	20:00	7014	12
São Jerônimo	14/10/2015	20:30	22141	19
General Câmara	14/10/2015	21:00	8452	0
Rio Pardo	14/10/2015	21:30	37602	17
Cachoeirinha	14/10/2015	22:00	118294	0
Arroio dos Ratos	14/10/2015	22:00	13608	2
Arroio do Tigre	14/10/2015	22:00	12648	100
Charqueadas	14/10/2015	22:30	35363	0
Candelária	14/10/2015	22:30	30176	8
Canoas	14/10/2015	22:30	341343	100
Nova Santa Rita	14/10/2015	23:00	22706	15
Sinimbu	15/10/2015	00:15	10164	3
Santa Clara do Sul	15/10/2015	00:30	5692	26
Capitão	15/10/2015	01:30	2741	2
São Francisco de Paula	15/10/2015	01:30	20540	16
Restinga Seca	15/10/2015	04:00	15850	2
Vera Cruz	15/10/2015	03:00	25700	6
Arvorezinha	21/10/2015	00:00	10229	5
Putinga	21/10/2015	00:10	4147	85
Nova Bréscia	21/10/2015	00:25	3184	13
Ilópolis	21/10/2015	00:30	4098	5
Relvado	21/10/2015	00:30	2155	23
Imigrante	21/10/2015	00:30	3025	31
Encantado	21/10/2015	00:30	20514	12
Roca Sales	21/10/2015	01:30	10287	8
São Marcos	21/10/2015	02:30	20105	2

Continua na próxima página...

continuação...

Venâncio Aires	21/10/2015	16:30	65964	5
Agudo	21/10/2015	17:40	16729	0
Unistalda	21/10/2015	17:40	2453	33
André da Rocha	21/10/2015	17:45	1216	5
Paraíso do Sul	21/10/2015	18:00	7336	3
Santiago	21/10/2015	18:10	49082	43
Progresso	21/10/2015	20:50	6161	61
Antônio Prado	28/10/2015	00:01	12837	6
Floriano Peixoto	21/12/2015	17:00	2018	50
Soledade	10/07/2016	23:10	30065	7
Minas do Leão	11/07/2016	00:15	7631	59
Viamão	11/07/2016	01:30	239234	1
Ibirubá	11/07/2016	17:00	19312	1
Vila Lângaro	11/07/2016	19:30	2062	33
Arvorezinha	11/07/2016	23:30	10229	2
Coxilha	13/07/2016	17:15	2826	1
Victor Graeff	13/07/2016	19:00	3036	0
Não-Me-Toque	13/07/2016	19:30	15938	3
Água Santa	13/07/2016	20:00	3726	8
Igrejinha	14/07/2016	06:18	31663	27
Santa Cruz do Sul	14/07/2016	07:00	118287	0
Mampituba	14/07/2016	08:30	2997	25
Lavras do Sul	15/08/2016	16:30	7669	1
Caçapava do Sul	15/08/2016	17:30	33700	1
Vacaria	05/10/2016	06:00	61345	0
Tuparendi	05/10/2016	14:00	8557	12
Bom Progresso	05/10/2016	15:30	2328	23
Miraguaí	05/10/2016	15:30	4855	23
Tenente Portela	05/10/2016	15:30	13716	16
Nova Bassano	16/10/2016	16:00	8840	14
Não-Me-Toque	16/10/2016	18:30	15938	0
Liberato Salzano	18/10/2016	03:00	5780	62
Ajuricaba	19/10/2016	06:00	7255	0
Catuípe	20/10/2016	05:30	9323	21
Vila Maria	24/10/2016	15:30	4221	60
Roque Gonzales	24/10/2016	16:30	7206	0
Ciríaco	24/10/2016	17:00	4922	7
Candelária	24/10/2016	18:30	30176	3
Jari	31/10/2016	23:00	3575	13
São José das Missões	01/11/2016	03:30	2720	70

Fonte: Própria autora.

#### 4.2 ANÁLISE SINÓTICA E IMAGEM DE SATÉLITE DOS CASOS DE GRANIZO

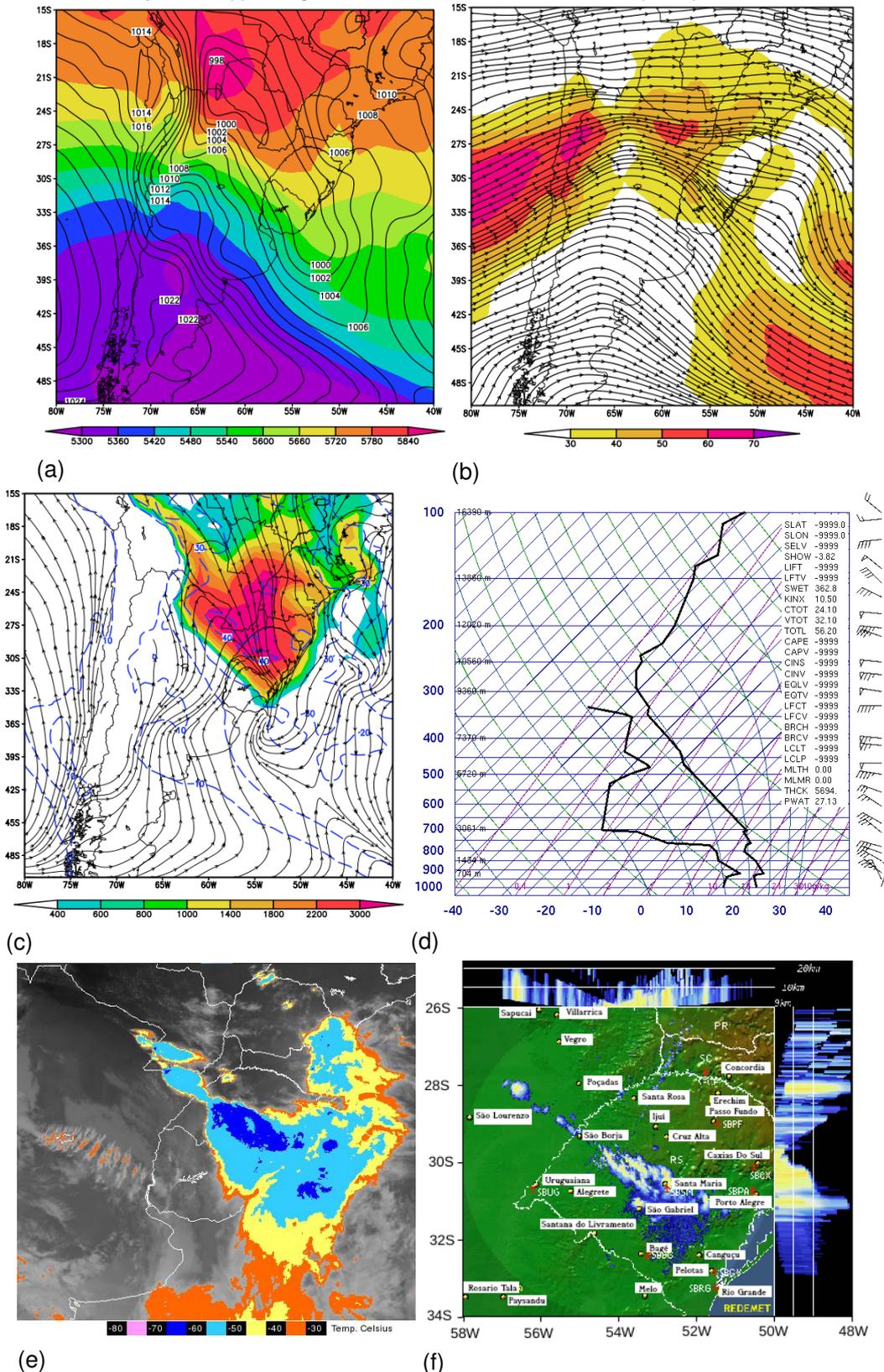
Analisando o evento do dia 7 de setembro de 2009, pode-se observar que na figura 4.2 a, no campo de PRNMM, tem-se uma área de baixa pressão sobre o Paraguai que se estende para o RS, deixando essa região muito instável. A espessura da camada 1000 – 500 *hPa* (figura 4.2 a), mostra a presença de um gradiente de espessura entre a Argentina e o Brasil / Paraguai indicando uma região de baroclinia, isto é, um gradiente horizontal de temperatura apontando para o nordeste com a existência de ar frio e quente. Para o campo de magnitude do vento em altos níveis (figura 4.2 b), observa-se um cavado de grande escala sobre a Argentina e a presença de uma ciclogênese que causa uma difluência no escoamento sobre o RS. O campo de CAPE mostra valores acima de 2000 *J*

$J / kg$  no Paraguai e RS (figura 4.2 c), enquanto o escoamento em 850 hPa indica a presença do Jato de Baixos Níveis, onde o movimento de noroeste da bacia amazônica trás calor e umidade à região sul do Brasil, intensificando a instabilidade da atmosfera (figura 4.2 c). Com base no perfil termodinâmico (figura 4.2 d), os índices favoráveis à atividade convectiva são Showalter (valor de -3,82), Índice de Instabilidade por Levantamento (valor de -4), Total Totais (valor acima de 50) e Sweat (valor de 362,5). O índice K não estava favorável para convecção, pois indicava um valor de 12. Ainda nota-se que a altura do nível de congelamento é baixa, aproximadamente 600 hPa, o que auxilia a manter o tamanho do granizo ao cair para o solo. Pela imagem de satélite (figura 4.2 e) observa-se nuvens de topos frios, que indicam forte convecção sobre o centro / sul do estado se estendendo para o oceano. Consequência de uma massa de ar quente e úmida que deixou a atmosfera muito instável, conforme pode ser observado pelos índices, favorecendo a ocorrência de tempestades severas geradas por um SCM que conseqüentemente gerou uma linha de instabilidade podendo ser visto pela imagem de radar (figura 4.2 f) mostrando uma alta refletividade e que auxiliou na produção de granizo grande em pelo menos dois municípios do RS, sendo a imagem de radar do relato de granizo em Itaara e a outra cidade colocada em Anexo A na figura A.1.

Para o dia 28 de setembro de 2009, pode-se notar que no campo de PRNMM na figura 4.3 a, tem-se uma área de baixa pressão sobre o Paraguai que se estende para o norte do RS, com forte baroclinia no Paraguai e a noroeste dele (figura 4.3 a), avançando para nordeste mais tarde (figura 4.3 d) e instabilizando a atmosfera. Em 200 hPa, o escoamento é quase zonal e o RS encontra-se sobre a região do núcleo do jato (figuras 4.3 b-d), não havendo uma influência significativa que force o levantamento através das circulações transversais. Em 850 hPa, há uma forte confluência entre o escoamento de norte e de sul sobre o Paraguai e RS como pode ser visto nas figuras 4.3 c-f. O CAPE mostra valores acima de 2000  $J / kg$  e a água precipitável com valores entre 30 e 40 mm sobre o RS (figura 4.3 f). A forte confluência no norte do estado e associado ao CAPE e água precipitável elevados representam o avanço de uma frente fria sobre o estado que está sobre a atuação de uma massa de ar quente e úmida. Pelo perfil termodinâmico (figura 4.2 g), os índices favoráveis à atividade convectiva são Showalter (valor de -0,59), Índice de Instabilidade por Levantamento (valor de -1), k (valor de 36) e Total Totais (valor de 45,80). O índice Sweat é menos favorável que os demais para convecção, pois indicava um valor de 266,82. Ainda nota-se que a altura do nível de congelamento é baixa, auxiliando a manter o tamanho do granizo ao cair para o solo. Nas figuras 4.3 h-i, as regiões com nuvens de topos frios vistas pela imagem de satélite, encontram-se sobre o RS e SC, indicando uma região de forte convecção, coincidindo com o gradiente de espessura e CAPE das figuras 4.3 d-f. A tempestade severa para esse caso ficou localizada na faixa leste/norte do RS e foi suficiente para causar danos com granizo grande em pelo menos 4 cidades produzido por uma tempestade com células isoladas conforme observado na imagem de

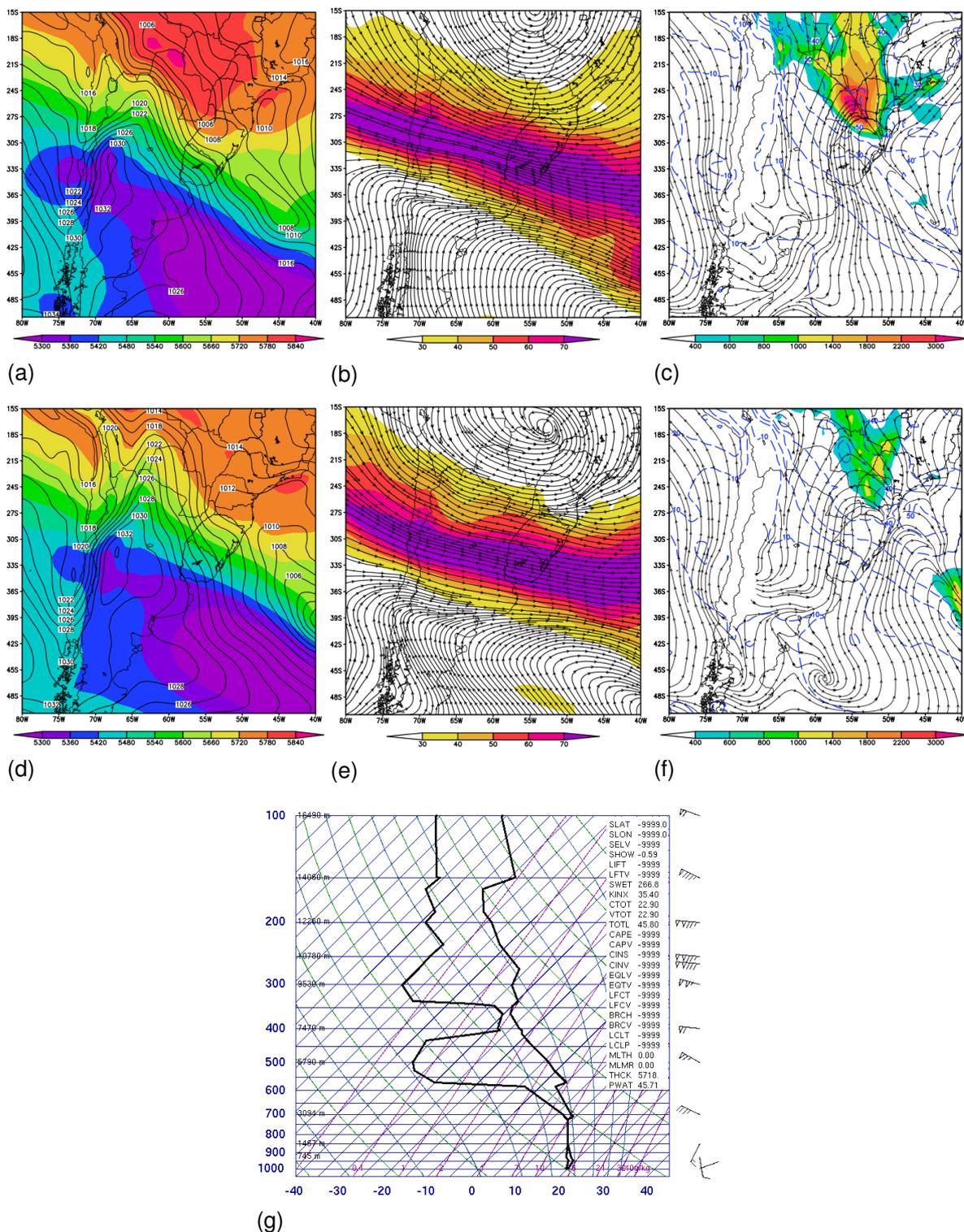
radar na figura 4.3 j. Nessa imagem de radar mostra o evento que atingiu Engenho Velho, Constantina e São José das Missões.

Figura 4.2 – Campos meteorológicos para o evento do dia 7 de setembro de 2009 às 18 UTC, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) PRNMM (linha preta, 2 hPa) e espessura de 1000 – 500 hPa (colorido, 60 m); (b) linhas de corrente (preto) e magnitude do vento (colorido, a cada 10 m / s acima de 30 m / s) em 200 hPa; (c) linhas de corrente em 850 hPa (preto), água precipitável (azul tracejada, 10 mm) e CAPE (colorido, acima de 400 J / kg); (d) perfil termodinâmico das 12 UTC; (e) imagem de satélite do GOES-10 do infravermelho realçado e (f) imagem de radar de refletividade (dBZ) às 20 UTC.



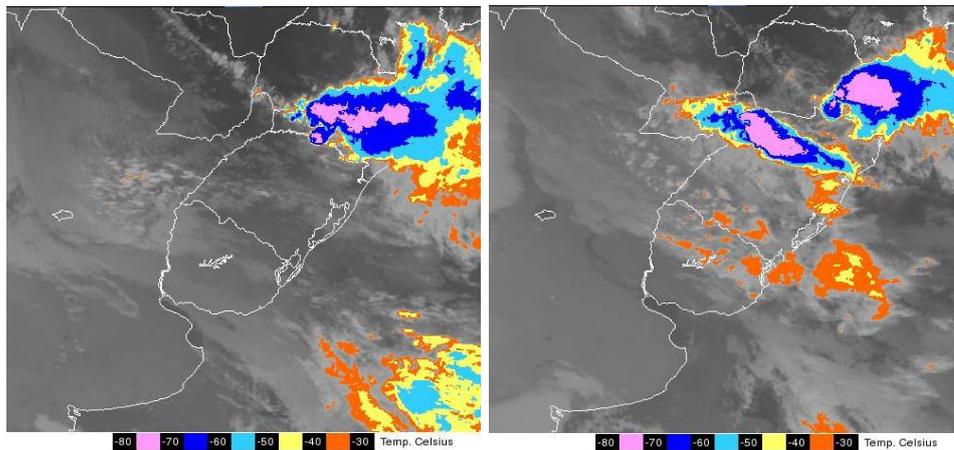
Fonte: A autora, perfil termodinâmico da *University Wyoming*, imagens de satélite do CPTEC e radar do REDEMET.

Figura 4.3 – Mesmo que a figura 4.2, mas para o evento do dia 28 de setembro de 2009, contendo os horários das 00 e 12 UTC nos campos meteorológicos (a-b-c-d-e-f), perfil termodinâmico às 00 UTC (g), imagem de satélite do GOES-10 do infravermelho realçado às 00 UTC (h) e 06 UTC (i) e imagem de radar de refletividade (dBZ) às 06 UTC (j). Sendo (a-d) PRNMM e espessura entre 1000 – 500  $hPa$ ; (b-e) linhas de corrente e magnitude do vento; (c-f) linhas de corrente, água precipitável e CAPE.



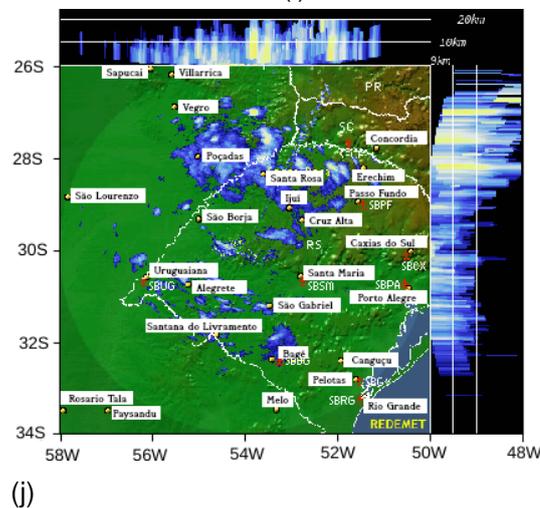
Continua na próxima página...

continuação...



(h)

(i)



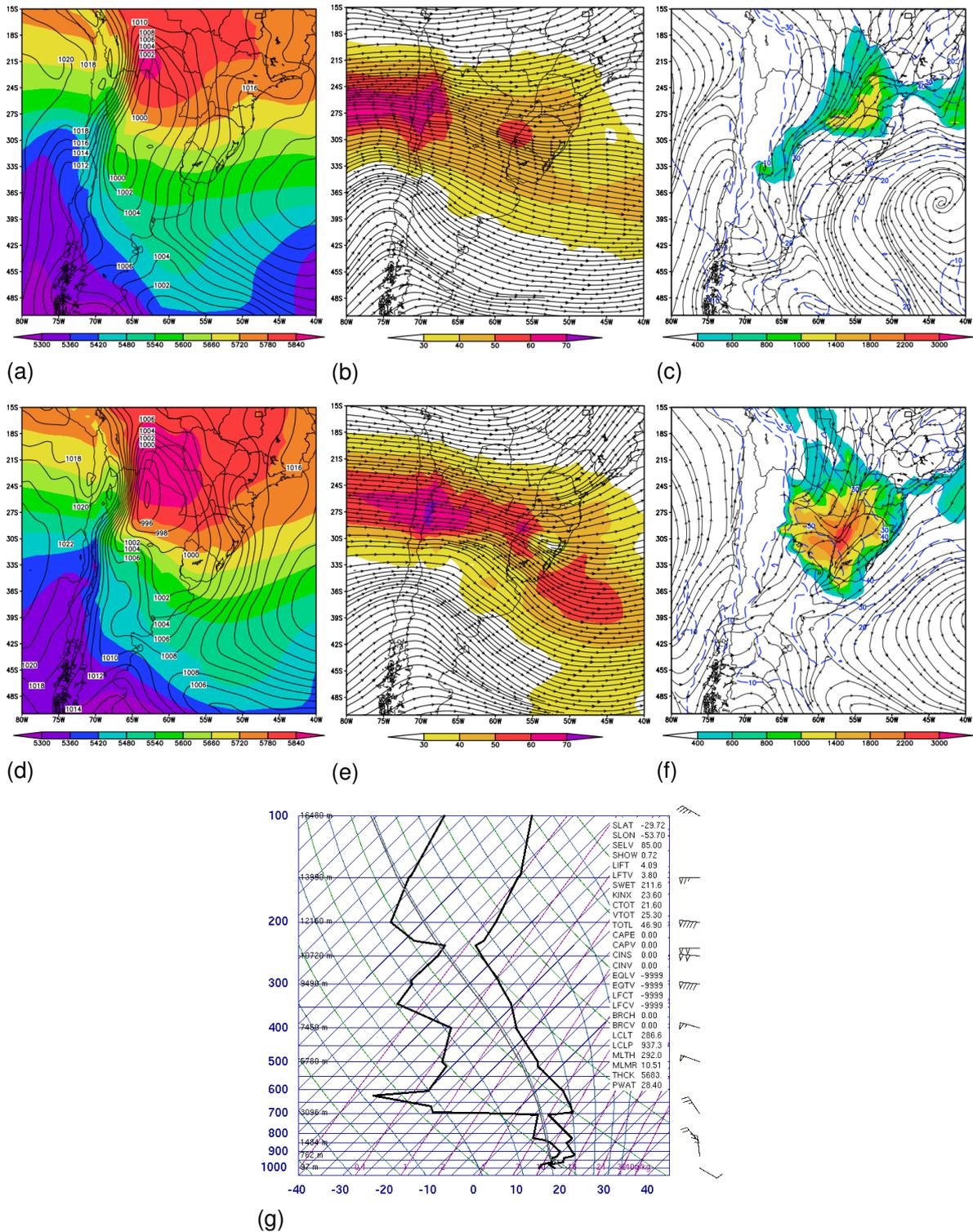
(j)

Fonte: A autora, perfil termodinâmico da *University Wyoming*, imagens de satélite do CPTEC e radar do REDEMET.

No dia 14 de outubro de 2015, no campo de PRNMM observa-se a presença da baixa no noroeste da Argentina (figuras 4.4 a-d) com um gradiente de espessura sobre o RS (figura 4.4 d). Pelas figuras 4.4 b-e, nota-se que em 200 hPa, tem-se um cavado de grande escala sobre o Chile e Argentina, e tem-se uma difluência no escoamento que causa uma "quebra" na entrada do núcleo de jato, representando a ocorrência de um SCM (figura 4.4 e). Com o passar do tempo (figuras 4.4 c-f), o CAPE e água precipitável começam a se elevar (acima de 1800 J/kg) sobre o oeste do RS (figura 4.4 f). Pelo perfil termodinâmico (figura 4.2 g), os índices favoráveis à atividade convectiva são Showalter (valor de 0,72), k (valor de 23,60) e Total Totals (valor acima de 46,90). O índice Sweat e Índice de Instabilidade por Levantamento são menos favoráveis que os demais para convecção, pois indicavam valores de 211,61 e -1, respectivamente. Nota-se também para esse caso a altura do nível de congelamento baixa, ajudando a manter o tamanho do granizo ao cair para o solo sem grandes descongelamentos. Nas imagens de satélite, observa-se nuvens de topos mais frios do que o observado nos eventos analisados acima, chegando a valores

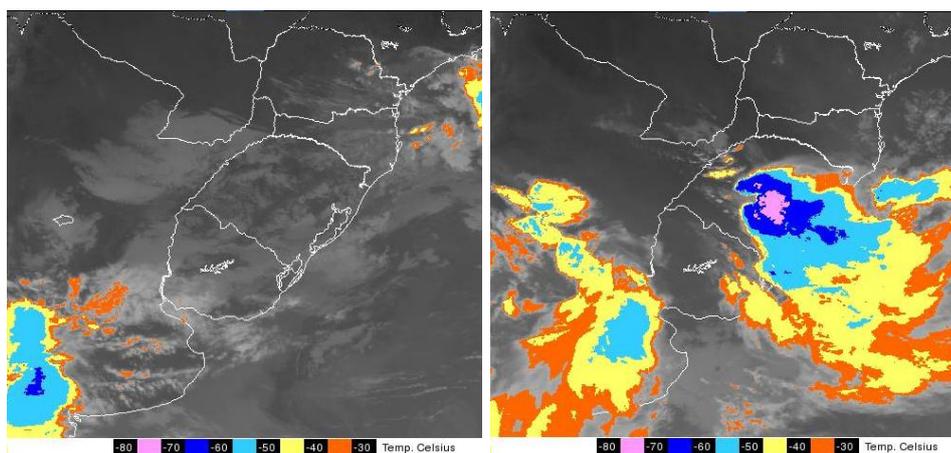
abaixo de  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  sobre parte do estado. Esses topos frios indicam que ocorreu uma forte convecção nessa região (figura 4.4 h-i) coincidindo com a difluência vista em altos níveis (figura 4.4 e). Esta tempestade severa que gerou um SCM com supercélulas isoladas vista pela imagem de radar (figura 4.4 j) causou um dano maior do que foi relatado nos outros dois casos, pois nove cidades foram atingidas por granizo grande. Salientando que as cidades mostradas pela imagem de radar foram Passo do Sobrado e Cachoeira do Sul e as outras cidades colocadas em Anexo A na figura A.2.

Figura 4.4 – Mesmo que a Figura 4.2, mas para o evento do dia 14 de outubro de 2015, contendo os horários das 12 UTC do dia 14 e 00 UTC do dia 15 nos campos meteorológicos (a-b-c-d-e-f), perfil termodinâmico às 12 UTC (g), imagens de satélite do GOES-13 do canal infravermelho às 12 UTC do dia 14 (h) e às 00 UTC do dia 15 (i) e imagem de radar de refletividade (dBZ) às 19 UTC (j). Sendo (a-d) PRNMM e espessura entre 1000 – 500 *hPa*; (b-e) linhas de corrente e magnitude do vento; (c-f) linhas de corrente, água precipitável e CAPE.



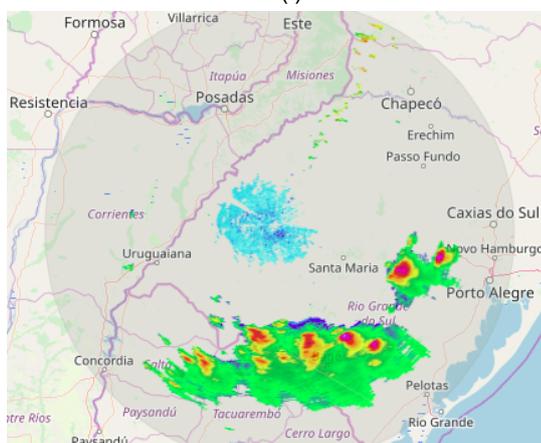
Continua na próxima página...

continuação...



(h)

(i)



(j)

Fonte: A autora, perfil termodinâmico da *University Wyoming*, imagens de satélite do CPTEC e radar do REDEMET.

### 4.3 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DO GRANIZO EM SUPERFÍCIE E NA ATMOSFERA

#### 4.3.1 Caso 1 - 07 de setembro de 2009

Uma visão geral de cada experimento pode ser vista na figura 4.5 a qual mostra o GAS após 24 h de simulação. Pode-se observar que a simulação indicou melhor o GAS sobre o estado nos Exp1 e 2 (figuras 4.5 a-b) chegando a valores acima de 16 mm e nos Exp5 e 6 (figuras 4.5 e-f) não passando de 8 mm, pois GAS foi produzido pela simulação próximo das cidades A e B. Já nos experimentos Exp3, 4, 7 e 8 (figuras 4.5 c-d-g-h), a simulação não gerou GAS muito significativo, mas pode ter sido gerado nos experimentos e derretido antes de chegar ao solo.

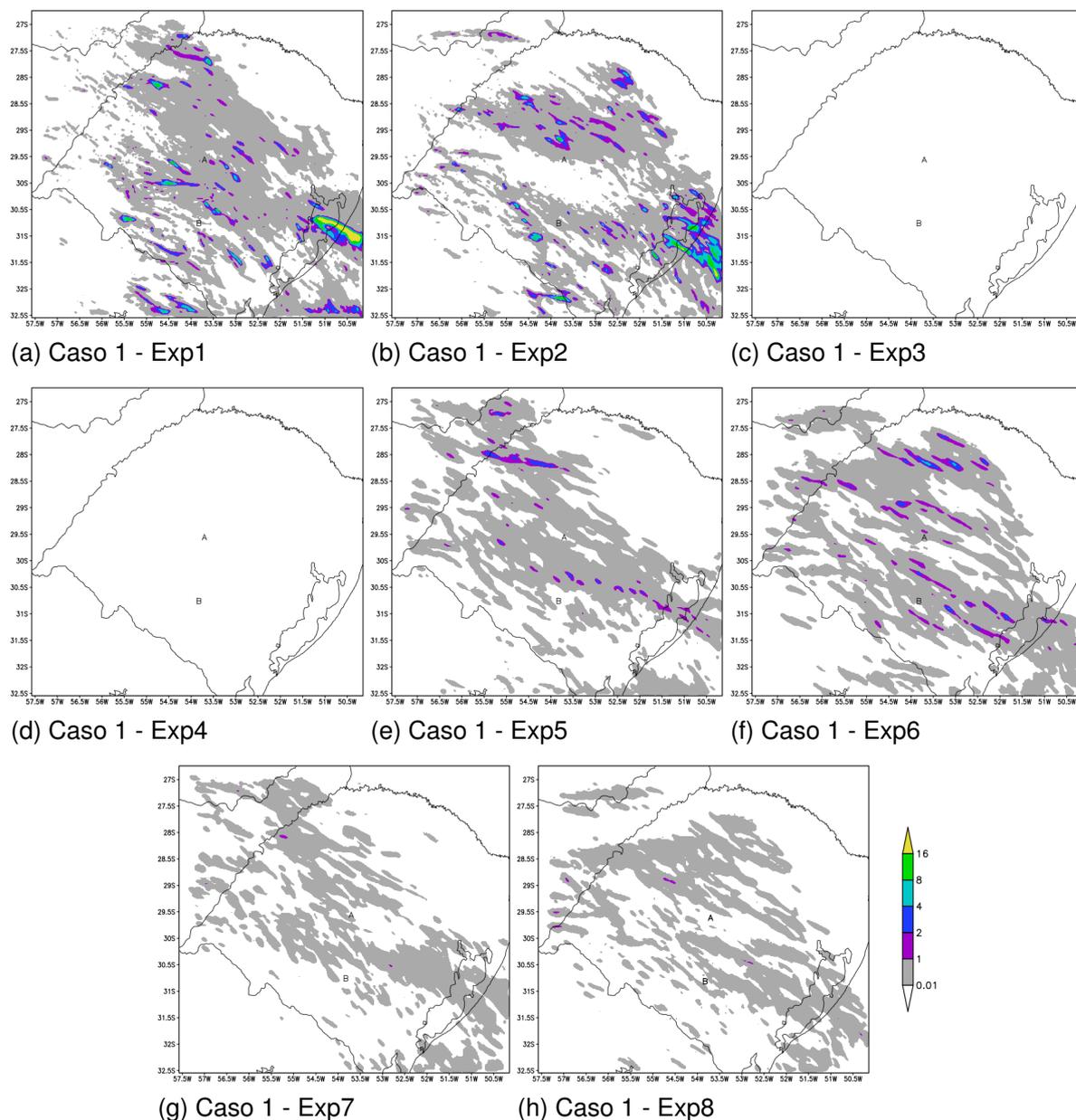
A figura 4.6 mostra o granizo integrado na vertical na atmosfera e acumulado durante às 24 h de simulação. Nota-se a grande quantidade de granizo gerado, inclusive nos Exp3 e 4 (figuras 4.6 c-d), onde não foi gerado GAS pela simulação nas figuras 4.5 c-d. Possivelmente não foi gerado por se tratar de uma PMN de momento simples que prevê apenas a razão de mistura dos hidrometeoros.

A fim de se analisar o GAS com maior detalhamento, passa-se agora a observar o GAS em intervalos de acumulação menor. Porém, isso é feito somente para os experimentos que mostraram GAS acima de 1 mm em 24 h, ou seja, Exp1, 2, 5 e 6 (figuras 4.5 a-b-e-f). Abordando os três experimentos, os Exp1 e 2 foram os quais a simulação apresentou GAS próximo das cidades que relataram o evento de granizo (figuras 4.7 e-f), sendo acima de 16 mm. E também apresentou em outras regiões GAS acima de 8 mm no Exp1 (figura 4.7 e). Salienta-se que nos horários das 19 às 21 UTC e das 21 às 00 UTC foram os períodos próximos ao evento relatado pela SEDEC e indicado pela simulação nos Exp1 e 2.

Na figura 4.8, a simulação mostra melhor o GAS usando os Exp6 do que o Exp5, ficando também próximo à cidade B (figura 4.8 b). Entretanto, em nenhum dos casos o GAS ultrapassa 8 mm. Na figura 4.9, o GAS não foi muito significativo, ficando abaixo de 1 mm.

Com o intuito de analisar os hidrometeoros verticalmente na nuvem a partir das séries temporais horárias pode-se observar que possui dois picos de aumento dos hidrometeoros, das 06 às 12 Z e 15 às 00 Z (figura 4.10). Das 06 às 12 Z tem-se um aumento do gelo, chuva e nuvem que vão aumentando do Exp1 até chegar ao Exp8. No horário das 15 às 00 Z além de aumentar os hidrometeoros anteriores, também aumenta-se o granizo, graupel e neve, ressaltando que foi nesse período que ocorreram os relatos pela SEDEC. Entretanto, salienta-se que o granizo tem um aumento maior apenas nos Exp1 e 2, com valores de aproximadamente 10 m (figuras 4.10 a-b). Já para os Exp5, 6, 7 e 8 o gelo tem-se um aumento maior do que os outros, chegando até 40 m (figuras 4.10 e-f-g-h).

Figura 4.5 – Campos de GAS com o acumulado em 24 h em todos os experimentos (colorido; 0.01, 1, 2, 4, 8 e 16 mm) para o Caso 1, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) Exp1, (b) Exp2, (c) Exp3, (d) Exp4, (e) Exp5, (f) Exp6, (g) Exp7 e (h) Exp8. As letras A e B marcam as duas cidades afetadas pelo evento, sendo Itaara e Lavras do Sul.

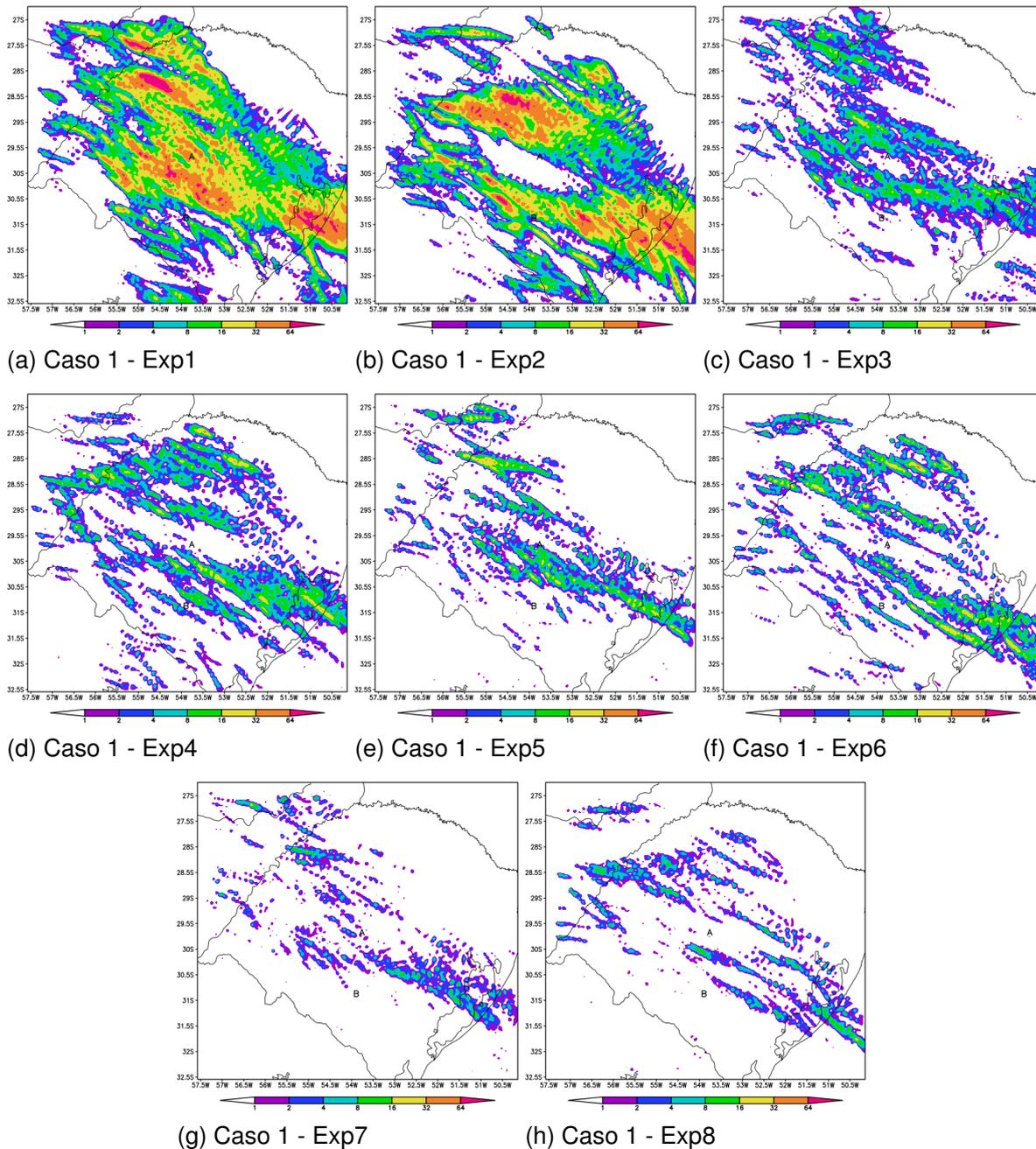


Fonte: A autora.

A fim de analisar a queda dos hidrometeoros na superfície, passam a ser avaliadas as séries temporais horárias integradas na área com relação à superfície. Observa-se que os Exp1 e 2 geraram granizo chegando a 1 *dam* (figuras 4.11 a-b) e nos Exp5 e 6 não passando de 0,5 *dam* (figuras 4.11 e-f). O graupel também é gerado em superfície nos Exp5, 6, 7 e 8, sendo no máximo 9 *dm*.

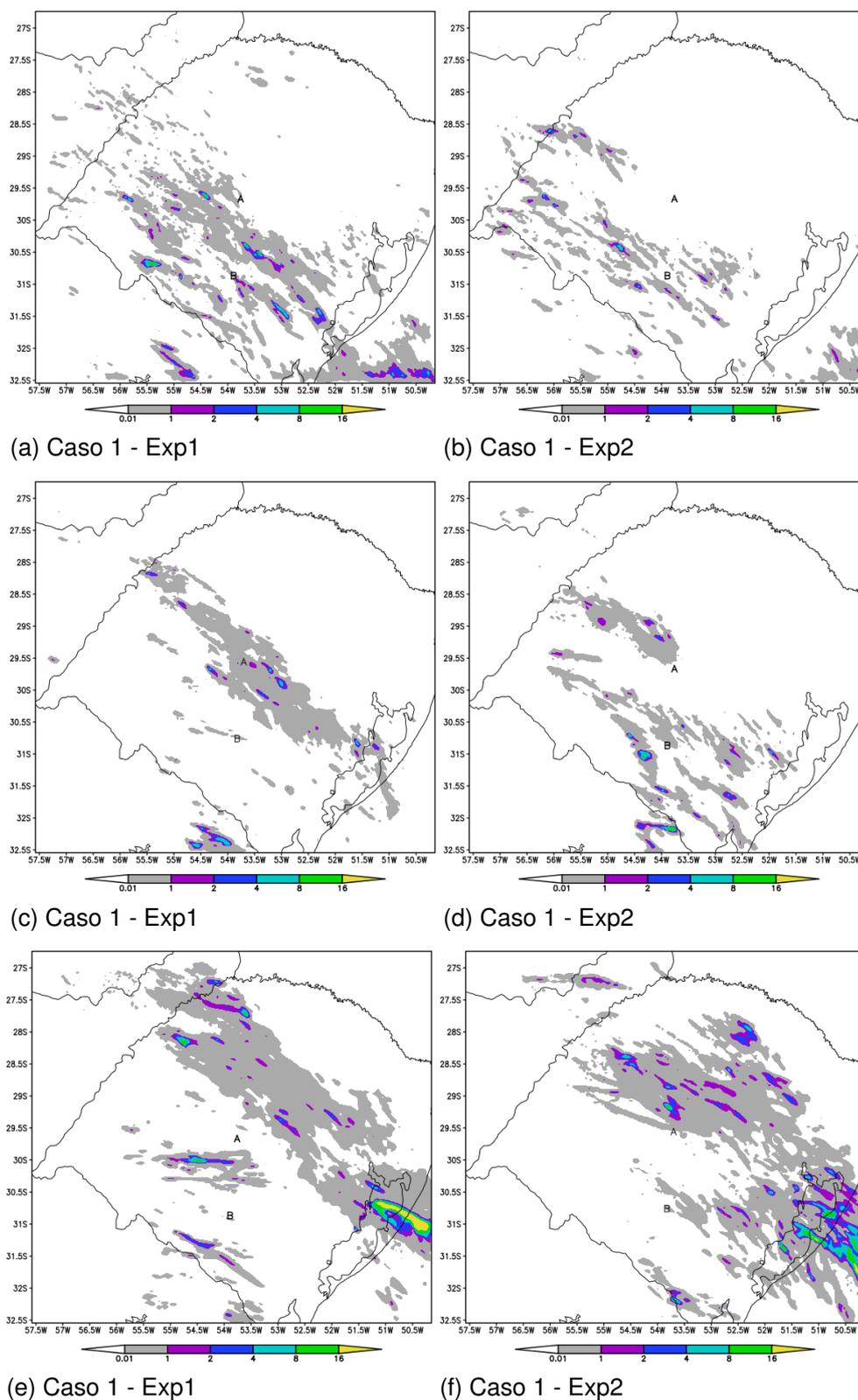
Observando o Caso 1 conclui-se que os Exp1 e 2 foram melhores que os demais

Figura 4.6 – Campos de granizo na atmosfera integrado verticalmente e nas 24 h de simulação (colorido; 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 mm) para o Caso 1, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) Exp1, (b) Exp2, (c) Exp3, (d) Exp4, (e) Exp5, (f) Exp6, (g) Exp7 e (h) Exp8.



Fonte: A autora.

Figura 4.7 – Campos de GAS (colorido; 0, 01, 1, 2, 4, 8 e 16 mm) utilizando o Exp1 (a-c-e) e o Exp2 (b-d-f) para o Caso 1, sendo o acumulado das 00 UTC às 19 UTC (a-b), das 19 UTC às 21 UTC (c-d) e das 21 UTC às 00 UTC (e-f), constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude.



Fonte: A autora.

Figura 4.8 – Mesmo que a figura 4.7, porém com o Exp5 (a-c-e) e o Exp6 (b-d-f). Sendo o acumulado das 00 UTC às 19 UTC (a-b), das 19 UTC às 21 UTC (c-d) e das 21 UTC às 00 UTC (e-f).

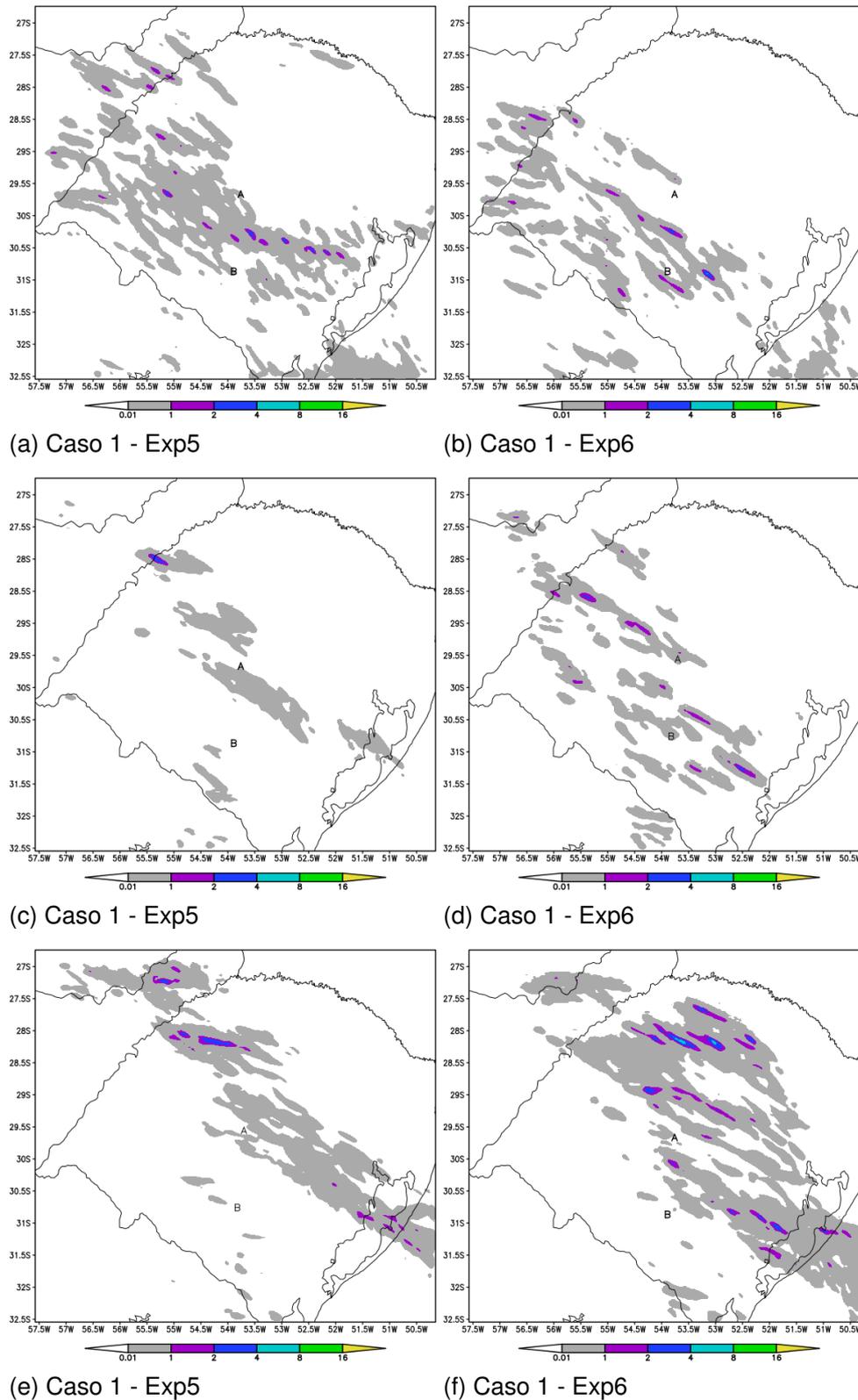
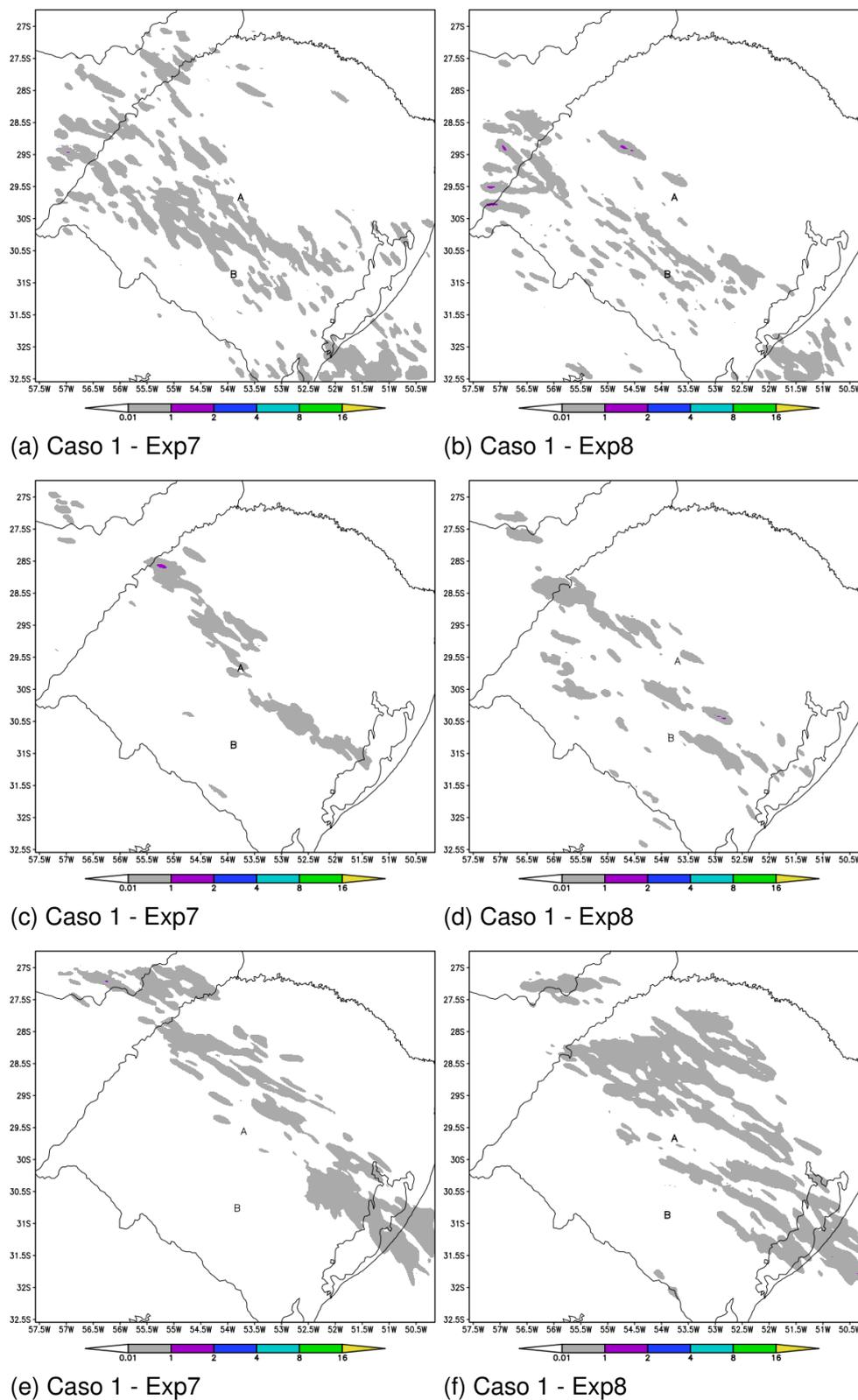


Figura 4.9 – Mesmo que a figura 4.7, porém com o Exp7 (a-c-e) e o Exp8 (b-d-f). Sendo o acumulado das 00 UTC às 19 UTC (a-b), das 19 UTC às 21 UTC (c-d) e das 21 UTC às 00 UTC (e-f).



Fonte: A autora.

Figura 4.10 – Séries temporais horárias integradas verticalmente na atmosfera até 50 hPa e acumulada na área de todo o domínio da grade de 3 km da simulação para o Caso 1. Sendo Exp1 (a), Exp2 (b), Exp3 (c), Exp4 (d), Exp5 (e), Exp6 (f), Exp7 (g) e Exp8 (h). As variáveis apresentadas no gráfico são as razões de mistura de granizo ( $m$ ; círculo vermelho), chuva ( $m$ ; quadrado preto), vapor ( $hm$ ; círculo preto), nuvem ( $m$ ; círculo preto rachurado), neve ( $dam$ ; \* preto), gelo ( $m$ ; + preto) e graupel ( $dam$ ; triângulo preto).

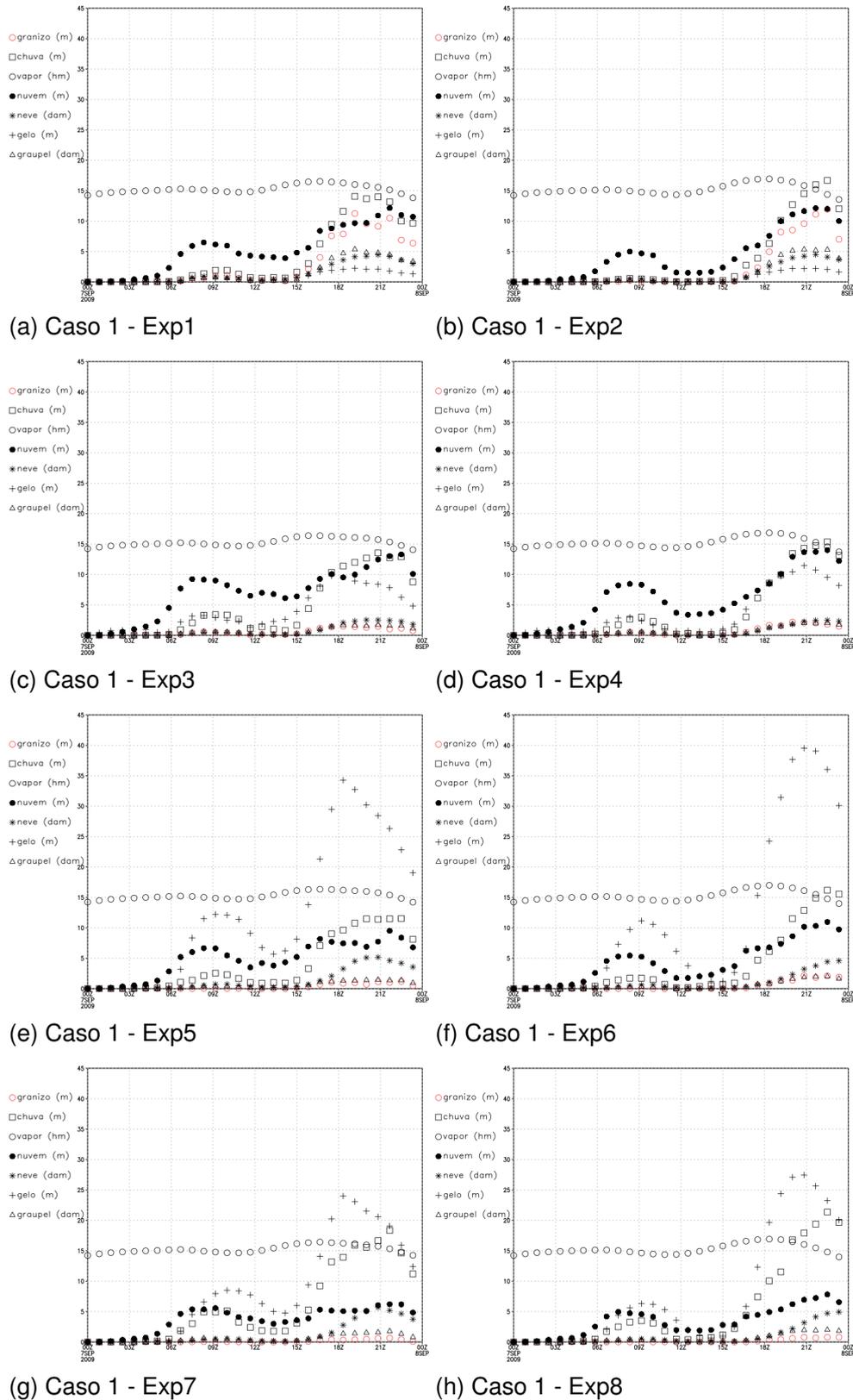
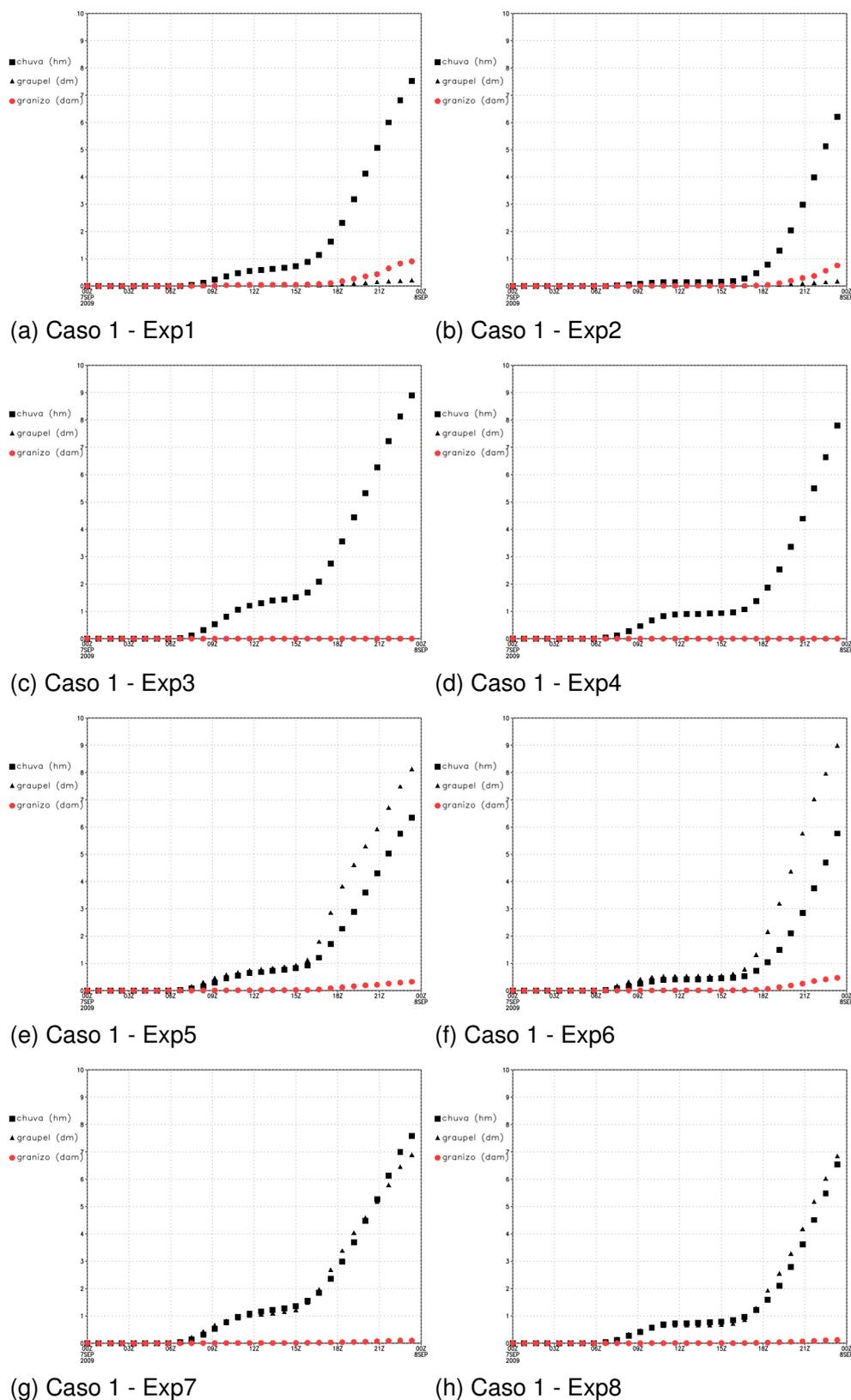


Figura 4.11 – Séries temporais horárias integradas na área com relação à superfície para o Caso 1. Sendo Exp1 (a), Exp2 (b), Exp3 (c), Exp4 (d), Exp5 (e), Exp6 (f), Exp7 (g) e Exp8 (h). As variáveis apresentadas no gráfico são granizo ( $m$ ; círculo vermelho rachurado), chuva ( $m$ ; quadrado preto rachurado) e graupel ( $dm$ ; triângulo preto rachurado).



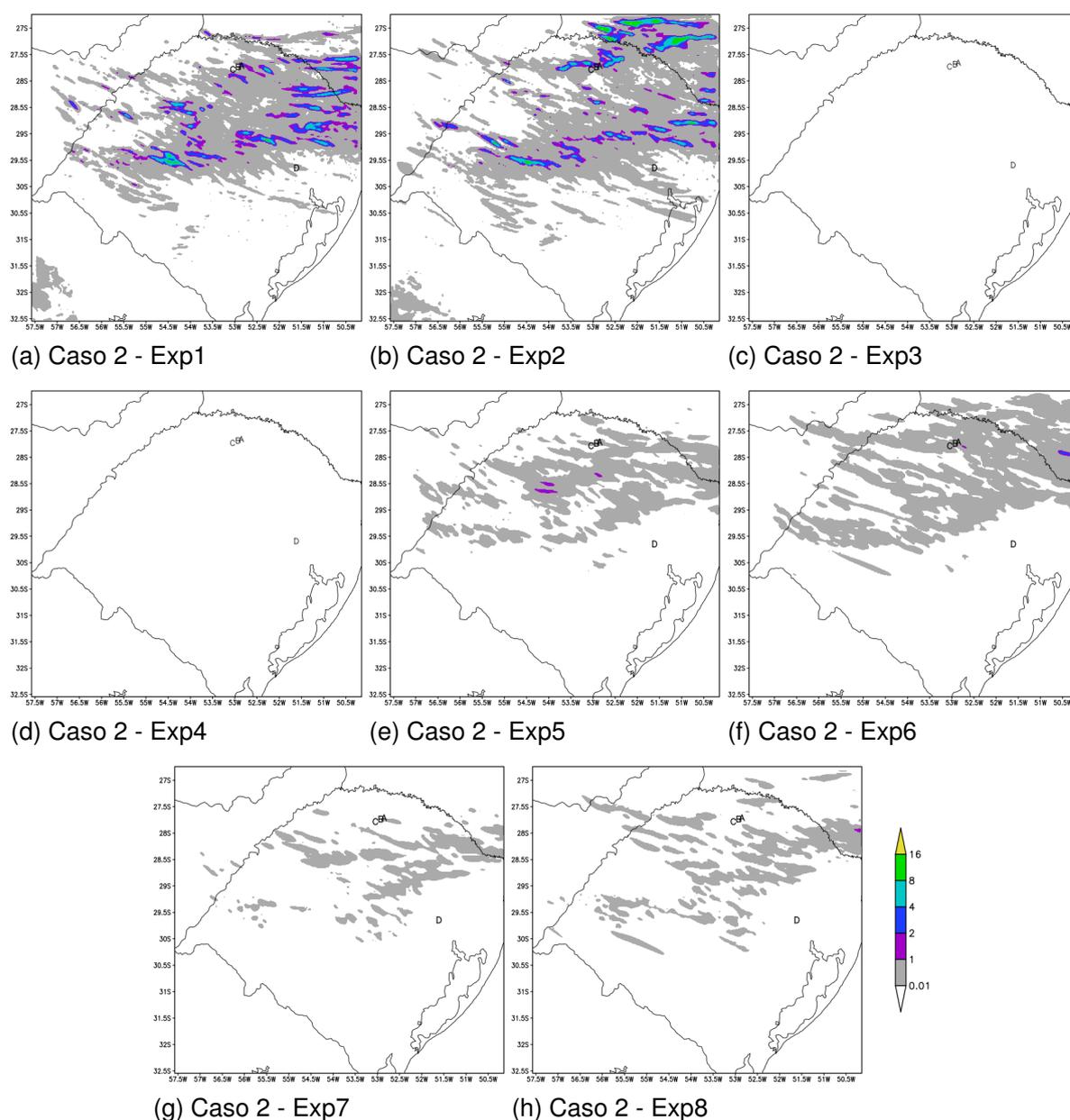
Fonte: A autora.

experimentos na produção do granizo pela simulação. Pois, além de estar presente na atmosfera também foi precipitado próximo das cidades que relataram o fenômeno pela SE-DEC. E ainda, pelas séries temporais observa-se que o gelo, neve e graupel encontram-se no mesmo horário em que foi gerado o granizo, podendo auxiliar na formação do mesmo.

### 4.3.2 Caso 2 - 28 de setembro de 2009

No geral, analisando cada experimento observa-se que com o acumulado de 24 h de simulação, os campos que melhor mostraram GAS foram nos Exp1 e 2 (figuras 4.12 a-b), sendo valores acima de 8 mm e gerado próximo das cidades A, B e C onde houve os relatos de granizo pela SEDEC.

Figura 4.12 – Campos de GAS com o acumulado em 24 h em todos os experimentos (colorido; 0,01, 1, 2, 4, 8 e 16 mm) para o Caso 2, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) Exp1; (b) Exp2; (c) Exp3; (d) Exp4; (e) Exp5; (f) Exp6; (g) Exp7 e (h) Exp8. As letras A, B, C e D marcam as quatro cidades afetadas pelo evento, sendo Engenho Velho, Constantina, São José das Missões e Tabai.

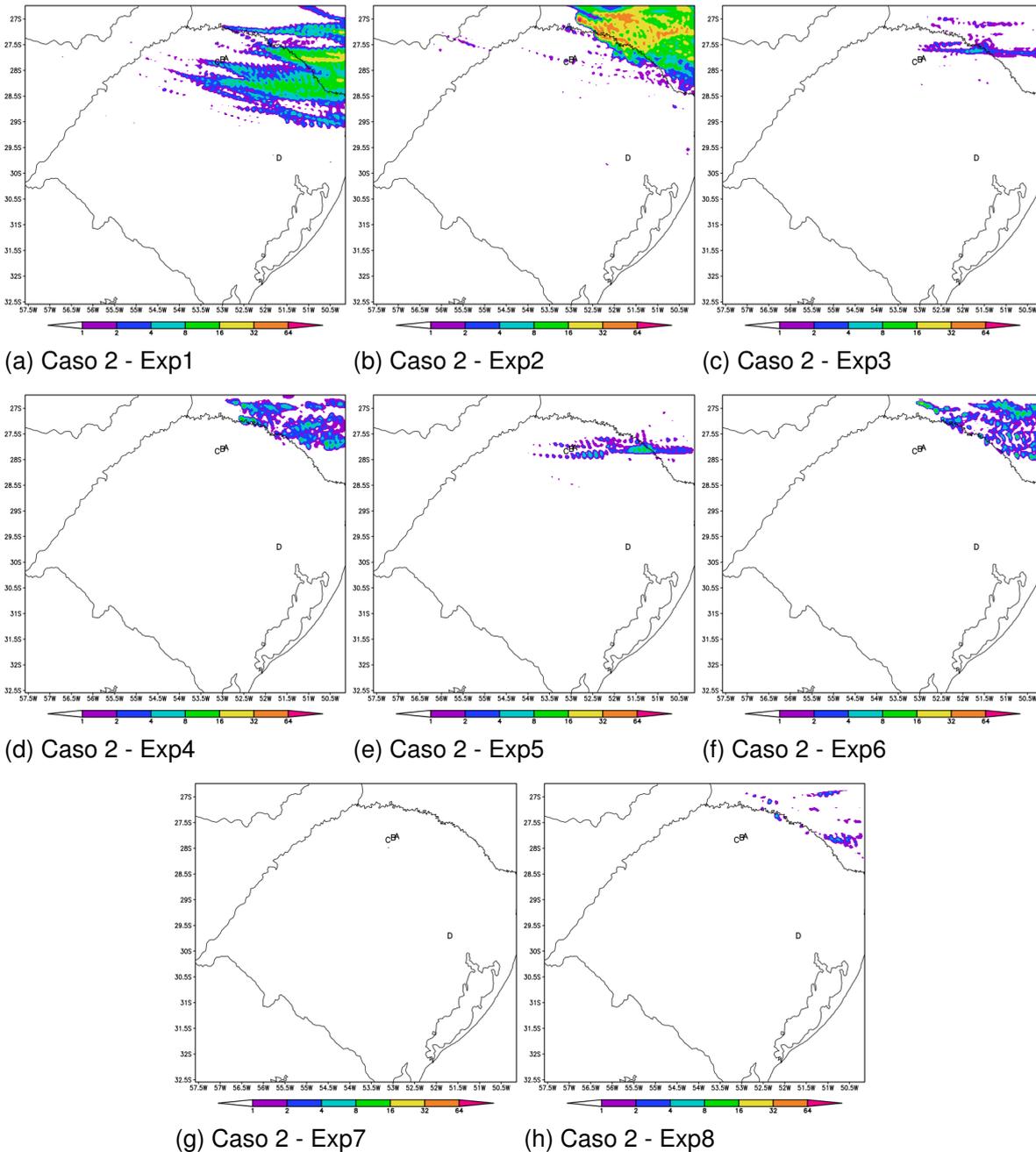


Fonte: A autora.

Na figura 4.13 nota-se a maior quantidade de granizo gerado na atmosfera durante

às 24 h de simulação no Exp2, com valores acima de 32 mm (figura 4.13 b) e para o Exp1 no máximo 16 mm (figura 4.13 a). Nesse último experimento e no Exp5, o granizo na atmosfera foi gerado próximo das cidades A, B e C (figuras 4.13 a-e).

Figura 4.13 – Campos de granizo na atmosfera integrado verticalmente e nas 24 h de simulação (colorido; 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 mm) para o Caso 2, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) Exp1, (b) Exp2, (c) Exp3, (d) Exp4, (e) Exp5, (f) Exp6, (g) Exp7 e (h) Exp8.



Fonte: A autora.

Olhando com mais detalhes em intervalos de acúmulo de GAS, os experimentos que melhor indicaram o GAS pela simulação foram Exp1 e 2 no período das 12 às 00 UTC,

ficando localizados na faixa centro / norte do RS com valores acima de 4 *mm* (figuras 4.14 a-b). Nos Exp 5 e 6, também foram mostrados GAS pela simulação, mas não foi significativo para os dois casos (figuras 4.15 a-b). No Exp6 foi gerado próximo da cidade A (figuras 4.15 a-b).

Em uma visão geral, na figura 4.17 nota-se que o granizo é gerado em maior quantidade na vertical nos Exp 1 e 2 com 6 *m* (figura 4.17 a-b). Porém, observa-se que a simulação aumentou os hidrometeoros em todos os experimentos antes do período que realmente ocorreu o fenômeno, que foi das 03 às 08 Z. Nos experimentos Exp3, 4, 5, 6, 7 e 8 apesar da simulação indicar no máximo 1 *m* de granizo na atmosfera, foram os que melhor produziram gelo e neve das 12 às 21 Z, chegando a valores de 9 *m* e 9 *dam* (figura 4.17 c-d-e-f-g-h).

Na figura 4.18 nota-se que o granizo foi gerado somente nos Exp1 e 2 (figuras 4.18 a-b) como também na atmosfera na figura anterior (figura4.17 a-b), chegando a valores de 1 *dam*. A chuva segue o mesmo padrão em todos os experimentos e o graupel aumenta nos Exp 5, 6, 7 e 8, com valores de até 4 *dm* (figuras 4.18 e-f-g-h).

No Caso 2, nota-se que em todos os experimentos ocorreu um atraso na geração do granizo. Pois, o relato das cidades abordadas nesse caso foram das 03 às 09 UTC e a simulação mostrou o granizo no dia anterior (27 de setembro de 2009). Entretanto, mesmo ocorrendo este atraso os Exp1 e 2 também produziram o granizo melhor que os outros experimentos. Salientando-se que nas séries temporais da atmosfera há a presença do gelo, neve e graupel, mas em menor quantidade para o mesmo período que o granizo foi gerado na atmosfera. Podendo ajudar a formar e manter o granizo na atmosfera para depois ser precipitado. Nos experimentos que esses hidrometeoros não foram colocados a chuva aumentou notavelmente.

Figura 4.14 – Campos de GAS (colorido; 0, 01, 1, 2, 4, 8 e 16 *mm*) utilizando o Exp1 (a-c-e) e o Exp2 (b-d-f) para o Caso 2, sendo o acumulado das 12 UTC do dia 27 às 00 UTC do dia 28 (a-b), das 00 UTC às 03 UTC (c-d) e das 03 UTC às 12 UTC (e-f), constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude.

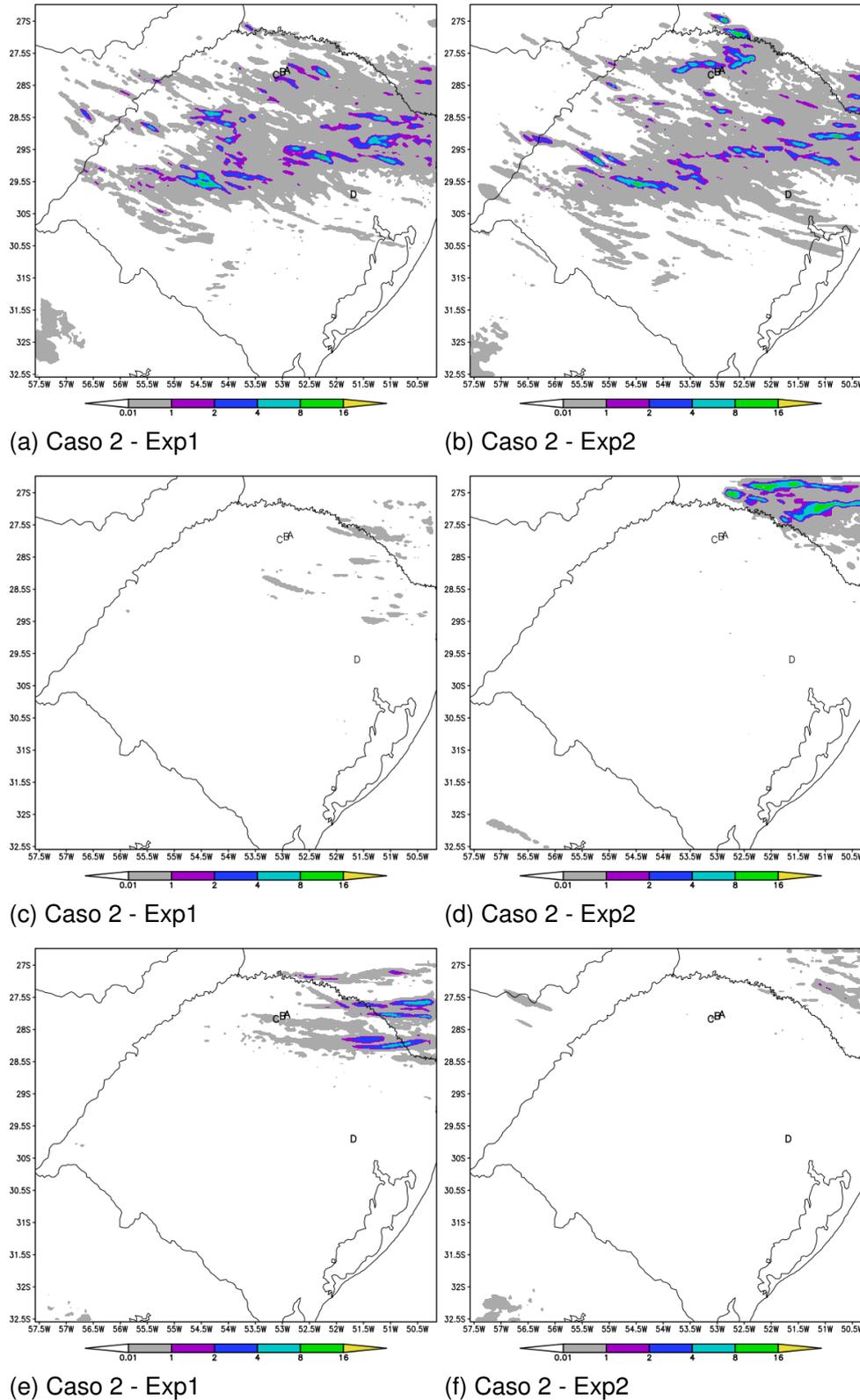
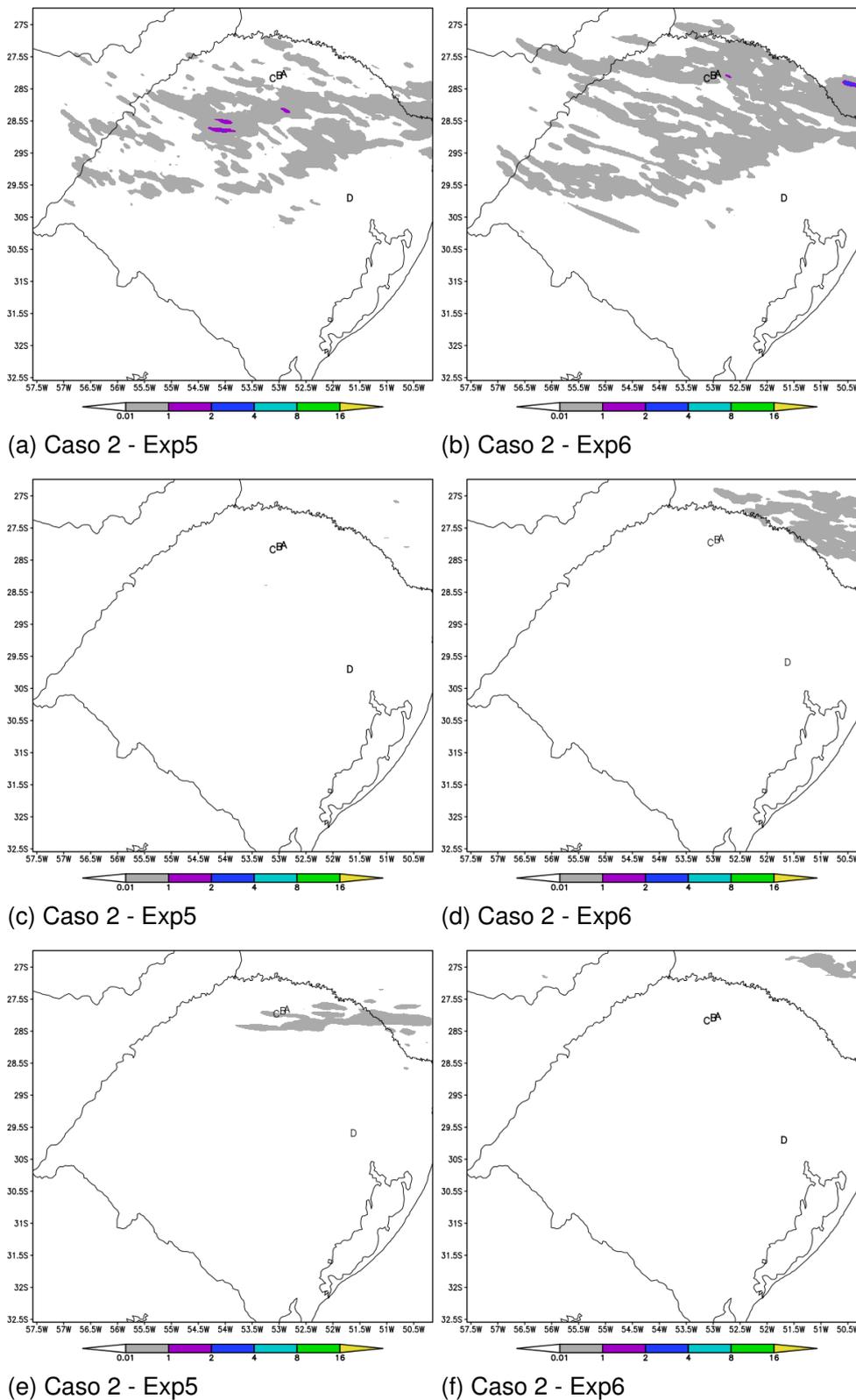
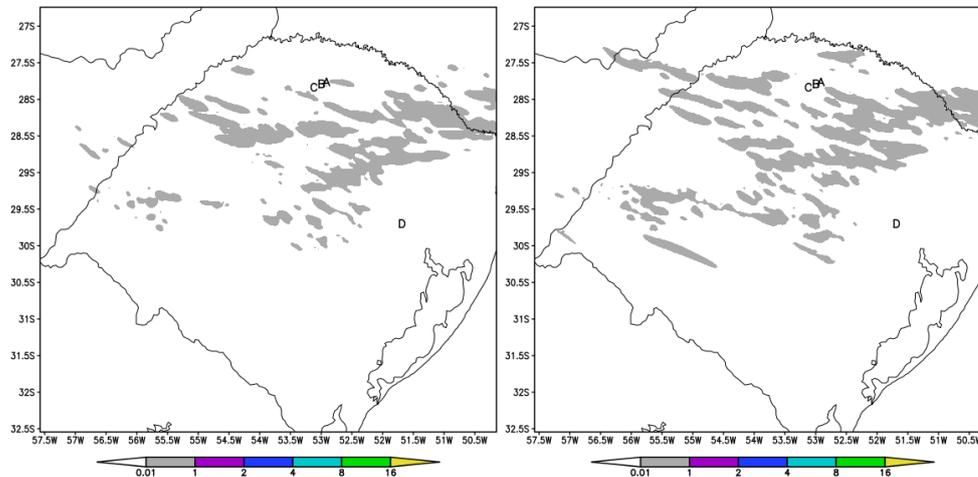


Figura 4.15 – Mesmo que a figura 4.14, porém com o Exp5 (a-c-e) e o Exp6 (b-d-f). Sendo o acumulado das 12 UTC do dia 27 às 00 UTC do dia 28 (a-b), das 00 UTC às 03 UTC (c-d) e das 03 UTC às 12 UTC (e-f).



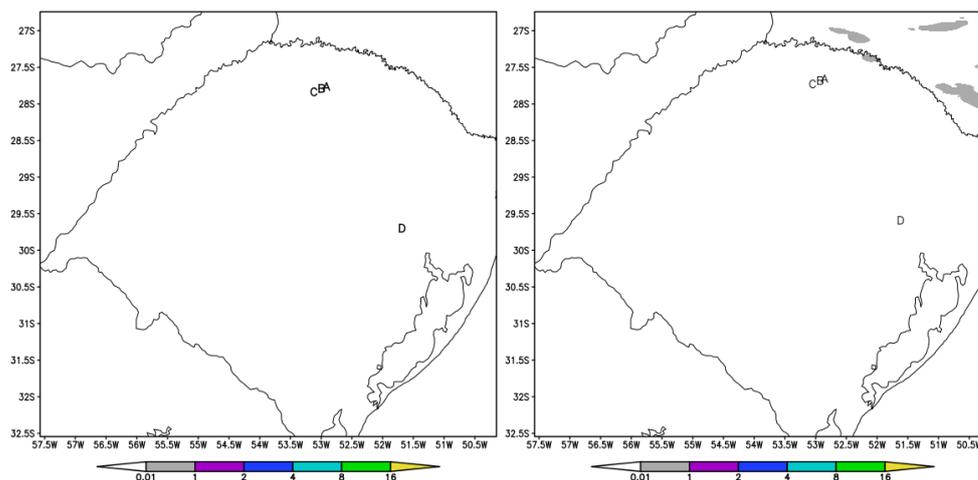
Fonte: A autora.

Figura 4.16 – Mesmo que a figura 4.14, porém com o Exp7 (a-c-e) e o Exp8 (b-d-f). Sendo o acumulado das 12 UTC do dia 27 às 00 UTC do dia 28 (a-b), das 00 UTC às 03 UTC (c-d) e das 03 UTC às 12 UTC (e-f).



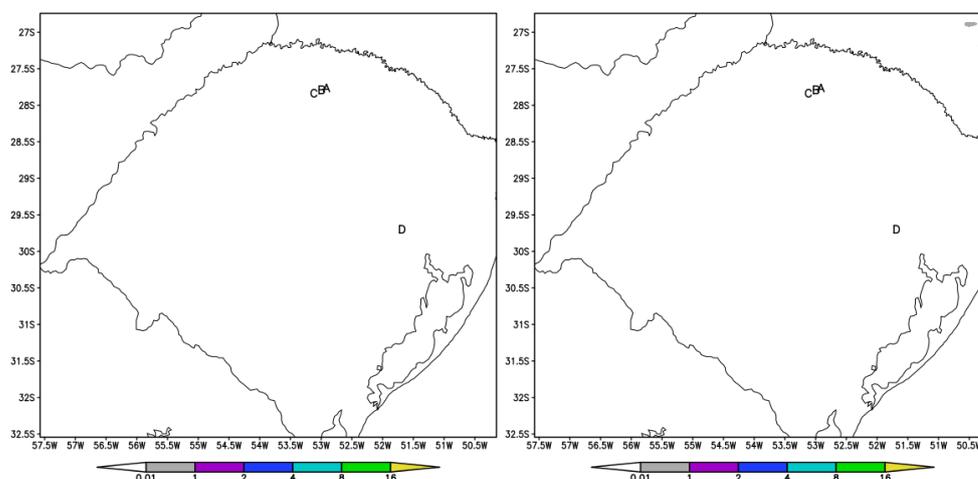
(a) Caso 2 - Exp7

(b) Caso 2 - Exp8



(c) Caso 2 - Exp7

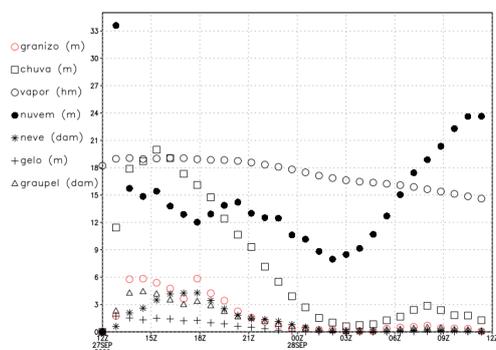
(d) Caso 2 - Exp8



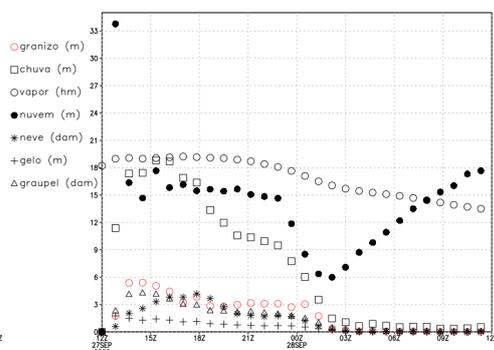
(e) Caso 2 - Exp7

(f) Caso 2 - Exp8

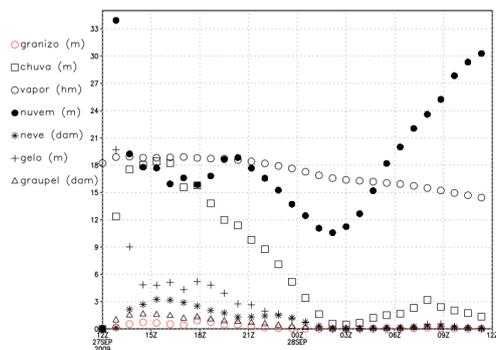
Figura 4.17 – Séries temporais horárias integradas verticalmente na atmosfera até  $50\text{ hPa}$  e acumulada na área de todo o domínio da grade de  $3\text{ cm}$  da simulação para o Caso 2. Sendo Exp1 (a), Exp2 (b), Exp3 (c), Exp4 (d), Exp5 (e), Exp6 (f), Exp7 (g) e Exp8 (h). As variáveis apresentadas no gráfico são granizo ( $m$ ; círculo vermelho), chuva ( $m$ ; quadrado preto), vapor ( $hm$ ; círculo preto), nuvem ( $m$ ; círculo preto rachurado), neve ( $dam$ ; \* preto), gelo ( $m$ ; + preto) e graupel ( $dam$ ; triângulo preto).



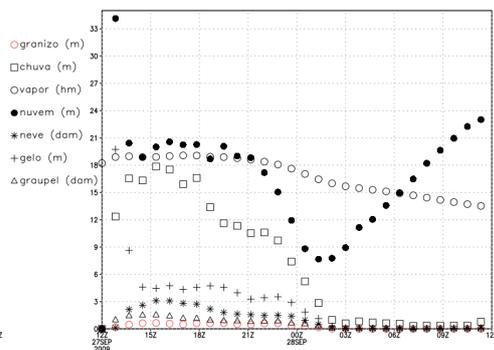
(a) Caso 2 - Exp1



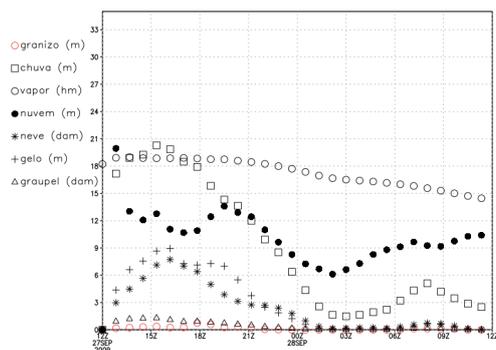
(b) Caso 2 - Exp2



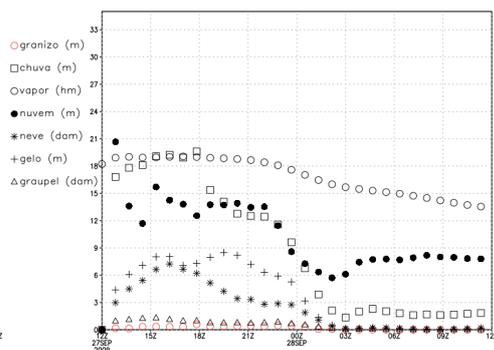
(c) Caso 2 - Exp3



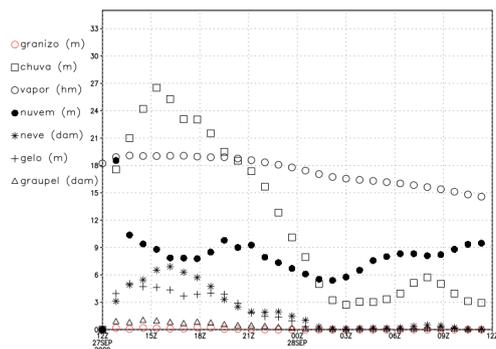
(d) Caso 2 - Exp4



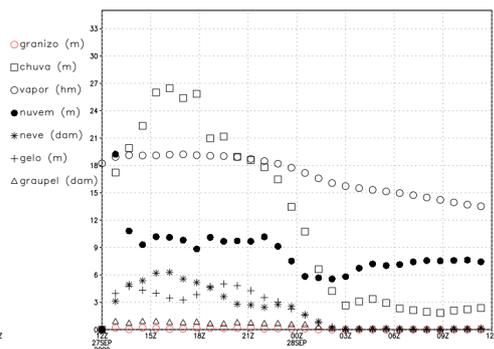
(e) Caso 2 - Exp5



(f) Caso 2 - Exp6

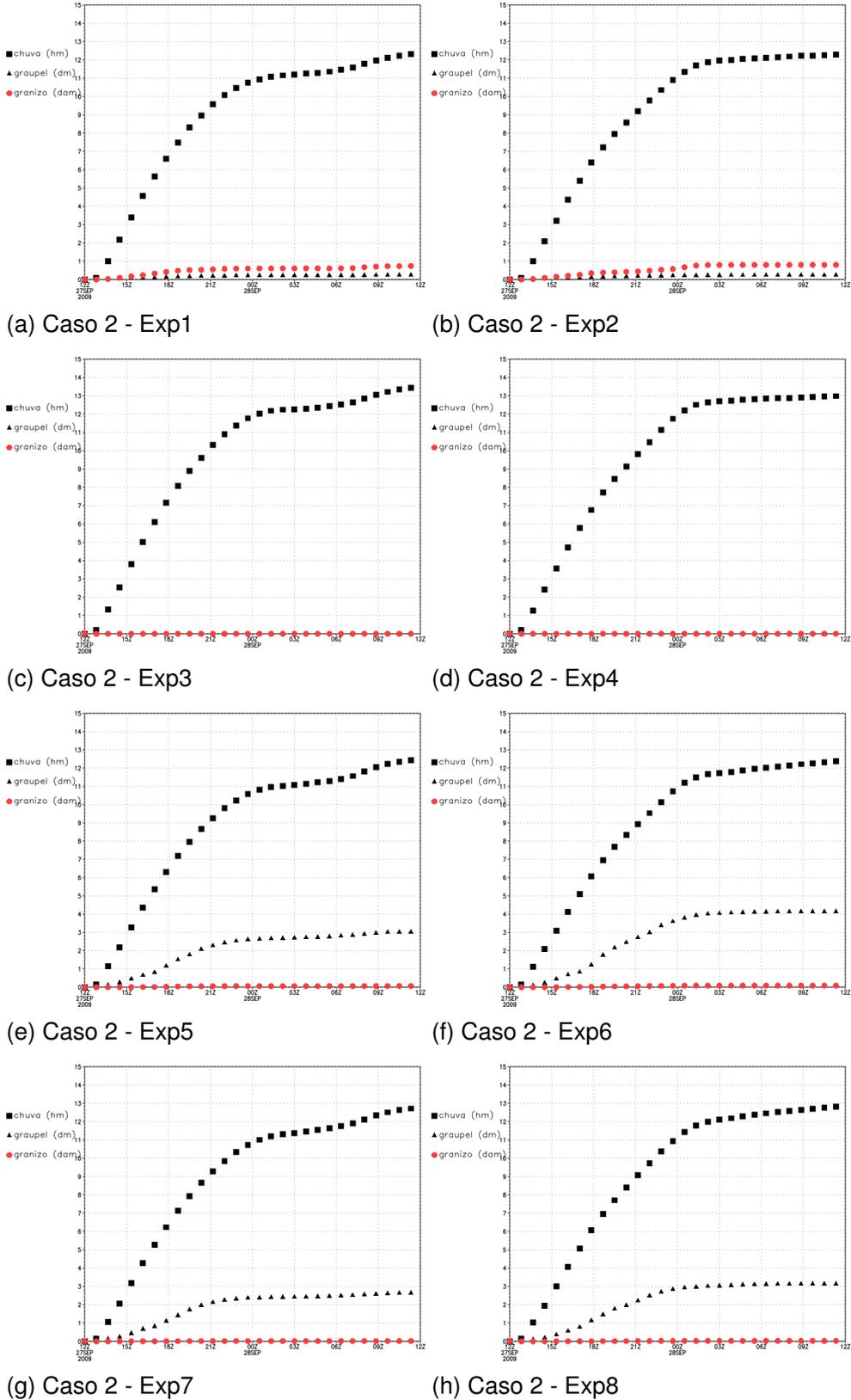


(g) Caso 2 - Exp7



(h) Caso 2 - Exp8

Figura 4.18 – Séries temporais horárias integradas na área com relação à superfície para o Caso 2. Sendo Exp1 (a), Exp2 (b), Exp3 (c), Exp4 (d), Exp5 (e), Exp6 (f), Exp7 (g) e Exp8 (h). As variáveis apresentadas no gráfico são granizo ( $m$ ; círculo vermelho rachurado), chuva ( $m$ ; quadrado preto rachurado) e graupel ( $dm$ ; triângulo preto rachurado).



### 4.3.3 Caso 3 - 14 de outubro de 2015

No último evento analisado neste trabalho, as cidades relatadas pela SEDEC ficam localizadas no centro / leste do estado, sendo dos três eventos o que teve maior número de cidades afetadas pelo fenômeno de granizo. A partir disso, em uma visão geral do acumulado em 24 h observa-se que a simulação apresentou o GAS próximo ou até mesmo sobre as cidades em B, D, E, G e H, utilizando os Exp1, 2, 5 e 6 com valores acima de 4 mm (figuras 4.19 a-b-e-f).

Pela figura 4.20 pode-se notar o granizo gerado na atmosfera nos Exp1 e 2 com valores acima de 64 mm (figuras 4.20 a-b) e para os Exp5 e 6 de no máximo 32 mm (figuras 4.20 e-f). Ainda, é possível observar ondas de gravidade produzida pela simulação e a presença de gelo no nível da bigorna (figuras 4.20 a-b)

Analisando mais detalhadamente a simulação do GAS em intervalos de acumulação, observa-se que os Exp1, 2 (figuras 4.21 c-g-h) das 17 às 20 UTC e das 22 às 00 UTC, e Exp5 e 6 (figuras 4.22 e-g-h) das 20 às 22 UTC e das 22 às 00 UTC geraram o GAS sobre ou próximo das cidades afetadas. Essas simulações mostrando-se ser melhores que os mesmos experimentos dos outros casos, com valores acima de 4 mm. Já os Exp7 e 8 não foram tão eficientes em produzir GAS (figura 4.23).

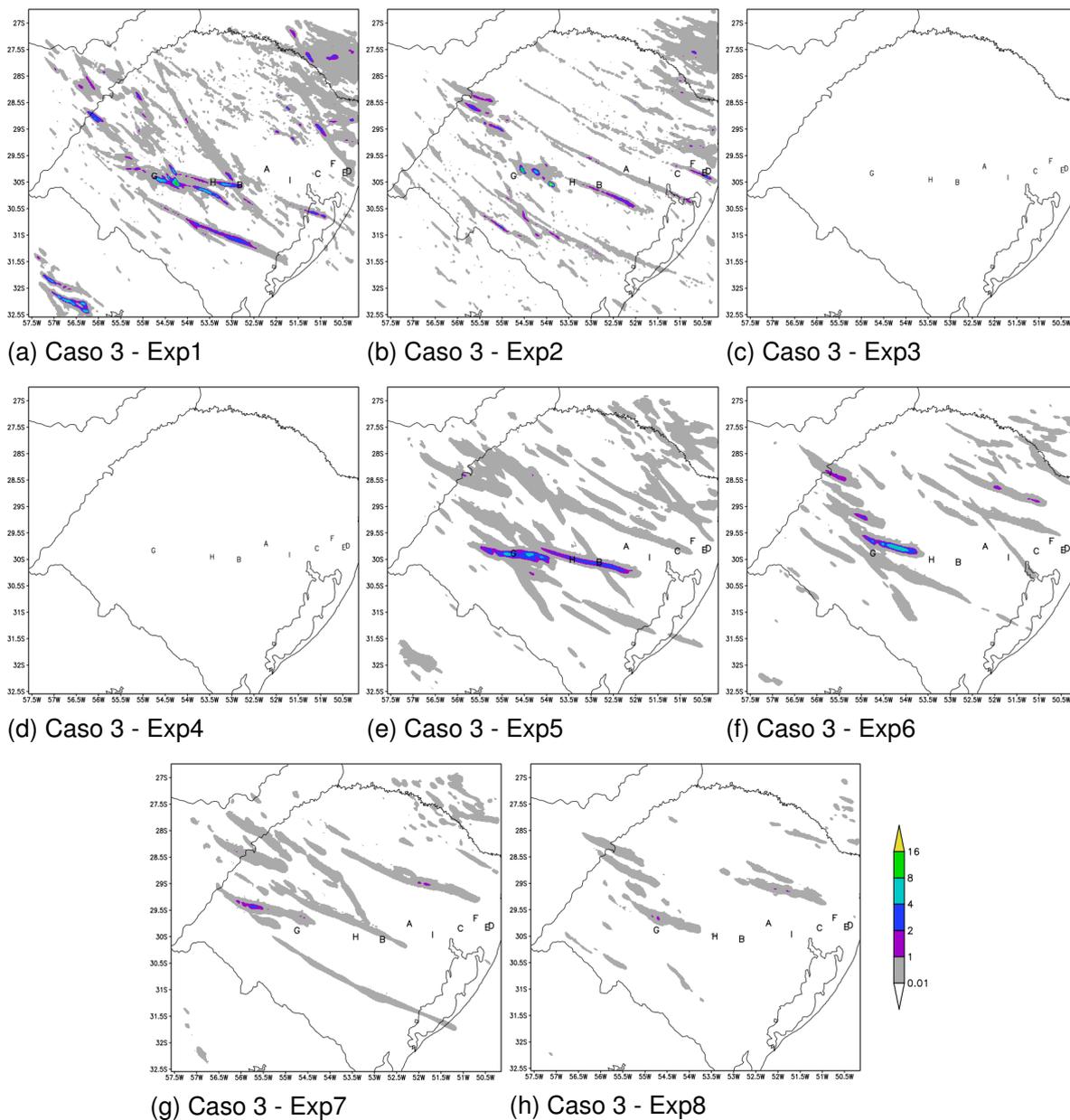
No Caso 3 todos os experimentos geraram o granizo nos Exp1 e 2 com no máximo 8 m (figuras 4.25 a-b). Nos demais experimentos o granizo é reduzido, e a chuva e o gelo aumentam chegando a aproximadamente 12 m.

Na figura 4.25 pode-se analisar que não foi produzido granizo em superfície, mas chuva nos Exp1, 2, 3 e 4 (figuras 4.25 a-b-c-d), e chuva e graupel nos Exp5, 6, 7 e 8 (figuras 4.25 e-f-g-h).

Observando o Caso 3, a simulação gera GAS principalmente com os Exp1, 2, 5 e 6, onde observa-se diferentes trajetórias das células, isto é, as células que deslocaram-se para a esquerda do vento médio geraram mais granizo. Diferentes dos outros casos, o GAS é produzido próximo das cidades afetadas. Nesse evento também pode-se observar a presença do gelo, neve e graupel na atmosfera que pode ajudar na formação do granizo.

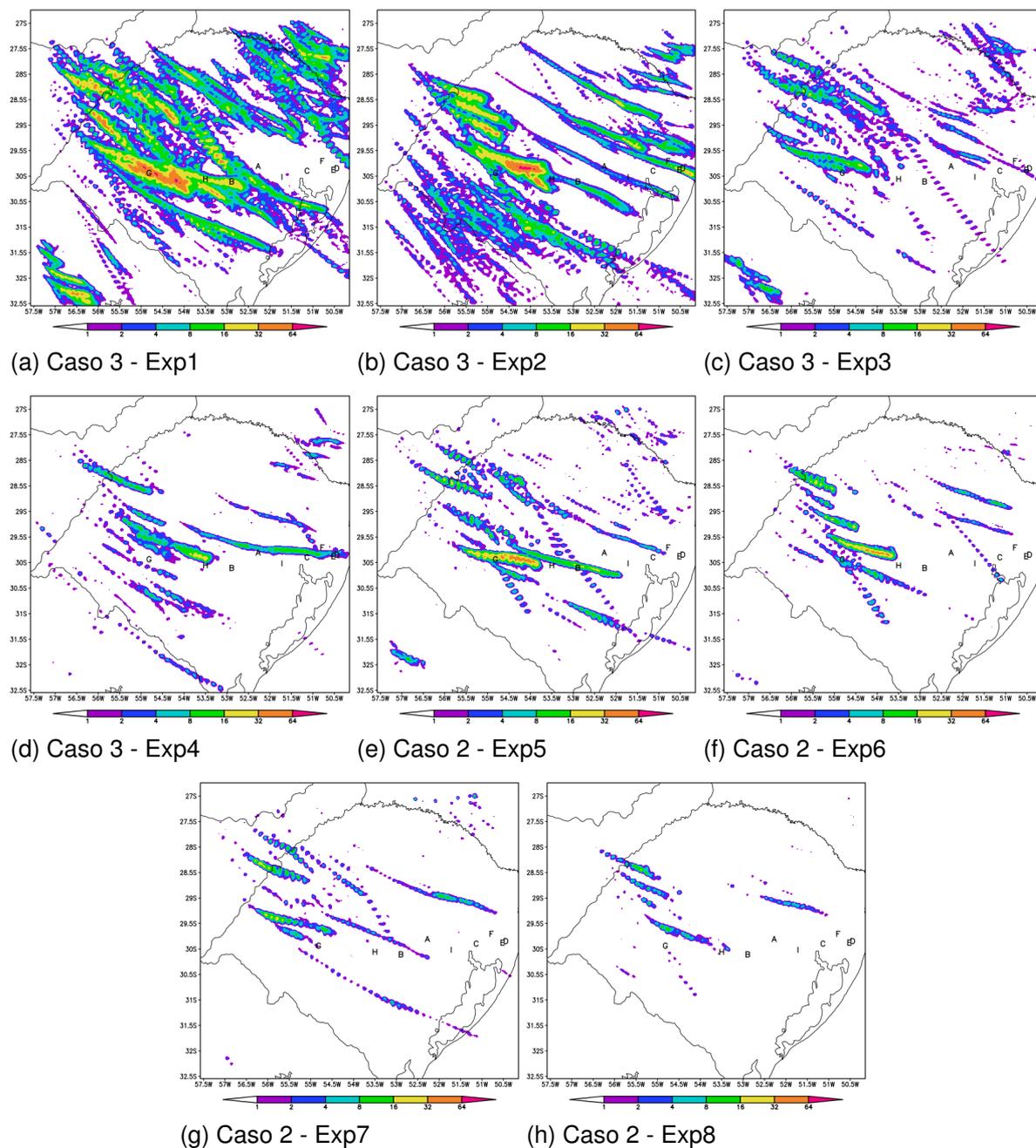
Com relação as PMN independente da PCC, o Exp1 e 2 geraram melhor o GAS nos três casos abordados. Resultado esse que também foi observado no trabalho de Karki et al. (2018). Ao investigarem um evento de precipitação intensa no oeste de Nepal de 14 a 15 de agosto de 2014 através de simulações no WRF utilizando 9 PMN e avaliando cada uma com relação a 222 estações de precipitação por meio de uma técnica de

Figura 4.19 – Campos de GAS com o acumulado em 24 h em todos os experimentos (colorido; 0.01, 1, 2, 4, 8 e 16 mm) para o Caso 3, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) Exp1; (b) Exp2; (c) Exp3; (d) Exp4; (e) Exp5; (f) Exp6; (g) Exp7 e (h) Exp8. As letras A, B, C, D, E, F, G, H e I marcam as nove cidades afetadas pelo evento, sendo Passo do Sobrado, Cachoeira do Sul, Sapucaia do Sul, Carará, Santo Antônio da Patrulha, Taquara, Cacequi, Formigueiro e São Jerônimo.



Fonte: A autora.

Figura 4.20 – Campos de granizo na atmosfera integrado verticalmente e nas 24 h de simulação (colorido; 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 mm) para o Caso 3, constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude. (a) Exp1, (b) Exp2, (c) Exp3, (d) Exp4, (e) Exp5, (f) Exp6, (g) Exp7 e (h) Exp8.



Fonte: A autora.

Figura 4.21 – Campos de GAS (colorido; 0, 01, 1, 2, 4, 8 e 16 *mm*) utilizando o Exp1 (a-c-e) e o Exp2 (b-d-f) para o Caso 3, sendo o acumulado das 00 UTC às 17 UTC (a-b), das 17 às 20 UTC (c-d), das 20 às 22 UTC (e-f) e das 22 às 00 UTC (g-h), constando no eixo x a longitude e no eixo y a latitude.

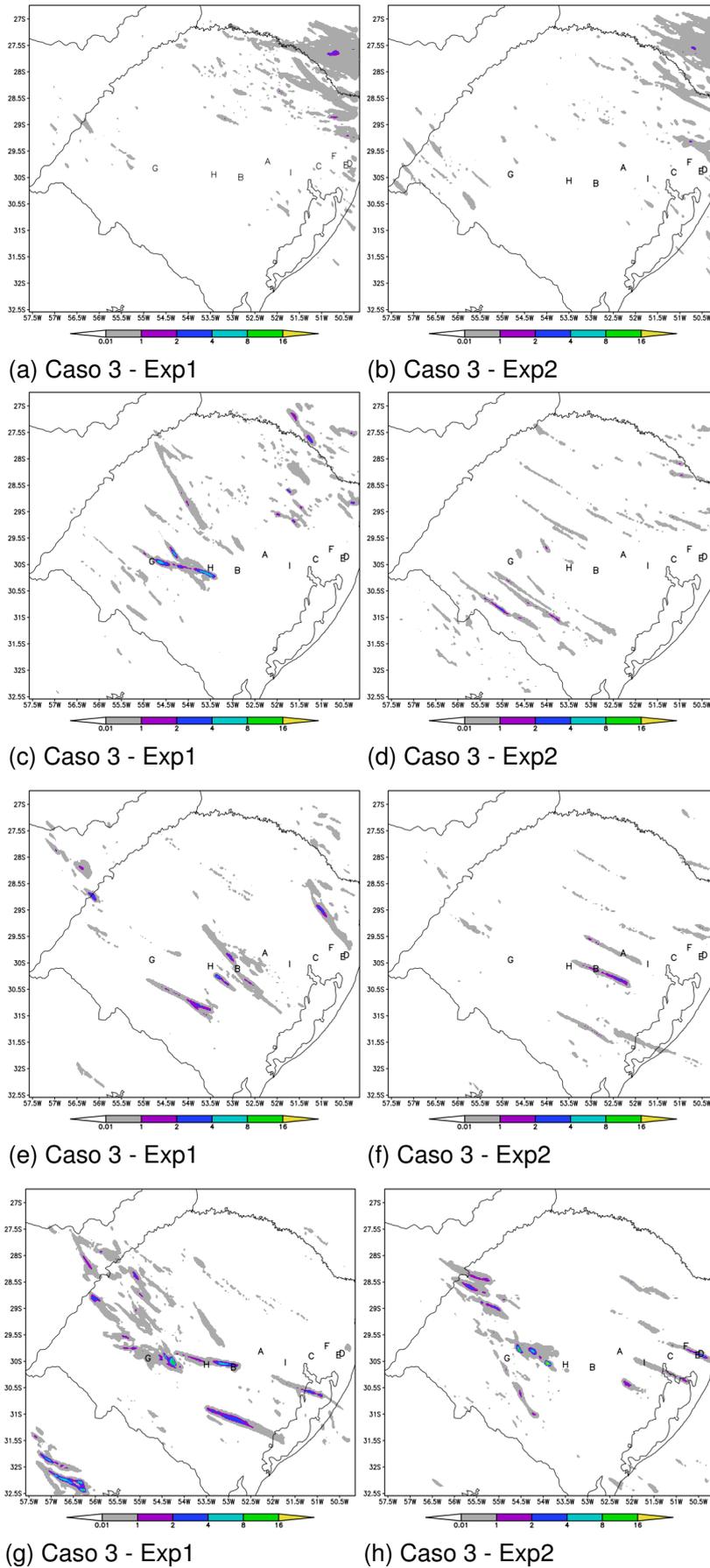


Figura 4.22 – Mesmo que a figura 4.21, porém com o Exp5 (a-c-e) e o Exp6 (b-d-f). Sendo o acumulado das 00 UTC às 17 UTC (a-b), das 17 às 20 UTC (c-d), das 20 às 22 UTC (e-f) e das 22 às 00 UTC (g-h).

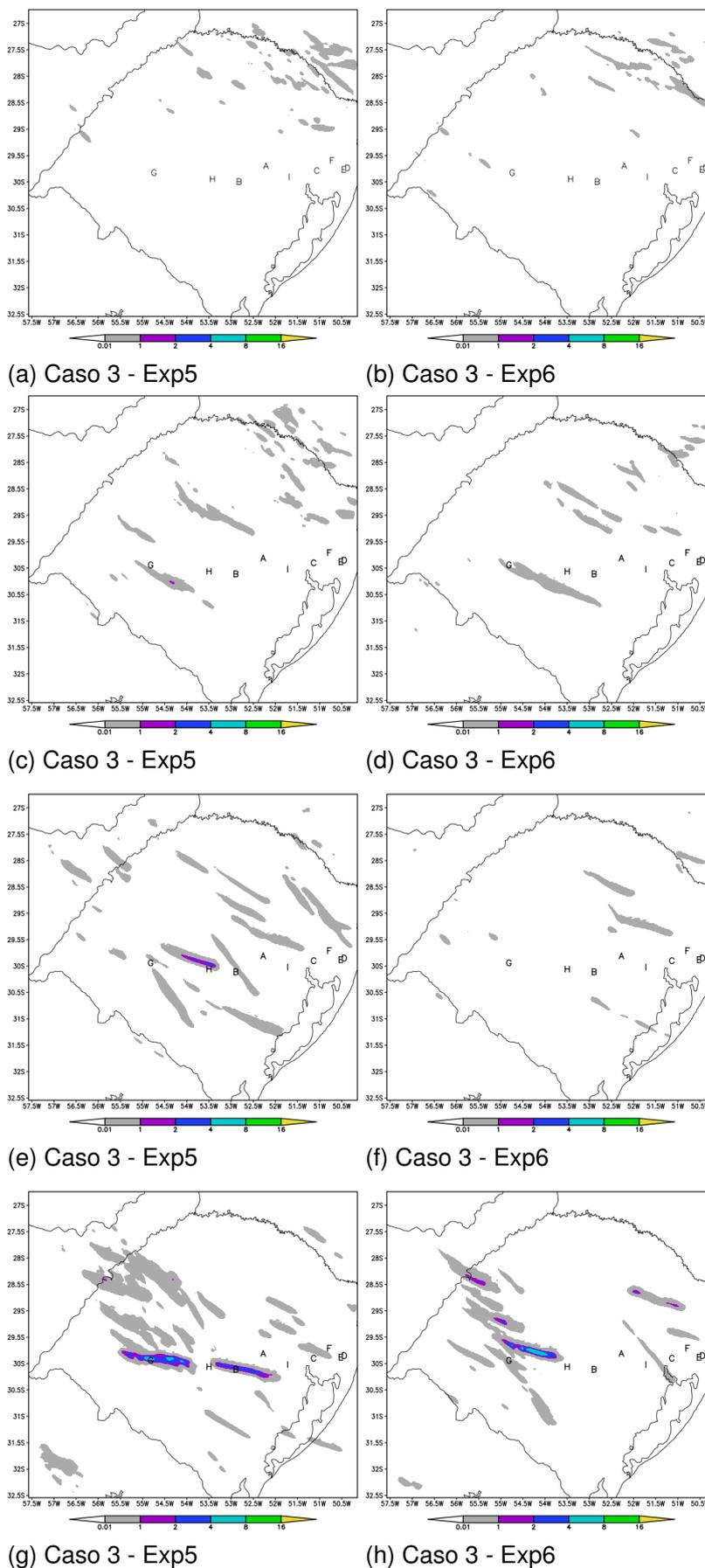


Figura 4.23 – Mesmo que a figura 4.21, porém com o Exp7 (a-c-e) e o Exp8 (b-d-f). Sendo o acumulado das 00 UTC às 17 UTC (a-b), das 17 às 20 UTC (c-d), das 20 às 22 UTC (e-f) e das 22 às 00 UTC (g-h).

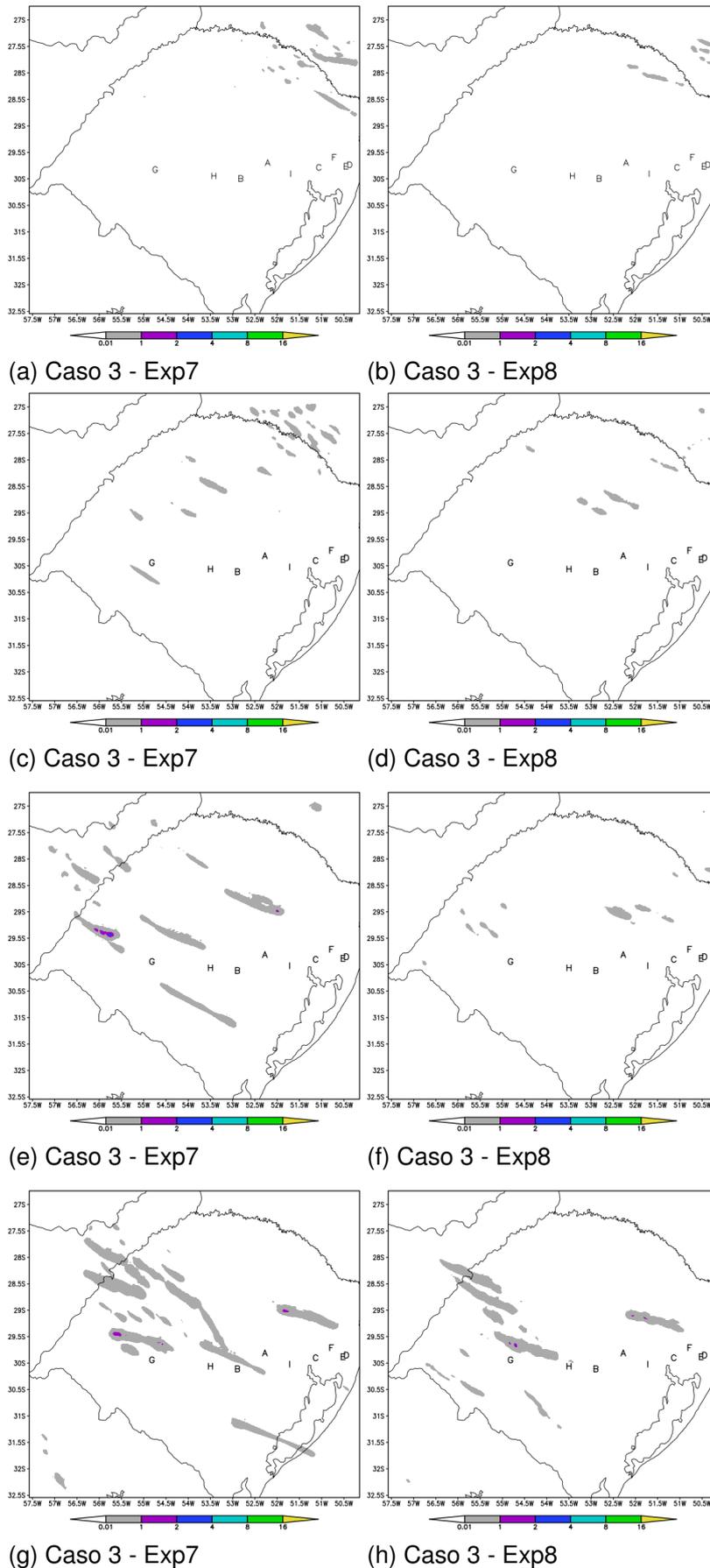


Figura 4.24 – Séries temporais horárias integradas verticalmente na atmosfera até 50 hPa e acumulada na área de todo o domínio da grade de 3 km da simulação para o Caso 3. Sendo Exp1 (a), Exp2 (b), Exp3 (c), Exp4 (d), Exp5 (e), Exp6 (f), Exp7 (g) e Exp8 (h). As variáveis apresentadas no gráfico são granizo ( $m$ ; círculo vermelho), chuva ( $m$ ; quadrado preto), vapor ( $hm$ ; círculo preto), nuvem ( $m$ ; círculo preto rachurado), neve ( $dam$ ; \* preto), gelo ( $m$ ; + preto) e graupel ( $dam$ ; triângulo preto).

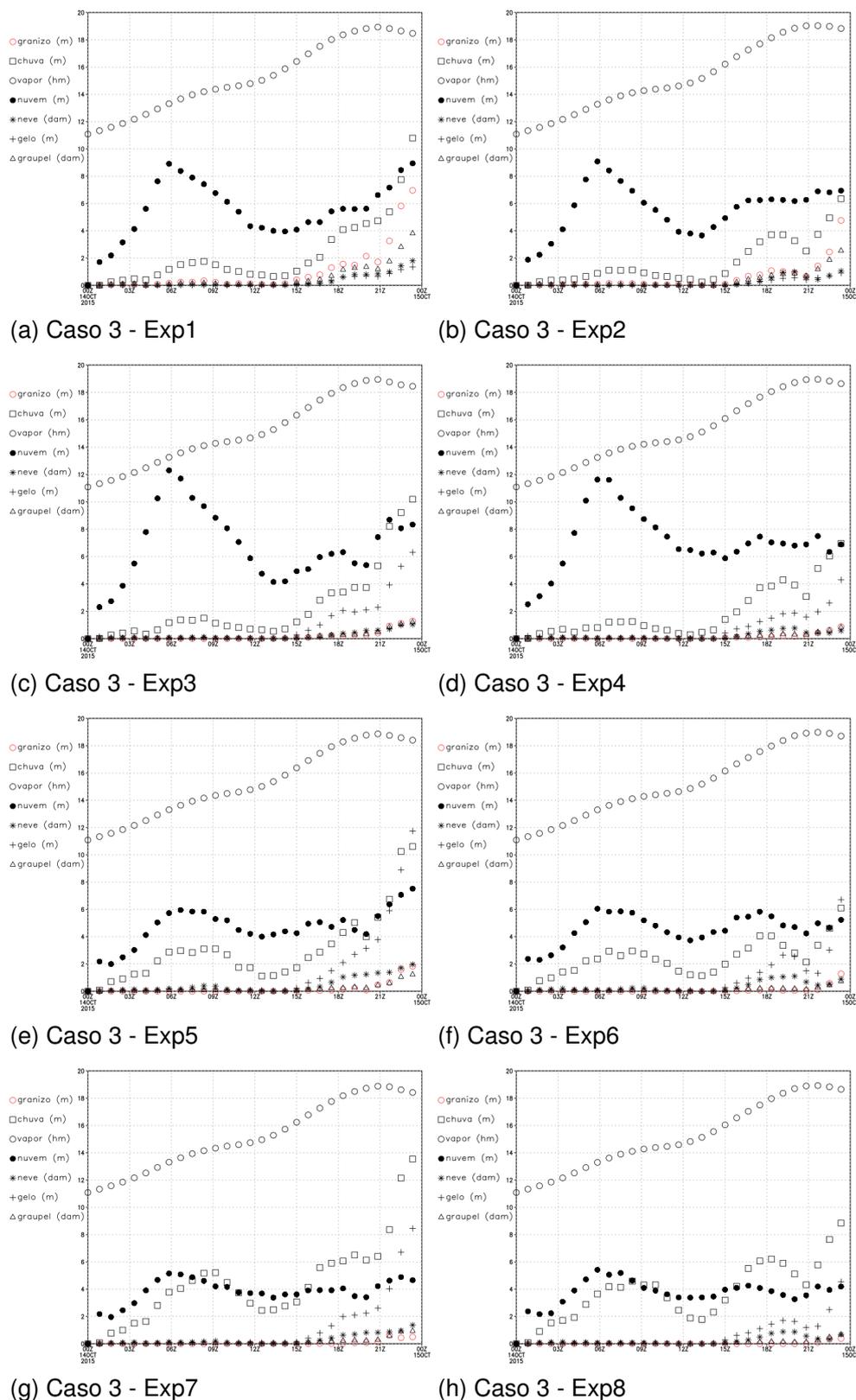
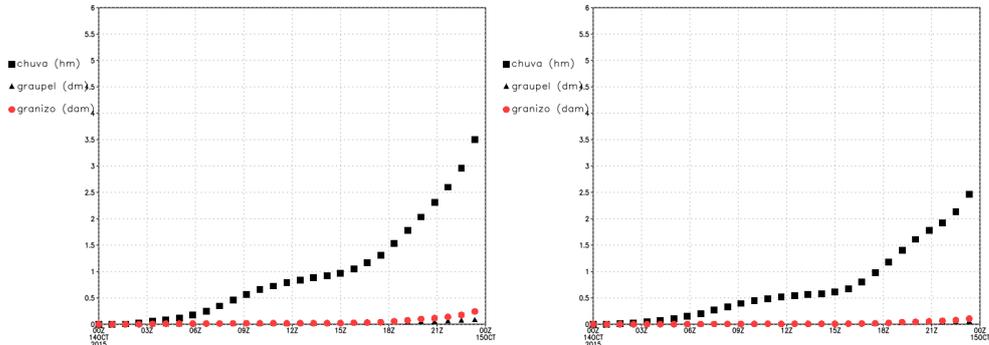
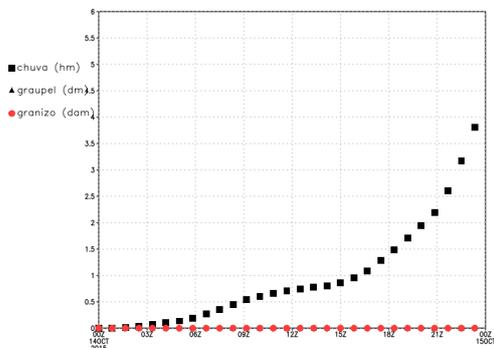


Figura 4.25 – Séries temporais horárias integradas na área com relação à superfície para o Caso 3. Sendo Exp1 (a), Exp2 (b), Exp3 (c), Exp4 (d), Exp5 (e), Exp6 (f), Exp7 (g) e Exp8 (h). As variáveis apresentadas no gráfico são granizo ( $m$ ; círculo vermelho rachurado), chuva ( $m$ ; quadrado preto rachurado) e graupel ( $dam$ ; triângulo preto rachurado).

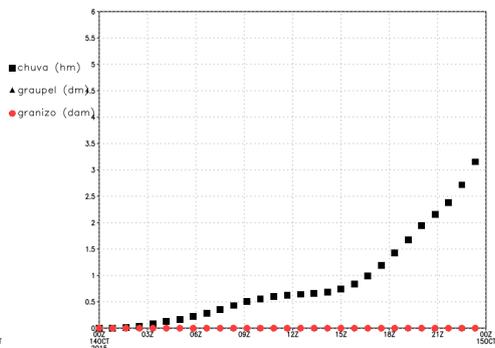


(a) Caso 3 - Exp1

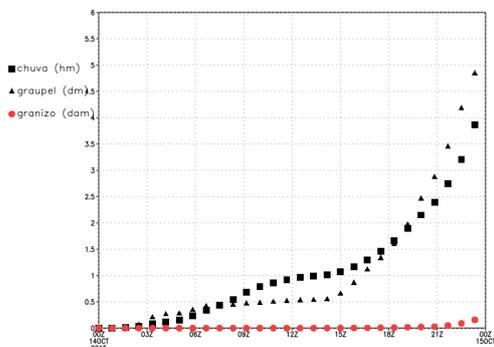
(b) Caso 3 - Exp2



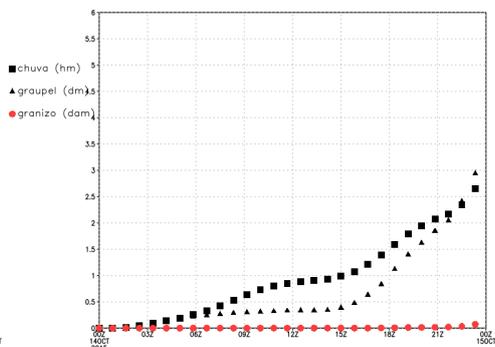
(c) Caso 3 - Exp3



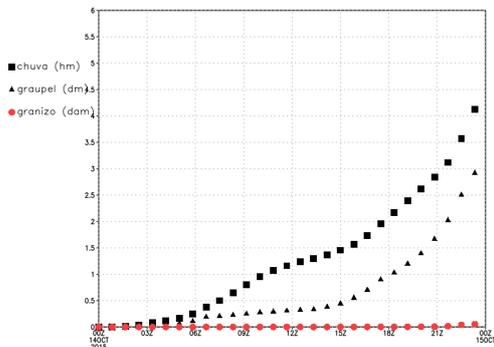
(d) Caso 3 - Exp4



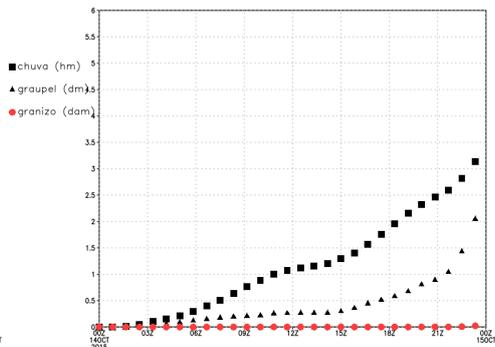
(e) Caso 3 - Exp5



(f) Caso 3 - Exp6



(g) Caso 3 - Exp7



(h) Caso 3 - Exp8

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizar simulações de eventos muito locais é de extrema dificuldade, pois são fenômenos que variam muito no tempo e no espaço, como foi identificado por Murthy, Latha e Madhuparna (2018), principalmente ao verificar a produção de granizo exatamente onde foi relatado.

Através da análise sinótica foi possível analisar que os eventos ocorreram de diferentes formas. No Caso 1 e 3 o RS estava sobre atuação de um sistema pré-frontal. Nos dois casos em altos níveis ocorreu uma difluência gerada por SCM. O aporte de calor e umidade vindos da Amazônia ajudam a intensificar a instabilidade da atmosfera. Pelas imagens de radar observa-se que o Caso 1 foi gerado pela passagem de uma Linha de Instabilidade sobre o estado afetando duas cidades e no Caso 3 foi devido a tempestades de células isoladas que causaram transtornos em nove cidade.

No Caso 2 também ocorreu devido a ocorrência de tempestades de células isoladas, mas que ficou localizado mais ao leste/norte do estado, coincidindo com a região que concentrou mais o calor e a umidade.

Através dos perfis nota-se pelos índices de estabilidade estática que a atmosfera se encontrava muito instável nos três casos. E ainda, a altura do nível de congelamento estava baixa, o que auxiliou o granizo a não sofrer descongelamento durante a queda da nuvem.

Nos campos de GAS acumulado em 24 h, notou-se que os Exp1, 2, 5 e 6 indicaram melhor o GAS através da simulação nos três casos. Entretanto, no Caso 3 foi o que a simulação representou melhor o GAS próximo das cidades afetadas pelo fenômeno.

Para o granizo na atmosfera integrado verticalmente e acumulado nas 24 h observou-se que no Caso 1, a simulação colocou mais granizo do que nos outros casos nos Exp 1 e 2. No Caso 3 o granizo na atmosfera está de forma mais isolada, mas a simulação representou bem estando localizado sobre as cidades afetadas.

Para o GAS com acumulados em períodos diferentes, notou-se que o GAS foi gerado bem pela simulação no Caso 1 somente nos Exp1 e 2 das 19 às 21 UTC, sendo esse o período relatado. Já para o Caso 2, também foi colocado GAS com os mesmos experimentos porém, o período com o GAS gerado foi das 12 às 00. Isto difere do que foi relatado pela SEDEC, pois seria colocado das 03 às 08 UTC. No entanto, o Caso 3 foi o qual a simulação melhor representou o GAS, porque foi produzido localmente e temporalmente pela metade dos experimentos utilizados, ou seja, sobre ou próximo das cidades afetadas e nos períodos dos relatos, sendo das 17 às 20 UTC, das 20 às 22 UTC e das 22 às 00 UTC.

O GAS mostrado nos três casos foi superestimado pela simulação, pois ela gerou GAS onde não houve relato. Cabe levar em consideração que como o granizo é muito variável no espaço e tempo, pode ter ocorrido, mas não foi observado para ser relatado

pela SEDEC. Dessa forma, a simulação pode não ter errado totalmente o GAS simulado.

Pelas séries temporais observou-se que os Exp1 e 2 foram os que melhor reproduziram o granizo na atmosfera e em superfície. Nos Exp3 e 4 não geraram o granizo e graupel na superfície. Já nos Exp5, 6, 7 e 8 indicaram menos granizo na atmosfera e mais gelo e neve.

A partir das simulações de diferentes experimentos utilizando PMN com PCC no modelo WRF, foi possível observar que apenas para o Caso 3 com os Exp1, 2, 5, 6, 7 e 8, a simulação foi capaz de gerar corretamente a ocorrência do granizo no espaço e no tempo.

Os índices estatísticos não foram satisfatórios para estudar os eventos de granizo principalmente pelo uso da modelagem numérica de alta resolução. Cabe em trabalhos futuros, utilizar uma outra metodologia para analisar as diferenças dos experimentos do presente trabalho.

Portanto, conclui-se que estudar um evento local como o granizo é de extrema dificuldade, pois ele varia muito no tempo e espaço, principalmente na compreensão dos processos de microfísica de nuvens do modelo para que produza exatamente onde o fenômeno ocorreu em superfície.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

O estudo apresentado aqui esboça muitas possibilidades para trabalhos futuros, uma vez que uma análise mais profunda sobre a dinâmica e termodinâmica dos eventos de granizo é necessária. Neste sentido, os seguintes tópicos são perspectivas de trabalhos futuros:

- a) Avaliar dados de granizo por satélite;
- b) Avaliar também dados de radar comparando a refletividade simulada com a observada nos eventos de granizo;
- c) Identificar como o modelo representa a dinâmica dos eventos, pois em alguns casos não gerou granizo onde foi observado. Para isso, utilizar a distribuição vertical de hidrometeoros temperatura e velocidade vertical representados pelo modelo;
- d) Verificar a formação de granizo relacionando com a velocidade vertical das correntes ascendentes e descendentes dentro da nuvem;
- e) Estudar o papel do CCN, visto que ele indicou uma diferença nos experimentos com e sem a aplicação do CCN;

- f) trabalhar com as equações das parametrizações, visando aumentar a possibilidade de colocar o granizo acumulado em superfície para futuramente realizar as previsões com um modelo regional de mesoescala como o WRF.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBIENTAL, L. de Climatologia e A. **Chuva de granizo danifica cerca de 3.180 casas no RS**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2009. Acesso em 11 de jul. 2018. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/labcaa/2009/09/29/chuva-de-granizo-danifica-cerca-de-3-180-casas-no-rs/>>.

BROOKS, H. A global view of severe thunderstorms: Estimating the current distribution and possible future changes. **AMS Severe Local Storms Special Symposium**, n. s.n., 2006.

CAMPOS, C. R. Jacondino de; MARIA, D. M. Ocorrência de granizo associada a um SCM que afetou o Rio Grande do Sul em agosto de 2006. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, n. 1, 2014.

CECIL, D. J.; BLANKENSHIP, C. B. Toward a global climatology of severe hailstorms as estimated by satellite passive microwave imagers. **Journal of Climate**, American Meteorological Society, v. 25, n. 2, p. 687–703, 2012.

CHANGON, S. A.; CHANGON, D.; HILBERG, S. D. Hailstorms across the nation: An atlas about hail and its damages. **Illinois State Water Survey**, Institute of Natural Resource Sustainability, p. 101, 2009.

COELHO, S. A. **Avaliação dos prognósticos de precipitação para os diferentes esquemas de microfísica gerados pelo modelo de mesoescala WRF na região de Brasília-DF**. 2013. 28 f. Monografia (Artigo Científico) — Curso de Especialização em Meteorologia Aeronáutica, Instituto de Controle do Espaço Aéreo, São José dos Campos, SP, 2013.

COMÉRCIO, J. do. **Chuva põe Defesa Civil em alerta no Rio Grande do Sul**. 2009. Acesso em 10 de jul. 2018. Disponível em: <<https://www.jornaldocomercio.com/site/noticia.php?codn=8806>>.

COSTA, A. A. **Apostila do curso de Modelagem Atmosférica**. 2003. 82 p. Acesso em 20 mai. 2019. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/25103993/Modelagem-Atmosferica-Alexandre-Costa-Rascunho-2003>>.

DENNIS, E. J.; KUMJIAN, M. R. The impact of vertical wind shear on hail growth in simulated supercells. **Journal of the Atmospheric Sciences**, American Meteorological Society, v. 74, p. 641–663, 2017.

DUDHIA, J. et al. **PSU / NCAR Mesoscale Modeling System**. [S.l.]: National Center for Atmospheric Research, 2005. 398 p. (Tutorial Class Notes and User's Guide).

ESTADÃO. **Vendaval danifica 1,5 mil casas no RS e fere 14 no PR**. 2009. Acesso em 22 de jan. 2018. Disponível em: <<https://brasil.estadao.com.br/noticias/geral,vendaval-danifica-1-5-mil-casas-no-rs-e-fere-14-no-pr,431700>>.

FOLHA.COM. **Chuva de granizo provoca danos em 11 cidades no RS: Uma pessoa morreu**. BOL Notícias, 2009. Acesso em 11 de jul. 2018. Disponível em: <<https://noticias.bol.uol.com.br/brasil/2009/09/28/chuva-de-granizo-provoca-danos-em-11-cidades-no-rs-uma-pessoa-morreu.jhtm>>.

FOOTE, G. B. A study of hail growth utilizing observed storm conditions. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, American Meteorological Society, v. 23, p. 84–101, 1984.

FOSTER, D. S. et al. **Aviation Hail Problem**. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1968. 2-8 p.

G1, J. **Temporal de granizo atinge o RS e danifica casas**. 2015. Acesso em 11 de jul. 2018. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2015/10/temporal-de-granizo-danifica-casas-e-chuva-volta-com-forca-ao-rs-videos.html>>.

GARCÍA-ORTEGA, E.; LÓPEZ, L.; SÁNCHEZ, J. Atmospheric patterns associated with hailstorm days in the ebro valley, spain. **Atmospheric research**, Elsevier, v. 100, n. 4, p. 401–427, 2011.

GAÚCHAZH. **Tempestade de raios toma conta do céu do Estado**: Fenômeno ocorre principalmente nas regiões central, metropolitana e dos vales. 2015. Acesso em 10 de jul. 2018. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2015/10/tempestade-de-raios-toma-conta-do-ceu-do-estado-4878559.html>>.

GLICKMAN, T. **American Meteorological Society Glossary of Meteorology**. Allen Press, 2000. Acesso em 31 ago. 2017. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20100725142407/http://amsglossary.allenpress.com/glossary/search>>.

GROENEMEIJER, P. H.; DELDEN, A. v. Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in the netherlands. **Atmospheric Research**, Elsevier B.V., v. 18, p. 473–487, 2006.

HIRSCH, E. et al. Enhanced humidity pockets originating in the mid boundary layer as a mechanism of cloud formation below the lifting condensation level. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing Ltd, v. 12, p. 1–7, 2017.

HOUZE JR., R. A. **Cloud Dynamics**. San Diego: Academic press, 2014. v. 53. 81-93 p. (International Geophysics Series, v. 53).

ILINE, V. M.; MINUZZI, R. B.; ROLIM, J. L. W. Climatologia da precipitação de granizo na região central do estado de Santa Catarina. **16° Congresso Brasileiro de Meteorologia**, p. 5, 2010. Disponível em: <[http://www.sbmet.org.br/cbmet2010/artigos/749{\\\_}39661.>](http://www.sbmet.org.br/cbmet2010/artigos/749{\_}39661.>)

JANJIC, Z. I. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. University Corporation for Atmospheric Research, v. 122, p. 927–945, 1994.

KAIN, J. S. The kain–fritsch convective parameterization: An update. **Journal of Applied Meteorology**, Cooperative Institute for Mesoscale Meteorological Studies, v. 43, p. 170–181, 2004.

KARKI, R. et al. WRF-based simulation of an extreme precipitation event over the central himalayas: Atmospheric mechanisms and their representation by microphysics parameterization schemes. **Atmospheric Research**, Elsevier, v. 214, p. 21–35, 2018.

KNIGHT, C. A.; KNIGHT, N. C. Hailstorms. **Meteorological Monographs**, American Meteorological Society, v. 28, n. 50, p. 223–248, 2001.

LACKMANN, G. **Midlatitude Synoptic Meteorology: Dynamics, Analysis, and Forecasting**. Boston: American Meteorological Society Boston, 2011. 262 p.

LI, M. et al. Nonlinear response of hail precipitation rate to environmental moisture content: A real case modeling study of an episodic midlatitude severe convective event. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 122, n. 13, p. 6729–6747, 2017.

LI, XF.; ZHANG, Q.; XUE, H. The role of initial cloud condensation nuclei concentration in hail using the WRF nssl 2-moment microphysics scheme. **Advances in Atmospheric Sciences**, Institute of Atmospheric Physics/Chinese Academy of Sciences, and Science Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, v. 34, n. 9, p. 1106–1120, 2017.

LOURENCIANO, J. O. **Chuva rápida de granizo atingiu alguns locais da cidade**. 2015. Acesso em 11 de jul. 2018. Disponível em: <<http://www.jornalolourenciano.com.br/cidade/item/1273-chuva-rapida-de-granizo-atingiu-alguns-locais-da-cidade>>.

LUO, L. et al. Explicit prediction of hail using multimoment microphysics schemes for a hailstorm of 19 march 2014 in eastern china. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 122, n. 14, p. 7560–7581, 2017.

MANSELL, E. R.; ZIEGLER, C. L.; BRUNING, E. C. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 67, n. 1, p. 171–194, 2010.

MARKOWSKI, P.; RICHARDSON, Y. **Mesoscale Meteorology in Midlatitudes**. Oxford: John Wiley & Sons, 2010. 306 p.

MARTINS, J. A. et al. Climatology of destructive hailstorms in brazil. **Atmospheric Research**, Elsevier, v. 184, p. 126–138, 2017.

MATSON, R. J.; HUGGINS, A. W. The direct measurement of the sizes, shapes and kinematics of falling hailstones. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 37, n. 5, p. 1107–1125, 1980.

METEOROLOGIA, C. **Vídeo do YouTube**: Temporal de granizo em sapucaia do sul (rs). 2015. Acesso em 10 de jul. 2018. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=adsNKuoGlmY>>.

MILBRANDT, J. A.; YAU, M. K. A multimoment bulk microphysics parameterization. part i e ii: A proposed three-moment closure and scheme description. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 62, p. 3065–3081, 2005.

MILLER, L. J.; TUTTLE, J. D.; FOOTE, G. B. Precipitation production in a large montana hailstorm: Airflow and particle growth trajectories. **Journal of the Atmospheric Sciences**, American Meteorological Society, v. 47, n. 23, p. 1619–1646, 1990.

MURTHY, B.; LATHA, R.; MADHUPARNA, H. WRF simulation of a severe hailstorm over baramati: a study into the space-time evolution. **Meteorology and Atmospheric Physics**, Springer-Verlag Wien, v. 130, n. 2, p. 153–167, 2018.

NASCIMENTO, E. d. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 1, p. 121–140, 2005.

NELSON, S. P. The influence of storm flow structure on hail growth. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 40, p. 1965–1983, 1983.

NOAA. **WRF Domain Wizard**. 2013. Acesso em 23 de jul. 2018. Disponível em: <<https://esrl.noaa.gov/gsd/wrfportal/DomainWizard.html>>.

OLIVEIRA, E. M. G. **Parametrizações convectivas no modelo WRF e sua relação com a precipitação durante ciclogêneses no sudeste da América do Sul**. 2014. 95 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

PU, Z. et al. Sensitivity of numerical simulations of a mesoscale convective system to ice hydrometeors in bulk microphysical parameterization. **Pure and Applied Geophysics**, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, p. 1–24, 2018.

PUNGE, H. J.; KUNZ, M. Hail observations and hailstorm characteristics in europe: A review. **Atmospheric Research**, Elsevier, v. 176, p. 159–184, 2016.

RASERA, G. **Eventos severos gerados por SCM que atingiram o Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2008**. 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2013.

ROGERS, R. R.; YAU, M. **A Short Course in Cloud Physics**. 3. ed. [S.l.]: Reed Elsevier Group, 1996. 306 p.

ROMPS, D. M. Exact expression for the lifting condensation level. **Journal of the Atmospheric Sciences**, American Meteorological Society, v. 74, p. 3891–3900, 2017.

RUTLEDGE, S. A.; HOBBS, P. V. **The Mesoscale and Microscale Structure and Organization of Clouds and Precipitation in Midlatitude Cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cold-frontal rainbands**. [S.l.]: American Meteorological Society, 1984. 1187 p.

SANTOS, M. O. **Estimativa de Descargas Elétricas através de Simulações Numéricas com o WRF**. 2014. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SCHUSTER, S. S.; BLONG, R. J.; SPEER, M. S. A hail climatology of the greater sydney area and new south wales, australia. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 25, n. 12, p. 1633–1650, 2005.

SEDEC. **Relatório de Avaliação de Danos de Granizo da Secretaria Nacional de Defesa Civil-SEDEC**. Sistema Integrado de Informações sobre Desastres, 2009. Acesso em 20 ago. 2017. Disponível em: <<https://s2id-search.labtrans.ufsc.br/>>.

SEPEENSE, J. O. **Chuva de granizo atinge municípios de Formigueiro e Restinga Seca**. 2015. Acesso em 11 de jul. 2018. Disponível em: <<http://osepeense.com/chuva-de-granizo-atinge-municipios-de-formigueiro-e-restinga-seca/>>.

SIOUTAS, M.; FLOCAS, H. Hailstorms in northern greece: synoptic patterns and thermodynamic environment. **Theoretical and Applied Climatology**, Springer-Verlag, v. 75, n. 3-4, p. 189–202, 2003.

SKAMAROCK, W. C. W. C. et al. **Reinterpreting evaluation classics in the modern age**. Boulder: [s.n.], 2008. v. 49. 125 p. (NCAR Technical Note, 2).

SODERHOLM, J. et al. An 18-year climatology of hailstorm trends and related drivers across southeast queensland, australia. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Wiley Online Library, v. 143, n. 703, p. 1123–1135, 2017.

S.PAULO, F. de. **Vendaval e chuvas causam destruição e morte no Sul**. 2009. Acesso em 10 de jul. 2018. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff2809200911.htm>>.

SPERLING, V. B. **Processos Físicos e Elétricos das Tempestades de Granizo na região Sul do Brasil**. 2018. 207 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

SPIRIDONOV, V.; ĆURIĆ, M. Evaluation of supercell storm triggering factors based on a cloud resolving model simulation. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science**, Springer, v. 55, p. 439–458, 2019.

STENSRUD, D. J. **Parameterization Schemes**: keys to understanding numerical weather prediction models. Norman: Cambridge University Press, 2009. 185-275 p.

SUL, J. O. **Canoas decreta situação de emergência devido aos estragos do temporal**. 2015. Acesso em 11 de jul. 2018. Disponível em: <<http://www.osul.com.br/canoas-decreta-situacao-de-emergencia-devido-aos-estragos-do-temporal/>>.

TASZAREK, M.; SUWALA, K. Large hail in poland in 2012. **Quaestiones Geographicae**, v. 34, p. 75–84, 2013.

TEITELBAUM, H.; D'ANDREA, F. Deep convection east of the andes cordillera: four hailstorm cases. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, International Meteorological Institute in Stockholm, v. 67, n. 1, p. 1–19, 2015.

TERRA. **vc repórter**: Itaara é a mais atingida pelas chuvas no rs. 2009. Acesso em 22 de jan. 2018. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/noticias/brasil/vc-reporter-itaara-e-a-mais-atingida-pelas-chuvas-no-rs,98de68f40d94b310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html>>.

TUOVINEN, J.-P. et al. Climatology of severe hail in finland: 1930-2006. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 137, n. 7, p. 2238–2249, 2009.

VIDA, D. **Carro atingido por Granizo no RS em Outubro de 2015**. 2015. Acesso em 11 de jul. 2018. Disponível em: <<https://descobrindovida.blogspot.com/2015/10/carro-atingido-por-granizo-no-rs-em.html>>.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science**: An introductory survey. 2. ed. San Diego: Elsevier Academic Press, 2006. v. 92. 232-245 p. (International Geophysics Series, v. 92).

WANG, W. et al. **User's Guide for Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3**. Boulder: [s.n.], 2017. 454 p. Acesso em 6 ago. 2017. Disponível em: <[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v3.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf)>.

WILKS, D. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Volume 100 - 2nd Edition**. [S.l.]: Elsevier, 2006. 627 p. (International Geophysics, v. 91).

WITT, A. et al. Rapid-scan radar observations of an oklahoma tornadic hailstorm producing giant hail. **Weather and Forecasting**, American Meteorological Society, v. 33, p. 1263–1282, 2018.

WU, D. et al. Impacts of microphysical scheme on convective and stratiform characteristics in two high precipitation squall line events. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 118, n. 19, p. 11–119, 2013.

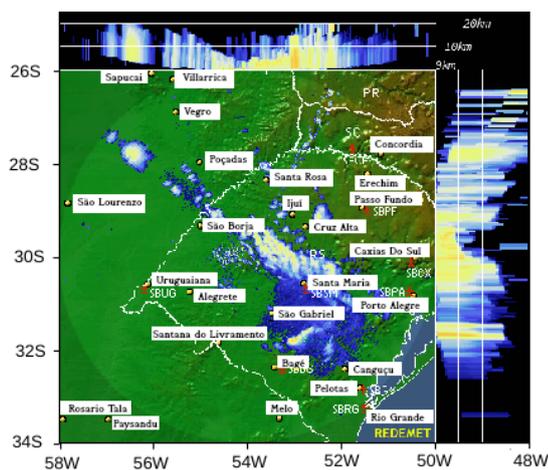
ZHENG, Y. et al. Improving high-resolution weather forecasts using the weather research and forecasting (wrf) model with an updated kain–fritsch scheme. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 144, n. 3, p. 833–860, 2015.

ZIPSER, E. J. et al. Where are the most intense thunderstorms on earth? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 87, n. 8, p. 1057–1071, 2006.



## APÊNDICE A – IMAGENS DE RADAR DAS DEMAIS CIDADES DOS EVENTOS DE GRANIZO DO DIA 07 DE SETEMBRO DE 2009 E 14 DE OUTUBRO DE 2015.

Figura A.1 – Imagens de radar de refletividade em dBZ às 20:30 UTC do evento de granizo do dia 7 de setembro de 2009 que atingiu a cidade de Lavras do Sul.

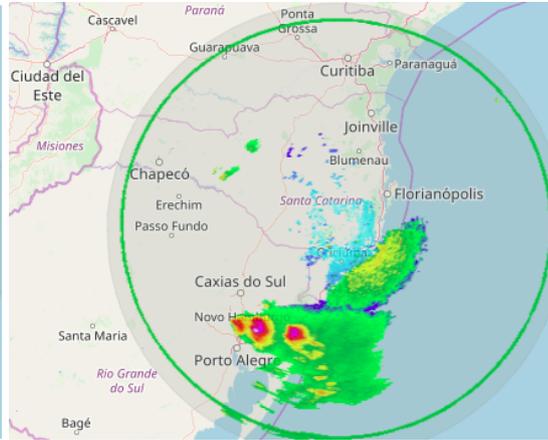


Fonte: Imagem de radar do REDEMET.

Figura A.2 – Imagens de radar de refletividade em dBZ do evento do dia 14 de outubro de 2015 que atingiu as cidades de (a) Sapucaia do Sul às 20:30 UTC, (b) Caraá às 20:45 UTC, (b) Santo Antônio da Patrulha às 20:45 UTC, (c) Taquara às 21:00 UTC, (d) Cacequi às 21:30 UTC, (e) Formigueiro às 23:00 UTC e (f) São Jerônimo às 23:30 UTC.



(a)



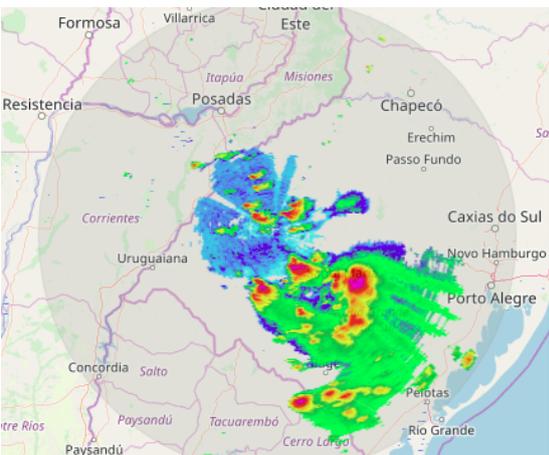
(b)



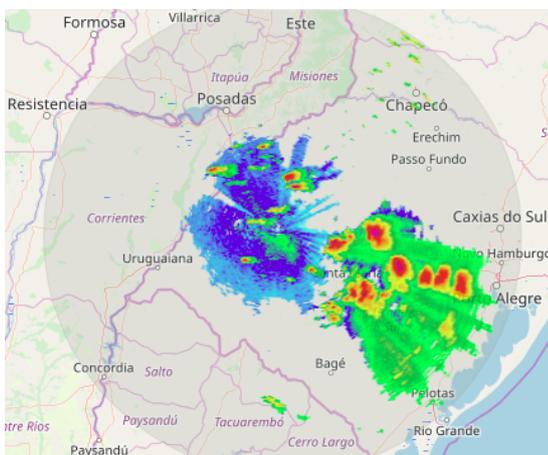
(c)



(d)



(e)



(f)