

## **Contribuições de Edmilson D. Freitas e Ricardo Hallak**

### **3) Descrição dos trabalhos de Pesquisa em Andamento**

#### ***a) O sistema operacional de previsão em curtíssimo prazo***

No relatório anterior foi mencionada a criação ciclos operacionais com os modelos BRAMS (no IAG-USP) e WRF (no IAG-USP e no CPTEC-INPE). Embora tenham ocorrido muitos desenvolvimentos importantes nesta versão, existe uma limitação em relação ao aninhamento de grades, não sendo possível a interação de dois sentidos (two-way interaction), ou seja, apenas a informação das grades de menor resolução são passadas para as grades de maior resolução, sem que haja feedback para as grades maiores sobre os processos de menor escala resolvidos pelo modelo. Deste modo, um dos trabalhos realizados durante o período envolveu a aplicação de versões mais antigas do modelo BRAMS em que a comunicação two-way estivesse funcionando. Este é um trabalho que está sendo desenvolvido pela estudante de Mestrado Isabela Christina Siqueira. Também, em relação às grades que estavam sendo utilizadas, foi verificado problema de instabilidade numérica na grade de mais alta resolução. Deste modo, julgou-se mais adequado reduzir o espaçamento de grade, de 1 para 2 km. O ciclo de operações com o modelo BRAMS tem sido feito com esse espaçamento e os problemas de instabilidade numérica foram sanados. Além da apresentação dos campos de precipitação e vento nos produtos disponíveis na página do Laboratório MASTER, já apresentados no relatório anterior, atualmente podem também ser verificados os campos de umidade relativa e temperatura. Os resultados podem ser vistos em <http://www.master.iag.usp.br/num/modelos/regional/>.

#### ***b) Experimentos com o Modelo BRAMS***

Além das simulações realizadas operacionalmente com os modelos numéricos, foi dado início à simulação de casos mais relevantes de tempestades ocorridas no domínio de interesse do projeto. Foi selecionado o evento ocorrido em 03 de Dezembro de 2016, em que foram observados granizo, rajadas de vento, altas taxas de precipitação e destruição de patrimônios na Região Metropolitana de Campinas (RMC). Foi utilizado um arquivo de uso de solo com cobertura urbana, além da parametrização de superfícies para áreas urbanas (o esquema TEB-SPM) que realiza a dispersão de poluentes gerada por veículos e indústrias. O objetivo do experimento realizado foi o de buscar uma melhor calibração do modelo, bem como de avaliar as parametrizações de maior relevância para os processos de formação de nuvens disponíveis, tanto de radiação quanto de microfísica de nuvens, podendo assim, melhor avaliar a destreza do modelo em novas simulações. Além disso, foram realizados testes de sensibilidade com diferentes usos de solo (urbano x cerrado), com o objetivo de verificar a influência do ambiente urbano na geração de eventos severos.

Para essas simulações foram utilizadas grades não aninhadas e aninhadas com espaçamento horizontal de 16 e 4 km, estando a grade de maior resolução com a parametrização de cumulus desativada. Na Figura 1 são apresentadas as duas grades utilizadas nos experimentos sobre a projeção da topografia simulada pelo modelo na grade de 16 km.



Figura 1: Domínio das grades utilizadas e Topografia da grade de 16 km.

Na microfísica foi utilizada a distribuição de Marshall e Palmer (MARSHALL e PALMER, 1948) para os hidrometeoros presentes nas simulações de nuvens, já a parametrização escolhida para a radiação de onda longa e curta, foi a de Mahrer e Pielke (MAHRER e PIELKE, 1977). Os dados de entrada do modelo foram obtidos do modelo global GFS, com  $0,5^\circ$  de espaçamento de grade horizontal, e o período total de simulação foi de 30 horas com início às 16Z do dia 02/12 com final às 22Z do dia 03/12. A partir dessas simulações foram analisados perfis de precipitação, temperatura e vento da grade de 16 km com uso de solo urbano, além de análise de temperatura, vento, CAPE e CINE da grade e 04 km, com o mesmo uso de solo.

Dos experimentos realizados com o modelo BRAMS 4.2, pode-se observar que a simulação da precipitação (mm) com o uso de solo urbano foi simulada apenas na grade de 16 km, indicando falta de comunicação entre as grades, na Figura 2, pode-se observar um núcleo intenso de precipitação à leste da RMC, entretanto, em relação à ocorrência observada do evento (16Z) houve um atraso de 7 horas em relação à simulação (22Z).

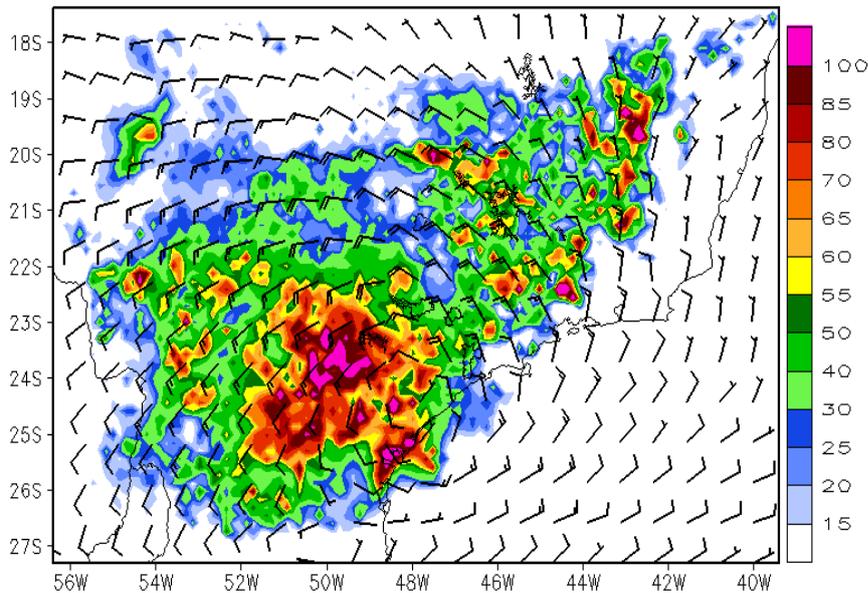


Figura 2: Precipitação (mm) e vento ( $\text{ms}^{-1}$ ) simulados pelo modelo BRAMS na grade de 16 km para o horário das 22Z.

Pode-se observar um giro ciclônico intenso centrado em  $50^{\circ}\text{W} - 24^{\circ}\text{S}$  indicando a presença de um centro de baixa pressão em superfície. Vale ressaltar que o evento teve forçantes dinâmicas de larga escala bastante intensas, estando associado à uma circulação baroclínica, onde em altos níveis foi observado um centro de alta pressão que em baixos níveis corresponde a um centro de baixa pressão.

Já as simulações de temperatura para a grade de 16 km (Figura 3) mostra o desenvolvimento do centro de baixa pressão no decorrer do dia. As temperaturas simuladas não ultrapassam os  $30^{\circ}\text{C}$ , sendo o maior valor de temperatura observado sobre a RMC às 00Z. Já a temperatura simulada na grade de 4 km apresenta um maior detalhe, porém não há nenhuma elevação de temperatura sobre as cidades durante o dia (não mostrado neste relatório), indicando que a simulação realizada apresenta baixos valores de temperatura em superfície para o dia estudado.

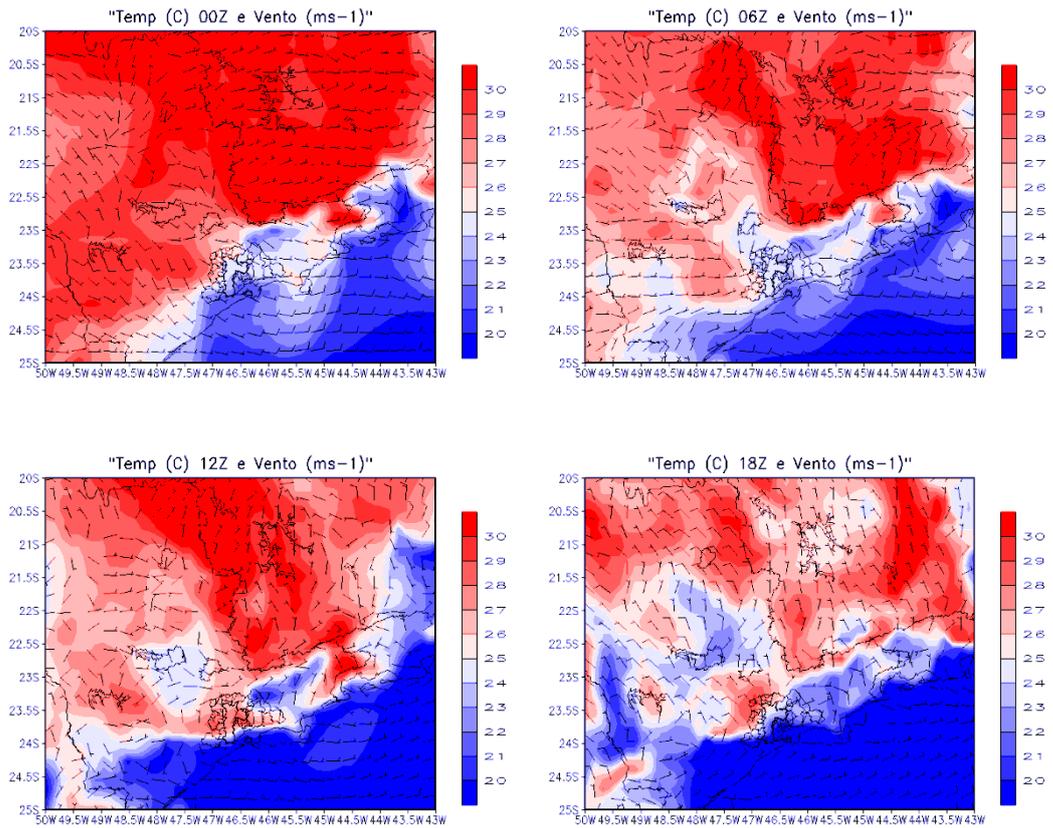


Figura 3: Temperatura (°C) e Vento (m/s) simulados para a grade de 16 km (horários estão indicados nas figuras).

Já para o CAPE e CINE (Figura 4) simulados na grade de 4 km, há indicação de valores extremamente baixos para o horário das 20Z, anterior à ocorrência do evento na simulação.

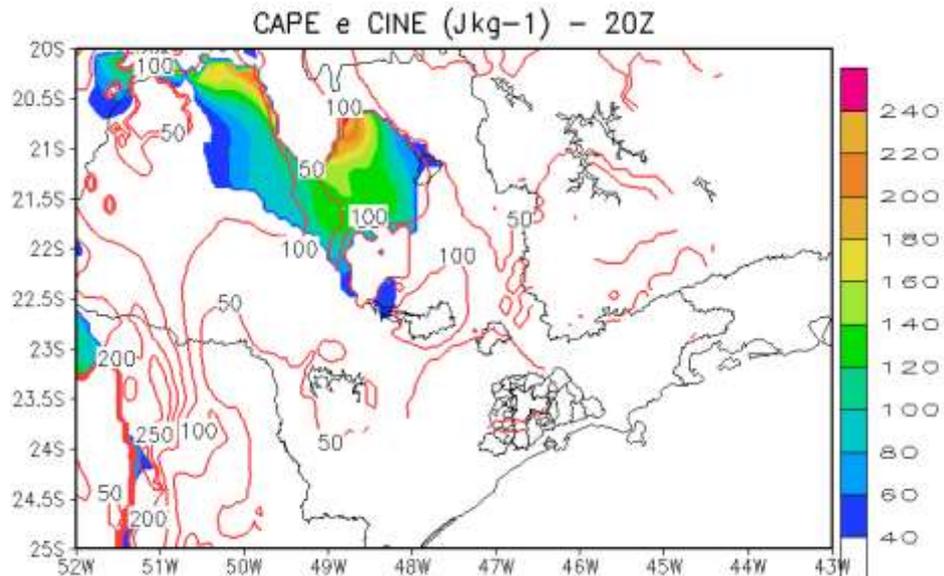


Figura 4: CAPE (Jkg-1) e CINE (Jkg-1) simulados na grade de 04 km.

**c) Avaliação de parametrizações de nuvens cúmulos no modelo WRF em situação sinótica de frente fria nas áreas central e leste da Região Sudeste do Brasil**

Nesta fase de desenvolvimento do projeto SOS-CHUVA, direcionou-se um projeto de mestrado, elaborado no Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG/USP, com objetivos derivados dos assuntos propostos no Projeto Temático. O projeto de mestrado teve início em março de 2017 e foi designado ao estudante Franco Cassol, sob orientação do Prof. Dr. Ricardo Hallak.

Em linhas básicas, o projeto propõe entender as causas dos erros nas simulações de precipitação na área de interesse, derivados de algumas parametrizações cúmulos dentre as diversas opções existentes no modelo regional WRF, um dos modelos atmosféricos em uso no projeto SOS-CHUVA. Ao mesmo tempo, propõe-se compreender também as diferenças entre as parametrizações estudadas. Nesta primeira parte do trabalho, foram testadas e comparadas as parametrizações de Kain-Fritsch (2004) e a de Betts-Miller-Janjic (Janjic, 2004; Warner, 2011).

### **Parametrizações cúmulos**

Em grades numéricas de baixa resolução espacial, neste projeto consideradas como aquelas com mais de 3 km de espaçamento entre pontos de grade, os efeitos da convecção e das nuvens cúmulos individuais não são necessariamente representados de forma explícita pelos modelos atmosféricos. No entanto, os sistemas convectivos de mesoescala que são associados aos aglomerados de nuvens cúmulos individuais podem surgir como soluções explícitas nesses modelos de mesoescala, derivados dos processos físicos que as parametrizações de nuvens cúmulos tentam descrever.

Conforme descrito em Warner (2011), para espaçamentos de grade maior que 10 km, a precipitação é estimada por parametrizações cúmulos que representam convecção como processo de subgrade. Normalmente a precipitação surge nessas parametrizações mesmo que não haja saturação nos pontos de grade. A chamada "zona cinza" das parametrizações encontra-se atualmente no intervalo de espaçamento de grade entre 3 km e 10 km. Neste intervalo, a convecção é parcialmente resolvida pela parametrização de microfísica de nuvens, mas não há uma parametrização que funcione adequadamente na estimativa de precipitação. Já para espaçamentos de grade menores que 3 km, as nuvens cúmulos individuais podem ser resolvidas explicitamente pelas equações da microfísica de nuvens.

Nesta etapa do trabalho as simulações com o modelo regional WRF estão sendo realizadas com espaçamento de grade de 27 km, a fim de se avaliar o desempenho das parametrizações cúmulos escolhidas para os testes, bem como identificar as fontes de erros para cada determinada parametrização.

### **Esquema de Kain-Fritsch**

O esquema de Kain-Fritsch trata a convecção profunda e é considerado um esquema de controle de baixos níveis por usar forçantes de níveis inferiores para impor as condições para que ocorra convecção. A sua formulação pode ser dividida em três partes: a função de disparo, a formulação do fluxo de massa e a hipótese de fechamento (Kain-Fritsch, 2004).

A função de disparo é considerada uma das mais complexas dentro todos os esquemas possíveis (Stensrud, 2009). A função gatilho seleciona uma camada atmosférica de profundidade de 60 hPa, iniciando da superfície, como sendo uma parcela. Utiliza suas condições termodinâmicas médias para avaliar se é uma camada candidata a gerar convecção, estimando uma elevação até o seu nível de condensação por levantamento (NCL) e comparando a temperatura da parcela com a do ambiente nesse nível.

Nas condições habituais da atmosfera, uma parcela precisa de um mecanismo dinâmico para ser elevada até atingir uma condição de flutuabilidade positiva, ou seja, até se tornar mais quente e menos densa que o ambiente, e, a partir daí, elevar-se espontaneamente na vertical. Movimento vertical induzido por dinâmica de grande escala é um mecanismo forçante, como, por exemplo, a intersecção entre duas massas de ar de características muito diferentes durante a passagem de uma frente fria sobre uma região.

A hipótese de fechamento desta parametrização considera que o CAPE (Energia Potencial Disponível para Convecção) é removido em 90% por conta da mistura e do aquecimento do ambiente, que ocorre durante o desenvolvimento da convecção, em um período de tempo entre 30 e 60 minutos de convecção. Por meio deste conceito, os perfis de temperatura e razão de mistura de vapor d'água são ajustados no fim do período de remoção de CAPE.

### **Esquema de Betts-Miller-Janjic**

Este esquema, ao contrário do esquema de Kain-Fritsch, é do tipo chamado "controle de camada profunda", que se baseia na geração de CAPE como parâmetro de controle para o desenvolvimento da convecção.

### **Estudo de Caso**

Para este estudo, foi selecionado um caso de passagem de frente fria pela Bacia do Paraná. O caso ocorreu entre os dias 07 e 11 de novembro de 2014.

### **Configurações da simulação e métodos de análise**

As análises do modelo global GFS (Global Forecast System) com 0,5° de espaçamento horizontal foram usadas como condições iniciais e de fronteira das simulações efetuadas com o modelo WRF, cujo período de integração foi de 0000 UTC de 07 de novembro a 0000 UTC de 11 de novembro de 2014. Estes arquivos estão disponíveis em intervalos de seis horas, abrangendo 26 níveis verticais em coordenadas de pressão entre 1000 e 1 hPa.

O domínio escolhido para as simulações com o modelo regional WRF apresenta espaçamento de grade de 27 km. A região de simulação é mostrada na Figura 5. As duas simulações foram feitas modificando a opção de esquema de parametrização cúmulos, sem alterar as demais configurações definidas ainda no pré-processamento.

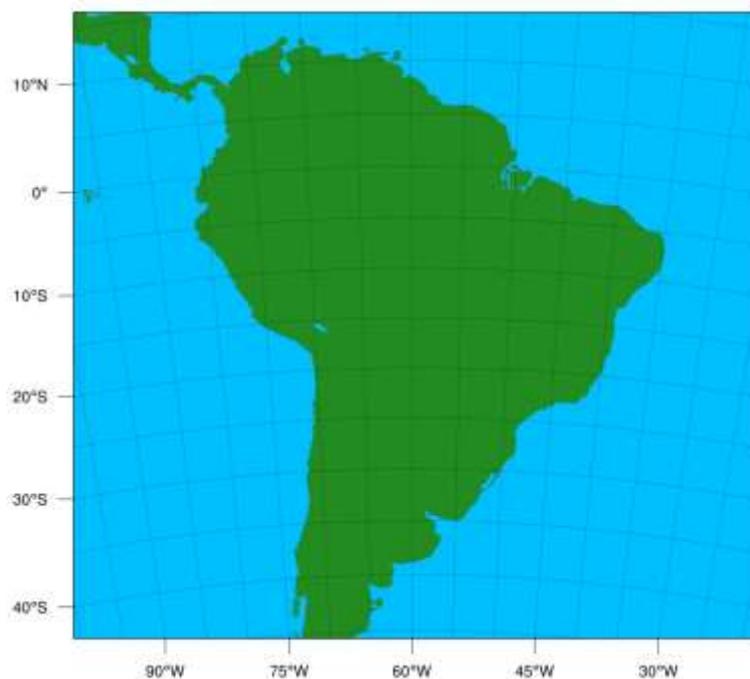


Figura 5: Domínio definido para as simulações WRF de 27 km de espaçamento entre os pontos de grade.

### Método comparativo

Para comparação com os resultados do modelo regional, são usadas as estimativas de precipitação via satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). As comparações são feitas de forma objetiva, conforme a metodologia proposta em Hallak e Pereira Filho (2011). As estimativas de precipitação TRMM possuem disponibilidade a cada 3 horas e resolução espacial de 25 km.

Seguindo a metodologia proposta em Hallak e Pereira Filho (2011), são calculados os campos de ERRO MÉDIO ou BIAS (ou ainda, VIÉS), que é relevante para inferir erros sistemáticos de amplitude da precipitação, e de raiz quadrada do erro médio quadrático (REMQ), que é um dado de magnitude do erro, que fornece informações acerca da acurácia da simulação. Ambos os campos permitem avaliar os erros associados à fase dos sistemas (ou seja, de posicionamento de sistemas precipitantes). Tais medidas estatísticas são definidas da seguinte forma:

### Erro Médio (ME)

$$ME = BIAS = \bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i$$

onde  $d_i$  refere-se à diferença simples entre a precipitação simulada ( $P_s$ ) e a observada ( $P_O$ ), ou estimada por satélite, para os  $N$  passos de tempo. Os cálculos são efetuados ponto a ponto entre duas grades horizontais apresentando as mesmas geometrias e, então, os erros somados no tempo e divididos pelo número de passos de tempo.

### **Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE):**

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_s - P_o)^2 \right]^{1/2}$$

com as definições já apresentadas para os diversos símbolos.

Ambos os erros foram somados num intervalo de 12 h, e avançando no tempo a cada 3 horas, segundo a disponibilidade de dados das estimativas TRMM.

### **RESULTADOS PARCIAIS**

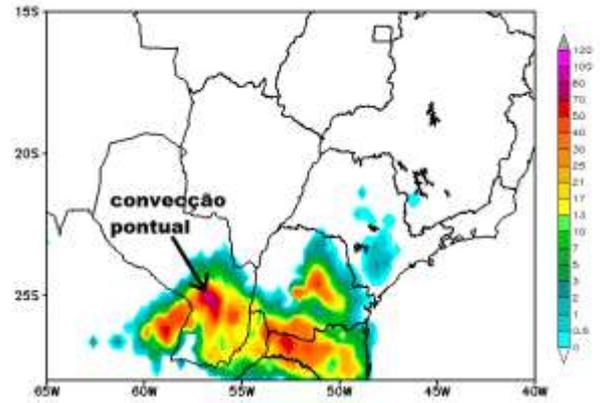
Como análise subjetiva básica, registre-se que, nesta configuração do modelo WRF, fica evidente a dificuldade das parametrizações testadas representarem pequenas áreas de convecção isolada, responsáveis por picos locais de taxa de precipitação mais intensa. O espaçamento de grade pode ser um fator importante na representação destes detalhes locais. Conclui-se que a configuração utilizada de 27 km não é um espaçamento ideal para este tipo de padrão pontual, o que certamente penaliza o modelo nos cálculos de desempenho de simulação de precipitação.

Na subestimativa de chuvas pontuais, o esquema Betts-Miller-Janjic (BMJ) teve pior desempenho, pois apresentou maiores dificuldades em apontar pontos de precipitação mais alta. Nota-se, também que, de forma geral, o esquema BMJ obteve acumulados de chuva menores do que o esquema Kain-Fritsch (KF) na Bacia do Paraná como um todo. Além disso, os erros de fase (associados ao posicionamento dos sistemas precipitantes) são observados diversas vezes nos resultados das simulações, o que de fato é muito comum em modelagem atmosférica, como já observado por Hallak e Pereira Filho (2011).

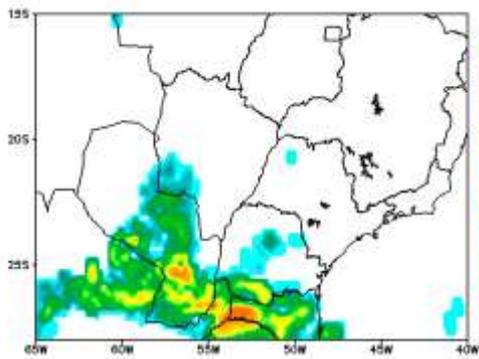
Na Figura 6, os aspectos acima comentados (dificuldade em representações pontuais, subestimativa maior por BMJ, erros de fase) são demonstrados e quantificados. A Figura 6 apresenta imagem do canal infravermelho do satélite GOES 13 com recorte para a área de interesse, a precipitação acumulada a cada 3 h estimada pelo satélite TRMM, as precipitações estimadas pelos dois esquemas de parametrização analisados e os campos espaciais de BIAS para o dia 07/11/2014 às 1200 UTC.



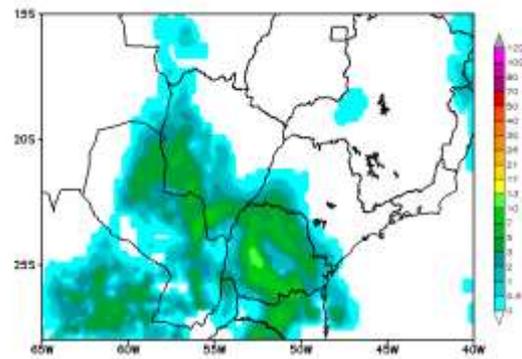
(a)



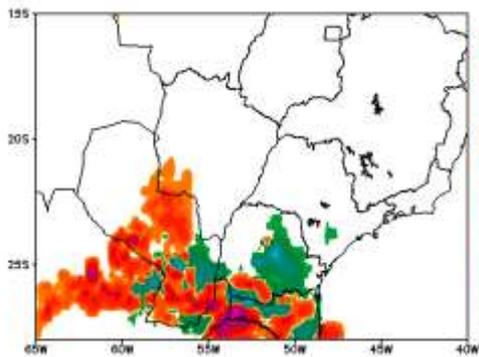
(b)



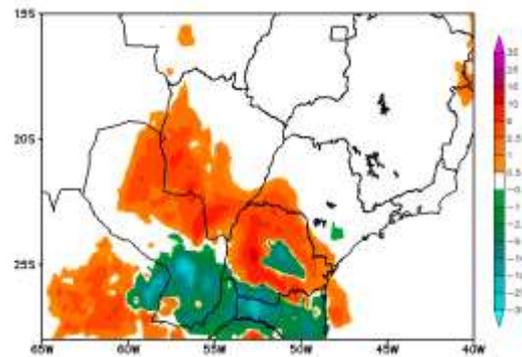
(c)



(d)



(e)



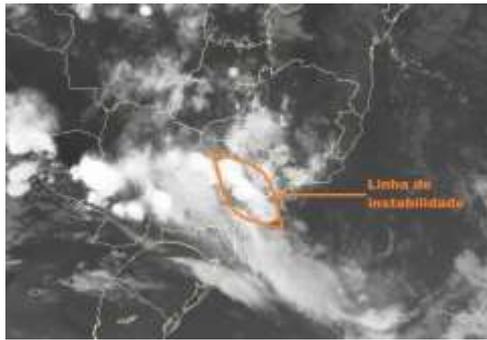
(f)

Figura 6: (a) Imagem do canal infravermelho do satélite GOES13; (b) precipitação acumulada estimada via satélite TRMM (mm/3h); (c) precipitação acumulada simulada pelo esquema Kain-Fritsch na simulação WRF (mm/3h); (d) precipitação acumulada simulada pelo esquema Betts-Miller-Janjic na simulação WRF (mm/3h); (e) BIAS entre a simulação de precipitação KF e a estimativa TRMM (mm/h); (f) BIAS entre a simulação de precipitação BMJ e a estimativa TRMM (mm/h). Figuras válidas para 1200 UTC de 07/11/2014.

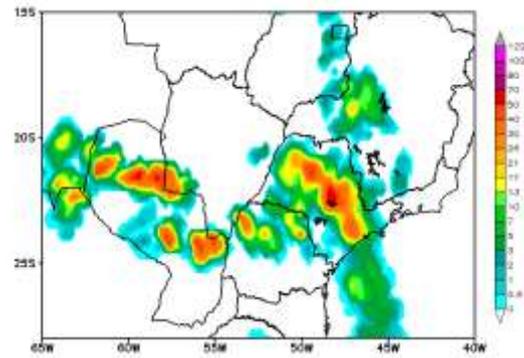
A Figura 6c mostra que a parametrização KF produz áreas com precipitação acumulada em 3 h mais intensa que a de BMJ (Fig. 6d) para o horário analisado. Em comparação com a imagem GOES13 (Fig. 6a) e a estimativa TRMM (Fig. 6b), observa-se também que KF (Fig. 6c) produz área de precipitação com melhor fase em relação ao observado, do que o notado em BMJ (Fig. 6d), que parece ter adiantado a faixa de precipitação para o estado de Paraná. A estimativa TRMM (Fig. 6b) mostra que a área de precipitação, nesse horário, é observada sobre o norte do Rio Grande do Sul e o estado de Santa Catarina.

Na sequência do evento, na madrugada do dia 07 para o dia 08 de novembro, houve a ocorrência de uma linha de instabilidade pré-frontal no estado de São Paulo (Fig. 7a). Esse fenômeno de mesoescala não foi reproduzido por nenhuma das simulações (KF e BMJ). Os valores acumulados de precipitação estimados pelo TRMM (Fig. 7b) mostram valores de aproximadamente 35 mm em 3 h associados com a linha de instabilidade em São Paulo. Neste caso em específico, espera-se que a escala espacial do fenômeno em questão permitisse a reprodução do sistema de mesoescala nas soluções do modelo. No entanto, os processos físicos de formação de tal linha de instabilidade podem não ter sido bem definidos nas soluções do WRF. A investigação acerca dos erros cometidos na reprodução desta linha de instabilidade é um assunto a ser explorado na sequência da investigação de mestrado do projeto em questão.

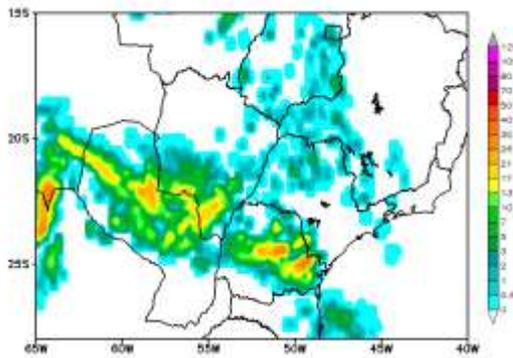
Quanto à quantidade de precipitação simulada, para o mesmo horário das 0300 UTC de 11/08/2014, observa-se também uma superestimativa pela parametrização KF que, em alguns locais, chega a erros de cerca de 30 mm em 3 horas. A simulação com o esquema BMJ minimiza bastante este erro no estado do Paraná, se comparada com KF. No entanto, ainda neste mesmo horário, são observadas organizações convectivas multicelulares no norte do Paraguai, também na forma de linha de instabilidade descontínua (Figs. 7a e 7b). Esta organização convectiva é vista nos resultados de Kain-Fritsch (Fig. 7c), embora haja erro de posicionamento (Figs. 7e e 7g), enquanto que os resultados de Betts-Miller-Janjic subestimam significativamente tal ocorrência (Figs. 7f e 7h).



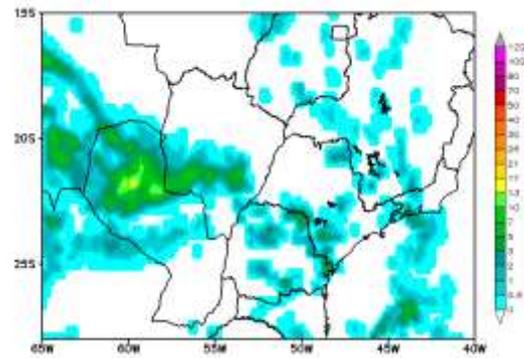
(a)



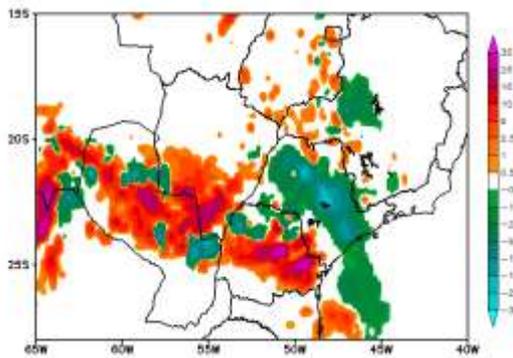
(b)



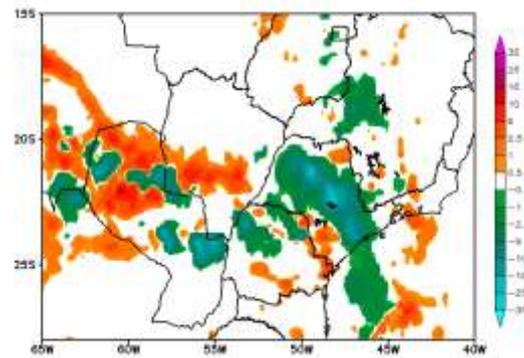
(c)



(d)

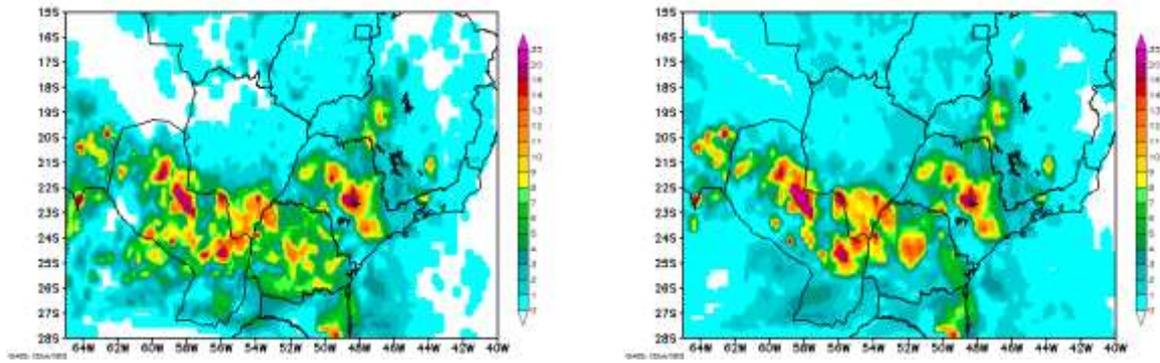


(e)



(f)

Figura 7: (a) Imagem do canal infravermelho do satélite GOES12; (b) precipitação acumulada estimada pelo satélite TRMM (mm/3h); (c) precipitação acumulada simulada pelo esquema Kain-Fritsch (mm/3h); (d) precipitação acumulada simulada pelo esquema Betts-Miller-Janjic (mm/3h); (e) BIAS entre a simulação KF e a estimativa TRMM (mm/h); (f) BIAS entre a simulação BMJ e a estimativa TRMM (mm/h); (g) raiz do erro médio quadrático da simulação KF calculado para a janela de 12 horas anteriores ao horário 0300 UTC de 08/11/2014 (mm/h); (g) raiz do erro médio quadrático da simulação BMJ calculado para a janela de 12 horas anteriores ao horário 0300 UTC do dia 08/11/2014 (mm/h). Figuras válidas para 0300 UTC de 08/11/2014.



(g)

(h)

Figura 7: (a) Continuação

### Considerações Gerais

Neste estudo de caso preliminar, foram observadas várias diferenças significativas entre a precipitação gerada pelos dois diferentes esquemas de parametrização convectiva. A parametrização Kain-Fritsch possui melhor desempenho na representação dos locais de precipitação mais intensa, ainda que tenha apresentado erros de fase e amplitude (magnitude) ao longo de toda a evolução do sistema. Por outro lado, a mesma parametrização superestimou a região precipitante, indicando indevidamente chuva em algumas fases da evolução de sua simulação, enquanto que, na mesma situação, o esquema Betts-Miller-Janjic não indicou essa precipitação inexistente.

Associar estes resultados às particularidades das duas opções de parametrização faz parte da investigação de fontes de erros das simulações de precipitação, e, portanto, é uma abordagem importante para trabalhos futuros a serem realizados na sequência do projeto.

Além disso, alguns erros observados nas simulações durante a evolução do sistema devem ser estudados com mais profundidade. Dentre eles, destaca-se a linha de instabilidade pré-frontal, que não foi simulada, e que deve ser melhor abordada de um ponto de vista físico, fazendo uma caracterização local mais precisa do que foi o sistema, para buscar a fonte do erro das simulações.

#### **d) Análises atmosféricas de casos selecionados (Golden Cases)**

Como parte das atividades relativas ao projeto de Mestrado da estudante Mariana Fadigatti Picolo, 21 eventos de tempestades severas no estado de São Paulo foram selecionados durante o verão de 2016-2017. O Brasil não tem um banco de dados oficial para as ocorrências de tempo severo. Desta forma, os eventos foram escolhidos com base em notícias publicadas pela mídia local ou selecionados pela equipe do projeto SOS-CHUVA, com base nas previsões disponíveis no site do Laboratório MASTER e do CPTEC.

Os dados disponíveis para análise são:

-saídas de dados numéricas do modelo GFS e BRAMS.

- Imagens de satélite imagens (GOES-13, do CPTEC)
- Radar (São Roque, Campinas, IPMET)
- dados de superfície do INMET
- METAR de aeroportos de todo o estado de São Paulo
- Synop
- sondagens das saídas do modelo GFS serão usadas para analisar os campos sinóticos relativos a cada evento.

Serão analisadas linhas de corrente, isotacas, divergência em 200 hPa, advecção, geopotencial, vortacidade e advecção de vortacidade em 500 hPa, umidade relativa e advecção de temperatura em 850 hPa, pressão ao nível médio do mar, ventos em 1000 hPa, temperatura da superfície. Também, do modelo GFS, análise do lapse-rate de 700-500 hPa, e índice de levantamento será feita. Os campos que serão analisados usando a saída do modelo BRAMS são: CAPE, CINE, vento na superfície, pressão ao nível do mar, razão de mistura de vapor de água.

As imagens de satélite obtidas do CPTEC do satélite GOES-13 são: imagens no infravermelho, infravermelho realçada, visível e vapor de água.

Imagens do radar da São Roque e do radar de Campinas (X-band) serão obtidas e os campos que serão analisados são: CAPPI 3 km e refletividade (radar de São Roque) e precipitação (Campinas), VIL (conteúdo de água líquida verticalmente integrado). Imagens dos radares do IPMET também serão utilizadas, estando estes radares localizados em Presidente Prudente e Bauru, sendo a imagem analisada é uma composição de ambos.

A Tabela 1 apresenta uma descrição de todos os eventos que serão analisados neste projeto. Os dados de inundações na cidade de São Paulo foram obtidos do CGE (Centro de Gerenciamentos de Emergências). Quatro desses casos foram identificados como linhas de instabilidade. Todos produziram chuva, a maioria dos casos teve ocorrências de granizo e rajadas de vento. Um total de 16 casos resultaram em inundações na cidade de São Paulo, atingindo valores de até 57 pontos de alagamento em torno da cidade (segundo informação do CGE) em 24 de fevereiro de 2017.

Tabela 1 : Descrição dos eventos selecionados.

Data	Ocorrências	Danos	Categoria
3 de dezembro de 2016	Chuva, enchentes, rajadas de vento	Inundação em São Paulo (1 ponto)	(1)
18 de dezembro de 2016	Chuva, granizo, rajadas de vento	Inundação em São Paulo (7 pontos)	(2)
25 de dezembro de 2016	Chuva, granizo, vento de rajadas (em Campinas e São Carlos).		(2)
28 de dezembro de 2016	Chuva. Em Campinas, São José dos Campos as rajadas de vento e granizo em Vila Pirituba.	Inundação em São Paulo (7 pontos). Perda das culturas em Salesópolis.	(2)
3 de janeiro de 2017	Chuva, rajadas de vento	Queda de árvores em Indaiatuba, inundação em São Paulo (2 pontos).	(2)
7 de janeiro de 2017	Chuva	Inundação em São Paulo (26 pontos).	
15 e 16 de janeiro de 2017	Chuva, 64,6 mm acumulado na estação do Mirante de Santana em São Paulo	Inundação em São Paulo (11 pontos em 15 <sup>th</sup> e 31 em 16 <sup>th</sup> ). Uma morte em Guarulhos	
17 de janeiro de 2017	Chuva	Inundação em São Paulo (15 pontos) a maioria à noite.	(1)
26 de janeiro de 2017	Linha de rajada de vento, chuva, rajadas de vento	Inundação em São Paulo (10 pontos). Queda de árvores em São Paulo e Campinas (117 e 47, respectivamente).	(1)
30 de janeiro de 2017	Chuva, rajadas de vento. Granizo em Jundiaí.	Inundação em Campinas e queda de árvores em Jundiaí	
31 de janeiro de 2017	Linha de rajada de vento, chuva. Granizo em Sorocaba e Itu.	Inundação em São Paulo (1 ponto), Sorocaba e Itu.	

Tabela 1: Continuação

Data	Ocorrências	Danos	Categoria
2 de fevereiro de 2017	Linha de Squall, chuva		(1)
4 de fevereiro de 2017	Linha de Squall, chuva	Inundação em São Paulo (25 pontos).	(1)
6 de fevereiro de 2017	Chuva, rajadas de vento	Inundação em São Paulo (36 pontos). Queda de árvores em São Paulo e Campinas	(2)
22 de fevereiro de 2017	Chuva. Granizo	Inundação em São Paulo (27 pontos).	(2)
24 de fevereiro de 2017	Chuva, granizo	Inundação em São Paulo (57 pontos).	
5-8 de março de 2017	Chuva, granizo	Inundação em São Paulo (26 pontos), Piracicaba, Jundiá, Campinas, São Carlos	Março, 5- (1) Março, 7 e 8-(2)
13 de março de 2017	Chuva, granizo em Bauru		(1)
14 de março de 2017	Chuva em Sorocaba, granizo em Campinas		
5 de maio de 2017	Chuva, rajadas de vento e granizo	Inundação em São Paulo (9 pontos)	
19 de maio de 2017	Chuva. Rajadas de vento e granizo em Dracena	Inundação em São Paulo (42 pontos)	(1)

Os eventos foram caracterizados em duas categorias: embebidos em sistemas de escala sinóptica (1), brisa do mar e efeitos locais (2). A primeira caracterização inclui eventos de tempo severos que ocorreram em um ambiente com algum sistema de escala sinóptica, como ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), zonas de convergência de umidade e frentes. A segunda categoria envolve dias em que não só a brisa do mar penetrou no continente, levando à convecção, mas outros efeitos locais estavam envolvidos.

Uma versão preliminar dos resultados dessa classificação foi realizada na Dissertação de Mestrado da Estudante Mariana Fadigatti Picolo).

### e) Avaliação da microfísica do modelo BRAMS

Com o objetivo de avaliar a destreza da parametrização de microfísica do modelo BRAMS na representação de eventos severos, foram realizadas simulações para o caso ocorrido em 14 de fevereiro de 2013, como parte das atividades do projeto de pesquisa de doutorado da estudante Andréia Bender. Para comparação, foram obtidas as precipitações observadas pelos pluviômetros do SAISP (Sistema de Alerta a Inundações do Estado de São Paulo). Os valores de precipitação acumulada nestes pluviômetros são apresentados na Figura 8, juntamente com as informações obtidas da estação do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), para a RMSP. Com esses valores podemos avaliar o acumulado obtido a partir das simulações com o modelo BRAMS para este caso. A Figura 9 apresenta a precipitação simulada pelo modelo, com TEB ativado e outras opções comumente utilizadas no modelo. No intuito de melhorar a simulação também foi realizado novo teste, com as mesmas opções, mas com a alteração da variável CPARM (concentração de gotículas de nuvem), que foi modificado de  $1 \times 10^9$  para  $5 \times 10^9$ . O acumulado obtido com esta simulação está apresentado na Figura 10. Nestas figuras então, destacam-se os acumulados de 101 mm e 84 mm em um período de até 2 horas, medidos pelos pluviômetros do SAISP na Zona Oeste de São Paulo. As simulações conseguem obter este máximo de precipitação muito próximo da localização real, embora um pouco subestimados, chegando a até 50 mm. Dada a alta variação da chuva em um pequeno espaço, como podemos ver pelas estações, ocorre uma boa correspondência entre os valores observados e os simulados em vários pontos da região metropolitana, principalmente entre a Zona Sul e a Região do ABC.

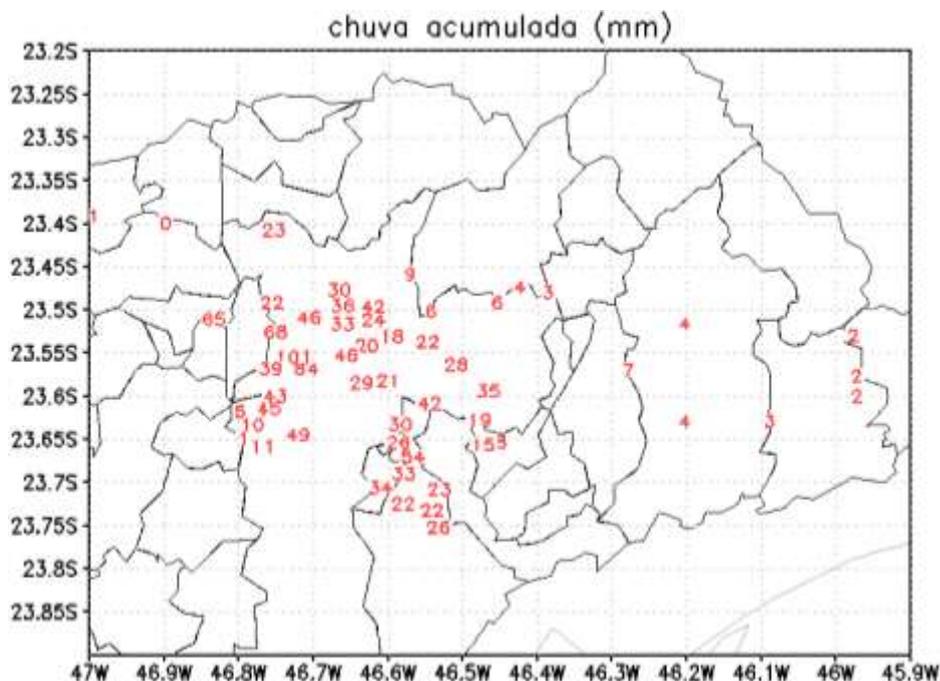


Figura 8 – Chuva acumulada (mm) durante evento de 14 de fevereiro de 2013, obtida das estações do SAISP e INMET.

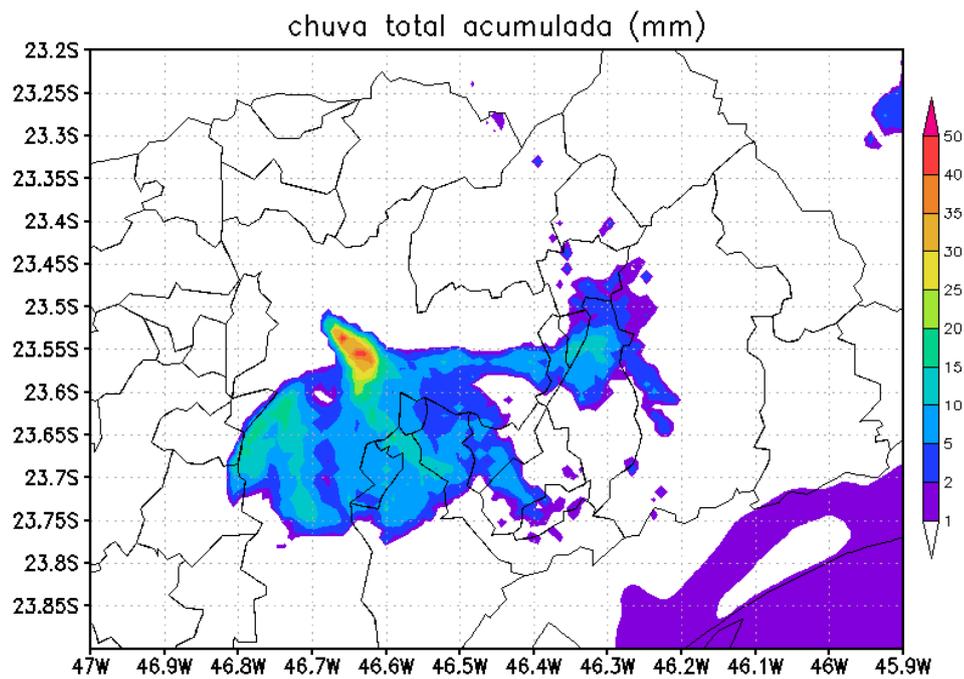


Figura 9 - Chuva acumulada (mm) durante evento de 14 de fevereiro de 2013, obtida com as variáveis acccon e totpcp da simulação. Caso com TEB ativado e  $CPARM=1 \times 10^9$ .

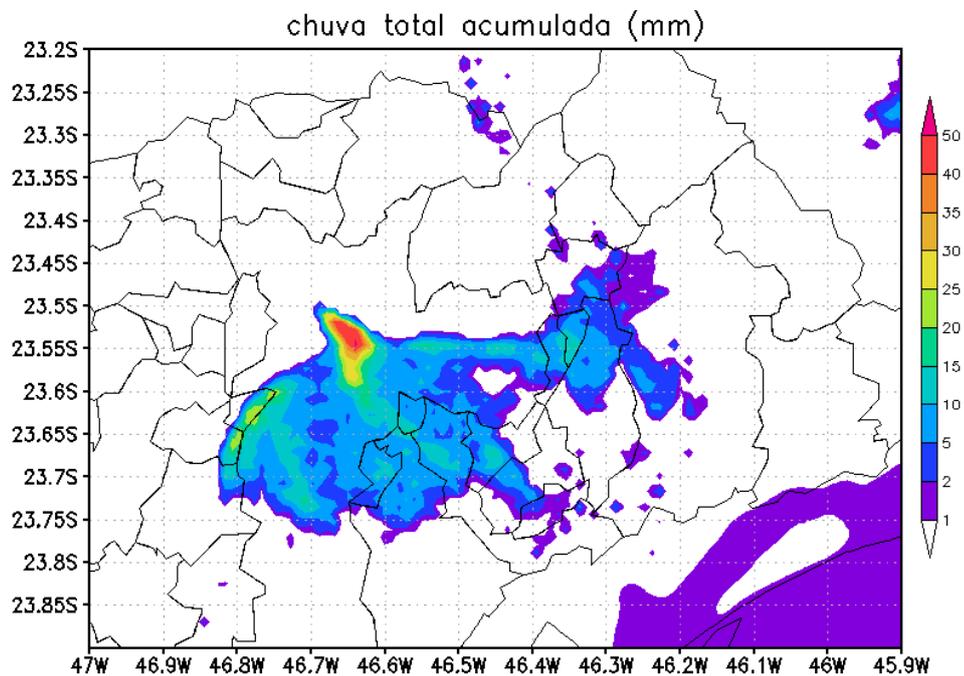


Figura 10 - Chuva acumulada (mm) durante evento de 14 de fevereiro de 2013, obtida com as variáveis acccon e totpcp da simulação. Caso com TEB ativado e  $CPARM=5 \times 10^9$ .

De forma geral, a simulação com  $CPARM=5 \times 10^9$  é a que apresenta os melhores resultados, pois consegue gerar um núcleo de precipitação mais intenso e estende a precipitação sobre uma área um pouco maior.

As sondagens de Campo de Marte – São Paulo (Figuras 11 e 12) foram usadas para avaliar quantitativamente o perfil atmosférico gerado pelas simulações. Graficamente, podemos ver que há uma subestimativa na temperatura próximo a superfície e uma superestimativa no conteúdo de umidade da sondagem. A seguir faremos uma análise mais detalhada do erro encontrado com outros índices estatísticos.

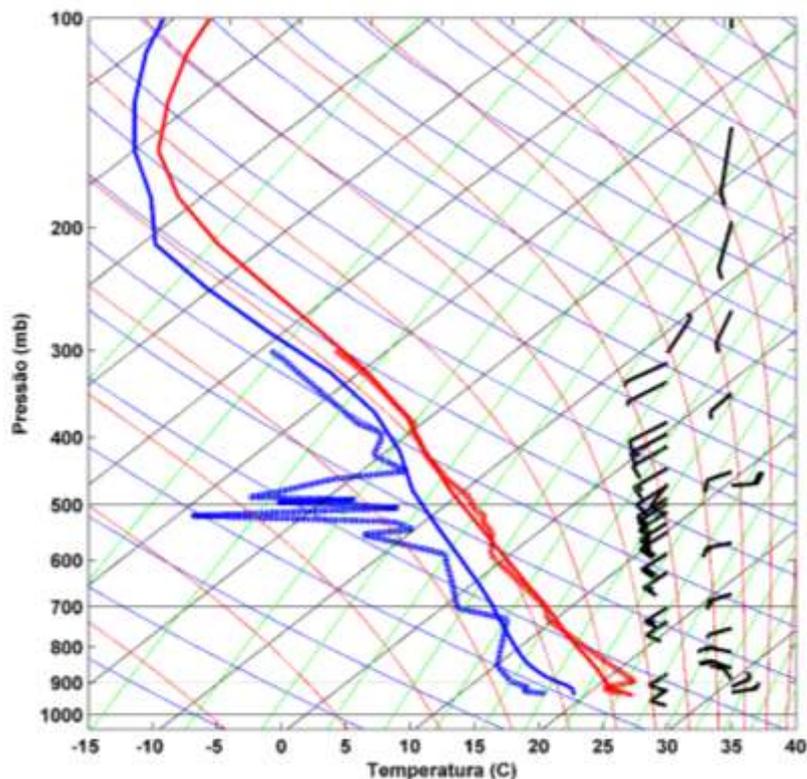


Figura 11. Linha Pontilhada: Sondagem de Campo de Marte. Linha Contínua: Temperatura e Temperatura do ponto de orvalho ( $^{\circ}$  C) para mesma lat/lon. Ambos às 12Z do dia 14 de fevereiro de 2013. Teste com  $CPARM=1 \times 10^9$ .

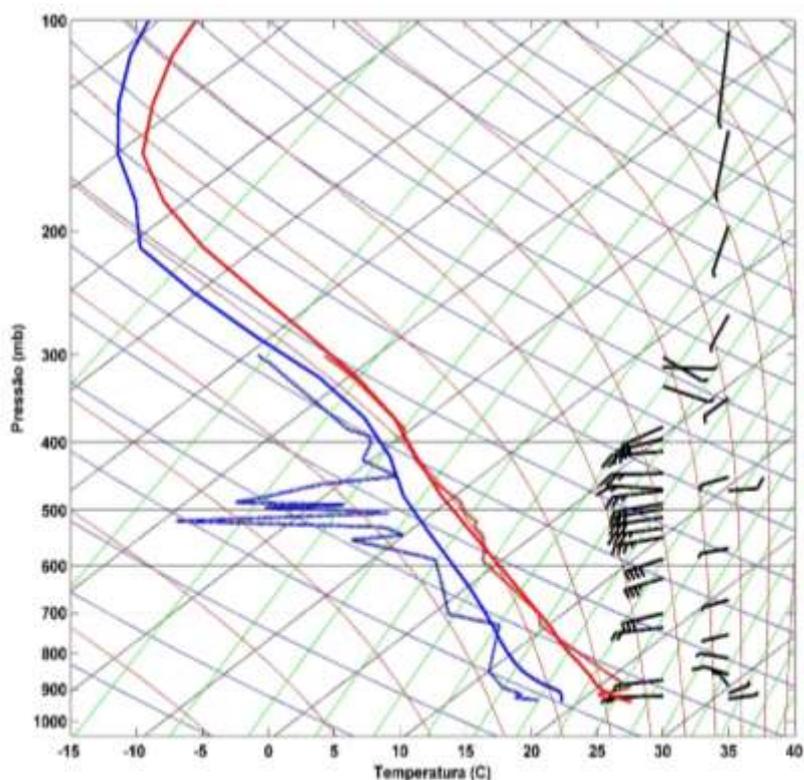


Figura 12. Linha Pontilhada: Sondagem de Campo de Marte. Linha Contínua: Temperatura e Temperatura do ponto de orvalho ( $^{\circ}$  C) para mesma lat/lon. Ambos às 12Z do dia 14 de fevereiro de 2013. Teste com  $C_{PARM}=5 \times 10^9$ .

## Avaliação Quantitativa da Simulação

### Precipitação:

As tabelas 2 e 3 apresentam o cálculo do erro da precipitação obtida das simulações em comparação aos valores observados nas estações do SAISP e INMET sobre a RMSP. Foram utilizados todos os pontos da simulação e os dados das estações foram interpolados, utilizando um método de média ponderada pelo inverso da distância.

O Viés apresenta uma tendência de subestimação da precipitação pelas simulações, embora menor na segunda simulação. Porém, como erros individuais positivos e negativos podem se cancelar neste cálculo, também podemos analisar outros parâmetros presentes nas tabelas 2 e 3, como: MAE (Mean Absolute Error, Erro Absoluto Médio) que remove este problema. Para este erro foram obtidos valores muito semelhantes em ambas as simulações; MSE (Mean Squared Error, Erro Médio Quadrático), semelhante ao MAE, porém mais sensível a grandes diferenças; RMSE (Root Mean Square Error, Raiz do Erro Médio Quadrático), que possui a vantagem de os valores do erro ser da mesma dimensão da variável analisada. Neste cálculo, a segunda simulação apresenta um erro menor e vemos que existe um erro em torno de 6 mm para cada ponto de grade da simulação.

O coeficiente de correlação espacial dá uma medida de quanto os valores similares ocorrem próximos entre o simulado e o observado. Um coeficiente de 1 apresenta a correlação perfeita. Por isso, novamente a segunda simulação se sai melhor.

Comparando o desvio padrão do observado com o simulado, vemos que o observado possui maior variação e a simulação não consegue alcançar a alta variabilidade da amostra medida pelos pluviômetros, já a segunda simulação, consegue alcançar uma variabilidade um pouco maior.

No cálculo do índice  $D_{Pielke}$ , os parâmetros RMSE e RMSE sem bias são menores que o desvio padrão do observado, preenchendo dois critérios para a destreza da simulação. Porém, o parâmetro de desvio padrão ( $\sigma_s/\sigma_o$ ), não é próximo de 1, portanto este critério não é preenchido. Desta forma,  $D_{Pielke}$  não apresenta destreza, segundo a soma de seus critérios.

Tabela 2: Erro da precipitação simulada X pluviômetros. Teste com CPARM=1x10<sup>9</sup>.

Viés	-1,84
MAE	2,70
RMSE	6,49
Coeficiente de correlação espacial	0,20
Desvio padrão da simulação	1,54
Desvio padrão do Observado	6,58
D <sub>PIELKE</sub>	2,71

Tabela 3: Erro da precipitação simulada X pluviômetros. Teste com CPARM=5x10<sup>9</sup>.

Viés	-1,79
MAE	2,70
RMSE	6,45
Coeficiente de correlação espacial	0,22
Desvio padrão da simulação	1,66
Desvio padrão do Observado	6,58
D <sub>PIELKE</sub>	2,69

### Temperatura e umidade:

As tabelas 4 e 5 apresentam o cálculo do erro da temperatura obtida dos perfis simulados com o observado pela sondagem de Campo de Marte das 12Z do dia 14 de fevereiro de 2103. Foram utilizados todos os 75 níveis da sondagem e os dados da simulação foram interpolados, utilizando uma média ponderada pela distância. Podemos tirar de conclusão, destes cálculos estatísticos, que a temperatura é em média um pouco superestimada pelas simulações (menos superestimada pela segunda simulação), apesar da camada próxima da superfície com temperatura subestimada. Observando o MAE, vemos que há um erro absoluto de cerca de 0,8 °C para cada nível do perfil (em média). Este erro é puxado principalmente em camadas de inversão do “lapse rate”, onde a temperatura começa a cair com a altura (acima da camada limite planetária) e quando a temperatura começa a aumentar (acima da tropopausa). Para ambos MAE e RMSE, que são cálculos de erros mais

robustos que o Viés, a primeira simulação tem melhor desempenho. Por outro lado, o desvio padrão da segunda simulação demonstra que ela possui valores extremos mais acentuados, chegando mais próximo da variância do observado. Isso resulta em parâmetro  $D_{Pielke}$  muito próximo entre ambas as simulações e com destreza demonstrada para simulações quase perfeitas.

Tabela 4: Erro da temperatura simulada X sondagem. Teste com PARM=1x10<sup>9</sup>.

Viés	0,37
MAE	0,76
RMSE	1,08
Coeficiente de correlação espacial	1
Desvio padrão da simulação	32,36
Desvio padrão do Observado	32,94
D <sub>PIELKE</sub>	0,08

Tabela 5: Erro da temperatura simulada X sondagem. Teste com CPARM=5x10<sup>9</sup>.

Viés	0,26
MAE	0,89
RMSE	1,31
Coeficiente de correlação espacial	1
Desvio padrão da simulação	32,52
Desvio padrão do Observado	32,94
D <sub>PIELKE</sub>	0,09

As tabelas 6 e 7 apresentam o cálculo do erro da temperatura do ponto de orvalho obtida dos perfis simulados com o observado pela sondagem de Campo de Marte das 12Z do dia 14 de fevereiro de 2103. Foram utilizados todos os 39 níveis da sondagem e os dados da simulação foram interpolados, utilizando uma média ponderada pela distância. O Viés positivo apresenta superestimação da umidade pelas simulações. O mesmo valor encontrado por MAE mostra que não houve subestimação no perfil. As simulações possuem maiores dificuldades em representar o perfil de umidade em comparação a temperatura, isso fica explícito ao observar MAE, RMSE e  $D_{Pielke}$ . Ambas as simulações apresentam desempenho semelhantes com uma pequena vantagem para a primeira simulação.

Tabela 6: Erro da temperatura do ponto de orvalho simulada X sondagem. Teste com CPARM=1x10<sup>9</sup>.

Viés	7,92
MAE	7,92
RMSE	9,15
Coeficiente de correlação espacial	0,96
Desvio padrão da simulação	13,17
Desvio padrão do Observado	15,62
D <sub>PIELKE</sub>	1,04

Tabela 7: Erro da temperatura do ponto de orvalho simulada X sondagem. Teste com CPARM=5x10<sup>9</sup>.

Viés	7,95
MAE	7,95
RMSE	9,18
Coeficiente de correlação espacial	0,96
Desvio padrão da simulação	13,14
Desvio padrão do Observado	15,62
D <sub>PIELKE</sub>	1,04

## Referências Bibliográficas

FREITAS, E. D. e SILVA DIAS, P. L. Alguns Efeitos de Áreas Urbanas na Geração de uma Ilha de Calor. *Revista Brasileira de Meteorologia, Brasil*, v. 20, n. 3, p. 355–366, 2005.

FREITAS, S. R. and others. The Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS 5.2): an integrated environmental model tuned for tropical areas. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, v. 10, p. 1–55, 2016.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J.: Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, n. 4, p. 591-608, 2011.

JANJIĆ, Z. I.: The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sub layer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, v. 122, n. 5, p. 927-945, 1994.

KAIN, J. S.: The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology*, v. 43, n. 1, p. 170-181, 2004.

MACHADO, L. A. T. Previsão Imediata de Tempestades Intensas e Entendimento dos Processos Físicos no Interior das Nuvens: O SOS-CHUVA. . [S.l: s.n.], 2015.

MAHRER, Y. e PIELKE, R. A. The Effects of Topography on Sea and Land Breezes in a Two-Dimensional Numerical Model. *Monthly Weather Review*. [S.l: s.n.]. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281977%29105%3C1151%3A%3E2.0.CO%3B2>>. , 1977.

MARSHALL, J. S. e PALMER, W. Mc K. The size distribution of raindrops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 76, n. 327, p. 16–36, 1948.

PIELKE SR., R. A. *Mesoscale Meteorological Modeling*. International Geophysics Series. 2ª. Edição, Estados Unidos da América, Academic Press, v. 78, 2002. 676 p.

STENSRUD, D. J. Parameterization schemes: keys to understanding numerical weather prediction models. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 480 p.

WARNER, T. T., 2011: Numerical weather and climate prediction. Cambridge University Press, Cambridge, 526 pp.