

MUDANÇAS DO ESQUEMA DE CONVECÇÃO PROFUNDA KAIN-FRITSCH PARA A REGIÃO DO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA

ANTONIO VICENTE PEREIRA NETO^{1#}, MARCOS DAISUKE OYAMA²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC), Cachoeira Paulista, SP

²Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Ciências Atmosféricas, São José dos Campos, SP

cristone@ig.com.br, marcos.oyama@ymail.com

Recebido Julho de 2010 - Aceito Março de 2011

RESUMO

Foram realizadas mudanças no esquema de parametrização convectiva de Kain-Fritsch (KF2), para melhor representar a precipitação na região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) em simulações com o modelo regional MM5. Simulações de 24 h em um domínio aproximadamente centrado no CLA, com espaçamento de grade de 30 km foram realizadas para o período de 2005-2006 (calibração) e 2008 (validação). O KF2 foi modificado sob a seguinte configuração: passo de tempo de 60 s, uso do esquema de convecção explícita *warm rain* e uso conjunto dos esquemas de convecção rasa de Grell e do KF2. As mudanças no KF2 foram: aumento da profundidade de nuvem necessária para disparar a convecção profunda e ajuste de alguns parâmetros da função disparo da convecção dependentes da velocidade vertical ascendente na coluna atmosférica. Com as modificações, houve expressiva melhoria na representação do total de precipitação e da fração dos dias do mês com chuva na escala mensal. O padrão espacial de erros no domínio, no entanto, não sofreu muitas alterações sobre o continente (em geral, a precipitação foi melhor representada sobre o continente do que sobre o oceano). Todas as etapas de mudanças e ajustes realizadas no trabalho poderão ser empregadas para melhorar a representação da precipitação em outras regiões específicas.

Palavras-chave: previsão quantitativa de precipitação, convecção profunda, costa norte do Brasil, Maranhão.

ABSTRACT: CHANGES IN THE KAIN-FRITSCH CONVECTIVE PARAMETERIZATION DEEP SCHEME FOR THE ALCÂNTARA LAUNCH CENTER REGION

Changes in the Kain-Fritsch convective parameterization scheme (KF2) were included to better represent the precipitation in simulations using the MM5 regional model for the Alcântara Launch Center (CLA) region. Daily (24 h) integrations for a 30 km grid spacing domain centered in CLA were performed for 2005-2006 (calibration) and 2008 (validation). KF2 scheme was modified under the following simulation settings: time step of 60 s, use of warm rain scheme and joint use of Grell and KF2 shallow convection schemes. Changes in KF2 were: increase of minimum cloud depth to initiate deep convection and several trigger function parameters dependent on column upward vertical motion. With the changes, marked improvement in the representation of total precipitation and monthly fraction of rainy days was found. The spatial pattern of errors over the domain, however, did not show substantial changes (in general, precipitation was better represented over land than over ocean). The steps carried out in this work to change KF2 could be followed to improve the precipitation representation over other specific regions.

Keywords: quantitative precipitation forecast, deep convection, northern coast of Brazil, Maranhão State.

[#]Filiação atual: Centro Nacional de Meteorologia Aeronáutica (CNMA), Brasília, DF

1. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de modelos atmosféricos, globais ou regionais, um desafio é prever a precipitação de forma fidedigna. Erros na previsão quantitativa de precipitação decorrem de diversos fatores, mas, em primeira ordem, podem ser atribuídos aos esquemas que geram a precipitação no modelo. Em grades com espaçamentos superiores a 10-20 km na região tropical, a maior parte da precipitação gerada por modelos atmosféricos se deve ao esquema de convecção profunda, que representa implicitamente (parametriza) os efeitos dos processos de subgrade de convecção *cumulus*. Maiores explicações sobre esses esquemas podem ser encontrados em Stensrud (2007).

O esquema de Kain-Fritsch, originalmente desenvolvido por Kain e Fritsch (1990) (KF) e posteriormente atualizado por Kain (2004) (KF2), tem sido utilizado em estudos de tempo e clima para a região tropical da América do Sul (Rocha, 2000; Mapes et al., 2004; Vizy e Cook, 2005). Para a região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA; 2°22'S, 44°23'W; Figura 1), onde são realizadas operações de lançamento de foguetes projetados e construídos no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE, São José dos Campos, SP; detalhes sobre as atividades meteorológicas no CLA podem ser encontrados em Marques e Fisch, 2005), o uso do esquema KF leva a uma expressiva superestimativa de precipitação, tanto em simulações de clima (Oyama, 2006), quanto de tempo (Barros, 2008).

O objetivo deste trabalho é melhorar a previsão quantitativa de precipitação sobre a região do CLA em simulações com a quinta geração do modelo regional da *Pennsylvania State University* (PSU) / *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), conhecido como MM5 (PSU/NCAR *Mesoscale Model, 5th Generation*), por meio de: 1) escolha de uma configuração (passo de tempo, esquema de convecção rasa e esquema de convecção explícita) mais adequada; 2) introdução de mudança e ajustes na função disparo da convecção (FDC) do KF2. Na FDC, realiza-se a decisão de disparar o esquema de convecção profunda. Escolhe-se mudar e/ou ajustar a FDC do KF2, pois trabalhos anteriores mostraram que a precipitação simulada é sensível a essas modificações (Mapes et al., 2004; Lee et al., 2006; Truong et al., 2009).

O trabalho está organizado da seguinte forma. Na seção 2, descrevem-se os dados de precipitação. Na seção 3, apresentam-se o modelo e as simulações. Na seção 4, descrevem-se brevemente as partes do esquema KF2 cujos parâmetros são mudados e/ou ajustados. Na seção 5, faz-se a escolha de uma configuração do modelo (convecção explícita, passo de tempo e tipo de convecção rasa) que melhore a representação da precipitação. Na seção 6, apresentam-se

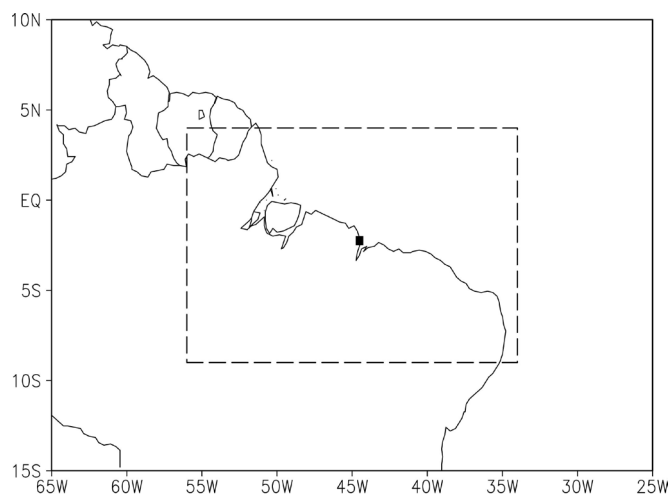


Figura 1 – Localização do CLA (quadrado preto na costa norte do Brasil) e do domínio das simulações (tracejado).

a mudança e os ajustes no esquema KF2, bem como os resultados da calibração (para dois anos: 2005 e 2006) e de uma validação preliminar (para 2008). Comentários finais são feitos na seção 7.

2. DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Devido à grande variabilidade espacial da precipitação várias fontes de dados são utilizadas para estimar o total mensal de precipitação (PREC) e fração de dias do mês com chuva (FRAC), observados na região do CLA no período de 2005-2006 e 2008. O uso de várias fontes evita erros que apareceriam se fossem considerados somente dados pontuais de precipitação e aumenta a representatividade espacial das estimativas. As fontes de dados são:

- Dados horários de precipitação em superfície coletados por pluviômetros no CLA e no aeroporto em São Luís (MA; 2°35'S, 44°14'W);

- Dados de precipitação diária do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) para a América do Sul obtidos do *Climate Prediction Center* (CPC) / *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA)¹. Os dados encontram-se em grade regular com espaçamento de 1°;

- Dados globais de precipitação diária do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) obtidos do *Goddard Space Flight Center* (GSFC) / *National Aeronautics and Space Administration* (NASA)². Os dados encontram-se em grade regular com espaçamento de 1°;

- Estimativas de precipitação a cada 3 horas na faixa tropical do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM)

1 <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/realtime/gis/retro.shtml>

2 <http://precip.gsfc.nasa.gov/index.html>

(produto 3B42) do GFSC/NASA³. As estimativas encontram-se em grade regular com espaçamento de 0,25°.

Para cada mês, há 5 valores de PREC e FRAC referentes à região do CLA (um valor por fonte de dado). Com base nesses valores, calculam-se a média (μ) e o desvio-padrão (σ). Considera-se que o valor observado encontra-se no intervalo $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$. Para o cálculo do viés (seções 5 e 6), utiliza-se μ como a estimativa do valor observado.

3. MODELO E SIMULAÇÕES

Para as simulações, utiliza-se o modelo regional MM5 (Grell et al., 1995). As condições iniciais e de contorno provêm das análises globais do NCEP [obtidas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)]. As análises possuem espaçamento de grade de aproximadamente 1° (T126) e amostragem temporal de 12 horas (00 e 12 UTC). O uso de análises a cada 12 horas segue Elia et al. (2002)⁴. Os dados de TSM são semanais, possuindo uma resolução horizontal de 1° e obtidos junto ao *Climate Diagnostics Center* (CDC) / NOAA (Reynolds et al., 2002). A temperatura e umidade do solo são inicializadas com os valores da Reanálise do NCEP/NCAR. O domínio das simulações é aproximadamente centrado no CLA (Figura 1) e abrange a área entre 9°S-4°N e 34°W-56°W. O espaçamento de grade horizontal é de 30 km; o número de níveis, igual a 24. Os níveis estão mais concentrados na camada mais baixa da atmosfera para melhor representação da camada limite planetária. A pressão no topo da atmosfera é de 50 hPa. Os esquemas de parametrização dos processos físicos são: KF2 (Kain, 2004) para convecção profunda; *warm rain* ou *simple ice* (Dudhia, 1989) para convecção explícita (Cf. seção 5); *Rapid Radiative Transfer Model* (RRTM; Mlawer et al., 1997) para radiação; *Medium-Range Forecast model planetary boundary layer scheme* (MRF-PBL; Hong e Pan, 1996) para camada limite planetária; e *Noah land surface model* (Noah-LSM; Chen e Dudhia, 2001) para processos de superfície.

As integrações do modelo se iniciam com a análise de 00 UTC e se estendem por 36 h. As 12 primeiras horas são descartadas como *spin up* (tempo necessário para o ajuste do modelo às condições iniciais e de contorno), tendo como base Richard et al. (2003); assim, somente são consideradas as últimas 24 h de cada integração. A precipitação simulada pelo modelo é obtida para a localização do ponto de grade mais próximo do CLA.

³ <http://trmm.gsfc.nasa.gov/3b42.html>

⁴ Atualmente, recomenda-se utilizar análises a cada 6 horas (em vez de a cada 12 horas) pela sua disponibilidade e para melhorar a representação de sistemas tropicais com ciclo de vida menor que possam se propagar rapidamente da fronteira para o interior do domínio e influenciar a região de interesse.

4. PARTES DO ESQUEMA KF2 MODIFICADAS NO TRABALHO

O KF2 é um esquema de fluxo de massa que parametriza os processos de convecção profunda. Nesta seção, descrevem-se brevemente as partes do KF2 cujos parâmetros são mudados e/ou ajustados.

4.1 Função disparo da convecção (FDC)

A FDC é responsável pelo disparo do esquema de convecção profunda. No KF2, a FDC baseia-se no esquema de Fritsch-Chappell (Fritsch e Chappell, 1980). Inicialmente, a FDC identifica a camada que poderá servir de fonte para as correntes ascendentes (USL, *updraft source layer*). A primeira camada pesquisada é de cerca de 60 hPa com base na superfície. Considerando uma parcela com as características termodinâmicas médias dessa camada, por ascensão adiabática, obtém-se o nível de condensação por levantamento (LCL) da pa parcela. Com base na velocidade vertical (resolvida) média do ponto de grade na altura do LCL (w_g , cm s⁻¹), obtém-se uma perturbação de temperatura (δT) definida por:

$$\delta T = K \sqrt[3]{WKL} \quad (1)$$

$$WKL = \max(w_g - c, 0) \quad (2)$$

$$c = w_0 \min(z_{LCL}/2000, 1), \quad (3)$$

onde K é constante e igual a 4,64 K s^{1/3} cm^{-1/3}; w_0 , constante igual a 2 cm s⁻¹; e z_{LCL} , a altura do LCL (m). Assim, a perturbação de temperatura depende da velocidade vertical (resolvida) ascendente no LCL, sendo nula sob subsidência ou fraca ascendência. Para fins de ajuste, a Equação 1 é modificada para a seguinte forma:

$$\delta T = K \sqrt[3]{\min(WKL, WKL_{\max})}, \quad (4)$$

onde WKL_{\max} é um parâmetro de ajuste igual a infinito na formulação original (Equação 1).

Como um primeiro critério de possibilidade de convecção, no LCL, a temperatura da parcela (T_{LCL}) acrescida da perturbação de temperatura (δT) é comparada à temperatura do ambiente (T_{ENV}). Se $T_{LCL} + \delta T > T_{ENV}$, a parcela passa a ser uma candidata à convecção profunda; caso contrário, é pesquisada a camada imediatamente acima, essa pesquisa continua até a camada cujo topo encontra-se a 300 hPa acima da superfície.

Para uma parcela candidata a convecção, calcula-se o fluxo de massa ascendente em cada nível do modelo acima do LCL, levando-se em conta os processos de entranhamento e desentranhamento. A taxa de entranhamento mínima (δM_e) em um intervalo de pressão δp (Pa) é dada por:

$$\delta M_e = -M_{u0} 0,03 \delta p / R, \quad (5)$$

onde R é o raio das correntes ascendentes (ou raio da nuvem, m); M_{u0} , o fluxo de massa na base da nuvem; e 0,03, uma constante de proporcionalidade (m Pa^{-1}). Assim, quanto menor R , as correntes ascendentes sofrem maior diluição. Em KF2, R varia de 1000 a 2000 m em função de WKL . Por simplicidade, para fins de ajuste, utilizam-se valores constantes de R , considerando como *default* o valor de 1500 m proposto por KF.

A profundidade da nuvem é determinada quando a velocidade da corrente ascendente⁵ muda de sinal (de positivo para negativo). Se a profundidade for maior que um limiar (D_{\min} , m), a convecção profunda é disparada; se menor, realiza-se convecção rasa. D_{\min} varia de 2000 a 4000 m e é dada por:

$$D_{\min} = \min[\max(2000 + 100 \cdot T_{LCL}, 2000), 4000], \quad (6)$$

onde T_{LCL} é dado em $^{\circ}\text{C}$.

4.2 Remoção de condensado das correntes ascendentes

A fração de material condensado (água líquida e/ou gelo) removido das correntes ascendentes é dada por:

$$\delta r_c / r_{c0} = 1 - \exp(-c_1 \delta z / w), \quad (7)$$

onde δr_c é a quantidade de condensado removida na camada; r_{c0} , a quantidade de condensado na base da camada; δz , a espessura da camada (m); w , a velocidade vertical média da corrente ascendente na camada (m s^{-1}); e c_1 , uma constante igual a $0,01 \text{ s}^{-1}$. Quando a velocidade vertical torna-se muito alta, no limite, w tendendo a infinito, a quantidade de condensado removida tende a zero. Isso leva a corrente ascendente a manter todo o condensado até o seu desentranhamento forçado no topo da nuvem. Permitir o desentranhamento contínuo de condensado, mesmo em fortes correntes ascendentes, é importante para controlar o total de precipitação simulado (Gomes e Chou, 2010). Assim, para fins de ajuste, a Equação 7 é modificada para a seguinte forma:

$$\delta r_c / r_{c0} = 1 - \exp[-c_1 \delta z / \min(w, w_{\max})], \quad (8)$$

onde w_{\max} é um parâmetro de ajuste igual a infinito na formulação original (Equação 7).

5. NOVA CONFIGURAÇÃO

Para obter melhorias nas simulações, realizam-se testes para obter uma configuração (convecção explícita, passo de tempo e tipo de convecção rasa) que minimize os erros. Testes

5 A velocidade vertical é obtida (de forma diagnóstica) do fluxo de massa e das propriedades termodinâmicas da corrente ascendente (Cf. Bechtold et al., 2001).

preliminares (não mostrados) indicam que a precipitação simulada para a região do CLA é sensível ao esquema de convecção explícita e ao tipo de convecção rasa adotados. A variação do passo de tempo nos testes é motivada pelos resultados de Xu et al. (2001)⁶.

Os erros das diferentes configurações são comparados aos resultados de Barros (2008), que utilizou duas configurações distintas:

- KF para convecção implícita e Grell para convecção rasa (CTL0);

- KF2 para convecção implícita e rasa (como o KF2 possui um esquema de convecção rasa em seu próprio código, a convecção rasa de Grell foi desativada) (CTL1).

Para 2005 e 2006, em praticamente todo o período, CTL0 superestima PREC e FRAC (Figura 2). O erro mais marcante consiste na simulação incorreta da sazonalidade de FRAC: p.ex., em 2005, as observações mostram uma variação sazonal de 70% (estação chuvosa) a 10% (estação seca); CTL0, de 100 a 80%, ou seja, simula-se chuva em quase todos os dias mesmo na estação seca. CTL1 melhora bastante a representação da sazonalidade de FRAC (p.ex., em 2005, de 90 a 30%) e reduz o erro de PREC na estação seca, mas agrava substancialmente a superestimativa de PREC em alguns meses da estação chuvosa (mar/2005, mar-abr/2006). P.ex., em mar/2005, o viés praticamente dobra (passa de cerca de +500 para cerca de +1000 mm).

Como em mar/2005 ocorre um erro expressivo de PREC, as simulações de teste são realizadas somente para este mês. As configurações e a precipitação simulada estão mostradas na Tabela 1 (A, B, C e D). A configuração de CTL1 é tomada como base e, em cada teste, somente uma configuração é diferente de CTL1 (teste de sensibilidade). Os resultados das simulações mostram que, em relação a CTL1:

- A redução do passo de tempo de 30 s (CTL1) para 10 s (A) agrava a superestimativa de precipitação; o aumento para 60 s (B) não leva a instabilidades numéricas, diminui o erro no total de precipitação e reduz o tempo computacional;

- A ativação da convecção rasa de Grell (C) ou a mudança da convecção explícita para *warm rain* (D) leva a uma redução expressiva, tanto da precipitação convectiva (PRECC), quanto da não-convectiva (PRECN).

Simulando com uma configuração (CTL2) que considera conjuntamente as 3 mudanças que promoveram melhorias (aumento do passo de tempo para 60 s, ativação da convecção rasa de Grell juntamente com a já existente no KF2

6 Xu et al. (2001) verificaram que a precipitação é a variável mais afetada por mudanças do passo de tempo. Mas isso não significa que mudanças do passo de tempo afetem diretamente o esquema de convecção; segundo os autores, a influência passa pelo coeficiente de difusão numérica horizontal. Para passos de tempo curtos, o coeficiente (como parametrizado no MM5) torna-se muito grande, provocando suavização excessiva dos campos e, assim, afetando a geração de precipitação pelo esquema de convecção.

e mudança da convecção explícita para *warm rain*), ocorre uma redução de erro mais pronunciada do que a apresentada nos testes individuais (Tabela 1). O acionamento conjunto de dois esquemas de convecção rasa (de Grell e *inline* no KF2), embora se trate de um procedimento heterodoxo, é adotado por levar a melhores resultados (indicando que a convecção rasa *inline* no KF2 não é eficiente e precisaria ser revista) e ser de implementação simples. A redução de precipitação decorrente de convecção rasa mais eficiente (pelo acionamento conjunto) pode estar associada à redução de instabilidade nas camadas mais próximas à superfície, diferentemente da idéia de que a convecção rasa favorece a ocorrência de convecção profunda (Cf. Souza e Silva, 2003).

Os resultados para 2005 e 2006 das simulações utilizando CTL2 mostram que (Figura 2):

- ocorre redução da superestimativa de PREC em relação a CTL0 e CTL1; na estação chuvosa, os valores são próximos aos de CTL0, ou seja, eliminam-se os picos de erros de CTL1 em mar/2005 e mar-abr/2006;

- os valores de FRAC são muito próximos aos de CTL1.

Assim, CTL2 integra os aspectos positivos de CTL0 (menor erro de PREC na estação chuvosa) e CTL1 (melhor representação da sazonalidade de FRAC), e é utilizada como base para as modificações e os ajustes do KF2.

6. MUDANÇAS NO KF2

6.1 Mudança da profundidade mínima da nuvem

A mudança no critério de profundidade mínima de nuvem (D_{\min}) objetiva tornar o esquema mais coerente com a profundidade esperada para as nuvens associadas à convecção profunda na região equatorial (i.e., não se trata de um ajuste cuja motivação é a redução do erro da precipitação simulada). D_{\min} é um parâmetro-chave do esquema KF2: processos de convecção profunda (rasa) são disparados em nuvens com profundidade

$\geq (<) D_{\min}$. No esquema KF2 original, D_{\min} varia de 2 a 4 km dependendo da temperatura do LCL (Equação 6).

Para o CLA, a média mensal da temperatura do LCL (obtida com os dados de radiossondagens de 1989 a 2008 realizadas no CLA) para uma parcela que representa as características médias camada entre 1000 e 950 hPa (camada mais próxima à superfície), é de $\sim 20^{\circ}\text{C}$ com pouca variação sazonal (não mostrado). Considerando essa camada (1000-950 hPa) como uma USL, D_{\min} seria de ~ 4 km ao longo do ano para o CLA (Equação 6).

Seja uma nuvem com a profundidade mínima (~ 4 km) para ser considerada como de convecção profunda pelo esquema KF2 para o CLA. No topo dessa nuvem, considerando um lapse rate em baixos níveis de $5,5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ (valor médio com pouca variação sazonal obtido com os dados de radiossondagens de 1989 a 2008 realizadas no CLA; não mostrado), e temperatura da base da nuvem (LCL) de 20°C , a temperatura seria de -2°C . A essa temperatura de topo, seria muito improvável a presença de cristais de gelo na nuvem e, conseqüentemente, a ocorrência de processos microfísicos de gelo. Como a convecção profunda demanda processos microfísicos de gelo muito ativos, a nuvem com 4 km de profundidade não poderia ser considerada como de convecção profunda, ou seja, o valor de D_{\min} precisaria ser aumentado.

Define-se um valor de D_{\min} , tal que o topo da nuvem com profundidade igual a D_{\min} esteja à temperatura de -20°C (253 K). Nuvens com topos a temperaturas menores (maiores) que esse limiar, estariam associadas à convecção profunda (rasa). A adoção desse limiar baseia-se nos seguintes argumentos:

- Limiares próximos a -20°C foram utilizados por alguns autores para identificar sistemas convectivos a partir de imagens de temperatura de brilho no canal infravermelho (Vila e Machado, 2004; Barros, 2008).

- Cristais de gelo são, certamente, encontrados a temperaturas inferiores a -13°C (Wallace e Hobbs, 2006, p.236).

- Para que nuvens convectivas produzam relâmpagos (que é um parâmetro muito utilizado nas observações

Tabela 1 – Configuração dos testes (A, B, C e D) e precipitação simulada (PRECC: convectiva; PRECN: não-convectiva) para mar/2005. A precipitação observada em mar/2005 é de 327 mm. CTL1 refere-se a uma das configurações de Barros (2008) e é a base dos testes. CTL2 integra as configurações que promoveram melhorias em relação a CTL1.

Nome	Configuração			Precipitação simulada (mm)		
	Convecção explícita	Passo de tempo	Convecção rasa de Grell	PRECC	PRECN	total
CTL1	Simple ice	30s	Não	946	380	1326
A	Simple ice	10 s	Não	888	823	1711
B	Simple ice	60 s	Não	903	340	1243
C	Simple ice	30 s	Sim	803	158	961
D	Warm rain	30 s	Não	801	210	1011
CTL2	Warm rain	60s	Sim	698	77	775

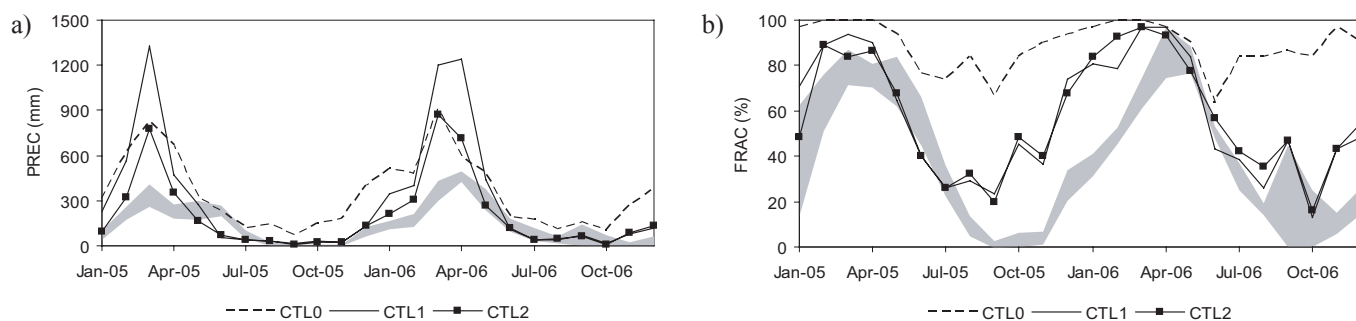


Figura 2 – Total mensal de precipitação (PREC, mm) (a) e fração dos dias do mês com chuva (FRAC, %) (b) para a região do CLA. A faixa sombreada corresponde ao intervalo que contém os valores observados. CTL0, CTL1 e CTL2 referem-se a diferentes simulações (vide texto).

meteorológicas para identificação de nuvens cumulonimbus), é necessário que o seu topo possua temperaturas entre -15°C e -20°C (Houze, 1993, p.270).

- O limiar de -20°C é utilizado para ativação de núcleos de deposição de gelo (Wallace e Hobbs, 2006, p.234).

Considerando T_{LCL} de aproximadamente de 20°C , e o lapse rate em baixos níveis de $5,5^{\circ}\text{C km}^{-1}$, a espessura mínima da nebulosidade, sobre o CLA, para se ter as características de convecção profunda e apresentar descargas elétricas e gelo, é de 7,3 km. Se a T_{LCL} fosse igual a 0°C (por exemplo, em regiões extratropicais), a profundidade para o topo estar a -20°C seria de 3,6 km. Isso motiva modificar a Equação 6 para:

$$D_{\min} = \min[\max(3500 + 175 \cdot T_{LCL}, 3500), 7000], \quad (9)$$

onde T_{LCL} é dado em $^{\circ}\text{C}$. Essa relação difere da proposta original de KF2 (Equação 6), embora mantenha a mesma concepção de D_{\min} dependente de T_{LCL} e os mesmos limites de T_{LCL} (0°C e 20°C).

Os resultados das simulações para 2005 e 2006, utilizando a Equação 9 para D_{\min} e as configurações de CTL2 (CTL2+DMIN) são mostradas na Figura 3. Em geral, ocorre redução de PREC e FRAC em relação aos valores de CTL2 devido à maior dificuldade de disparar o esquema de convecção pelo aumento de D_{\min} . Para PREC, os valores são próximos aos de CTL2, mas ocorre agravamento da superestimativa nos meses da estação chuvosa com maior erro (mar/2005, mar-abr/2006). Para FRAC, ocorre melhoria substancial na representação nos meses mais secos; em 2005, a variação sazonal mostrada por CTL2+DMIN é muito próxima da observada. Assim, CTL2+DMIN leva tanto a aspectos negativos (aumento do erro em alguns meses da estação chuvosa no caso de PREC), quanto positivos (melhor representação da sazonalidade de FRAC).

6.2 AJUSTE DE OUTROS PARÂMETROS

Os seguintes parâmetros são ajustados:

- w_{\max} , que permite remoção contínua de condensado das correntes ascendentes (Equação 8);
- R (raio das correntes ascendentes), que permite o controle do entranhamento nas correntes ascendentes;
- WKL_{\max} , que permite limitar diretamente a perturbação de temperatura (Equação 4);
- w_0 , que permite controlar a velocidade vertical mínima da grade resolvida para haver perturbação de temperatura não-nula (Equação 3).

Enquanto os parâmetros R , WKL_{\max} e w_0 afetam a FDC e, portanto, o disparo do esquema, w_{\max} influencia o total de precipitação.

Os parâmetros são ajustados separadamente para as estações chuvosa (subseção 6.2.1) e seca (subseção 6.2.2) por meio das seguintes etapas: 1) escolha de um parâmetro; 2) simulação para vários valores do parâmetro; 3) escolha do valor do parâmetro que minimiza o viés; 4) mudança do valor do parâmetro para o obtido na etapa 3 para simulações posteriores; 5) retorno para a etapa 1 (escolhendo outro parâmetro). Finalmente, os (diferentes) valores obtidos para as estações chuvosa e seca são combinados (*matching*) em uma única formulação (subseção 6.2.3).

6.2.1 Estação chuvosa

Na estação chuvosa, ocorre uma superestimativa expressiva de precipitação. Uma das razões para isso, conforme os resultados de CTL2+DMIN, consiste no disparo sistemático do esquema de convecção profunda por volta de 12 UTC (não mostrado). Nos meses mais chuvosos, considerando, por simplicidade, camada da superfície até o nível de 950 hPa como uma USL (resultados a seguir não mostrados):

- A altura do LCL encontra-se em torno de 800 m, o que leva a $c < 1 \text{ cm s}^{-1}$ (Equação 3);
- Como a velocidade vertical (resolvida) no LCL (w_g) possui máximos na ordem de $3\text{--}4 \text{ cm s}^{-1}$, WKL é positivo (Equação 2) e δT possui valor acima de 1°C (Equação 1);
- No LCL, como a diferença de temperatura entre parcela

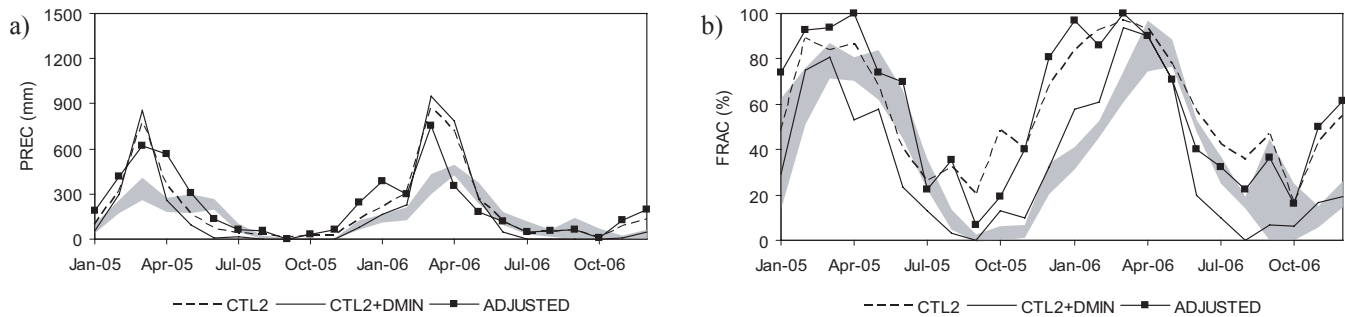


Figura 3 – Total mensal de precipitação (PREC, mm) (a) e fração dos dias do mês com chuva (FRAC, %) (b) para a região do CLA. A faixa sombreada corresponde ao intervalo que contém os valores observados. CTL2, CTL2+DMIN e ADJUSTED referem-se a diferentes simulações (vide texto).

e ambiente é de aproximadamente $-0,5^{\circ}\text{C}$, δT consegue suprir essa diferença e a parcela torna-se instável em relação ao ambiente, iniciando as correntes ascendentes;

- Como, em uma camada profunda (~ 5 km), uma diferença de temperatura na ordem de 1°C é suficiente para gerar correntes ascendentes superiores a 10 m s^{-1} (desconsiderando o entranhamento), a velocidade vertical de grande escala na coluna atmosférica, que é da ordem de $1\text{--}10\text{ cm s}^{-1}$, não influencia diretamente as correntes ascendentes, e correntes ascendentes intensas podem ser geradas;

- A remoção de material condensado tende a ocorrer somente no topo das nuvens convectivas devido à elevada intensidade das correntes ascendentes geradas (Equação 7).

Assim, a partir desse diagnóstico, haveria três formas de reduzir a excessiva precipitação na estação chuvosa observada em CTL2+DMIN:

- inibir diretamente a iniciação de convecção (reduzindo WKL_{max} e/ou aumentando w_0);

- aumentar o entranhamento (reduzindo R) para diminuir a profundidade da nuvem e aumentar a possibilidade de convecção rasa em vez da profunda;

- permitir a remoção contínua de condensado nas correntes ascendentes (reduzindo w_{max}).

Simulações para mar/2005 são realizadas para ajustar os parâmetros. Os resultados estão mostrados na Tabela 2. A inclusão de desentranhamento contínuo de condensado das correntes ascendentes (por meio de w_{max} finito) leva a uma expressiva melhoria da representação do total de precipitação (viés diminui de +527 para +442 mm). Expressiva melhora também é encontrada ao incluir a limitação do raio das correntes ascendentes (viés diminui de +442 para +294 mm). A limitação de WKL leva a uma ligeira melhoria (de +294 para +267 mm), enquanto a alteração de w_0 não traz nenhum benefício.

Para o mês de mar/2006, os valores ajustados para mar/2005 levam a uma redução do viés superior a 100 mm (viés de +583 mm em CTL2+DMIN para +446 mm). Com o intuito de obter uma maior redução do erro, realizam-se testes a partir dos valores obtidos na Tabela 2. A mudança de w_{max}

Tabela 2 – Ajuste dos parâmetros para mar/2005. São testados: na etapa 1, valores de w_{max} de 1 a 12 m s^{-1} ; na etapa 2, valores de R de 750 a 2500 m; na etapa 3, valores de WKL_{max} de 1 a $3,5\text{ cm s}^{-1}$; na etapa 4, valores de w_0 de 1 a 4 cm s^{-1} .

Etapa	Parâmetro ajustado	Valores que minimizam o viés em cada etapa				Viés (mm)
		w_{max} (m s^{-1})	R (m)	WKL_{max} (cm s^{-1})	w_0 (cm s^{-1})	
0*	-	∞	KF2**	∞	2	+527
1	w_{max}	8	KF2**	∞	2	+442
2	R	8	1750	∞	2	+294
3	WKL_{max}	8	1750	3	2	+267
4	w_0	mudanças do valor de w_0 não reduzem o viés				

* CTL2+DMIN

** R varia de 1000 a 2000 m em função do WKL (formulação original de KF2)

de 8 para 12 m s^{-1} e a redução de WKL_{max} para 1 cm s^{-1} levam uma redução do viés de +446 para +336 mm; para os demais parâmetros (R e w_0), mudanças nos valores não reduzem o viés de forma expressiva. Assim, para mar/2006, os valores ajustados de w_{max} e WKL_{max} são de 12 m s^{-1} e 1 cm s^{-1} , respectivamente.

6.2.2 Estação de transição e seca

De forma semelhante à estação chuvosa, ajustam-se os valores dos parâmetros para a estação de transição. Os ajustes são realizados para jun/2005 e jun/2006 e os resultados para jun/2005 estão mostrados na Tabela 3 (os resultados para jun/2006 são semelhantes e não são mostrados). Devido ao viés negativo, os ajustes são realizados no sentido de aumentar o total de precipitação (oposto ao realizado para a estação chuvosa). A redução do viés (simulação 2 da Tabela 3) também leva a uma pequena melhoria na representação da fração dos dias do mês com chuva (não mostrado). Testes para out/2005 e out/2006 mostraram que os valores ajustados para a estação de transição servem também para a estação seca. Assim, os valores

Tabela 3 – Viés do total mensal para jun/2005 para diferentes valores dos parâmetros. Na simulação 1, utilizam-se os valores ajustados para a estação chuvosa; na simulação 2, encontram-se os valores ajustados para a estação de transição (e seca).

Simulação	Valores dos parâmetros				Viés (mm)
	w_{\max} (m s ⁻¹)	R (m)	WKL_{\max} (cm s ⁻¹)	w_0 (cm s ⁻¹)	
CTL2+DMIN	∞	KF2*	∞	2	-210
1	8	1750	3	2	-161
2	4	2750	∞	0	-58

** R varia de 1000 a 2000 m em função do WKL (formulação original de KF2)

da simulação 2 da Tabela 3 são válidos, tanto para a estação de transição, quanto para a seca.

6.2.3 Índice de ascendência

Os valores do melhor ajuste variam conforme a estação do ano. Essa dependência pode ser implementada diretamente, como por exemplo, utilizando um valor determinado pela data da condição inicial, ou relacionando o valor dos parâmetros a alguma variável que tenha relação direta com os processos convectivos e possua expressiva variação sazonal. Essa segunda estratégia é adotada. Escolhe-se a velocidade vertical como variável a partir da qual se calcula o valor dos parâmetros. Especificamente, define-se um índice, chamado aqui de **índice de ascendência** (IA), que integra a velocidade vertical (w) positiva (i.e., ascendente) da superfície (p_1) até 300 hPa (p_2) nos níveis de pressão (unidade: hPa cm s⁻¹ = Pa m s⁻¹):

$$IA = \frac{1}{100} \int_{p_1}^{p_2} \max(w, 0) dp. \quad (10)$$

Por exemplo, se há uma velocidade positiva ascendente de 1 cm s⁻¹ entre 1000 (superfície) e 300 hPa, IA é igual a 7 hPa cm s⁻¹. O IA é uma medida da “intensidade” dos movimentos verticais ascendentes na coluna atmosférica, e varia de ~10 (estação seca) a ~40 hPa cm s⁻¹ (estação chuvosa) no CLA (de acordo com CTL2+DMIN).

Aqui propomos uma relação entre o valor dos parâmetros e IA ; a relação proposta para cada parâmetro está mostrada na Figura 4. Para IA alto (baixo), os parâmetros tendem a ser aqueles ajustados para a estação chuvosa (seca). Para a definição dos limites de IA (IA_{\min} e IA_{\max}), são realizadas simulações de teste para março, junho e outubro de 2005 e 2006. Os valores característicos de IA para as estações seca e chuvosa são utilizados como *first guess*. Os limites que levam a menor viés de total de precipitação são de 15 hPa cm s⁻¹ para IA_{\min} e de 40 Pa cm s⁻¹ para IA_{\max} .

6.3 Resultados da calibração

Os resultados das simulações para 2005 e 2006 utilizando os ajustes mostrados na Figura 4 (e as demais configurações de CTL2+DMIN) (ADJUSTED) estão mostrados na Figura 3. Para PREC, há redução do viés nos meses da estação chuvosa com maior erro (mar/2005, mar-abr/2006) em relação a CTL2 e CTL2+DMIN; nos demais meses, não há melhora ou piora sistemática. Para FRAC, os valores são maiores do que os de CTL2+DMIN e próximos aos encontrados em CTL1 e CTL2, embora em alguns meses (p.ex., set-out/2005) os valores mantenham-se próximos aos de CTL2+DMIN, sendo mais condizentes com as observações. Portanto, em relação a CTL2, a introdução da mudança de D_{\min} e dos ajustes leva a melhorias pontuais em PREC (p.ex., redução do viés nos meses com maior erro) e FRAC (p.ex., estação seca melhor representada).

6.4 Validação preliminar para 2008

Para fins de validação preliminar, realiza-se uma simulação para 2008 utilizando as novas configurações (ADJUSTED). Os resultados estão mostrados na Figura 5. Para PREC, os erros são claramente menores em ADJUSTED (p.ex., os picos de CTL1 na estação chuvosa são corrigidos); para FRAC, os valores são próximos aos de CTL1, que representa a sazonalidade com menos erros do que CTL0. Portanto, as novas configurações levam a uma representação mais realista da precipitação na região do CLA.

6.5 Impactos em outras regiões do domínio

Embora o foco do presente trabalho seja a região do CLA, uma questão é se os ajustes realizados influenciam as outras regiões do domínio. Em geral, em termos de PREC, para todos os anos (2005, 2006 e 2008), os erros são maiores no oceano do que no continente, o padrão espacial de erros não substancialmente modificado com a introdução dos ajustes, apesar da melhoria na representação da precipitação no CLA, e os ajustes têm a capacidade de reduzir substancialmente a precipitação não-convectiva em todo o domínio. Para fins de ilustração, os campos de PRECC e PRECN para mar/2005 (mês da estação chuvosa) e set/2005 (mês da estação seca) estão mostrados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

Para mar/2005, no continente, CTL0 representa bem o gradiente de precipitação observado (segundo dados do TRMM e GPCP) entre a região da Ilha do Marajó (PA) (maior precipitação) e o Nordeste brasileiro (menor precipitação). A mudança para CTL1 piora a representação do gradiente de precipitação (PRECC) e aumenta muito PRECN. Os ajustes (ADJUSTED) trazem PRECC para valores próximos de CTL0

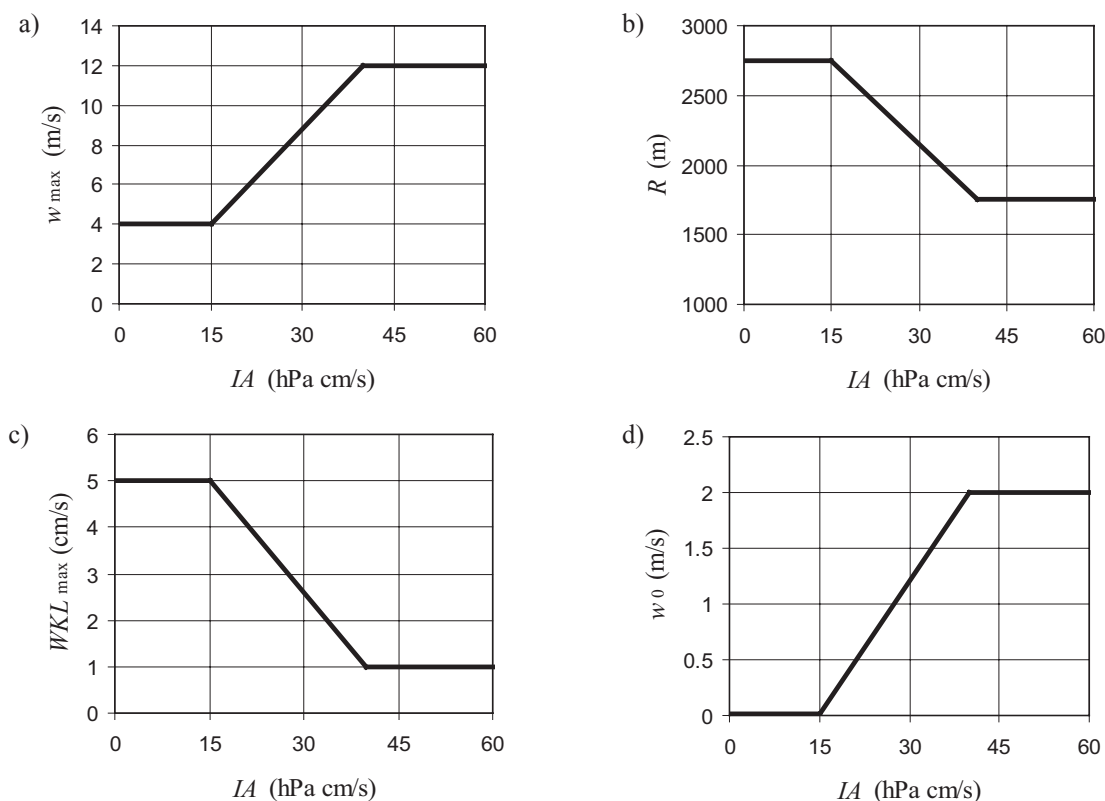


Figura 4 – Relação entre parâmetros da FDC do KF2 e o índice de ascensão (IA). Os parâmetros estão descritos na seção 6.2.

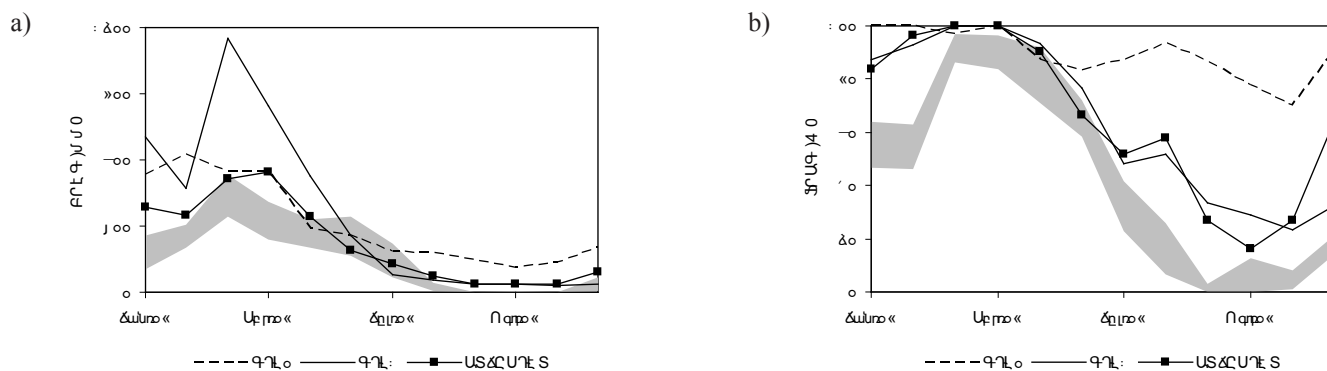


Figura 5 – Total mensal de precipitação (PREC, mm) (a) e fração dos dias do mês com chuva (FRAC, %) (b) para a região do CLA. A faixa sombreada corresponde ao intervalo que contém os valores observados. CTL0, CTL1 e ADJUSTED referem-se a diferentes simulações (vide texto).

com o ganho adicional de praticamente anular PRECN em todo o domínio. No oceano, todas as simulações (CTL0, CTL1 e ADJUSTED) superestimam a precipitação (via PRECC). Para set/2005, no continente, ADJUSTED simula PRECC de forma muito semelhante a CTL1, que representa melhor as observações que CTL0. Assim, a precipitação simulada no continente por ADJUSTED é semelhante aos campos simulados mais próximos das observações: CTL0 em mês chuvoso (mar/2005) e CTL1 em mês seco (set/2005). Esse resultado confirma o obtido para a região do CLA.

Apesar das diferenças de PRECC entre CTL0, CTL1 e ADJUSTED, o padrão espacial é semelhante. Isso significa que mudanças na FDC são capazes de afetar o total e a frequência das chuvas localmente, mas não têm a capacidade de influenciar substancialmente o padrão espacial de erros.

7. COMENTÁRIOS FINAIS

Com o intuito de representar de forma mais realista a precipitação simulada pelo modelo regional MM5 para a região

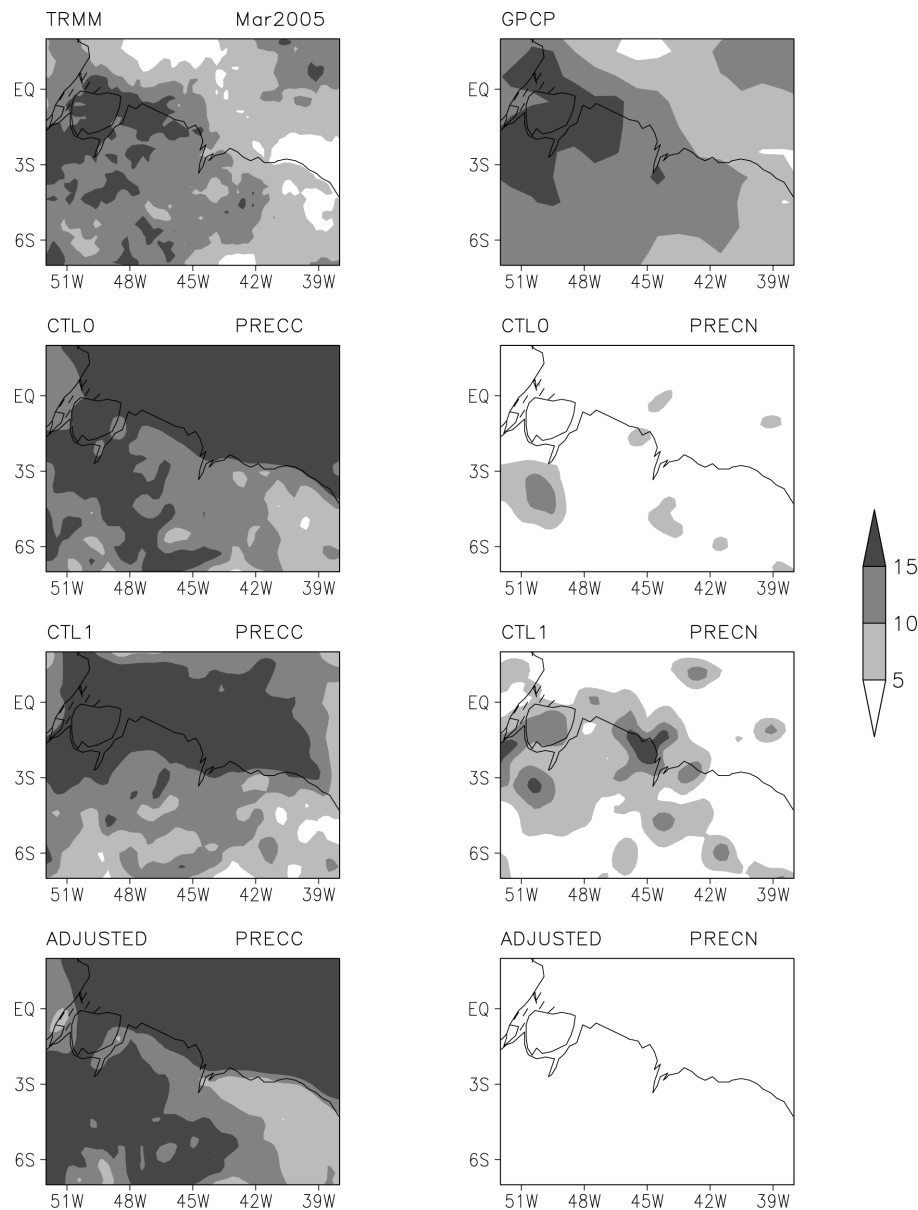


Figura 6 – Total mensal de precipitação convectiva (PRECC) e não-convectiva (PRECN) simulada nos experimentos CTL0, CTL1 e ADJUSTED para março de 2005. Unidade: mm dia⁻¹. TRMM e GPCP representam os valores observados.

do CLA, foi escolhida uma nova configuração (passo de tempo, esquema de convecção rasa e esquema de convecção explícita) para as simulações e foram realizadas mudança e ajustes na FDC do esquema de convecção profunda KF2. A calibração foi realizada para o período de 2005-2006. As principais modificações na configuração e no esquema KF2 original foram:

- Utilização do esquema de convecção explícita *warm rain*, de passo de tempo igual a duas vezes o espaçamento da grade (em km) e do esquema de convecção rasa de Grell juntamente com o *inline* no KF2;

- Aumento da profundidade de nuvem necessária para disparar a convecção;

- Parâmetros da FDC dependentes de um índice (índice de ascendência) que integra o movimento vertical ascendente de grande escala na coluna atmosférica.

Em relação à simulação com as configurações originais e o esquema KF2 original (controle), as modificações implementadas levaram aos seguintes resultados:

- Melhoria da representação do total mensal de precipitação (PREC) e da fração dos dias do mês com chuva (FRAC) foram melhor representados;

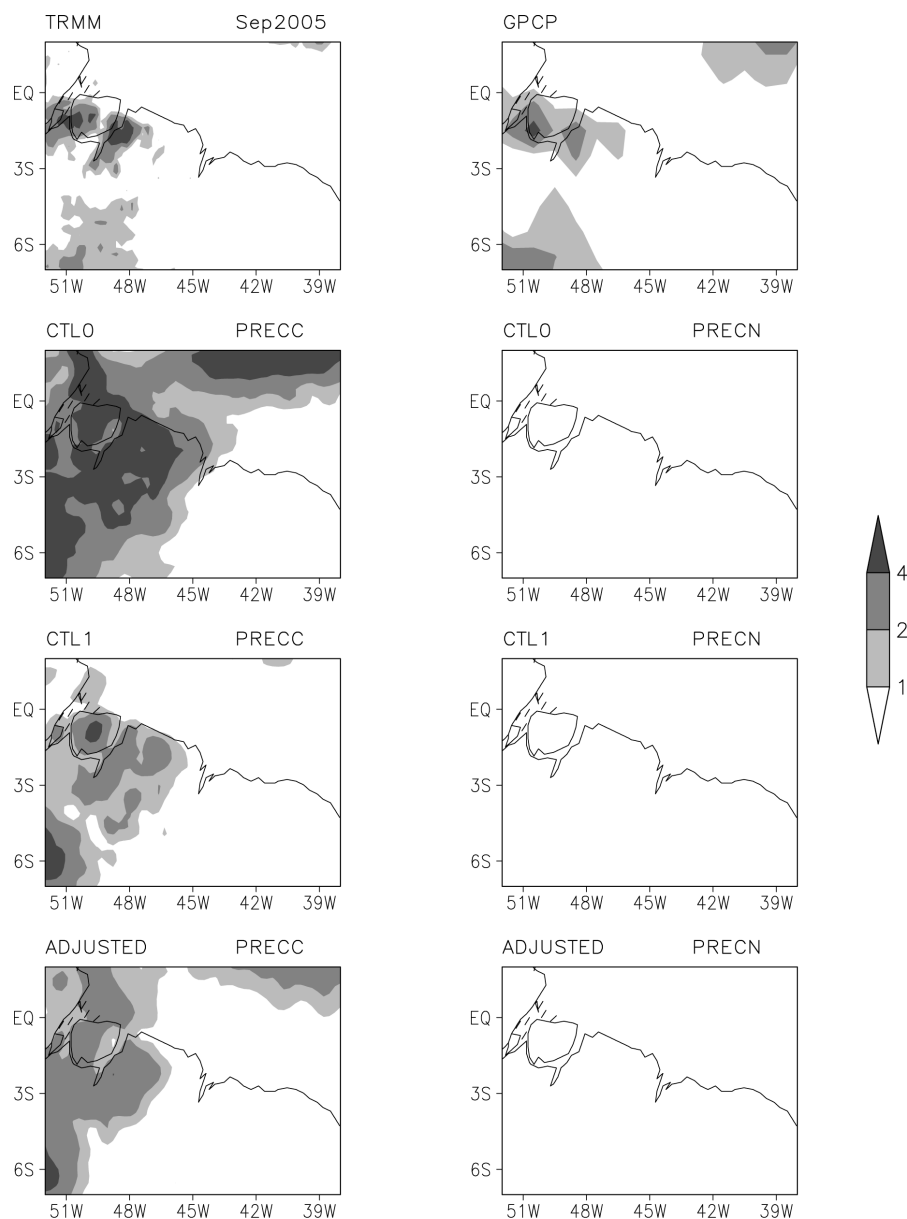


Figura 7 – Total mensal de precipitação convectiva (PRECC) e não-convectiva (PRECN) simulada nos experimentos CTL0, CTL1 e ADJUSTED para setembro de 2005. Unidade: mm dia⁻¹. TRMM e GPCP representam os valores observados.

- Redução do pico de PREC em alguns meses da estação chuvosa;

- Manutenção da boa representação da sazonalidade de FRAC encontrada no controle.

Uma validação preliminar para 2008 mostrou resultados semelhantes aos da calibração, confirmando a utilidade das modificações implementadas.

Em relação ao padrão espacial de erros, os ajustes não foram capazes de alterar substancialmente o padrão e, em geral, os erros são menores no continente do que no oceano.

Neste trabalho, procurou-se apresentar detalhadamente as

etapas de ajuste. Essa metodologia poderá ser empregada por outros grupos para ajustes em situações específicas. Especificamente para o CLA, a melhoria da representação da precipitação significa maior segurança nas operações de integração e lançamento de foguetes.

8. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é parte da dissertação de mestrado do primeiro autor sob orientação do segundo. Os autores gostariam de agradecer aos membros da banca examinadora (Dr. Clóvis Angeli Sansigolo, Dr. Cléber Souza Corrêa e Dr. Silvio Nilo

Figuerola) e ao(à) revisor(a) anônimo(a) as sugestões e os comentários.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, S. S. **Precipitação no Centro de Lançamento de Alcântara: aspectos observacionais e de modelagem**. 2008. 112 p. (INPE-15319-TDI/1362). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008.
- CHEN, F.; DUDHIA, J. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. **Monthly Weather Review**, v. 129, p. 569-585, 2001.
- DUDHIA, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale twodimensional model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 46, p. 3077-3107, 1989.
- ELÍA, R.; LAPRISE, R.; DENIS, B. Forecasting Skill Limits of Nested, Limited-Area Models: A Perfect-Model Approach. **Monthly Weather Review**, v. 130, p. 2006-2023, 2002.
- FRITSCH, J. M.; CHAPPELL, C. F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 37, p.1722-1733, 1980.
- GOMES, J. L.; CHOU, S. C. Dependence of partitioning of model implicit and explicit precipitation on horizontal resolution. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 106, p.1–18, 2010.
- GRELL, G. A.; DUDHIA, J.; STAUFFER, D. R. **A Description of the fifth-generation penn state/NCAR Mesoscale Model (MM5)**. Boulder, Colorado: NCAR, 1995. 122p. NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR.
- HONG, S. Y.; PAN, H. L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. **Monthly Weather Review**, v. 124, p. 2322-2339, 1996.
- HOUZE, R. A. **Cloud dynamics**. New York: Academic Press, 1993.
- KAIN, J. S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An Update. **Journal of Applied Meteorology**, v. 43, n. 1, p. 170-181, 2004.
- KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 47, n. 23, p. 2748-2802, 1990.
- LEE, M. J.; LEE, D. K. Effects of Trigger Function in the Kain-Fritsch Cumulus Parameterization Scheme on Heavy Rainfall Simulation. **Journal of the Korean Meteorological Society**, v. 42, p. 397-410, 2006.
- MAPES, B. E. et al. Comparison of cumulus parameterizations and entrainment using domain-mean wind divergence in a regional model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 61, p. 1284–1295, 2004.
- MARQUES, R. F. C.; FISCH, G. F. As atividades de meteorologia aeroespacial no Centro Técnico Aeroespacial (CTA). **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 21-25, 2005.
- MLAWER, E. J. et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D14, p. 16663-16682, 1997.
- OYAMA, M. D. Erros sistemáticos no clima da região tropical da América do Sul simulado pelo modelo regional MM5 em baixa resolução horizontal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 1, p. 118-133, 2006.
- REYNOLDS, R. W. et al. An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate. **Journal of Climate**, v. 15, p.1609-1625, 2002.
- RICHARD, E. et al. Intercomparison of mesoscale meteorological models for precipitation forecasting. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 7, n. 6, p. 799-811, 2003.
- ROCHA, R. P. **Impacto de parametrizações de convecção em ciclologênese sobre o oceano**. 2000-08. 181 p. (INPE-7505-TDI/720). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 2000.
- SOUZA, E. P.; SILVA, E. M. Impacto da Implementação de uma Parametrização de Convecção Rasa em um Modelo de Mesoescala: Descrição e Testes de Sensibilidade do Esquema. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 18, n. 1, p. 33-42, 2003.
- STENSRUD, D. J. **Parameterization schemes**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- TRUONG, N. M. et al. A Modified Kain-Fritsch Scheme and Its Application for Simulation of an Extreme Precipitation Event in Vietnam. **Monthly Weather Review**, v. 137, p. 766-789, 2009.
- VILA, D. A.; MACHADO, L. A. T. Shape and radiative properties of convective systems observed from infrared satellite images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, p. 1-16, 2004.
- VIZY, E. K.; COOK, K. H. Evaluation of last glacial maximum sea surface temperature reconstructions through their influence on South American climate. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, D11105, doi:10.1029/2004JD005415, 2005.
- XU, M. et al. Effect of time step size in MM5 simulations of a mesoscale convective system. **Monthly Weather Review**, v. 129, p. 502–516, 2001.
- WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V., **Atmospheric science: an introductory survey**, 2nd ed., International Geophysics Series, Academic Press, 2006.