



**Estudo do Desempenho de Dois Códigos de
Transferência Radiativa do Modelo WRF para o Sul do Brasil**
Study of the Performance of Two Radiative Codes From WRF Model to South of the Brazil

Álvaro Vasconcellos de Ávila¹; Leonardo José Gonçalves Aguiar¹;
Simone Marilene da Costa Sievert Coelho²; Graciela Redies Fisher¹;
Paulo Yoshio Kubota² & Luciano Ritter Nolasco Jr³

¹Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós Graduação em Meteorologia,
Av. Ildefonso Simões Lopes, 2751, 96.060-290 Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Satélites Ambientais,
Rodovia Presidente Dutra, s/n, 12.630-000 Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Programa de Pós Graduação em Meteorologia,
Rodovia. Presidente Dutra, s/n, 12.630-000 Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil

E-mails: avilamet@gmail.com; veraneiro@gmail.com;

simone.sievert@inpe.br; gracielafigher@gmail.com; pkubota@gmail.com; luciano.nolasco@inpe.br

Recebido em: 10/05/2019 Aprovado em: 21/08/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_286_299

Resumo

A radiação solar que atinge a superfície terrestre é amplamente dependente das condições de nebulosidade presentes na atmosfera. Assim, uma boa simulação da nebulosidade pelos modelos regionais de previsão do tempo é fundamental para refinar as condições de radiação descritas pelos códigos radiativos, e conseqüentemente melhorar a estimativa das principais variáveis meteorológicas. No presente trabalho, foi realizada uma análise da forçante radiativa de nuvens por meio da simulação de dois códigos radiativos do modelo WRF. As simulações foram feitas para a região sul do Brasil durante um período de 21 de outubro de 2014 a 30 de outubro de 2014. Ao avaliar os códigos radiativos RRTMG e CAM3, nota-se que a presença de nuvens baixas simuladas pelo modelo altera significativamente a quantidade de radiação que atinge a superfície, provocando um aumento dos erros de temperatura, pressão, umidade relativa, radiação de onda curta a superfície e radiação de onda longa descendente a superfície.

Palavras-chave: Radiação; Modelagem; Nuvens; RRTMG; CAM

Abstract

The solar radiation that reaches on earth's surface is largely depending of the cloud conditions that are present in the atmosphere. Thus, a good simulation of cloudiness by the forecasting regional models is fundamental to refine the conditions of radiation described by the radiation codes, and in this way to get a better estimative of the mainly meteorological variable. In this work, it was made an analyze of the cloud radiation forces through the simulation of two radiative codes from WRF model. The simulations were made to the south region of Brazil during October, 21 to 30 of 2014. In assessing the radiative codes RRTMG and CAM3, it was noted that the presence of simulated low clouds by the model, significantly change the amount of radiation that reaches the surface. Causing an increase in the errors of temperature, pressure, relative humidity, surface short waves and downward long wave.

Keywords: Radiation; Modeling; Clouds; RRTMG; CAM

1 Introdução

A principal fonte de energia presente no sistema terrestre, fundamental para a formação e desenvolvimento de sistemas convectivos na atmosfera, é proveniente do sol em forma de radiação solar. A caracterização da radiação solar é definida pelo espectro de radiação e dividida em onda curta (RG) e onda longa (ROL). Onde a RG que interage com a atmosfera terrestre desempenha um papel fundamental na modulação de temperatura da superfície do planeta, distribuição de pressão, entre outras variáveis meteorológicas (Liou, 2002). Até chegar a superfície terrestre a RG sofre com os processos de absorção e espalhamento, modulado pelos gases, aerossóis em suspensão, e pelas nuvens presentes na atmosfera (Pavão *et al.*, 2016). Nuvens altas propendem a ser mais transparentes a RG, permitindo com que a radiação atravesse a atmosfera aquecendo a coluna abaixo da nuvem, ao passo que nuvens baixas são mais opacas a RG o que provoca maior espalhamento da radiação incidente, dificultando a sua chegada na superfície terrestre (Malek, 2007). A radiação que é absorvida pela superfície é também reemitida, para a atmosfera, onde será absorvida e reemitida novamente pelas nuvens. Este ciclo de troca de radiação entre a superfície e a atmosfera é o mecanismo responsável por manter a temperatura do sistema terrestre elevada, permitindo um ciclo de aquecimento e resfriamento do sistema (Lima, 2013). Regiões com diferentes coberturas de solo podem provocar diferenças no albedo superficial, onde um decréscimo de albedo induz a um aumento na radiação de onda curta absorvida, garantindo o aumento de temperatura no local (Hwang *et al.*, 2018). O espalhamento tanto atmosférico quanto superficial provoca mudanças nas circulações atmosféricas locais, alterando os fluxos de calor sensível e calor latente, permitindo alterações na formação ou desenvolvimento de sistemas (Sousa *et al.*, 2008). Em localidades onde a previsão numérica é importante, uma boa simulação por modelos regionais é vital para o entendimento da influência das nuvens nos processos radiativos, bem como sua efetiva influência na previsão do tempo. O Rio Grande do Sul - RS é considerada uma região propícia a formação de sistemas convectivos intensos, dentre estes fenômenos encontram-se a passagem de sistemas frontais, sistemas convecti-

vos de mesoescala, tempestades unicelulares, multicelulares e supercelulares, entre outros fenômenos que elevam a quantidade de vapor de água e a presença de nuvens na atmosfera (Reboita *et al.*, 2012). Por este motivo, o objetivo deste trabalho é analisar como se comportam as variáveis meteorológicas e radiativas geradas pela saída do modelo regional Weather Research and Forecast (WRF) durante um período com baixa fração de nebulosidade, e qual a influência da nebulosidade como uma forçante radiativa atmosférica, quando simulada por dois diferentes códigos de transferência radiativas.

2 Metodologia e Dados

Neste estudo foram examinados dois códigos de transferência radiativa dos quais compõem o modelo WRF. Os esquemas radiativos escolhidos para análise foram o Rapid Radiative Transfer Model (RRTMG) proposto por Iacono *et al.* (2008) e o Community Atmosphere Model (CAM 3.0) desenvolvido por Collins *et al.* (2005). Os esquemas radiativos do modelo WRF são altamente sensíveis a quantidade de nuvens simuladas pelo modelo, visto que, em ambos os esquemas a profundidade ótica de uma camada na atmosfera é calculada levando em consideração o raio efetivo líquido das partículas em suspensão (Liou, 2012). No esquema RRTMG a profundidade ótica é fornecida pelo método Line-By-Line (LBLRTM), relação estabelecida na parametrização RRTM desenvolvida por Mlawer *et al.* (1997). Para Collins *et al.* (2004), no esquema CAM o raio efetivo líquido das partículas em suspensão é dependente da temperatura presente na camada, ou seja, a profundidade ótica da nuvem será dependente da temperatura da camada. Neste trabalho, realizou-se uma comparação entre a saída do modelo regional (WRF) e os dados observacionais do projeto Sistema Nacional de Organização de Dados (SONDA), de modo a observar o comportamento do modelo ao simular algumas das variáveis meteorológicas como: temperatura do ar, pressão, umidade relativa e radiação solar incidente na superfície. Escolheu-se um período de estudo associado a uma baixa fração de nebulosidade, de 21 de outubro de 2014 a 30 de outubro de 2014, onde a caracterização das condições atmosféricas durante o estudo é inicialmente de

céu claro, vezes com nuvens esparsas, até a chegada de um sistema frontal no fim do período estudado. A escolha desta data em especial permite que se estude os códigos em situações onde há predominância de céu claro, de modo que haja uma avaliação dos impactos nos perfis termodinâmicos na radiação, possuindo melhor controle da relação componentes atmosféricas e radiação. Os dados meteorológicos observacionais foram disponibilizados pelo Projeto SONDA, referente a cidade de São Martinho da Serra-RS (Lat: 29° 26' 34" S, Lon: 53° 49' 23" O, Alt: 489 m).

Os esquemas radiativos do modelo WRF foram simulados a partir dos dados de análise do modelo Global Forecast System (GFS), no qual possui uma resolução espacial de 0.5° x 0.5° com dados a cada 6 horas. A região de estudo foi determinada como ponto central do domínio abrangente pelo WRF, que foi rodado com 16 x 16 km de resolução espacial (Figura 1).

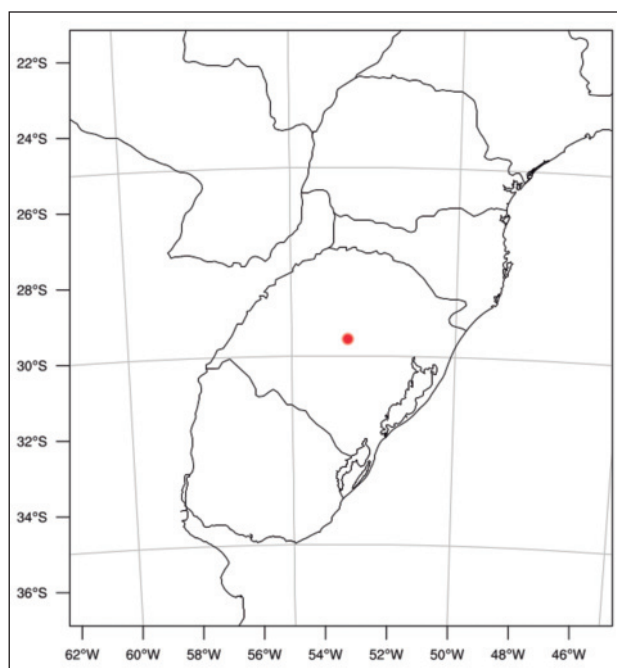


Figura 1 Região escolhida para a avaliação dos códigos de transferência radiativa do WRF, onde o ponto central representa a estação de São Martinho da Serra - RS (Vermelho).

No desenvolvimento do trabalho, as rodadas do WRF foram realizadas variando as parametrizações de radiação e fixando as demais, onde o mesmo procedimento é repetido para o modelo com e sem nebulosidade.

Esquemas	Cumulus	Microfísica	Radiação	Superfície	Camada Limite Planetária
Rodada 1 Com nuvem	New Tiedtke	WDM6	RRTMG	CLM4	Yonsei University
Rodada 2 Com nuvem	New Tiedtke	WDM6	CAM3.0	CLM4	Yonsei University
Rodada 3 Sem nuvem	New Tiedtke	WDM6	RRTMG	CLM4	Yonsei University
Rodada 4 Sem nuvem	New Tiedtke	WDM6	CAM3.0	CLM4	Yonsei University

Tabela 1 Especificações dos esquemas utilizados para as rodadas do modelo WRF.

Nomeou-se portanto os esquemas radiativos rodados com o modelo sob condições de céu claro em RRTMGC e CAM3C. Para as rodadas com condições de nebulosidade ativas no modelo, os esquemas serão tratados por RRTMG e CAM3. Uma avaliação estatística do desempenho dos códigos de transferência radiativas foi realizada para comparar os fluxos de onda curta e longa simulados pelo WRF e o observado pela estação do projeto SONDA. Sendo eles:

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum (P - O)^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |P - O| \quad (2)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum (P - O) \quad (3)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P - O)^2}{\sum (|P - O| + |O - O'|)^2} \right] \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (O - P)^2}{\sum (O - O')^2} \quad (5)$$

Onde P refere-se a variável simulada pelo WRF, O o observado, O' é a média das observações e n a quantidade da amostra. Para discriminar dias de céu claro e dias com nebulosidade foi utilizado o índice de claridade (kt), do qual considerou-se que valores de kt iguais ou acima de 0,75 são dias claros e abaixo de 0,75 dias com nebulosidade. Aqui kt é definido pela razão entre a radiação solar global descendente a superfície e a radiação que chega diretamente no topo da atmosfera (TOA).

3 Resultados e Discussões

3.1 Análise do Ciclo Diário Observado de Radiação Solar e Terrestre, Temperatura e Pressão

A Figura 2 apresenta o ciclo diário de radiação de onda longa e curta incidente à superfície, tem-

peratura do ar e pressão atmosférica para a estação de São Martinho da Serra-RS, no período de 21 a 30 de outubro de 2014. A tabela 2 apresenta o cálculo da quantidade diária de radiação de irradiância solar global (RG), Radiação de onda longa descendente à superfície (ROL), e o índice de claridade (Kt). As condições de tempo na região de São Martinho da Serra para maioria dos dias estudados era de uma atmosfera estável, principalmente nos três primeiros dias. Particularmente, os dias 21 a 23 e 25 de outubro apresentavam índice de claridade (Kt) alto ($Kt > 0,75$, Tabela 2), indicando a ausência de nebulosidade local. Nestes dias, a RG e ROL são aproximadamente de 29 e 26 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, respectivamente. Comparando com os demais dias considerados nublados, esses valores representam as maiores medidas de RG e menores de ROL. No dia 24 de outubro, observa-se uma queda significativa de 8 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ (superior a 25 %) na RG e conseqüentemente um aumento de aproximadamente 2,21 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ (10 %) na ROL em relação aos dias anteriores. Esta variação na radiação é caracterizada pela presença de nebulosidade formada localmente, indicado pelo valor do kt de 0,53. Adicionalmente, observa-se uma maior oscilação do ciclo diário da RG (Figura 2A), caracterizada pela presença de nebulosidade persistente neste dia. Durante o período de 26 a 29 de outubro observa-se oscilações de curta duração na RG devido a presença de nebulosidade entre o sensor e a fonte de radiação (Figura 2B), o que diminui os valores de Kt diário. Estes dias que antecedem a chegada do sistema frontal (dia 30) são marcados por uma queda gradual da RG devido a presença de nebulosidade. Com a aproximação do sistema frontal, um aumento da nebulosidade e da ROL ao longo do dia é observado, alcançando valor máximo de 31,86 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ no dia 29. Neste dia, os valores de RG são similares aos dias anteriores em torno de 25 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. A queda acentuada de radiação solar descendente a superfície ocorre no dia 31, em que a RG é de aproximadamente 6 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. O ciclo de temperatura do ar observado (Figura 2C) apresentou um aumento com o passar dos dias, devido ao efeito da nebulosidade e conseqüentemente da ROL, estabilizando no dia 24, quando há presença de nebulosidade, com valores máximos próximos de 27 °C. A temperatura do ar volta a subir a partir do dia 26, até a chegada do sistema frontal. No dia 30, uma acentuada diminuição da radiação solar diária

(mais de 70% com relação a dias anteriores) é observada devido a presença de nebulosidade associado ao sistema sinótico, acarretando uma queda superior a 10 °C na temperatura do ar. A aproximação do sistema frontal é notória ao acompanhar a queda da pressão na estação, que diminui mais de 20 hPa nos 10 dias de estudo. Durante os primeiros dias, a pressão registrada possui um ciclo diário entre 1020 hPa e 1023 hPa. O decaimento da pressão é percebido até o dia 29, a qual atinge o seu mínimo de 1000 hPa. De maneira geral, os dados observacionais mostram que a radiação de onda curta atmosférica apresentou um comportamento proporcional ao índice de claridade enquanto que para a ROL o desempenho foi inversamente proporcional. Dias com maiores índices de claridade obtiveram valores mais altos (baixos) de RG (ROL). Como esperado, estes resultados mostram que as nuvens diminuem a RG por espalhar e absorver radiação solar, e aumentam a ROL por emitirem radiação de onda longa em direção a superfície. O efeito de diferentes tipos de nuvens será avaliado em mais detalhes na seção 3.

Dia	Ro ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	RG ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	ROL ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	Kt
21	37,94	28,84	23,78	0,76
22	38,12	29,50	24,49	0,77
23	38,30	28,99	26,37	0,76
24	38,47	20,52	28,58	0,53
25	38,64	28,86	27,92	0,75
26	38,81	28,32	26,87	0,73
27	38,98	26,98	29,54	0,69
28	39,14	25,11	31,74	0,64
29	39,31	24,50	31,86	0,62
30	39,46	6,20	-	0,16

Tabela 2 Radiação de onda curta no topo da atmosfera (Ro), Irradiância solar global (RG), Radiação de onda longa descendente (ROL) e índice de claridade (Kt).

3.2 Avaliação dos Códigos de Transferência Radiativa Inseridos no WRF

Nesta seção são avaliados as parametrizações físicas dos códigos de transferência radiativa (RRT-MG e CAM3) empregados no WRF. A avaliação é realizada através da comparação entre as estimativas de RG e ROL analisadas na seção anterior. Para compreender melhor o desempenho dos modelos a análise é realizada em termos das condições de presença e ausência de nebulosidade.

3 2 1 Análise da Radiação de Onda Curta Descendente à Superfície

Foram classificados como dias completos sem nuvens aqueles em que visualmente apresentavam ciclo diários de irradiância solar global observada sem oscilações ou quedas abruptas em seus valores. Neste modo, totalizaram-se quatro dias com essas características, mais precisamente os dias 21 a 23 e 25 outubro (Figura 2A). De modo geral, os códigos de estimativa da RG avaliados apresentam excelente desempenho em dias de céu sem nuvens. Os dias 22 e 23 (Figura 3B e 3C), destacam-se pela acurácia dos códigos (MAE < 5%, R=0,99, d=0,99, Tabela 3), acompanhando o ciclo da RG observada ao longo do dia, bem como do índice de claridade (Figura 3). Entretanto, ambos os códigos subestimam a RG nas primeiras horas da manhã do dia 21, 25 a 27 de outubro (Figura 3A e 3D). Nota-se que os índices de claridade estimados usando as rodadas numéricas são menores do que aqueles utilizando dados observados, indicando que as parametrizações do WRF simularam nebulosidade naqueles horários, o que reduziu a quantidade de radiação solar incidente à superfície. Esse aspecto será melhor avaliado nas próximas seções.

Com a simulação de nebulosidade (ausente nas observações) nos dias 21 e 25, houve elevação nos valores dos erros estatísticos. Para o dia 21, em que a nebulosidade foi dissipada às 10 horas da ma-

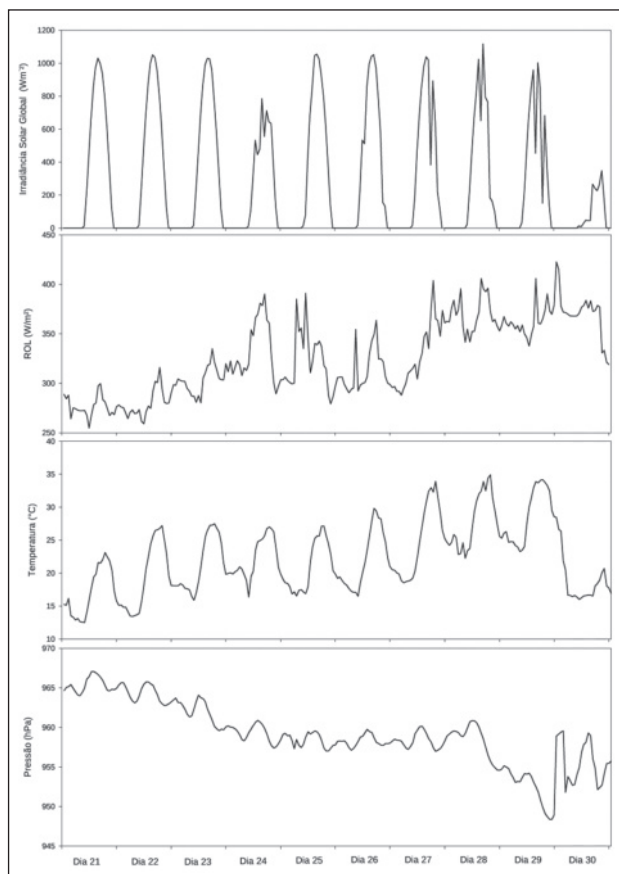


Figura 2 Variáveis observadas pela estação de São Martinho da Serra, Irradiância Solar Global (A), Radiação de onda longa descendente (B), Temperatura do ar (C) e Pressão reduzida ao nível médio do mar (D) durante o período de estudo.

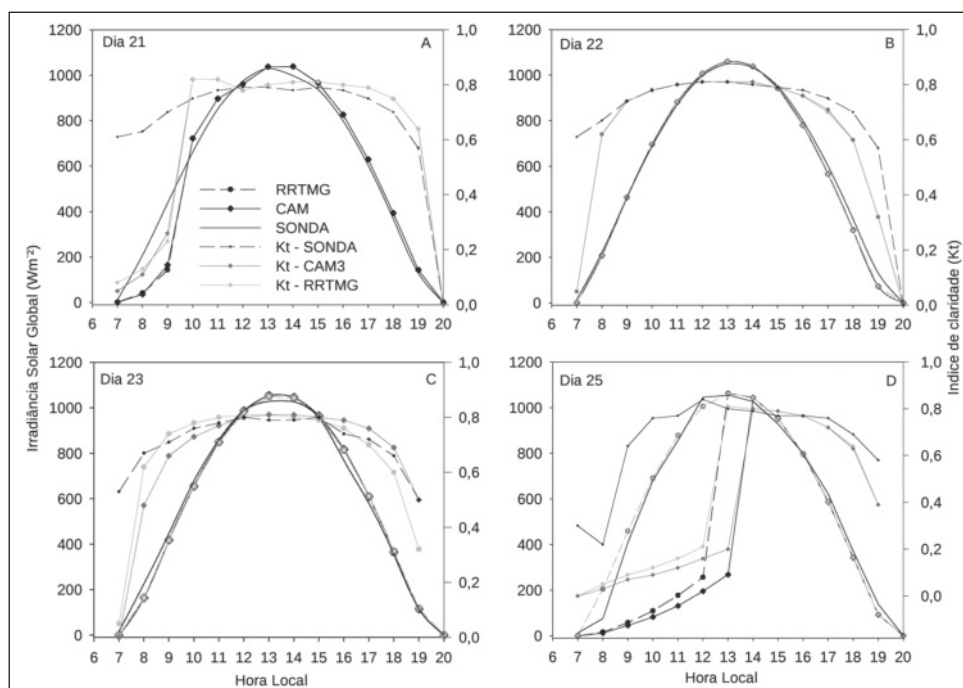


Figura 3 Ciclo diário de Irradiância Solar Global para os dias sem nebulosidade observada no sensor da estação SONDA e simulados pelos códigos radiativos RRTMG e CAM (dias 21, 22, 23 e 25 outubro).

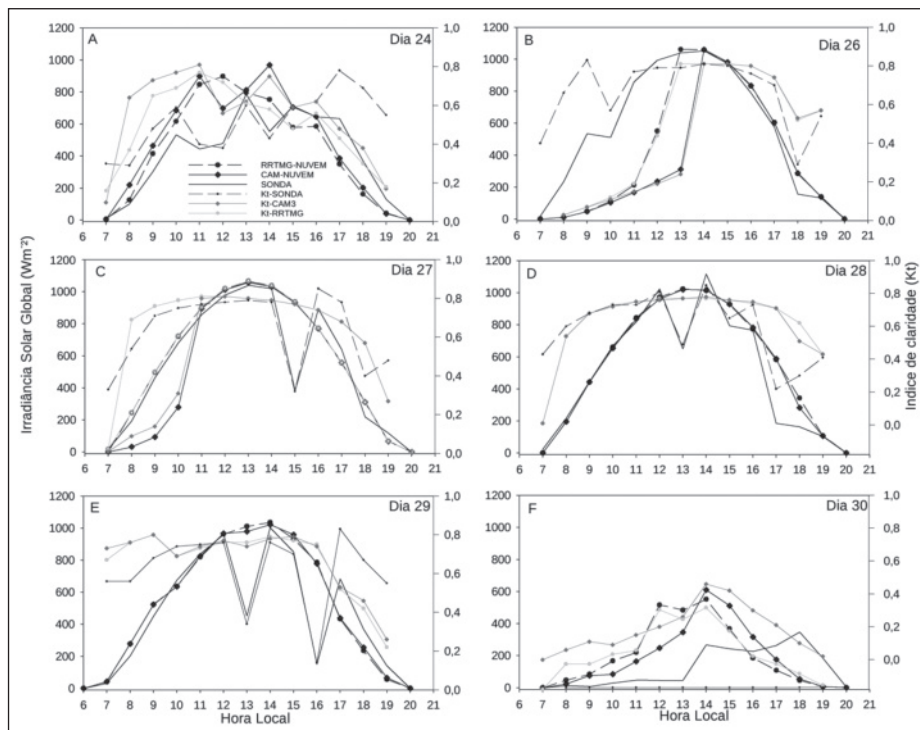
RRTMG	RMSE	MAE	MAE%	MBE	d	R ²
Dia 21	98,14	58,31	9,5	-16,41	0,98	0,94
Dia 22	25,48	18,70	3,0	-12,58	0,99	0,99
Dia 23	27,55	21,87	3,5	-1,07	0,99	0,99
Dia 25	344,73	201,55	32,7	-193,90	0,80	0,51
CAM3	RMSE	MAE	MAE%	MBE	d	R ²
Dia 21	94,16	57,37	9,3	-14,97	0,98	0,95
Dia 22	25,17	18,42	2,9	-12,19	0,99	0,99
Dia 23	27,99	22,25	3,6	-0,349	0,99	0,99
Dia 25	426,64	273,30	44,3	-266,91	0,71	0,32

Tabela 3 Erros estatísticos entre a RG simulada por RRTMG e CAM3 e o observado na estação nos dias de céu claro ($W m^{-2}$).

nhã, o RMSE aumentou para $98,14 W m^{-2}$ (RRTMG) e $94,16 W m^{-2}$ (CAM3) e o MAE para $58,31 W m^{-2}$ (RRTMG) e $57,37 W m^{-2}$ (CAM3). Entretanto, tanto o *d* quanto o *R*² não obtiveram grandes reduções. No dia 25, como a nebulosidade simulada pelo modelo permaneceu até às 13 horas, os erros foram maiores, com reduções mais elevadas do *d* e do *R*², alcançando erros médios absolutos relativos de aproximadamente 32,7%. Tanto o RRTMG quanto o CAM3 subestimaram os valores diários da RG, como pode ser verificado pelos valores do MBE. Como era esperado, os dias 21 e 25 foram os que apresentaram maiores subestimativas da RG. Comparando os dois modelos de estimativa da RG, nos dias em que não há simulação de nebulosidade, os erros estatísticos

são muito próximos. Entretanto, quando o modelo assume condições de nebulosidade, os códigos divergem em alguns aspectos. No dia 21 ambos os modelos erram de maneira similar, apresentando igual índice *d* (0,98) e com coeficiente de correlação *R*² de 0,95 para o CAM3 e 0,94 para o RRTMG. Este pequeno erro é notado pela dissipação da nebulosidade nos códigos em horários semelhantes. No dia 25 houve uma maior diferença entre os esquemas, sendo que o CAM3 apresentou os maiores erros, uma vez que dissipou a nebulosidade uma hora depois do RRTMG, ficando com valores de *d* e *R*² de 0,71 e 0,32, respectivamente. Entretanto, mesmo o RRTMG apresentando performance melhor do que o CAM3, as estimativas da RG ficaram muito aquém do que se esperava, com subestimativa de aproximadamente $193,90 W m^{-2}$ ao longo do dia. Verificou-se ainda que os esquemas radiativos não são capazes de acompanhar as oscilações bruscas da RG associadas a passagem de nuvens esparsas ao longo do dia, como pode ser visto nos dias 27, 28 e 29 outubro (Figura 4). Em dias em que há persistência de nebulosidade ao longo de todo o dia na região (Figura 4A e 4F), os códigos radiativos conseguem retratar uma maior queda na RG. Mas as oscilações ao longo do dia estão fora de fase entre as curvas da RG simuladas e a observada, evidenciando que a modelagem de nuvens do WFR não está apresentando um bom desempenho.

Figura 4 Irradiância solar a superfície em dias com alguma nebulosidade influenciando no sensor da estação (dias 24, 26 a 30 de outubro de 2014).



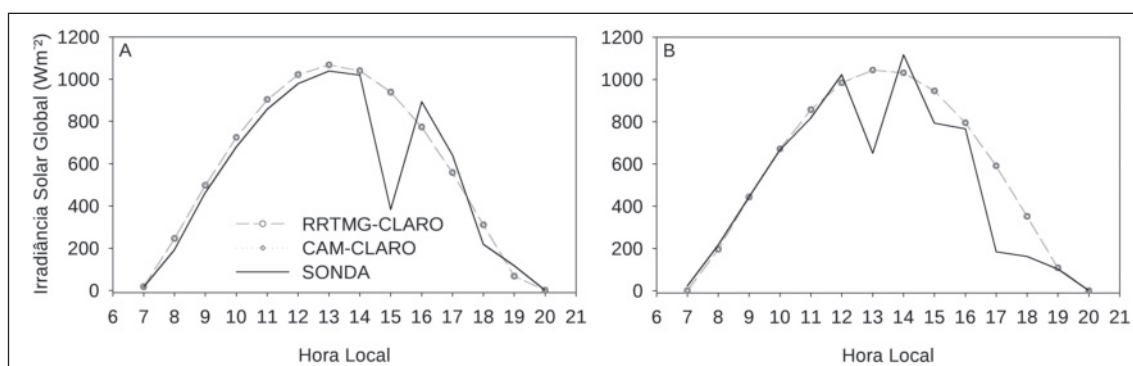
Nas primeiras horas do dia 27 (Figura 4C), os códigos de transferência radiativa comportam-se de maneira distinta. O RRTMG acompanha a radiação observada desde as primeiras horas da manhã, enquanto que o esquema CAM3 subestima a RG até às 11 horas da manhã, devido a simulação de nuvens, evidenciada pelos baixos valores de kt. A partir deste horário o esquema CAM3 volta a representar condições de uma atmosfera mais estável, no qual passa a acompanhar a RG observada. Deve-se salientar que ambos os esquemas não conseguem reproduzir a brusca redução da RG às 15 horas, deixando a diferença entre o simulado e o observado ainda mais acentuada. A representatividade dos esquemas é perceptiva no dia 28 (Figura 4D), onde as curvas apresentam o ciclo diário de radiação com maior precisão durante a maior parte do dia. A partir das 15 horas Local a presença de nebulosidade contribui para a queda da radiação observada a qual não é representada pelas simulações RRTMG e CAM3. A maior diferença entre a Irradiância Solar Global do modelo e o observada gera maiores erros no fim da tarde, pois ambos os esquemas superestimam os valores observados. A reflexão da radiação devido a presença de grande nebulosidade acarreta na diminuição imediata da irradiância solar global, e conseqüentemente na destreza dos modelos em simular com perfeição esta variável. Deve-se salientar que nos dias 27 e 28 a irradiância solar global observada em alguns momentos é maior do que a radiação teórica de céu claro simulada pelos esquemas RRTMG e CAM3 (Figura 5), onde RRTMG e CAM3 refere-se as rodadas do modelo WRF com a formação de nuvens desligada. Este fenômeno é conhecido na literatura como “cloud gap effect” (Gu *et al*, 1999), em que o radiômetro observa valores maiores de radiação so-

lar incidente a superfície em dias nublado do que em condições de céu claro. Isso ocorre devido a reflexão de radiação solar por nuvens geralmente pela lateral de nuvens tipo cumulus em direção a instrumentação a superfície. Isso ocorre dependendo da geometria de iluminação, ocorre geralmente para altos valores de ângulos zenitais. Em outras palavras, este fenômeno ocorre quando o caminho óptico dos raios solares está livre, chegando a mesma quantidade de radiação solar global que chegaria em um dia claro, e ao redor deste caminho óptico há presença de nuvens, aumentando a quantidade de radiação solar à superfície devido ao incremento de radiação difusa. Este tipo de comportamento da radiação não é simulada por esquemas radiativos.

Devido a chegada de um sistema frontal uma grande presença de nebulosidade é observada na região de estudo no dia 30, fazendo com que a radiação decaia durante o dia e não ultrapasse 350 W/m². Os esquemas RRTMG e CAM3, apesar de conseguirem retratar a diminuição da RG, têm suas capacidades de descrever a radiação afetada diretamente pela presença de nuvens de grande desenvolvimento vertical, levando a superestimativa da RG. Os erros da RG simulada para dias em que houve presença de nebulosidade ainda que esparsa, são praticamente uma ordem de grandeza superiores aos erros encontrados para os dias de céu claro (Tabela 4), com erros médios absolutos relativos superiores a aproximadamente 15,5%. O dia 26 foi o que apresentou os maiores erros, uma vez que os esquemas subestimaram a RG durante toda a parte da manhã.

De modo geral, os dois esquemas apresentaram comportamento muito parecidos para as condições de céu com nuvens, não podendo ser indicada

Figura 5
Figura com os dados de radiação teórica de céu claro e RG do sonda para o dia 27 (A) e 28 (B)



RRTMG	Kt	RMSE	MAE	MAE%	MBE	d	R ²
Dia 24	0,53	205,53	155,86	35,5	36,66	0,84	0,55
Dia 26	0,73	288,16	189,09	31,3	-151,85	0,86	0,63
Dia 27	0,69	163,38	89,27	15,5	47,15	0,95	0,82
Dia 28	0,64	167,05	102,27	19,1	69,94	0,94	0,82
Dia 29	0,62	251,58	153,10	29,2	72,17	0,86	0,55
Dia 30	0,16	234,77	186,08	140,5	81,56	0,60	0,01
CAM3	Kt	RMSE	MAE	MAE%	MBE	d	R ²
Dia 24	0,53	212,51	159,10	36,3	79,27	0,83	0,59
Dia 26	0,73	398,21	272,90	45,1	-237,43	0,73	0,37
Dia 27	0,69	225,44	149,80	26,0	-35,42	0,90	0,70
Dia 28	0,64	163,48	99,13	18,5	64,48	0,94	0,82
Dia 29	0,62	243,97	148,58	28,4	73,89	0,86	0,57
Dia 30	0,16	191,74	155,15	117,2	68,86	0,59	0,15

Tabela 4 Erros estatísticos entre a RG simulada por RRTMG e CAM3 e o observada na estação em dias com nebulosidade em determinado período do dia ($W m^{-2}$).

uma melhor performance do RRTMG ou do CAM3, apesar de nos dias 24, 26 e 27 o RRTMG ter obtido melhor desempenho enquanto que nos dias 28, 29 e 30 ter sido o CAM3.

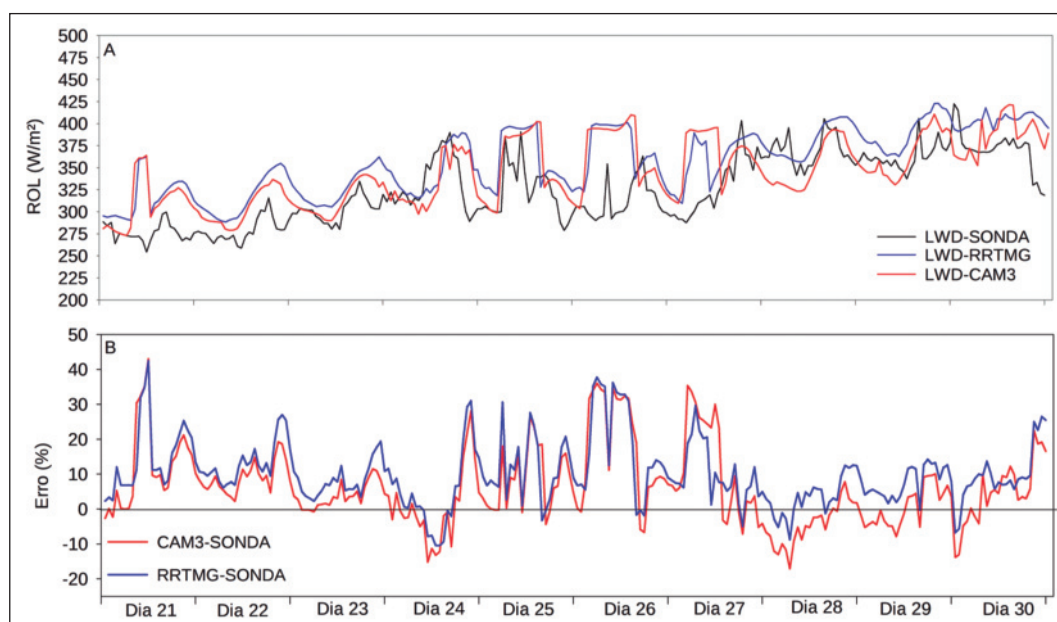
3.2.2 Análise da Radiação de Onda Longa Descente à Superfície

A radiação de onda longa atmosférica simulada pelos esquemas radiativos acompanha a tendên-

cia de aumento do valor de irradiância solar global observada ao longo do período estudado (Figura 6A). As simulações de ambos códigos de transferência indicam um erro médio de aproximadamente 15% na ROL (Figura 6A). Ambos os códigos de radiação praticamente superestimam a radiação de onda longa descende a superfície para todo o período, indicando um erro sistemático. Interessante observar que para os dias em que as observações e as simulações indicavam praticamente condições de céu claro (21 a 23 de outubro), apresentam também excelente acordo em termos de temperatura e umidade do ar, sendo esses parâmetros importantes na estimativa de radiação de onda longa. Espera-se que essa diferença esteja associada a variabilidade temporal dos dados observados, a qual não é possível de estimar no âmbito dos experimentos numéricos realizados neste estudo, principalmente devido a resolução espacial.

Analisando as variações da ROL e da temperatura do ar simuladas pelos esquemas radiativos (Figura 7A), nota-se uma relação bem marcada entre essas variáveis, evidenciando a influência da temperatura do ar na radiação de onda longa tanto em dias claros quanto em dias com nebulosidade. Entretanto, a dependência da ROL em relação à temperatura do ar nos dados observados é mais evidente nos dias sem nuvens (21 a 23 outubro). Nos dias com menores índices de claridade (24, 28 a 30) essa relação

Figura 6 Ciclo diário de radiação de onda longa (A) simulado pelos modelos RRTMG (azul), CAM3 (vermelho) e observado (preto). Erros da radiação de onda longa (B) entre o simulado pelo código RRTMG (azul) e CAM3 (vermelho).



da ROL com a temperatura do ar é menos evidente, indicando que a nebulosidade é outro fator decisivo na quantidade de ROL que incide à superfície. A relação entre a radiação (RG e ROL), temperatura do ar e nebulosidade é um processo de retro-alimentação, como pode ser evidenciado tanto nos dados observacionais quanto nos experimentos numéricos. Neste sentido, com a condição de céu claro nos três primeiros dias estudados, ocorreu a maior incidência de irradiância solar global à superfície, elevando as temperaturas, e aumentando a capacidade da atmosfera de reter vapor d'água. O efeito estufa do vapor foi de aumentar a radiação de onda longa e consequentemente manter temperaturas elevadas. A chegada do sistema frontal fez com que a massa de ar fria resfriasse o ar quente e úmido sobre a região e o vapor condensasse gerando nebulosidade. As nuvens por sua vez aumentaram a radiação solar refletida de volta ao espaço diminuindo a quantidade de RG, e consequentemente diminuindo a temperatura local.

A maior dependência da ROL em relação à temperatura do ar nos dias claros ocasionou em menores erros estatísticos nesses dias, apresentando melhores índices de concordância de Willmott (1985) e coeficiente de determinação. No entanto, o desempenho dos esquemas radiativos de onda longa em geral pode ser considerado in-

satisfatório, visto que os maiores valores de d e R^2 não passaram de 0,57 e 0,53 (RRTMG) e 0,45 e 0,67 (CAM3), respectivamente, apesar dos baixos valores do erro médio absoluto percentual (MAE%). Como mencionado, um estudo minucioso deve ser realizado através de experimentos numéricos com alta resolução espacial para melhor avaliar possíveis razões do baixo desempenho do modelo.

3 2 3 Simulação de Nebulosidade Usando Diferentes Códigos de Transferência Radiativa

Os experimentos numéricos utilizando os esquemas de radiação (RRTMG e CAM3), apresentam uma fração de nebulosidade (Figura 8) em altos níveis (acima de 400 hPa) com maior intensidade e extensão vertical nos dias 24 e 30, em que as observações indicam os menores valores de K_t . Nos dias 25 a 27, os esquemas indicam uma fração de nebulosidade próxima de 1 em baixos níveis próximo de 1000 hPa (Figura 8A e 8B). Nos dias 28 e 29, a fração de nebulosidade simulada é restrita a altos níveis (~200 hPa), sendo que informações de satélite indicavam presença de nuvens baixas (não mostrado). Isso explica as temperaturas mais elevadas na simulação em relação aos dados observados. As observações indicam uma redução na quantidade

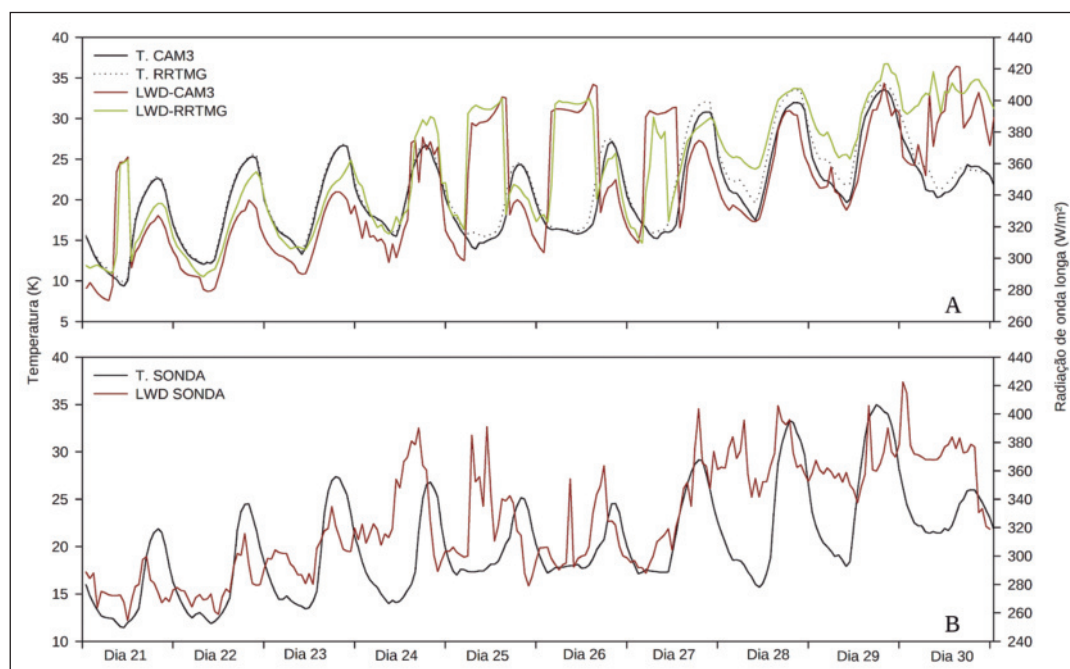


Figura 7 Ciclo diário de radiação de onda longa (A) simulado pelos modelos RRTMG (azul), CAM3 (vermelho) e observado (preto). Erros (B) entre o simulado pelo código RRTMG (azul) e CAM3 (vermelho).

de radiação solar para determinados períodos do dia (Figura 4D e 4E), e que esta redução está associada as nuvens baixas observadas por satélite. No caso das simulações, a radiação solar apresenta intensidades similar a condições de céu claro, pois o efeito radiativo das nuvens altas simuladas é nulo (Iacono *et al.*, 2008; Collins *et al.*, 2004), onde o raio efetivo líquido da partícula é representado pelos diferentes códigos, seja importado da microfísica (RRTMG) ou calculado de acordo com a temperatura da camada (CAM3), vide seção 2. Neste caso, o modelo realizou o cálculo corretamente do efeito radiativo de nuvens altas, porém seu desempenho foi prejudicado por não simular a presença de nuvens baixas para esses dias. Consequentemente, a temperatura da superfície é mais elevada, devido a entrada de radiação de onda curta. Nota-se neste dia, que o esquema RRT-

MG apresenta uma menor fração de nebulosidade do que o esquema CAM3, o que explica a temperatura máxima ser maior no esquema RRTMG para este dia. No dia 30, com a chegada da frente, a nebulosidade aumentou em todos os níveis atmosféricos de 800 a 200 hPa, reduzindo a temperatura do ar e a radiação solar em relação aos dias anteriores.

Ambos os esquemas radiativos sob condições de céu claro apresentam configurações similares quanto à distribuição vertical de conteúdo de vapor de água, água líquida e gelo. RRTMG (Figura 9C) e CAM3C (Figura 9A) apresentam a maior quantidade de vapor próximo à superfície, e pouca presença de conteúdo de gelo nos dias que antecedem a chegada do sistema frontal. Período em que a concentração de gelo torna-se maior devido a presença de movi-

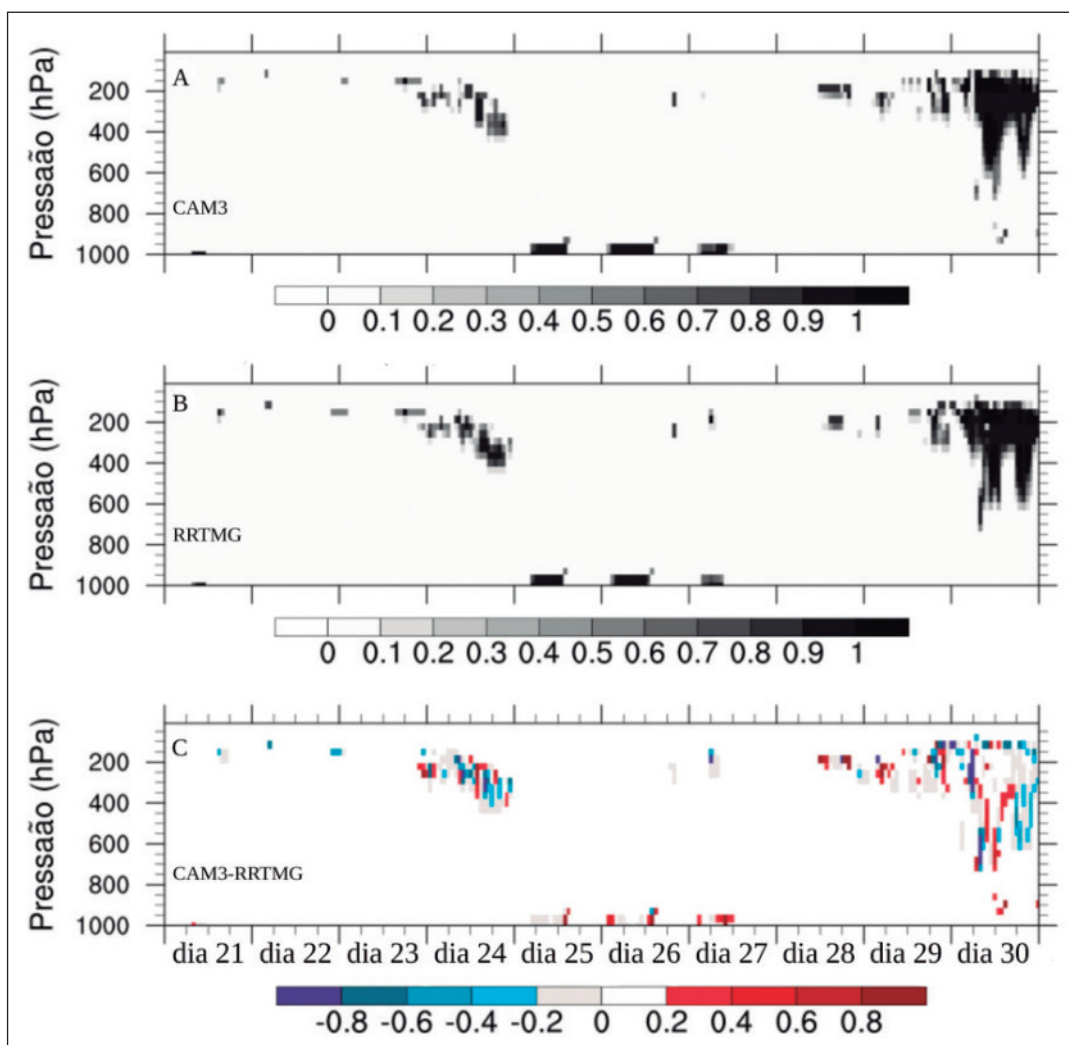


Figura 8 Fração de nebulosidade do esquema CAM3 (A), RRTMG (B) e a diferença entre eles (C).

mentos ascendentes. Ambos os modelos associam apenas o dia 26 com conteúdo de água líquida em superfície. Maiores diferenças entre os campos ocorrem devido a nebulosidade, onde RRTMG (Figura 9D) apresenta maior quantidade de gelo na atmosfera durante os dias 24 e 30, enquanto que CAM3 (Figura 9A) estima a presença desta variável em menor quantidade. Durante o dia 27, o esquema RRTMG não simula presença de conteúdo de água líquida em superfície, enquanto que o modelo com CAM3 atribui esta variável em sua rodada. Esta diferença é associada ao maior erro de CAM3 em estimar a irradiância em superfície neste dia (Figura 3C), apresentando uma atmosfera mais opaca nos níveis próximos à superfície, impedindo a penetração de radiação.

3.3 Forçante Radiativa de Nuvens e Impactos nas Variáveis Meteorológicas

Os resultados experimentais indicam que nuvens baixas apresentam impactos mais significativos nos fluxos radiativos. Verifica-se que nuvens baixas produziram uma forçante negativa de radiação de onda curta devido ao alto espalhamento da radiação pelas nuvens, consequentemente uma forçante positiva na radiação de onda longa (Figura 10A). A forçante radiativa da nuvem é observado com maior ênfase nos dias 24 a 27. A presença de nuvens baixas geradas por ambos experimentos contribui para a característica de uma atmosfera mais opaca à radiação solar, impedindo que a mesma incida à superfície, gerando um decréscimo de até 800 Wm^{-2} na radiação simulada (Figura 10B), e aumentando a

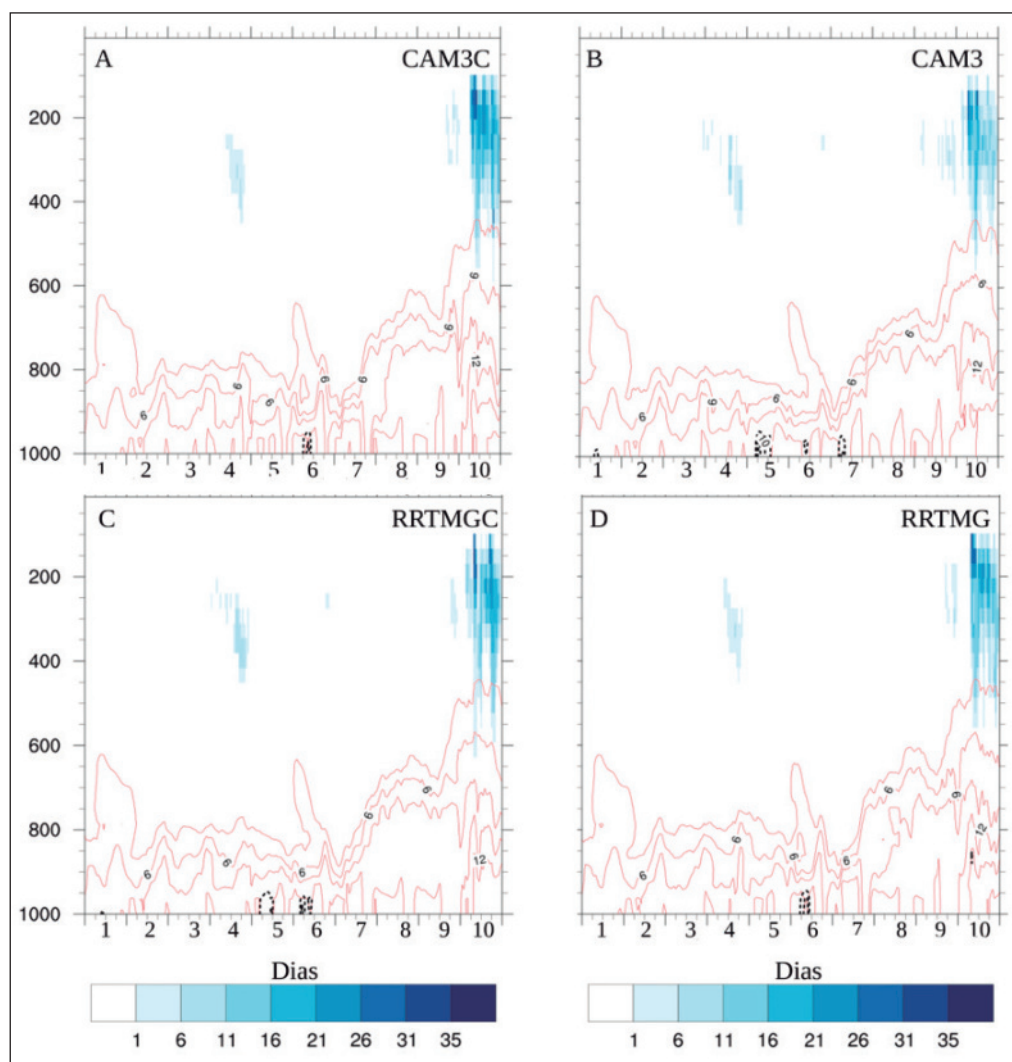


Figura 9 Análise vertical do conteúdo de vapor de água dividido por 10^{-3} (linha vermelha), água líquida dividido por 10^{-4} (Linha preta) e conteúdo de gelo dividido por 10^{-6} (escala em azul). Referentes aos esquemas CAM3C (A), CAM3 (B), RRTMGC (C) e RRTMG (D).

radiação de onda longa em até 100 Wm^{-2} . O efeito líquido da nuvem discretizada pelos modelos tende a diminuir a temperatura em superfície em relação as observações, por assumir os baixos níveis da atmosfera com maior quantidade de nebulosidade, o esquema CAM3 apresenta os maiores valores devido a forçante radiativa devido a nuvem, principalmente para o dia 27.

Ao comparar as variáveis meteorológicas simuladas pelo WRF com as observadas no sítio experimental, nota-se pequenas variações em algumas das principais variáveis meteorológicas. Durante o período de estudo, os esquemas RRTMG e CAM3 são precisos quanto ao ciclo diurno de temperatura observada, acompanhando o aumento da temperatura do ar até a chegada do sistema frontal ao final do período (Figura 11A). A temperatura é subestimada pelos esquemas radiativos durante a noite e início da manhã nos dias 25, 26 e 27, quando o modelo assume presença de nuvens baixas. Nestes três dias, nota-se uma queda da temperatura diurna em relação aos demais, visto que a presença de nebulosidade em baixos níveis impede que a radiação solar atinja a superfície, o que contribui significativamente para o

seu resfriamento. O resfriamento é também observado no dia 30 com a chegada do sistema frontal. O efeito radiativo das nuvens é notório no campo de temperatura quando faz-se a diferença entre o modelo conceitual de céu claro e o modelo com nuvens, onde percebe-se que a presença de nuvens colabora para o resfriamento da superfície em até 9°C no dia 25, 7°C no dia 26 e 5°C no dia 27 (Figura 11B).

Ambos os modelos apresentam poucos erros em relação à pressão atmosférica ao nível médio do mar, nos quais acompanham a queda de pressão com o decorrer do tempo até a chegada do sistema frontal, agindo como uma condição esperada da atmosfera (Figura 11C). O comportamento da pressão entre o modelo simulado com nuvens e sem nuvens é constante em grande parte do período. Nos dias 25, 26 e 27 observa-se que o efeito das nuvens baixas colabora para um aumento da pressão em superfície em torno de 2 hPa, como consequência ao resfriamento superficial provocado pela nebulosidade (Figura 11D). Os esquemas acompanham a oscilação de umidade relativa durante o período estudado, no qual concorda com a variação gradual do observado. Para esta variável, considerando o modelo sem

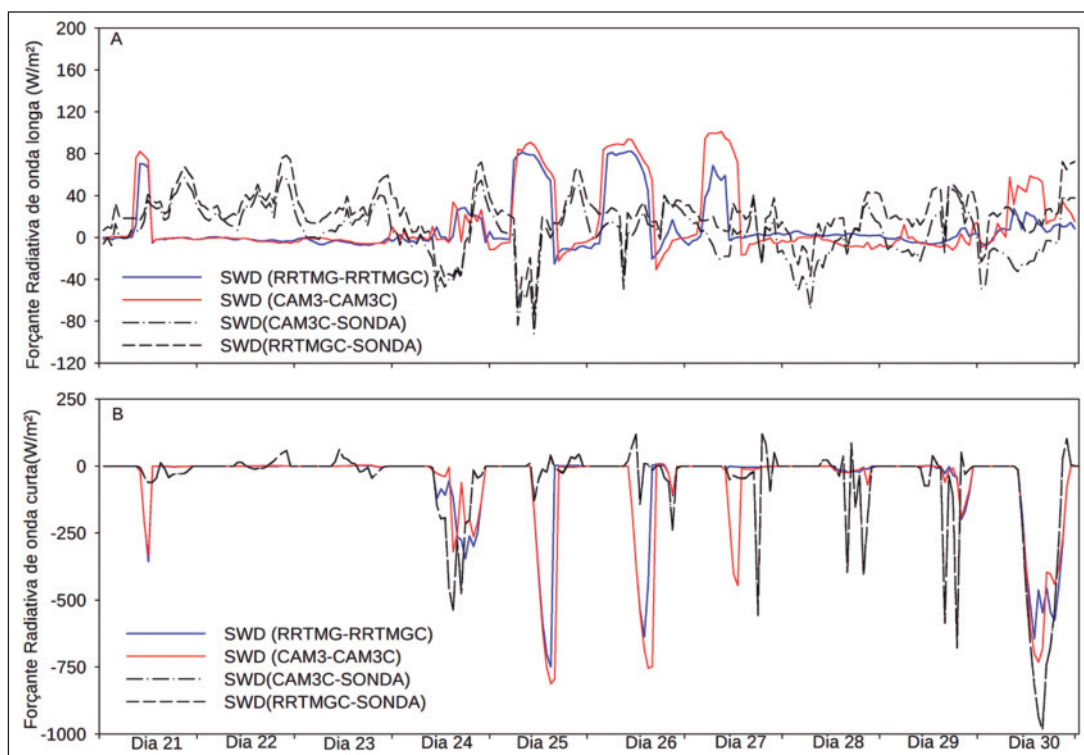


Figura 10 Forçante radiativa das nuvens na radiação de onda longa (A) e na radiação de onda curta (B).

nuvem, pode-se notar que a umidade relativa é superestimada durante todas as noites (Figura 11E). As simulações são melhores para a umidade relativa no final do período estudado, onde os esquemas aproximam-se do observado, gerando os menores erros durante o dia. O efeito radiativo para a umidade relativa é influenciado com maior contribuição durante os períodos onde os modelos assumem nuvens em baixos níveis, assumindo que a umidade em baixos níveis é crescente com a presença de nuvens. Nos dias 24 a 27 uma maior diferença entre os esquemas RRTMG e CAM3 é observada, onde o segundo esquema apresenta uma maior estimativa da umidade do que o esquema RRTMG (Figura 11F).

4 Conclusões

A presença de nuvens baixas gerada pelo modelo inibiram a chegada da radiação solar a superfície, dando início a forçante negativa na radiação devido a presença de nuvens nos dias 21, 25 e 26. A opacidade das nuvens baixas impede a entrada de radiação de onda curta, que por consequência afeta os cálculos de temperatura, umidade, pressão, razão de mistura, entre outras variáveis de troca de massa no instante posterior. Por esta razão o esquema CAM3 apresenta uma menor quantidade de radiação a superfície no dia 27 enquanto que RRTMG simula

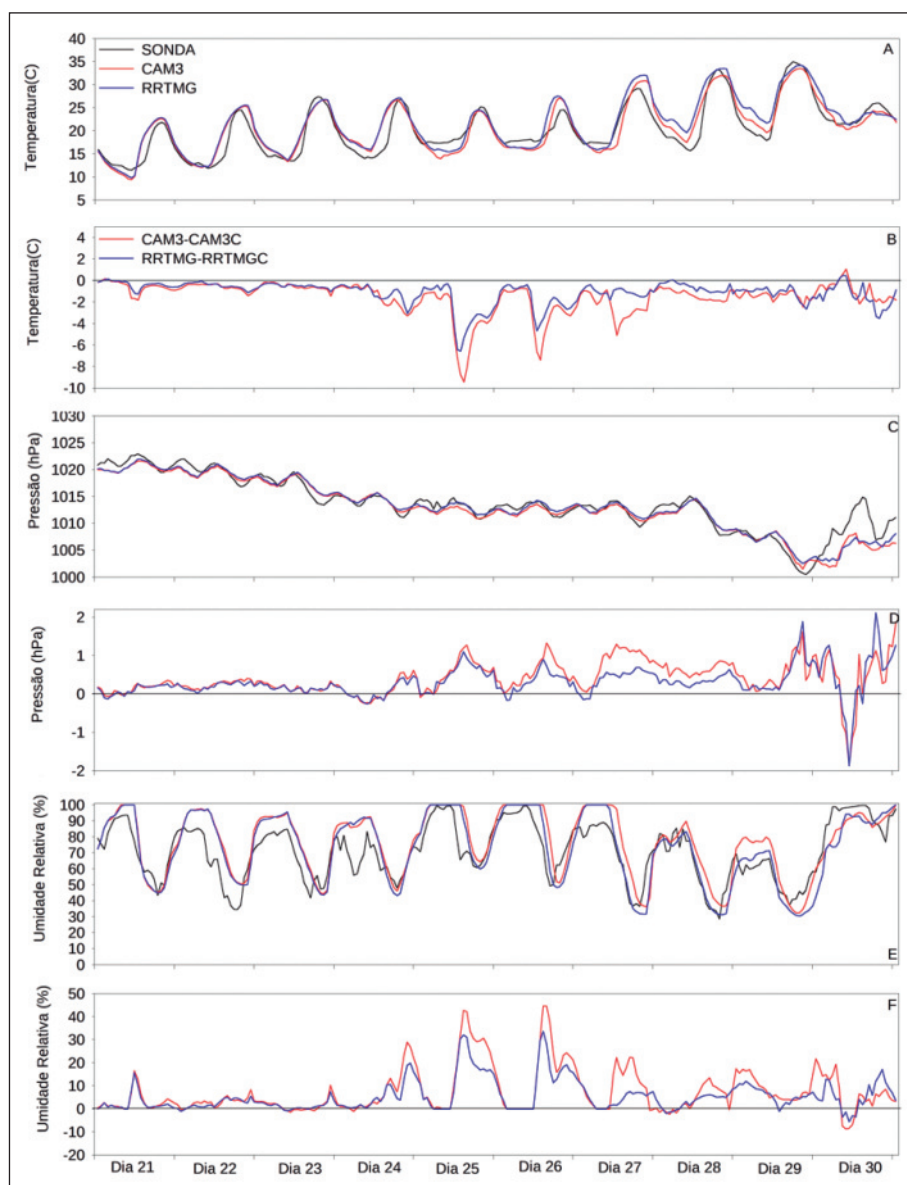


Figura 11 Comparação entre as variáveis de temperatura (A), efeito da nuvem no modelo em relação a temperatura (B), pressão ao nível médio do mar (C), efeito da nuvem na pressão ao nível médio do mar (D), umidade relativa (E), efeito da nuvem na umidade relativa (F)

bem quando comparado ao observado. Nos modelos regionais de previsão do tempo, como o WRF, os códigos de transferência radiativa são dependentes das variáveis que chegam a eles por meio das outras parametrizações. Essa dependência faz com que os códigos radiativos processem a radiação de acordo com o que é passado a ele. Neste trabalho podemos observar que tanto a RG e ROL são dependentes das condições de nebulosidade imposta pelo modelo. Nos dias em que o modelo assume as condições de nebulosidade condizente com o observado, os fluxos radiativos do modelo apresentam melhor desempenho.

5 Agradecimentos

Aos dados da estação radiométrica do Projeto SONDA, ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo suporte, ao apoio financeiro do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), e ao Programa Nacional de Pós Doutorado (PNPD/Capes).

6 Referências

- Andrade, R.C.; Tiba, C. & Silva, T.C. 2015. Suncloud-e: software para a localização do efeito lente produzido por nuvens na irradiação solar global. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 6: 95-101.
- Collins, W.D.; Rash, P.J.; Boville, B.A.; Hack J.J.; McCaa, R.J.; Williamson, D.L.; Kiehl, T.J. & Briegleb, B. 2004. *Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 3.0)*. NCAR Tech. Note NCAR/TN-464, 226.
- Hwang, J.; Choi, Y.S.; Kim, W.; Su, H. & Jiang, J.H. 2018. Observational estimation of radiative feedback to surface air temperature over Northern High Latitudes. *Climate Dynamics*, 50: 615-628.
- Gu, L.; Fuentes, J.D.; Shugart, H.H.; Staebler, R.M. & Black, T.A. 1999. Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness: results from two North American deciduous forests. *Journal of Geophysical Research*, 104: 31421-31434
- Iacono, M.J.; Delamere, J.S.; Mlawer, E.J.; Shephard, M.W.; Clough, S.A. & Collins, W.D. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113: D13.
- Lima, A.C. 2013. *Energia solar no Espírito Santo*, Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado de Espírito Santo. 120.
- Liou, K.N. 2002. *An introduction to atmospheric radiation*. Geophysics Series, 583.
- Malek, E. 2008. The daily and annual effects of dew, frost, and snow on a non-ventilated net radiometer. *Atmospheric Research*, 89: 243-251.
- Mlawer, E.J.; Taubman, S.J.; Brown, P.D.; Iacono, M.J. & Clough, S.A. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102: 16663-16682.
- Pavão, V.M.; Querino, C.A.S.; Beneditti, C.A.; Pavão, L.L.; Querino, J.K.A.; Machado, N.G. & Biudes, M.S. 2016. Variação espacial e temporal do saldo de radiação superficial em uma área do sul do Amazonas, Brasil. *Raega-O Espaço Geográfico em Análise*, 37: 333-352.
- Reboita, M.S.; Krusche, N.; Ambrizzi, T. & RGha, R.P.D. 2012. *Entendendo o tempo e o clima na América do Sul*. Terra e Didática. 8: 34-50.
- Sousa, J.D.; Silva, B.B. & Ceballos, J.C. 2008. Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26: 31-44.