



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.25.16.03-TDI

SIMULAÇÕES DO MODELO ETA UTILIZANDO DOIS ESQUEMAS DE RADIAÇÃO EM CONDIÇÕES DE CÉU CLARO

Diêgo de Andrade Campos

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pela Dra.
Chou Sin Chan, aprovada em 29
de junho de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JNMBR2>>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.25.16.03-TDI

SIMULAÇÕES DO MODELO ETA UTILIZANDO DOIS ESQUEMAS DE RADIAÇÃO EM CONDIÇÕES DE CÉU CLARO

Diêgo de Andrade Campos

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pela Dra.
Chou Sin Chan, aprovada em 29
de junho de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JNMBR2>>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Campos, Diêgo de Andrade.

C157s Simulações do modelo Eta utilizando dois esquemas de radiação em condições de céu claro / Diêgo de Andrade Campos. – São José dos Campos : INPE, 2015.
xxiv + 87 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.25.16.03-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.
Orientadora : Dra. Chou Sin Chan.

1. Radiação atmosférica. 2. Parametrização de radiação.
3. RRTMG. 4. GFDL. 5. Modelo ETA. I.Título.

CDU 551.521.326



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

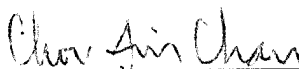
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Meteorologia

Dra. Simone Marilene Sievert da Costa
Coelho



Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Chou Sin Chan



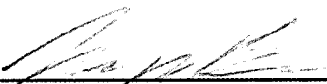
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Julio César Santos Chagas



Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Marcus Jorge Bottino



Convidado(a) / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Título: "Simulações do Modelo ETA Utilizando Dois Esquemas de Radiação em Condições de Céu Claro"

Aluno (a): *Diego de Andrade Campos*

São José dos Campos, 29 de Junho de 2015

“Feliz o homem que encontrou a sabedoria, o homem que alcançou o entendimento”.

Provérbios 3:13

A Deus todo poderoso e autor da minha fé, que me presenteou com todo o conhecimento necessário para finalizar este trabalho.

DEDICO

A toda minha família, em especial meus pais Sérgio e Eliane e meus irmãos Deive e Débora, que são espelho de quem sou hoje.

A minha amada esposa Nazaré, que me ensina todos os dias a ser um homem melhor, justo e temente a Deus.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e a Nossa Senhora por me concederem sabedoria e a alegria de viver, sempre iluminando o meu caminho em todas as adversidades.

A minha orientadora, Dra. Chou Sin Chan, pela paciência e confiança em meus esforços e por todos os ensinamentos que foram essenciais em meu crescimento profissional, me apoiando sempre nos momentos mais difíceis até aqui. Você é um exemplo como pessoa e profissional para mim.

A todos os amigos do grupo Eta pelas colaborações e amizade, em particular, Gustavo, Jorge, Daniela, Marilei, Dragan, Graciele, Priscila, Carol, Felipe e Josiane (in memorian). Em especial ao André e Adan por todos os ensinamentos e paciência desde sempre, me ajudando e colaborando muito em todo este trabalho. Muito obrigado.

Aos professores da Pós-Graduação em Meteorologia pelos ensinamentos e formação indispensáveis na escolha do meu foco de trabalho e às secretárias da PGMET pela disponibilidade e presteza em todos os momentos necessários.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e à Pós-Graduação em Meteorologia do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos pela oportunidade de realização deste curso de mestrado.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de estudo.

À ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e CGPDI (Centro de Gestão de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação), pelo financiamento deste trabalho.

Aos Colegas e funcionários do CPTEC pelo apoio e pelas conversas durante o desenvolvimento desta dissertação, em especial ao Carlos Renato, Otacílio Menezes, Diego Enoré, Paulo Kubota e Marcus Bottino.

A todos os amigos da PGMET sem exceções. Todos contribuíram em algo para a realização deste projeto, seja com discussões, ensinamentos ou conselhos, tornando mais fácil enfrentar as dificuldades do dia a dia. Muito obrigado!

A meus queridos pais Sérgio e Eliane por não pouparem esforços para que mesmo com a distância eu me sentisse mais em casa, possibilitando a realização deste trabalho com tranquilidade. A toda a minha família em Fortaleza-CE, pelo apoio e pela torcida.

Em especial a minha querida companheira e esposa Nazaré, por aguentar minha ausência durante o projeto e por me dar o carinho e a força necessária para continuar ultrapassando as dificuldades e finalizar esta dissertação. Te amo!

E por fim o meu agradecimento aos membros da banca examinadora por todas as críticas, sugestões e contribuições para este trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho de dois esquemas de parametrização de radiação em simulações contínuas de 30 dias do modelo Eta em condições de céu claro. Atualmente o modelo Eta do INPE utiliza o esquema de radiação de onda curta e onda longa desenvolvido pelo Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) e a superestimativa da radiação de onda curta incidente à superfície proveniente desse pacote de radiação é a principal motivação para a realização das simulações. Tem sido desenvolvido nos últimos anos um modelo rápido de transferência radiativa chamado RRTMG, que tem por objetivo estimar com maior precisão os fluxos radiativos e as taxas de resfriamento e pode ser utilizado em modelos atmosféricos. Esse esquema utiliza o método de aproximação de correlação-k para o cálculo da transferência radiativa, possibilitando maior acurácia e eficiência computacional. O RRTMG tem como base o modelo de transferência radiativa linha-a-linha, que fornece os coeficientes de absorção para a correlação-k. Esses coeficientes de absorção têm sua precisão validada a partir de medidas de alta resolução do modelo linha-a-linha em conjunto com medidas realizadas pelo programa Atmospheric Radiation Measurements (ARM), fornecendo ao RRTMG uma conexão direta com observações em alta resolução espectral. Dados de análise, reanálise, satélite e estação meteorológica foram usados para avaliar os campos de radiação, cobertura de nuvem e temperatura a dois metros, entre outros. Este estudo pretende contribuir principalmente em melhorias na radiação do modelo Eta e em um melhor entendimento do funcionamento de esquemas de parametrização de radiação.

Palavras Chave: Radiação Atmosférica, Parametrização de radiação, RRTMG, GFDL, Modelo Eta.

ETA MODEL SIMULATIONS USING TWO RADIATION SCHEMES IN CLEAR SKY CONDITIONS

ABSTRACT

This work aims to evaluate the performance of two radiation parameterization schemes in 30-days continuous simulations of Eta model in clear sky conditions. Currently the INPE Eta model uses the short and long wave radiation scheme developed by the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) and the overestimation of the incident short wave radiation at the surface of radiation package is the main motivation for the simulations. It has been developed in recent years a rapid radiative transfer scheme called RRTMG, which aims to estimate more precisely the radiative fluxes and cooling rates and can be used in atmospheric models. This scheme uses the correlation-k approximation method for the calculation of radiative transfer, enabling better accuracy and computational efficiency. The RRTMG is based on the line-by-line radiative transfer model, which provides the absorption coefficients for the correlation-k. These absorption coefficients have its accuracy validated from high-resolution line-by-line model in conjunction with measurements taken by the Atmospheric Radiation Measurements (ARM) program, providing the RRTMG a direct connection with observations in high spectral resolution. Analysis, reanalysis, satellite and meteorological station data were used to evaluate the radiation fields, cloud cover and temperature at two meters, among others. This study intends to contribute mainly to improvements in Eta model's radiation and a better understanding of how radiation parameterization schemes work.

Keywords: Atmospheric Radiation, Radiation Parameterization, RRTMG, GFDL, Eta Model.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Diagrama do balanço de energia global Fonte: Trenberth e Fasullo (2011)	5
Figura 2.2 - Diferença do balanço radiativo devido onda longa no topo da atmosfera em um experimento realizado pelo modelo global do centro europeu ECMWF, sem e com a utilização do modelo rápido de transferência radiativa RRTMG implementado (Morcrette et al., 2008).....	11
Figura 3.1 - Domínio e topografia (m) utilizada nas simulações propostas do modelo Eta.....	23
Figura 3.2 - Constituintes absorvedores de radiação solar, as caixas representam a média feita sobre o espectro de radiação solar incidente (Campana e Hou, 2005).....	25
Figura 3.3 - Radiação de onda longa emergente normalizada por unidade de comprimento de onda para um corpo negro, com a temperatura média da terra e as bandas de absorção usadas pelo esquema de radiação de onda longa do GFDL (Campana e hou, 2005)	31
Figura 3.4 - Função de densidade da potência espectral simetrizada para o auto alargamento do vapor d'água em 26,7 mb e 296 K (curva sólida). O "continuum" é indicado pela curva pontilhada (Clough et al., 1989)	34
Figura 3.5 - Coeficientes de absorção devido ao dióxido de carbono para um nível de 507 mbar em uma atmosfera de verão de latitudes médias para uma faixa espectral de 630-700 cm ⁻¹ (a) como uma função do número de onda e (b) reordenado em ordem crescente pelo método de correlação-k (Mlawer et al., 1997)	35
Figura 4.1 - (a) Precipitação acumulada no mês de Julho de 2008 (mm/mês) e (b) Temperatura média (°C) para o mês de Julho de 2008. Fonte: INMET	46
Figura 4.2 - Imagens do satélite GOES-10 do canal IR de temperatura realçada para o período entre 14 e 19 de Julho de 2008	48
Figura 4.3 - Cobertura média total de Nuvens (%) do mês de Julho de 2008 para (a) dados do CMSAF, (b) reanálise do CFSR, versões (c) Eta-GFDL e (d) Eta-RRTMG.....	50
Figura 4.4 - Precipitação média total (mm) para o mês de Julho de 2008 para (a) dados do CMORPH 8 km e versões (b) Eta-GFDL e (c) Eta-RRTMG	51

Figura 4.5 - Fluxo médio de radiação de onda curta incidente à superfície (W/m^2) do mês de Julho de 2008 para (a) dados CMSAF 5 km e do (b) GL 4 km (ambos interpolados para 10 km) e versões (c) Eta-GFDL e (d) Eta-RRTMG.....	52
Figura 4.6 - (a) albedo estimado pelo CMSAF 25 km (0 a 1), (b) albedo gerado pelo modelo Eta (0 a 1) e o Fluxo de radiação de onda curta emergente à superfície (W/m^2) das versões (c) Eta-GFDL e (d) Eta-RRTMG para o mês de Julho de 2008	54
Figura 4.7 - Fluxo médio de radiação de onda longa emergente à superfície (W/m^2) do mês de Julho de 2008 para (a) dados do CMSAF 25 km, versões (b) Eta-GFDL e (c) Eta-RRTMG.....	55
Figura 4.8 - Fluxo médio de radiação de onda longa incidente à superfície (W/m^2) do mês de Julho de 2008 para (a) dados do CMSAF 25 km, versões (b) Eta-GFDL e (c) Eta-RRTMG.....	57
Figura 4.9 - (a) Diferença do fluxo médio de radiação de onda curta incidente à superfície (W/m^2) entre as versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG, (b) o erro entre a versão Eta-GFDL e GL, (c) o erro entre a versão Eta-RRTMG e GL, (d) o erro entre Eta-GFDL e CMSAF e (e) o erro entre Eta-RRTMG e CMSAF para o mês de Julho de 2008	59
Figura 4.10 - Campo médio de temperatura a 2 metros ($^{\circ}C$) do (a) CRU, (b) ERA-Interim, (c) Eta-GFDL e (d) Eta-RRTMG, para o mês de Julho de 2008	61
Figura 4.11 - Topografia do domínio menor.....	62
Figura 4.12 - (a) e (b) Domínio menor sobre o continente para as duas versões e (c) série temporal da cobertura média total de Nuvens (%)......	63
Figura 4.13 - Ciclo diurno médio dos fluxos radiativos (W/m^2) das versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG para o mês de Julho de 2008 no domínio menor.....	64
Figura 4.14 - Ciclo diurno médio do saldo radiativo (W/m^2) das duas simulações para o mês de Julho de 2008 no domínio menor.....	66
Figura 4.15 - Ciclo diurno médio da temperatura a 2 metros ($^{\circ}C$) para o mês de Julho no domínio menor	67
Figura 4.16 - Resultados da validação dos dados radiométricos (radiação global) e meteorológicos (temperatura) do ano de 2008 para a estação de Ourinhos/SP.....	68
Figura 4.17 - Ciclo diurno médio de radiação de onda curta incidente à superfície (W/m^2) para a estação de Ourinhos-SP no período de 14 a 19 de julho de 2008	70
Figura 4.18 - Ciclo diurno médio da temperatura a 2 metros ($^{\circ}C$) na estação de Ourinhos-SP para os dados do SONDA com barra de desvio padrão (preto), Eta-GFDL (azul) e Eta-RRTMG (vermelho) no período de 14 a 19 de julho de 2008.....	71

Figura 4.19 - Perfil vertical de temperatura potencial equivalente (K) para as versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG na estação de Ourinhos-SP no período de 14 a 19 de julho de 2008.....	73
Figura 4.20 - Perfil vertical da umidade específica (kg/kg) para as versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG na estação de Ourinhos-SP no período de 14 a 19 de julho de 2008	74
Figura 4.21 - RMSE, BIAS e MAE das duas versões em comparação com dados do GL, dados de Ourinhos e dados do CMSAF, no período de 14 a 19 de julho de 2008	76
Figura 4.22 - Dispersão e correlação da radiação de onda curta incidente à superfície (W/m^2) para (a) Eta-GFDL e SONDA, (b) Eta-RRTMG e SONDA, (c) Eta-GFDL e GL, (d) Eta-RRTMG e GL, (e) Eta-GFDL e CMSAF e (f) Eta-RRTMG e CMSAF no período de 14 a 19 de julho de 2008	77

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Características dos esquemas de radiação	40
Tabela 4.1 - Erros em relação a diferentes conjuntos de observação.....	75

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Pág.

AER	Atmospheric and Environmental Research
AMSU-B	Advanced Microwave Sounding Unit-B
AM&WFG	Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group
ARM	Atmospheric Radiation Measurements
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CGOS	Climate Global Observing System
CMORPH	Climate Prediction Center Morphing Technique
CMSAF	Satellite Application Facility on Climate Monitoring
CRU	Climate Research Unit
CTS	Cool-to-Space
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GL	Modelo de Estimativa de Radiação Global da DSA-CPTEC
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
ECMWF	European Center for Medium-Range Weather Forecasts
HITRAN	High-Resolution Transmission Molecular Absorption Database
LBLRTM	Line-by-Line Radiative Transfer Model
McICA	Monte Carlo Independent Column Approximation
NIR	Near Infrared
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NTP	Normal Temperatura and Pressure
PIFM	Practical Improved Flux Method
RMSE	Root Mean Squared Error
RRTMG	Rapid Radiative Transfer Model
SBDART	Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer
SONDA	Sistema de organização nacional de dados ambientais
SSM/I	Sensor Microwave/Imager
TMI	TRMM Microwave Imager
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UV/PAR	Ultraviolet/Photosynthetically Active Radiation

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Balanço de energia	5
2.2. Parametrização de radiação.....	7
3. DADOS E METODOLOGIA	15
3.1. Dados de observação.....	15
3.1.1. Estimativa de radiação de onda curta à superfície do GL	15
3.1.2. Climate forecast system reanalysis (CFSR).....	16
3.1.3. ERA-Interim reanalysis (ECMWF).....	16
3.1.4. Sistema de organização nacional de dados ambientais (SONDA)	17
3.1.5. Climate Prediction Center Morphing Technique (CMORPH).....	17
3.1.6. Climate Research Unit (CRU).....	18
3.1.7. Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CMSAF)	19
3.2. O modelo Eta	21
3.2.1. Configuração do modelo.....	22
3.2.2. Esquema de radiação do GFDL.....	24
3.2.3. Modelo rápido de transferência radiativa (RRTMG)	33
3.2.4. Comparativo.....	38
3.2.5. Implementação do esquema RRTMG na versão Eta-INPE.....	42
3.2.6. Avaliação objetiva	42
4. RESULTADOS.....	45

4.1. Descrição de caso.....	45
4.2. Campos horizontais	49
4.2.1. Cobertura de nuvens	49
4.2.1.1. Chuva	50
4.2.2. Campos de radiação	52
4.2.2.1. Erro espacial.....	59
4.2.3. Temperatura a 2 metros	61
4.3. Ciclo diurno médio.....	62
4.3.1. Fluxos radiativos	64
4.3.2. Saldo de radiação	65
4.3.3. Temperatura a 2 metros	67
4.4. Avaliação para a estação de Ourinhos.....	68
4.4.1. Radiação de onda curta incidente.....	69
4.4.2. Temperatura a 2 metros	70
4.4.3. Perfis médios	72
4.4.4. Avaliação objetiva	75
5. CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar, energia proveniente do sol em forma de ondas eletromagnéticas, tem uma importância fundamental no cotidiano. Essa energia é responsável por todos os processos químicos, físicos e biológicos no planeta como um todo. Igualmente importante é o papel da atmosfera terrestre na recepção dessa energia fornecida pelo sol, servindo como um filtro regulador de energia radiativa, de forma a amenizar todo poder radiativo do sol e permitir a incidência na superfície de somente o necessário para a manutenção da vida.

Nossa atmosfera é constituída de diferentes gases e aerossóis e cada um deles realiza diferentes funções no equilíbrio radiativo terrestre, e essas funções são os processos atmosféricos que os raios solares sofrem em nossa atmosfera, onde podemos destacar; a “reflexão” ou o albedo da terra e das nuvens; a “absorção”, responsável pelo aquecimento de cada camada atmosférica e da terra e por fim a “transmissão”; neste último caso, pode-se dizer que o que não é refletido e absorvido pela atmosfera, é espalhado de forma direta ou difusa, dependendo da espessura da camada atmosférica e também do ângulo de incidência solar. Além disso, o que é absorvido pela terra também é reemitido de volta para o espaço, refazendo os mesmos processos na atmosfera, de forma inversa, fechando o balanço energético do planeta.

O balanço de energia da atmosfera terrestre é levado em consideração nos cálculos numéricos de modelos atmosféricos. Essencialmente, o aquecimento diferencial da superfície da terra pelo sol, devido à esfericidade do planeta, cria uma variação horizontal de temperatura gerando diferenças de pressão e esse gradiente de pressão conduz às circulações atmosféricas que conhecemos. A superfície da terra absorve principalmente a radiação solar e emite de volta em forma de radiação de onda longa. Nuvens e gases de efeito estufa refletem e absorvem a radiação de onda curta e onda longa incidentes, e emitem radiação de onda longa, tanto para a Terra como para o espaço. Dessa forma, a presença das nuvens garante temperaturas diurnas mais amenas, bloqueando a radiação de onda curta incidente ou temperaturas noturnas mais quentes, aprisionando a radiação terrestre emergente, o conhecido “efeito estufa”.

Um modelo de previsão numérica de tempo é uma ferramenta computacional desenvolvida com a finalidade de simular o comportamento da atmosfera por meio de equações matemáticas baseadas em leis físicas aplicadas à atmosfera com o intuito de prever o estado futuro da atmosfera a partir de condições iniciais observadas, portanto todos esses processos radiativos são relevantes em uma previsão de tempo, pois a forçante determinante na presença e variabilidade dos fenômenos meteorológicos é a radiação solar e sua interação com o planeta.

Os processos radiativos ocorrem em escalas moleculares mas seus efeitos são sentidos em escalas maiores e para que seja possível representar estes processos, os modelos numéricos atmosféricos utilizam-se da inserção de esquemas de parametrização da radiação solar e terrestre para simular esses efeitos. Os esquemas de radiação utilizados na maioria dos modelos atmosféricos globais e regionais servem para parametrizar processos físicos em uma escala menor que a da grade do modelo numérico e funcionam como um tipo de troca: o modelo fornece ao código radiativo informações sobre as características atuais da atmosfera como temperatura, pressão, razão de mistura dos gases constituintes atmosféricos e aerossóis e também características gerais das nuvens e o código se encarrega de, a partir desses dados, devolver ao modelo fluxos de energia na superfície, utilizados pelo modelo no fechamento do balanço de energia, além de taxas de aquecimento ou resfriamento radiativo no interior das várias camadas atmosféricas. Tudo isso deve ser realizado no mais curto espaço de tempo de integração numérica.

Erros sistemáticos associados aos esquemas de radiação são comumente encontrados em modelos numéricos de previsão de tempo e clima, e por esta razão, o aprimoramento dos esquemas de parametrização de radiação pode influenciar diretamente na qualidade das previsões do modelo numérico (HINKELMAN et al., 1999; CHOU et al., 2002).

1.1. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo verificar o desempenho de dois esquemas de radiação em simulações do modelo Eta-INPE sobre a região Sudeste em condições de céu claro e identificar o esquema de radiação que apresenta melhor simulação dos fluxos radiativos e temperatura à superfície.

O presente trabalho tem por objetivos específicos compreender como cada esquema efetua a distribuição dos fluxos de energia radiativa solar e terrestre, à superfície.

O trabalho está organizado da seguinte forma:

Na seção 2, será apresentada a revisão bibliográfica; na seção 3 serão apresentados os dados de observação que se pretende utilizar para validação das simulações, uma breve descrição da versão modelo Eta, uma descrição dos esquemas de radiação a serem utilizados, e a metodologia de avaliação; na seção 4 serão apresentados os resultados e na seção 5 as conclusões e considerações finais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Balanço de Energia

O balanço energético e os cálculos de transferência radiativa são essenciais na busca de uma parametrização da radiação atmosférica mais realista em modelos numéricos. O fluxo vertical de energia na atmosfera é um dos mais importantes processos para os estudos climáticos. Os fluxos radiativos e não radiativos, entre a superfície e a atmosfera são chaves determinantes do clima. A facilidade com que a radiação solar penetra a atmosfera e a dificuldade com que a radiação terrestre é transmitida através da atmosfera determina a intensidade do efeito estufa.

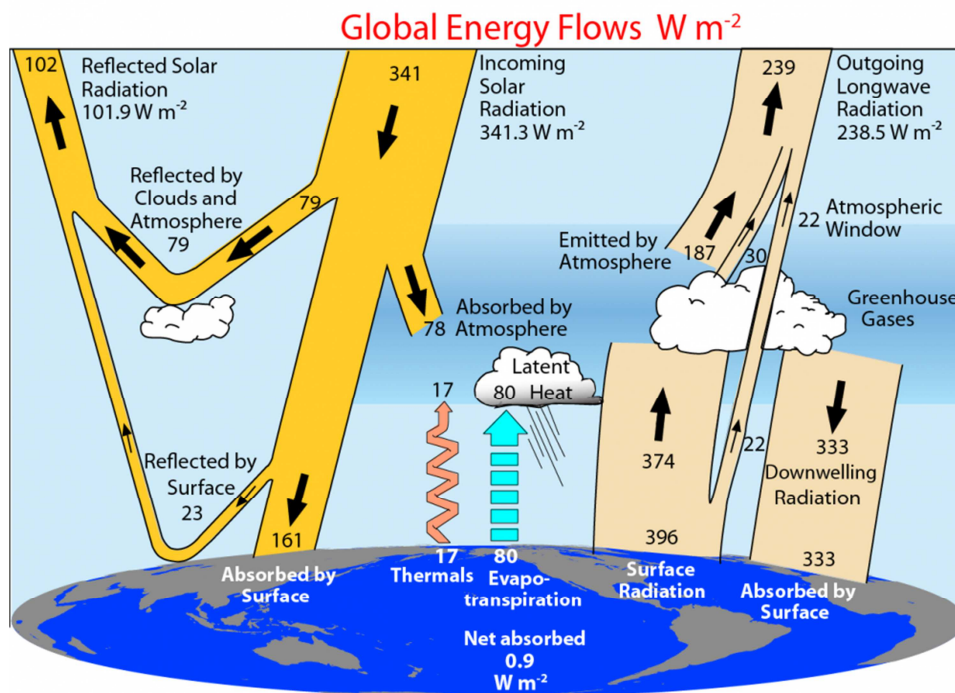


Figura 2.1 - Diagrama do balanço de energia global
Fonte: Trenberth e Fasullo (2011).

A Figura 2.1 mostra que o planeta absorve cerca de $239 W/m^2$ da radiação solar incidente e reflete $102 W/m^2$ dos aproximadamente $341 W/m^2$ da média global da radiação solar disponível no topo da atmosfera. Um total de $161 W/m^2$ da insolação disponível no topo da atmosfera atinge a superfície e é

absorvida por ela. Os 78 W/m^2 da radiação solar absorvidos na estratosfera são devidos principalmente ao ozônio e ao oxigênio molecular, enquanto que o dióxido de carbono e o vapor d'água contribuem muito pouco naquela camada da atmosfera. Do total de radiação solar absorvida na troposfera, parte é atribuída principalmente ao vapor d'água, enquanto que outra parte pequena é atribuída às nuvens. O restante compreende a absorção do dióxido de carbono, ozônio e o oxigênio juntos.

As trocas internas de energia entre a superfície e a atmosfera por fluxos radiativos de onda longa, têm valores maiores do que a insolação no topo da atmosfera e os principais contribuintes para a absorção da radiação devido à onda longa na troposfera são: o vapor d'água, nuvens, dióxido de carbono, ozônio, óxidos nitrosos e metano. Do total de radiação emitida pela superfície, uma parte de aproximadamente 22 W/m^2 passa diretamente para o espaço, pela chamada janela atmosférica de onda longa, sem ser absorvida ou reemitida de volta para a superfície através da atmosfera. Outra parte é absorvida pela troposfera, recebendo energia de fontes radiativas como a absorção de radiação solar e radiação terrestre, e não radiativas como a liberação de calor latente na atmosfera (chuvas) e a transferência de calor sensível proveniente da superfície. O que é absorvido pela troposfera é então reemitido de volta para a superfície, enquanto outra parte é emitida para a estratosfera e para o espaço.

O saldo de radiação na superfície durante o ano é negativo nos polos e positivo nos trópicos. Os valores mais altos de radiação incidente à superfície são de aproximadamente 120 W/m^2 sobre os oceanos subtropicais no hemisfério de verão, onde a grande insolação e albedo relativamente baixos contribuem para a grande absorção de radiação solar, enquanto que as maiores perdas de energia ocorrem nos polos nos hemisférios de inverno, onde a radiação de onda longa não é compensada pela absorção solar (HARTMANN, 1994).

2.2. Parametrização de Radiação

Em modelagem numérica, as parametrizações de radiação têm a intenção de fornecer os fluxos radiativos em qualquer lugar do globo terrestre. Esses cálculos são utilizados tanto para o fornecimento de fluxos radiativos necessários para o balanço energético em superfície, como para o fornecimento da divergência vertical do fluxo radiativo, necessária para calcular as taxas de aquecimento e resfriamento de um volume atmosférico. O desafio da parametrização de radiação está em encontrar caminhos para calcular as densidades de fluxo radiativo, incidente e emergente, presentes no cálculo da taxa de aquecimento para uma camada atmosférica, de forma eficiente e precisa. Problemas numéricos atribuídos a esquemas de radiação são comuns em vários modelos de tempo e clima, gerando a necessidade de ajustes na parametrização ou a inserção de novos esquemas.

Os esquemas de radiação utilizados por modelos atmosféricos fazem uma divisão entre as bandas espectrais provenientes da radiação solar, chamada de radiação de onda curta, com todos os comprimentos de onda abaixo de aproximadamente 4 micrômetros e as bandas espectrais provenientes da radiação terrestre, chamada de radiação de onda longa, abrangendo todos os comprimentos de onda acima de 4 micrômetros. A maior parte dos modelos numéricos utilizam dois esquemas de radiação separados, um para ondas curtas e outro para radiação de onda longa. No entanto, os esquemas de cada modelo diferem em sua simulação dos fluxos de radiação de onda curta e onda longa incidente e emergente. Os esquemas de radiação de ondas curtas e ondas longas em geral, devem principalmente, simular a absorção de radiação pelo vapor de água, ozônio, dióxido de carbono, nuvens e pela superfície da Terra, considerando também, a reflexão da radiação por nuvens e pela superfície terrestre. Esquemas de radiação mais modernos incluem adicionalmente, a absorção de radiação por outros tipos de gases, o espalhamento e a absorção da radiação por aerossóis e a reemissão de radiação de onda longa pelo ozônio.

George e Begum (1997) propuseram um experimento para avaliar o impacto de dois esquemas de parametrização de radiação (NASA/Goddard e GFDL) no

modelo de circulação geral T80 do National Centre for Medium Range Weather Forecasting (NCMWF), em uma simulação da fase inicial das monções de verão na Índia. De acordo com George e Begum (1997) a simulação, utilizando o esquema da NASA/Goddard, produziu um balanço à superfície mais razoável entre os fluxos radiativos incidentes e emergentes em comparação com o esquema do GFDL. A inclusão do espalhamento por nuvem e, conseqüentemente, o tratamento separado da radiação difusa e direta no esquema da NASA/Goddard, resultou em mudanças no saldo de fluxo de radiação por ondas curtas na superfície, influenciando diretamente na temperatura à superfície. Os resultados indicaram a alta sensibilidade da temperatura à superfície na simulação da fase inicial das monções. A maior absorção de radiação de ondas curtas apresentada pelo esquema da NASA resultou em temperaturas superficiais mais altas, gerando altas taxas de evaporação e precipitação.

Segundo George e Begum (1997), ambos os esquemas mostraram-se capazes de produzir bons resultados nas previsões de médio prazo. Os dois esquemas simularam razoavelmente os padrões médios do escoamento de verão. O experimento com o esquema da NASA/Goddard obteve menores erros de previsão na alta troposfera em todas as regiões, em comparação ao esquema do GFDL. De acordo com George e Begum (1997), baseado nos experimentos realizados com o modelo T80, as diferenças nos erros de previsão entre os dois esquemas de radiação, na baixa e alta troposfera, revelam a importância da utilização de um esquema de radiação mais eficiente em previsões de médio e longo prazo.

Iacono et al. (2000) efetuaram comparações entre dois esquemas de radiação de onda longa no modelo climático do NCAR (Community Climate Model - CCM3), para duas simulações em um período de 10 anos, com temperaturas da superfície do mar observadas variando mensalmente para o período entre 1979 e 1988. O objetivo das simulações foi a verificação, no modelo CCM3 da NCAR, dos efeitos da introdução de um novo esquema de radiação devido às ondas longas no balanço energético e nas propriedades termodinâmicas.

Segundo Iacono et al. (2000), a troca do esquema de radiação de onda longa original, intitulado CCM3_LW pelo novo esquema RRTMG, resultou na melhor absorção pelo “continuum” de vapor d’água proporcionada pelo novo esquema de onda longa.

Segundo Iacono et al. (2000), o RRTMG inclui um “continuum” adicional (“foreign continuum”) na importante banda rotacional do H₂O entre 200 e 600 cm⁻¹ e seu modelo de “continuum” de vapor d’água produz um significativo aumento da absorção de onda longa comparado ao tratamento utilizado pelo esquema original. No caso de uma atmosfera de verão para as latitudes médias, essa absorção adicional da banda rotacional do H₂O acontece entre a média e a alta troposfera.

Com a implementação do novo esquema de ondas longas no modelo CCM3, a radiação devido à onda longa emergente para céu claro foi reduzida em cerca de 5 W/m² na média global e 12 W/m² nos trópicos, enquanto para céu encoberto, a radiação devido onda longa emergente foi reduzida em 3 W/m², com maiores mudanças regionais nas baixas e médias latitudes. Na superfície, o saldo de fluxo radiativo foi reduzido em 20 W/m² nas altas latitudes e em outras áreas secas ou elevadas. A mudança do saldo de fluxo radiativo é devida principalmente à melhoria no fluxo incidente na superfície, que aquece a superfície para produzir pequenos aumentos no fluxo emergente emitido pela superfície.

A forte absorção do modelo de “continuum” de vapor d’água utilizado pelo RRTMG reduziu a radiação emergente devida à onda longa e aumentou o fluxo incidente de onda longa na superfície de áreas secas, aumentando a temperatura na superfície, principalmente em regiões de latitudes altas. Segundo Iacono et al. (2000), essas mudanças modificaram a temperatura atmosférica, resultando em retroalimentações dinâmicas que alteraram a umidade e a cobertura de nuvens.

De acordo com Iacono et al. (2000), um esquema mais preciso e rápido de transferência radiativa, aliado a um modelo mais evoluído de “continuum” de

vapor d'água podem causar um impacto significativo nas propriedades dinâmicas de modelos de circulação geral que utilizam métodos de “continuum” de vapor d'água desatualizados.

Desde 27 de Junho de 2000, um novo esquema de onda longa tornou-se operacional no modelo atmosférico do ECMWF. Integrações de 10 dias de previsão foram considerados sobre o período entre 1 e 15 de Abril de 1999, quando o impacto de uma melhor representação da radiação de onda longa pôde ser obtida. Segundo Morcrette et al. (2001,2008), a substituição do esquema original de radiação de onda longa pelo RRTMG, permitiu melhoras na descrição espectral de propriedades radiativas na superfície e nas nuvens devido ao aumento de 6 para 16 bandas espectrais. Além disso, notou-se melhora nas correlações de anomalias particularmente no hemisfério sul. O RRTMG permitiu a representação tanto de fração de nuvem verdadeira, como de emissividades e transmissividades espectrais definidas para cada uma das suas 16 bandas espectrais.

Apesar do esquema original de ondas longas ter sido validado por modelos linha-a-linha e ter passado por algumas atualizações nos coeficientes de absorção, seguindo a disponibilidade de novas versões de base de dados de parâmetros espectroscópicos como o HITRAN'92 (ROTHMAN et al., 1992), algumas das características do esquema original tornaram-se obsoletas, particularmente sua parametrização da absorção do “continuum” de vapor d'água.

Mocrette et al. (2001) verificaram que a maior diferença simulada entre o esquema de radiação de onda longa original e o novo esquema RRTMG, estava no decréscimo da intensidade do máximo resfriamento que o novo esquema forneceu para as taxas de resfriamento de céu claro para o intervalo entre os níveis de 200 e 500 hPa, e um acréscimo da taxa de resfriamento de céu claro para o intervalo entre 600 e 900 hPa. O novo esquema tornou-se mais rápido computacionalmente do que o esquema original e mostrou um impacto positivo significativo nos fluxos radiativos na superfície e na temperatura da estratosfera.

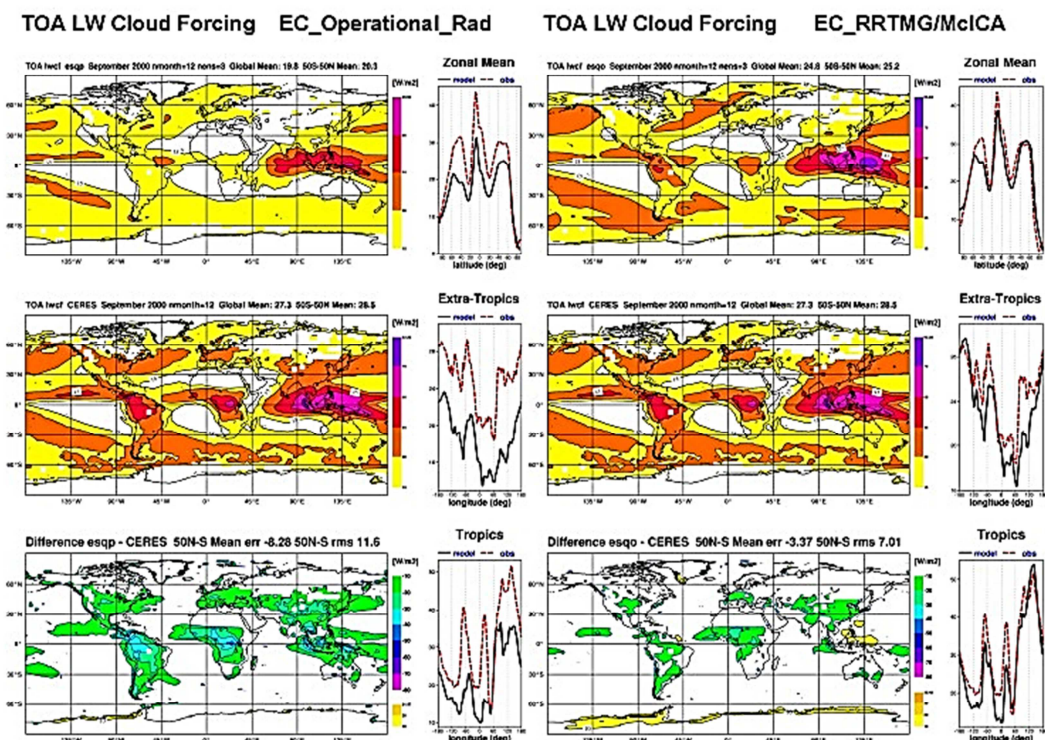


Figura 2.2 - Diferença do balanço radiativo devido onda longa no topo da atmosfera em um experimento realizado pelo modelo global do centro europeu ECMWF, sem e com a utilização do modelo rápido de transferência radiativa RRTMG implementado (Morcrette et al., 2008).

Atualmente, vários modelos de circulação geral utilizam a inserção do RRTMG em seu código. Na figura 2.2 vemos a diferença do balanço radiativo devido onda longa entre o céu com nuvem e sem nuvem (“Cloud Forcing”) no topo da atmosfera, com o fluxo variando entre 15 e 65,53 W/m², em um experimento realizado pelo centro europeu (ECMWF) com um período de integração de 13 meses entre agosto de 2000 e setembro de 2001, sem e com a inserção do RRTMG. Podemos verificar claramente que o experimento da segunda coluna, utilizando o RRTMG, obteve uma melhor concordância com a observação do CERES (segunda linha de figuras acima).

Em simulações com o modelo Eta (HINKELMAN et al., 1999; CHOU et al., 2002) utilizando o esquema de radiação do GFDL, comparações dos fluxos de radiação solar na superfície e os dados observados, mostram que o modelo sistematicamente superestima estes fluxos. O esquema do GFDL utiliza a

parametrização de ondas curtas de Lacis e Hansen (1974) e de ondas longas de Fels e Schwarzkopf (1975). Segundo Tarasova et al. (2006), o esquema de radiação de ondas curtas desenvolvido por Lacis e Hansen, não leva em consideração as linhas de absorção do O₂, CO₂ e do “continuum” de vapor d’água, além de utilizar a função de absorção do vapor d’água de Yamamoto (1962), características que causam uma diminuição da absorção de radiação solar como um todo na atmosfera, permitindo um fluxo bem maior de radiação incidente na superfície.

No intuito de verificar uma simulação da radiação solar incidente na superfície, Tarasova et al. (2006) integraram duas versões de testes climáticos do modelo Eta com distintos esquemas de radiação para o mês de janeiro de 2003, utilizando dados de reanálise do NCEP-DOE como condição inicial e condição de contorno. Os campos de saída foram comparados entre os dois testes e com dados observados. O novo esquema de radiação, denominado CLIRAD_SW (CHOU e SUAREZ, 1999), inclui os efeitos de absorção do oxigênio, do “continuum” de vapor d’água e o espalhamento de partículas, que não são considerados pelo esquema do GFDL. Foi constatado que a radiação solar incidente na superfície fornecida pelo experimento com o novo esquema de radiação obteve maior concordância com dados de satélite.

Em experimento realizado com o modelo SKIRON/Dust (KALLOS et al., 1997, 2006), para um domínio amplo sobre o Mediterrâneo, mostrou que o modelo apresenta uma superestimativa de temperatura do ar durante o dia. Este erro pode ser possivelmente atribuído ao esquema de radiação desenvolvido pelo *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL). O modelo SKIRON/Dust é baseado no modelo Eta/NCEP (MESINGER, 1984; MESINGER et al., 1988,2012; JANJIC, 1990,1994; BLACK, 1994). O esquema de radiação do GFDL não considera os efeitos de poeira suspensa sobre a radiação solar incidente na superfície, resultando em aumento da temperatura à superfície que indica a necessidade do uso de um esquema de transferência radiativa que inclua mais processos atmosféricos.

Spyrou et al. (2013) realizaram uma série de testes com o modelo SKIRON/Dust, utilizando um novo modelo rápido de transferência radiativa (RRTMG), para verificar e quantificar os efeitos de partículas de poeira desértica no balanço de radiação na atmosfera. O modelo foi integrado para um período de 6 anos (2002-2007) sobre uma área extensa cobrindo o continente Europeu, o mar Mediterrâneo e o norte da África, assim como boa parte do Oriente Médio. Foram realizados dois conjuntos de experimentos com o esquema RRTMG. O primeiro experimento desconsiderava os efeitos de poeira suspensa na atmosfera e o segundo experimento considerava esses efeitos. Notou-se que as diferenças sazonais no fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície entre os dois experimentos foram negativas durante todas as estações do ano, principalmente durante a primavera quente e períodos de verão, quando as diferenças eram de cerca de -70 W/m^2 sobre a extensa área do deserto de Chad na África (grande fonte de poeira). Por outro lado, durante os períodos frios da Europa e do Mediterrâneo, as diferenças do fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície entre os dois experimentos foram mínimas, por não haver um transporte de poeira significativo.

De acordo com Spyrou et al. (2013), com a inclusão de partículas em suspensão, como a poeira desértica, foi atenuada a energia radiativa incidindo na superfície. Ao mesmo tempo, houve um aumento da absorção atmosférica em todo o domínio de simulação, devido à absorção por parte das partículas de poeira, tanto da radiação solar incidente como de parte da radiação de onda longa emitida pela superfície durante a noite. A inserção do novo esquema permitiu ao modelo SKIRON/Dust o estudo dos efeitos de partículas de poeira desértica no balanço radiativo atmosférico. No RRTMG, a absorção e emissão a partir de aerossóis e nuvens são incluídas na rotina de onda longa, e o tratamento para ondas curtas inclui a extinção (absorção + espalhamento) a partir dos aerossóis. No esquema, os efeitos radiativos dos aerossóis são tratados através da especificação de suas propriedades ópticas dentro de cada intervalo espectral. Os resultados mostram uma forte interação entre as

partículas de poeira e a radiação solar e terrestre, com implicações no balanço energético da atmosfera.

3. DADOS E METODOLOGIA

Nesta seção serão descritas as principais ferramentas para a realização do trabalho. Para uma avaliação das versões serão utilizados dados observacionais estimados por satélite, reanálises de diferentes fontes e em diferentes resoluções espaciais, além de dados de estação meteorológica. Será apresentada uma breve descrição do modelo Eta e a configuração utilizada, procedido de uma descrição dos esquemas de radiação utilizados e suas diferenças em comum. Por fim, serão apresentadas validações das simulações a partir de avaliações objetivas estatísticas como erro médio, erro médio quadrático, desvio padrão e correlação espacial.

3.1. Dados de Observação

Serão apresentados nesta seção, os dados observacionais para avaliações subjetivas e objetivas das simulações.

3.1.1. Estimativa de radiação de onda curta à superfície do GL

Os dados de radiação de onda curta estimada por satélite com o modelo GL (radiação **GL**obal), desenvolvido no CPTEC, roda operacionalmente e estima irradiância sobre América do Sul a partir de imagens GOES (sensor Imager) (CEBALLOS et al., 2012). Diariamente são gerados arquivos de radiação para cada imagem recebida, assim como para sua integral (irradiação) diária. Retrospectivamente, o acervo de imagens GOES no CPTEC se estende até 1996 (CEBALLOS E BOTTINO, 2007; BOTTINO e VILLAS BOAS, 2006).

A área de cobertura adotada para GOES se estende desde 100°W até 28°W, e desde 50°S até 22°N. Os arquivos horários têm resolução espacial de 0,04°, o que equivale a aproximadamente 4 km de espaçamento de grade, definindo matrizes de 1800 × 1800 pontos de grade. A área e resolução apresentaram

algumas variações ao longo do tempo, dependendo do satélite GOES e do sistema de ingestão utilizado.

3.1.2. Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)

Foram utilizados dados do conjunto de reanálises *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) obtidos pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) (SAHA et al., 2010), para o período do mês de julho de 2008. A resolução espacial dos dados é de 0,3° o que equivale a aproximadamente 38 km de espaçamento de grade, cobrindo todo o globo terrestre. A frequência temporal é de 6 em 6 horas, disponibilizados nos horários sinóticos de 00, 06, 12 e 18Z.

3.1.3. ERA-Interim Reanalysis (ECMWF)

ERA-Interim é uma reanálise global atmosférica que foi originalmente planejada como uma reanálise 'interim', preparada como uma geração posterior estendida para substituir a reanálise do ERA-40. ERA-Interim usa uma versão do modelo de previsão Integrado do ECMWF (IFS Cy31r2) de Dezembro de 2006 (BERRISFORD et al., 2011). Os dados cobriam originalmente datas a partir de 01 de janeiro de 1989, entretanto posteriormente foi adicionada uma década, cobrindo, desde então, a partir de 1 janeiro de 1979.

A reanálise do ERA-Interim vem sendo constantemente atualizada em tempo real. A resolução espectral é T255 (cerca de 80 km) e utiliza 60 níveis verticais, com o topo do modelo em 0.1 hPa (cerca de 64 km). A assimilação de dados é baseada em uma análise variacional quadridimensional de 12 em 12 horas (4D-Var) com estimativa adaptativa de vieses em dados de radiância de satélite (VarBC). Com algumas exceções, o ERA-Interim usa observações de entrada preparadas para o ERA-40 desde 2002, utilizando posteriormente dados de arquivos operacionais do modelo do ECMWF. Para este trabalho foram

utilizados dados de temperatura a 2 metros com frequência temporal de 6 em 6 horas, disponibilizados nos horários sinóticos de 00, 06, 12 e 18Z.

3.1.4. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA)

O projeto SONDA tem como principal objetivo implementar uma infraestrutura física e de recursos humanos destinada à montagem e melhoramento da base de dados de superfície necessária ao levantamento dos recursos de energia solar e eólica no Brasil e consequente planejamento de seu uso (MARTINS et al., 2005).

A rede SONDA de dados, antes de disponibilizar os dados de suas estações, submete-os a um processo de validação que objetiva identificar os dados suspeitos. Através desse processo é possível não só garantir a confiabilidade dos dados, mas também acionar a equipe de engenheiros responsável pela manutenção dos equipamentos, muitos localizados em regiões remotas. Os relatórios de controle de qualidade poderão ainda ser utilizados pelos cientistas da equipe envolvida como base para futuros aprimoramentos das estações.

O processo de validação dos dados obtidos pelas estações SONDA baseia-se na estratégia de controle de qualidade de dados adotada pela *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN).

Para este trabalho serão utilizados dados de radiação global horizontal e temperatura do ar (superfície) do projeto SONDA para a estação de Ourinhos/SP.

3.1.5. Climate Prediction Center Morphing Technique (CMORPH)

CMORPH (CPC MORPHing technique) produz análises de precipitação global em altíssima resolução espacial e temporal, com resolução espacial de $0,07277^\circ$ ou aproximadamente 8 km de espaçamento de grade sobre o

equador e frequência temporal de 30 em 30 minutos. O domínio dos dados abrange a faixa global entre 60° N e 60° S, desde 3 de Dezembro de 2002 até os dias atuais (JOYCE et al., 2004).

Esta técnica utiliza estimativas de precipitação derivadas exclusivamente a partir de observações de micro-ondas via satélite de órbita baixa, e cujas características são transportadas através de informações de propagação espacial que são obtidas inteiramente a partir de dados Infravermelhos de satélite geoestacionário. Atualmente foram incorporadas estimativas de precipitação derivadas de micro-ondas passivas a bordo do DMSP 13, 14 e 15 (SSM/I), o NOAA-15, 16, 17 e 18 (AMSU-B), e AMSR-E e TMI a bordo do Aqua da NASA e naves espaciais TRMM, respectivamente. Estas estimativas são geradas por algoritmos de Ferraro (1997) para o SSM/I, Ferraro et al. (2000) para AMSU-B e Kummerow et al. (2001) para TMI. Esta técnica não é um algoritmo de estimativa de precipitação, mas um meio pelo qual as estimativas geradas a partir de algoritmos de precipitação de micro-ondas existentes podem ser combinadas. Consequentemente, este método é extremamente flexível de modo que quaisquer estimativas de precipitação a partir de qualquer fonte de satélite micro-ondas podem ser incorporadas.

Em relação à resolução espacial, embora as estimativas de precipitação estejam disponíveis em uma grade com um espaçamento de 8 km (no equador), a resolução das estimativas derivadas de satélite individuais é menor, na ordem de 12 x 15 km.

3.1.6. Climate Research Unit (CRU)

O conjunto de dados de séries temporais (TS) são variações climáticas mensais cobrindo o último século ou como os dados produzidos pela Unidade de Pesquisa Climática (CRU) da Universidade de *East Anglia*. Os dados são calculados em alta resolução (0.5x0.5 graus) com espaçamento de grade de aproximadamente 50 km, que são baseados em um arquivo de temperaturas

médias mensais fornecidas por mais de 4000 estações meteorológicas distribuídas em todo o mundo. Os dados permitem variações no clima para estudo, e inclusão de variáveis como cobertura de nuvens, faixa de temperatura diurna, frequência de dias com geada, precipitação, temperatura média diária, média mensal de temperatura máxima diária, pressão de vapor, evapotranspiração potencial e frequência de dias úmidos (JONES et al., 2013).

Atualmente, o Centro Britânico de Dados atmosféricos (BADC) mantém os dados mais recentes da série Temporal gerados pela CRU para o período de 1901-2013 que estão disponíveis como dados CRU TS 3,22. O BADC também detém os conjuntos de dados preliminares CRU TS3.00 para o período de 1901-2006, bem como a subsequente CRU TS 3,10, CRU TS 3,20 e CRU TS 3,21, conjuntos de dados para os períodos de 1901-2009, 1901-2011 e 1901-2012, respectivamente.

Os dados “CRU TS” são campos em grades mensais com base em valores diários, conseqüentemente os arquivos do tipo ASCII e NETCDF ambos contêm valores médios mensais para os vários parâmetros.

3.1.7. Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CMSAF)

A facilidade de aplicação por satélite no Monitoramento do Clima (CMSAF) tem por objetivo o fornecimento de dados de parâmetros geofísicos derivados de satélite adequados para o monitoramento do clima. CMSAF fornece climatologias para as “variáveis climáticas fundamentais” (ECV), conforme exigido pelo plano de implementação do *Climate Global Observing System* (CGOS) com apoio da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC). Vários parâmetros de nuvem, albedo de superfície, fluxos de radiação na parte superior da atmosfera e à superfície, bem como produtos de temperatura e humidade atmosférica formam uma base sólida para a monitorização da atmosfera ambiente. Os produtos são classificados em conjuntos de dados de monitoramento obtidos em tempo quase real e conjunto

de dados com base em radiâncias cuidadosamente Intercalibradas. Os produtos CMSAF são derivadas de vários instrumentos a bordo de satélites operacionais em órbita geoestacionária e polar, ou seja, os satélites Meteosat e NOAA, respectivamente (KARLSSON et al., 2012).

Os conjuntos de dados existentes permanecerão utilizando os dados de instrumentos a bordo do novo satélite Operacional EUMETSAT de Meteorologia (MetOP). Os produtos têm sido validados principalmente através de vários conjuntos de dados baseados em terra, tanto locais (*in situ*) como de sensoriamento remoto. A precisão empregada para os produtos derivados em tempo quase real é suficiente para monitorar a variabilidade em escalas diurnas e sazonais. Produtos baseados em dados de radiância intercalibrada também podem ser usados para análise da variabilidade climática até escala interanual. A meta principal do segundo Desenvolvimento Contínuo da CMSAF, recentemente iniciado em 2012 com fase de operações até 2017, é melhorar ainda mais todos os conjuntos de dados CMSAF a um nível de qualidade que permita estudos de variabilidade interanual.

Para este trabalho foram utilizados dados horários de radiação de onda curta incidente à superfície e cobertura total de nuvens do conjunto de dados estimados pelo satélite METEOSAT (MSG/Seviri), disponíveis de 1983 a 2013, com projeção do disco completo, cobrindo uma região de $\pm 65^\circ$ de latitude e $\pm 65^\circ$ de longitude e com resolução espacial de $0,03^\circ$, aproximadamente 5 km (POSSELT et al., 2011). Também foram utilizados dados de média mensal de albedo, fluxo de onda longa incidente e emergente do conjunto de dados climáticos estimados por satélite de órbita polar, com período de 1982 a 2009, em grade global regular de latitude-longitude com resolução espacial de aproximadamente 25 km.

3.2. O Modelo Eta

Neste trabalho será utilizado o modelo de área limitada Eta que foi desenvolvido na Universidade de Belgrado em parceria com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia e se tornou operacional no *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) em 1993 (MESINGER et al., 2012; BLACK, 1994). Este modelo foi instalado no CPTEC em 1996 (CHOU et al., 1996), com a finalidade de complementar a previsão numérica de tempo que é realizada desde o início de 1995 com o modelo de circulação geral atmosférica (MCGA).

O modelo Eta trata os processos físicos de subgrade através de esquemas de parametrizações, como a maioria dos modelos de previsão numérica de tempo. Ele resolve as misturas turbulentas na atmosfera através do esquema de Mellor-Yamada (MELLOR e YAMADA, 1982) no nível de fechamento 2.5, em que a energia cinética turbulenta é prevista. As trocas de energia à superfície se baseiam na teoria de similaridade de Monin-Obukhov e utilizam as funções de estabilidade de Paulson (PAULSON, 1970). O tratamento dos fluxos radiativos na atmosfera foi desenvolvido pelo *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL), onde a radiação de onda curta se baseia no esquema de Lacis e Hansen (1974) e a radiação de onda longa se baseia no esquema de Fels e Schwarzkopf (1975). As taxas de aquecimento ou resfriamento devido aos processos radiativos são recalculadas a cada hora de integração numérica. A hidrologia do modelo é representada pelo esquema NOAH (EK et al., 2003). O esquema possui 4 camadas no solo e utiliza 9 tipos de solo, e a cobertura vegetal difere em 12 tipos. A parte da chuva e das nuvens estratiformes são representadas pelo esquema de microfísica de nuvens de Ferrier et al. (2002) que trata de diferentes tipos de hidrometeoros. A precipitação convectiva é tratada pelo esquema de Betts-Miller (1986), modificada por Janjic (1994).

As variáveis prognósticas do modelo são: temperatura do ar, umidade específica, componente zonal e meridional do vento, pressão à superfície, energia cinética turbulenta, umidade e temperatura do solo e água líquida ou gelo das nuvens.

3.2.1. Configuração do Modelo

As duas versões (Eta-GFDL e Eta-RRTMG) foram rodadas no supercomputador do CPTEC/INPE. Ambas versões foram executadas com 100 processadores, 159 pontos de grade no eixo x e 201 pontos de grade no eixo y, 50 níveis verticais e com resolução espacial de 10 km. Além disso, as rodadas foram contínuas e realizadas com frequência de saída de hora em hora, com um *spin-up* partindo das 00Z do dia 29 de Junho de 2008 e finalizando às 00Z do dia 05 de Agosto de 2008 do calendário normal de 365 dias.

Foi utilizada em ambas as versões uma redução de 3% no valor da constante solar para considerar implicitamente os efeitos dos aerossóis. Apesar do esquema de radiação RRTMG ter em seu código uma parametrização dos efeitos de aerossóis, essa parametrização foi desabilitada tanto na rotina de onda curta como na rotina de onda longa, para efeito de comparação. Em ambas as simulações a radiação de onda curta e onda longa são chamadas a cada hora.

A versão do modelo Eta com o pacote de radiação do GFDL mantém as características utilizadas na versão operacional (MESINGER et al., 2012). O esquema conta com uma rotina de parametrização de radiação de onda curta de Lacis e Hansen (1974), e de onda longa de Fels e Schwarzkopf (1975) e tem como principais contribuintes atmosféricos, o vapor d'água, o ozônio e o gás carbônico. No caso da versão com RRTMG, o esquema de banda larga desenvolvido pela AER, também utiliza duas rotinas separadas, uma para radiação de onda curta com 14 bandas espectrais e outra para radiação de onda longa com 16 bandas. Além disso, a versão Eta-RRTMG foi realizada com algumas características particulares como a sobreposição máxima de nuvens, o tratamento separado da água líquida e gelo de nuvem, propriedades ópticas de gelo de nuvem de Fu (1996), e propriedades ópticas de água líquida de Hu e Stamnes (1993). Foi utilizada também uma parametrização do raio efetivo das partículas de água líquida baseada nos cálculos do CAM3 (Collins et al., 2004), e raio efetivo do gelo de nuvem de acordo com o SBDART (RICHIAZZI et al., 1998).

O domínio cobre a região sudeste do Brasil entre 26° e 13,5° S e 55° e 36° W, para uma resolução espacial de 10 km (Figura 3.1). As duas versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG foram integradas com frequência temporal de hora em hora com um passo de tempo de aproximadamente 20 segundos, em simulações contínuas de 30 dias de inverno com predomínio de céu claro, de forma a não incluir processos radiativos em nuvens.

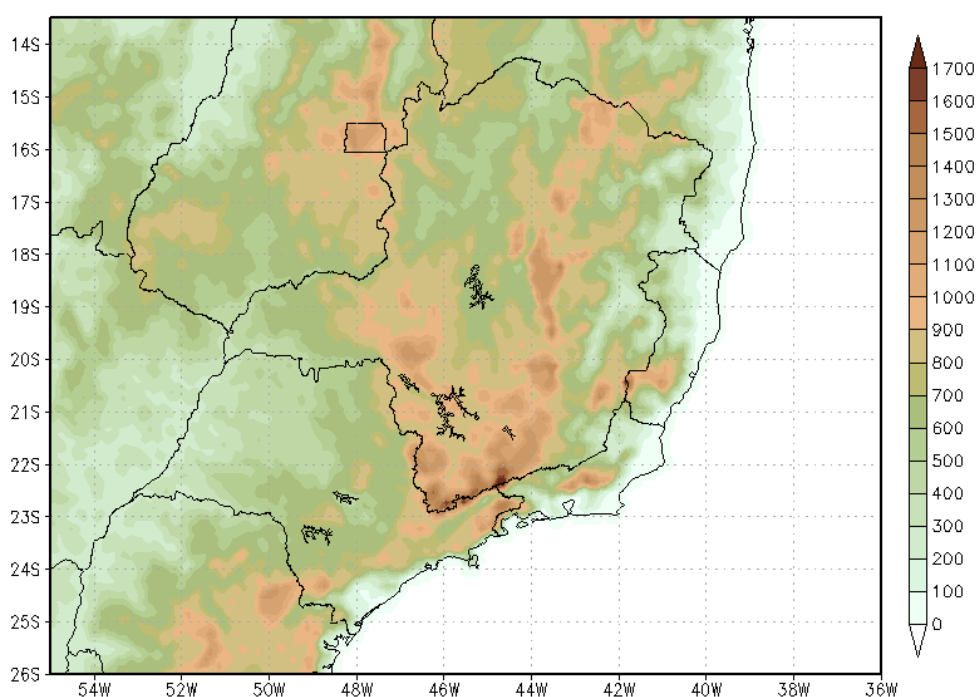


Figura 3.1 - Domínio e topografia (m) utilizada nas simulações propostas do modelo Eta.

Foram comparados os fluxos radiativos na superfície das duas versões para todo mês de julho de 2008 em todo o domínio. Dados de cobertura total de nuvem da reanálise do CFSR e do CMSAF, precipitação total do CMORPH, dados de temperatura a 2 metros da reanálise do CRU e ERA-Interim, dados de fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície do CMSAF e albedo, fluxo de onda longa incidente e emergente e dados de irradiância a superfície

estimada por satélite produzida pelo modelo GL. Espera-se identificar o esquema de radiação com melhor desempenho na simulação dos fluxos de calor à superfície e da radiação solar incidente.

As condições iniciais e de contorno lateral, necessárias para integração do modelo, foram obtidas do conjunto de Reanálises CFSR (Saha et al., 2010). As condições de contorno lateral foram atualizadas a cada 6 horas. As simulações foram interpoladas verticalmente para as superfícies Eta e horizontalmente para a grade e foram geradas com saídas horárias para um período de 30 dias. Como condição de contorno inferior foi utilizada a temperatura da superfície do mar (TSM) com resolução espacial de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ lat. x lon., mantida constante durante toda a integração. A umidade do solo foi obtida da climatologia sazonal. Foi utilizado o mapa da topografia original com resolução de 90 m gerado pelo *United States Geological Survey* (USGS), para gerar a topografia do modelo.

A seguir, será apresentada descrição dos esquemas de radiação que serão utilizados neste trabalho.

3.2.2. Esquema de radiação do GFDL

O esquema de radiação desenvolvido pela *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* – GFDL, conta com parametrização de radiação de ondas curtas de Lacis e Hansen (1974), e radiação de ondas longas de Fels e Schwarzkopf (1975).

O esquema de radiação de ondas curtas, apesar de utilizar o método de tratamento paramétrico, tem fórmulas e coeficientes baseados em cálculos precisos de múltiplos espalhamentos, com a finalidade de calcular rapidamente a quantidade de energia solar absorvida pela atmosfera e superfície terrestre. Originalmente foi testado no modelo global atmosférico do *Goddard Institute for Space Studies* (GISS). As parametrizações realizadas no esquema de radiação de onda curta do GFDL permitem que as concentrações e distribuições dos

principais espalhadores e absorvedores de radiação solar sejam consideradas como variáveis, possibilitando a investigação dos efeitos de possíveis mudanças na composição atmosférica, incluindo retroalimentação pela dinâmica atmosférica.

A parametrização de radiação no esquema de onda curta do GFDL é função da distribuição do vapor d'água, quantidade e tipo de nuvens, ângulo zenital do sol, albedo da superfície terrestre e distribuição do ozônio. Os cálculos incluem parametrizações para os principais processos de absorção na estratosfera, na troposfera e na superfície da terra. A Figura 3.2 mostra as bandas de absorção no espectro de onda curta onde na troposfera, o principal absorvedor é o vapor d'água (H_2O), que aquece cada camada atmosférica, absorvendo na faixa do infravermelho próximo, na região entre aproximadamente 0,7 e 4 microns; na estratosfera, o ozônio (O_3) é o principal absorvedor gasoso e sua absorção é mais efetiva na região do ultravioleta com comprimentos de onda mais curtos abaixo de aproximadamente 0,35 microns, como também na faixa do visível entre 0,5 e 0,7 microns aproximadamente.

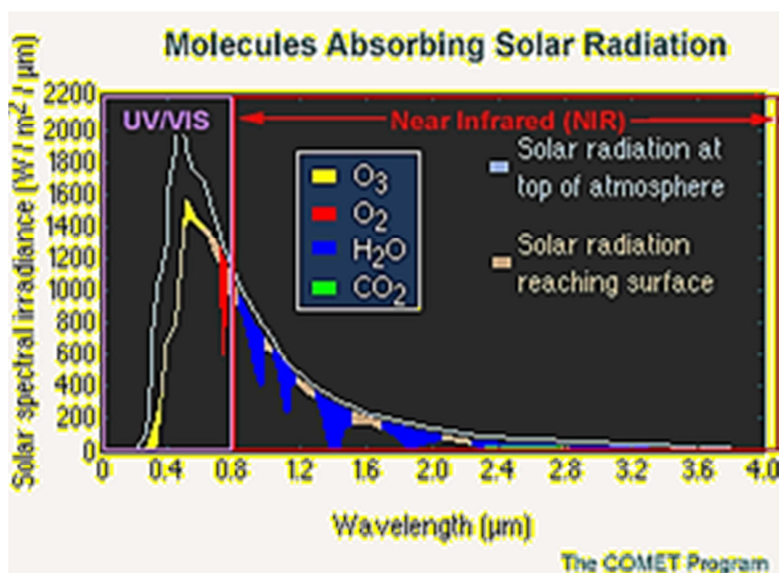


Figura 3.2 - Constituintes absorvedores de radiação solar, as caixas representam a média feita sobre o espectro de radiação solar incidente (Campana e Hou, 2005).

As equações são baseadas em parte em cálculos precisos de múltiplo espalhamento e os cálculos para a radiação solar são realizados em camadas plano-paralelas do modelo, onde as propriedades de espalhamento monocromático de cada camada homogênea são determinadas por sua espessura óptica, o albedo para espalhamento simples e a função de fase.

No esquema, o solo é “adicionado” à atmosfera como sendo uma camada adicional com transmissividade nula e uma função de reflexão do solo na falta da atmosfera. Nos casos em que o solo se comporta como uma superfície lambertiana (reflete energia incidente em todas as direções) o " R_g " (albedo no solo) torna-se uma constante com valor entre 0 e 1.

No esquema de ondas curtas do GFDL, a absorção pelo ozônio pode ser parametrizada de forma precisa, devido à absorção mais significativa ocorrer na alta atmosfera, onde há pouco espalhamento. A maior parte do espalhamento por moléculas de ar (espalhamento Rayleigh) acontece abaixo da camada de ozônio. Portanto, a camada atmosférica mais baixa age principalmente como uma camada refletora.

A parametrização da absorção da radiação solar pelo ozônio, responsável pelo aquecimento da estratosfera, tem uma variação de absorção diferente, dependendo da banda espectral. A absorção do fluxo de radiação solar incidente pelo ozônio na banda fraca do visível " A_{oz}^{vis} " (banda de Chappuis, entre aproximadamente 0,375 e 0,65 microns) é expressa analiticamente por:

$$A_{oz}^{vis}(x) = \frac{0,02118x}{1 + 0,042x + 0,000323x^2} \quad (3.1)$$

Onde “ x ” é a quantidade de ozônio em condições normais de temperatura e pressão normais, expressa em centímetros. Uma quantidade de ozônio típica em uma coluna vertical da atmosfera é 0.5 cm. Em condições normais de

temperatura e pressão, com o aumento do ângulo zenital, o feixe solar incide em uma quantidade maior de ozônio. A absorção pelo ozônio com um ajuste mais complexo do fluxo de radiação solar incidente, para a banda do ultravioleta A_{oz}^{uv} é dada pela expressão:

$$A_{oz}^{uv}(x) = \frac{1,082x}{(1 + 138,6x)^{0,805}} + \frac{0,0658x}{1 + (103,6x)^3} \quad (3.2)$$

Sendo assim, a absorção total do fluxo solar pela quantidade de ozônio em centímetros é expressa por:

$$A_{oz}(x) = A_{oz}^{vis}(x) + A_{oz}^{uv}(x) \quad (3.3)$$

Para a absorção da radiação solar pelo vapor d'água, principal causador do aquecimento da troposfera, a parametrização se torna mais complexa do que a absorção pelo ozônio devido à falta de valores monocromáticos precisos para todo o espectro bem como à alta dependência dos coeficientes de absorção do vapor d'água com a frequência. Em uma situação de céu claro o efeito do espalhamento é desprezível e a absorção devido ao vapor d'água é obtida diretamente por funções de absorção empíricas, enquanto que para céu com nuvens, o múltiplo espalhamento é o principal fator afetando a absorção. Dessa forma, a parametrização é feita baseada em uma distribuição de probabilidade discreta.

Yamamoto (1962) ponderou o fluxo solar com a absorção das principais bandas de vapor d'água medidas em baixa resolução espectral e os somou, incluindo também estimativas de bandas de absorção fraca próximas de 0,7 e 0,8 microns dadas por Fowle (1915), onde o fluxo solar é intenso. Com isso obteve uma equação da absorção total em função da quantidade de vapor d'água "y" (centímetros de água precipitável):

$$A_{wv}(y) = \frac{2,9y}{(1 + 141,5y)^{0,635} + 5,925y} \quad (3.4)$$

A curva de absorção por vapor d'água de Yamamoto (1962) fornece uma taxa de aquecimento maior ao longo da média troposfera.

No esquema de onda curta do GFDL, os efeitos do espalhamento para céu claro são desprezíveis e a absorção devido o vapor d'água é obtida através de funções de absorção empíricas. Um ajuste na expressão analítica da equação (4) foi aplicado de forma a calcular a absorção para céu com nuvens, usando cálculos de múltiplo espalhamento aproximado em conjunto com a distribuição de probabilidade discreta: " $p(k)$ ", para o coeficiente de absorção " k ". A equação (4) foi ajustada por Lacis e Hansen para uma soma finita de exponenciais expressa por:

$$A_{wv}(y) = 1 - \sum_{n=1}^N p(k_n) e^{-k_n y}, \quad (3.5)$$

onde " A_{wv} " é a relação entre a absorção total do vapor d'água em função da quantidade de vapor d'água y (cm), N é o número total de termos correspondentes aos coeficientes de absorção k_n , com um somatório de " n " termos variando de 1 a N , para uma distribuição de probabilidade discreta $p(k_n)$. Ramaswamy e Freidenreich (1992) reformularam os somatórios exponenciais de Lacis e Hansen aumentando o número de termos de distribuição de probabilidade discreta dos coeficientes de absorção do vapor d'água, favorecendo o ajuste por parte de resultados de modelos linha-a-linha, aumentando a absorção pelo vapor d'água.

No solo, a absorção de radiação de onda curta pela superfície é dividida em duas partes: $A_{g,1}$ para os comprimentos de onda em que o coeficiente de absorção da água é significativo e " $A_{g,2}$ " para a absorção nos demais comprimentos de onda. Em céu claro, nas faixas espectrais associadas com

significativa absorção do vapor d'água, a fração do fluxo solar total absorvido pelo solo é dada por:

$$A_{g,1} = \mu_0[0,353 - A_{wv}(Mw_t)](1 - R_g), \quad (3.6)$$

$$\text{Onde, } M = \frac{35}{(1224\mu_0^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}, \quad (3.7)$$

Onde " μ_0 " é o cosseno do ângulo zenital de incidência, R_g o albedo do solo com valores entre 0 e 1 (se o solo age como superfície lambertiana, refletindo a luz em todas as direções), A_{wv} a absorção total do vapor d'água e w_t a quantidade eficiente de vapor d'água em uma coluna vertical acima do solo. M é o fator de ampliação proposto por Rodgers e Walshaw (1966) utilizado para modificar o caminho óptico da radiação direta na faixa de absorção do ozônio, de modo a considerar trajetórias inclinadas e efeitos de refração.

De acordo com Lacis e Hansen (1974), o esquema de ondas curtas do GFDL, não inclui parametrização para a absorção por oxigênio e dióxido de carbono, por serem esses absorvedores de pouca importância comparados ao ozônio e ao vapor d'água, além disso, o efeito do espalhamento não é tão importante, exceto para casos de céu com nuvens. Os efeitos dos aerossóis também são excluídos, por também pertencerem à classe de constituintes minoritários e seus efeitos serem muito variáveis e pouco conhecidos.

O esquema de radiação de ondas longas foi desenvolvido por Fels e Schwarzkopf (1975), para um cálculo eficiente das taxas de aquecimento radiativo devido às ondas longas, com a aproximação proposta dada por:

$$q \approx q^e - q_{CTS}^e + q_{CTS} \quad (3.8)$$

Onde “ q ” é a taxa de aquecimento, “ q^e ” uma taxa de aquecimento por emissividade, calculada usando a aproximação “strong-line” e desprezando a variação da intensidade da linha com a temperatura, “ q_{CTS}^e ” a taxa de aquecimento calculada usando a aproximação CTS de resfriamento para o espaço (“cool-to-space”) utilizando as condições de emissividade e “ q_{CTS} ” a taxa de aquecimento calculada pela aproximação CTS.

No esquema de ondas longas do GFDL, a solução formal da equação de transferência radiativa para uma atmosfera em equilíbrio termodinâmico local é dada por:

$$F_{\nu}^{net} = B_{\nu}[T(0)]\tau_{\nu}(0, p) + \int_0^{p(ground)} \frac{\partial B_{\nu}}{\partial p'} \tau_{\nu}(p, p') dp' \quad (3.9)$$

Onde “ F_{ν}^{net} ” é o saldo do fluxo monocromático para cima, “ $B_{\nu}[T]$ ” é a função de corpo negro para uma frequência “ ν ” e $\tau_{\nu}(p, p')$ a função de transmissão média monocromática entre os níveis p e p' para todos os caminhos inclinados.

O esquema de radiação de ondas longas do GFDL considera como gases radiativamente ativos; o dióxido de carbono (CO_2), o ozônio (O_3) e o vapor d’água (H_2O). A distribuição de CO_2 é mantida constante ao contrário do ozônio cuja concentração é variável e fornecida pela climatologia, mas com efeitos de pouca importância na troposfera. O vapor d’água é o absorvedor mais abundante na troposfera, com opacidade mensurável em maior parte do espectro infravermelho e com distribuição altamente variável tanto em espaço como em tempo, demandando uma parametrização eficiente.

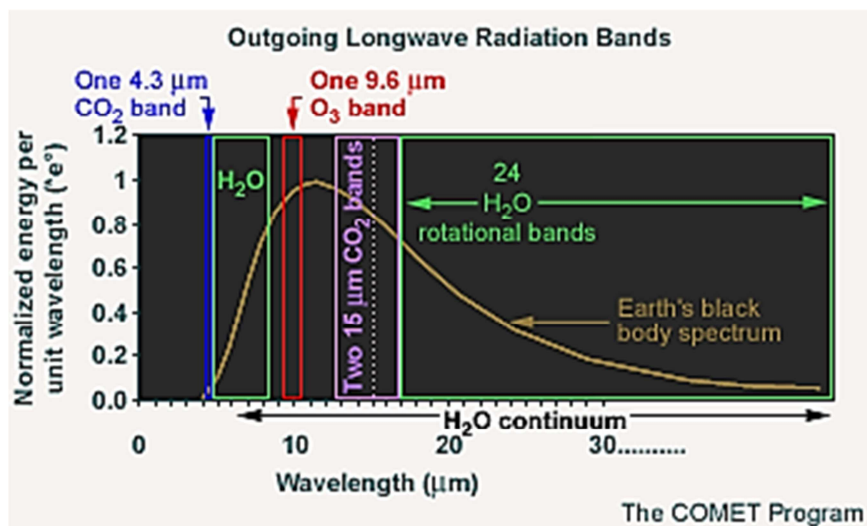


Figura 3.3 – Radiação de onda longa emergente normalizada por unidade de comprimento de onda para um corpo negro, com a temperatura média da terra e as bandas de absorção usadas pelo esquema de radiação de onda longa do GFDL (Campana e Hou, 2005).

De acordo com a Figura 3.3 de Campana e Hou (2005), em condições de céu claro, o esquema de ondas longas do GFDL inclui os efeitos de absorção de radiação de onda longa nas seguintes bandas espectrais:

- a) Para o ozônio; entre 9,35 e 10,10 μm (1 banda centrada em 9.6 μm);
- b) Para o dióxido de carbono; entre 12,5-14,93 μm e 14,93-17,86 μm (2 bandas centradas em 15 μm) e entre 4,2-4,4 μm (1 banda centrada em 4.3 μm , considerando somente emissão);
- c) Para a absorção do vapor de água; entre 4,55-8,33 μm (100 bandas iguais centradas em 6.3 μm)
- d) Nas bandas "rotacionais" do vapor d'água entre 17,86 μm até o fim das frequências no infravermelho (24 bandas desiguais em comprimentos de onda maiores que 12 μm)
- e) Na absorção fraca do "continuum" de vapor d'água na faixa entre 8-12 μm (3 bandas entre 8,33-9,35 μm ; 9,35-10,10 μm e 10,10-12,5 μm).

Fels e Schwarzkopf (1975) propuseram a utilização de uma aproximação “cool-to-space” ou “CTS” (perda de fótons de uma camada atmosférica para o espaço) de Rodgers e Walshaw (1966), que é relativamente fácil de calcular, necessitando somente da função de transmissão entre um nível arbitrário e o espaço. Para uma atmosfera isotérmica à temperatura T , a taxa de resfriamento é expressa por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{g}{c_p} \sum_n B_n(T) \frac{\partial \tau_n}{\partial p}(0, p) \quad (3.10)$$

g é a aceleração da gravidade, c_p é o calor específico do ar seco em pressão constante, n é o índice da banda espectral, $B_n(T)$ é a função de corpo negro para cada banda espectral e $\frac{\partial \tau_n}{\partial p}(0, p)$ é a função de transmissão na coluna. A utilização da aproximação “cool-to-space”, consiste em assumir que a equação (3.10) pode ser usada para calcular taxas de resfriamento em qualquer altura e em apenas uma coluna atmosférica (0,p), mesmo que a temperatura não seja constante. A aproximação “cool-to-space” pode ser bastante falha em algumas situações como na presença de nuvens.

Pode-se dividir a taxa total de aquecimento na região do infravermelho em duas partes: uma parte com a aproximação CTS (perda de fótons de uma camada atmosférica para o espaço) e outra com um termo de troca (troca de fótons entre as camadas atmosféricas) que é definido por:

$$q_{troca} \equiv q - q_{CTS} \quad (3.11)$$

Onde:

$$q \equiv \frac{\partial T}{\partial t}(p) = \frac{g}{c_p} \sum_n \frac{\partial F_n}{\partial p} \quad (3.12)$$

$$q_{CTS} \equiv \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{g}{c_p} \sum_n B_n(T) \frac{\partial \tau_n}{\partial p}(0, p) \quad (3.13)$$

Onde “ n ” refere-se à integração da função sobre o intervalo de frequência. Esta divisão é completamente separada da simplificação usada em cálculos de emissividade, de forma que se pode analogamente expressar a divisão como:

$$q_{troca}^e \equiv q^e - q_{CTS}^e .$$

Segundo Fels e Schwarzkopf (1975), pelo fato de que as diferenças entre q_{CTS}^e e q_{CTS} são muito maiores que as diferenças entre q_{troca}^e e q_{troca} , podemos considerar a aproximação “ $q_{troca} \sim q_{troca}^e$ ”, e por suposição temos que:

$$q_{troca} \sim q_{troca}^e \quad (3.14)$$

$$q - q_{CTS} \sim q^e - q_{CTS}^e \quad (3.15)$$

$$q \sim q^e - q_{CTS}^e + q_{CTS} \quad (3.16)$$

Onde q^e é a taxa de aquecimento por emissividade; q_{CTS}^e um cálculo local de banda única e q_{CTS} é a taxa de aquecimento com aproximação “cool-to-space”. A expressão é, portanto, a “aproximação de troca simplificada” proposta por Fels e Schwarzkopf (1975), como uma ferramenta computacional útil e precisa, que calcula de forma simplificada o termo de troca mas com precisão o termo CTS.

3.2.3. Modelo rápido de transferência radiativa (RRTMG)

O modelo rápido de transferência radiativa (RRTM), desenvolvido pela *Atmospheric and Environmental Research* (AER) (MLAWER et al., 1997), tem sido utilizado em modelos de circulação geral (RRTMG) (MLAWER et al., 2012). O modelo utiliza o método de correlação-k para transferência radiativa, permitindo cálculos de fluxos e taxas de resfriamento na região de ondas longas e cálculos de fluxos solares diretos e taxas de resfriamento na região de ondas curtas. Os resultados do método de correlação-k são validados por modelos de transferência radiativa “linha-a-linha” (LBLRTM) (CLOUGH et al., 1992; CLOUGH e IACONO 1995) para perfis atmosféricos em diversos tipos de condições atmosféricas.

Segundo Brown et al. (1995), a precisão do LBLRTM, que fornece os coeficientes de absorção para a correlação-k utilizada pelo RRTMG, é estabelecida pelas validações do programa de medições de radiação atmosférica (ARM). O LBLRTM é continuamente atualizado e validado a partir de medições de alta resolução espectral (MLAWER et al., 2012).

Os coeficientes de absorção k, utilizados pelo RRTMG, incluem os efeitos do “continuum” de vapor d’água (CLOUGH et al., 1989). De acordo com Alvarado et al. (2013), o modelo de transferência radiativa linha-a-linha da AER incorpora o modelo de “continuum” MT_CKD (MLAWER et al., 2012), que inclui o alargamento (self and foreign broadening) do “continuum” de vapor d’água, assim como o “continuum” para CO₂, O₂, N₂ e O₃ e a extinção devido ao espalhamento de Rayleigh. O “continuum” refere-se à absorção com dependência espectral lenta que, quando adicionada à absorção linha-a-linha, fornece concordância com as medições. (Figura 3.4).

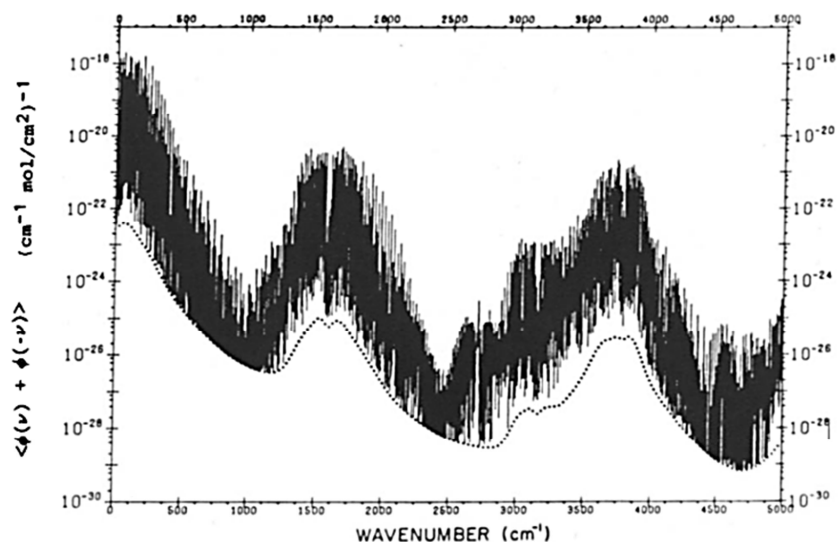


Figura 3.4 - Função de densidade da potência espectral simetrizada para o autoalargamento do vapor d’água em 26,7 mb e 296 K (curva sólida). O “continuum” é indicado pela curva pontilhada (Clough et al., 1989).

Segundo Mlawer et al. (1997), o objetivo do desenvolvimento do RRTMG tem sido obter precisão nos cálculos de fluxos e taxas de resfriamento consistente em comparação com os resultados obtidos pelos melhores modelos linha-a-linha, e conseqüentemente, obter uma adaptabilidade direta aos cálculos de múltiplo espalhamento em ambos os esquemas de radiação de ondas curtas e ondas longas. A região de onda longa (entre 10 e 3250 cm^{-1}) é dividida em 16 bandas espectrais, enquanto a região de ondas curtas (entre 2600 e 50000 cm^{-1}) é dividida em 14 bandas, onde uma das bandas (820-2600 cm^{-1}) é utilizada para dar continuidade espectral às bandas de onda longa. Cada banda espectral, por sua vez, é dividida em outros 16 sub-intervalos de larguras desiguais em um espaço de distribuição de probabilidade cumulativa g .

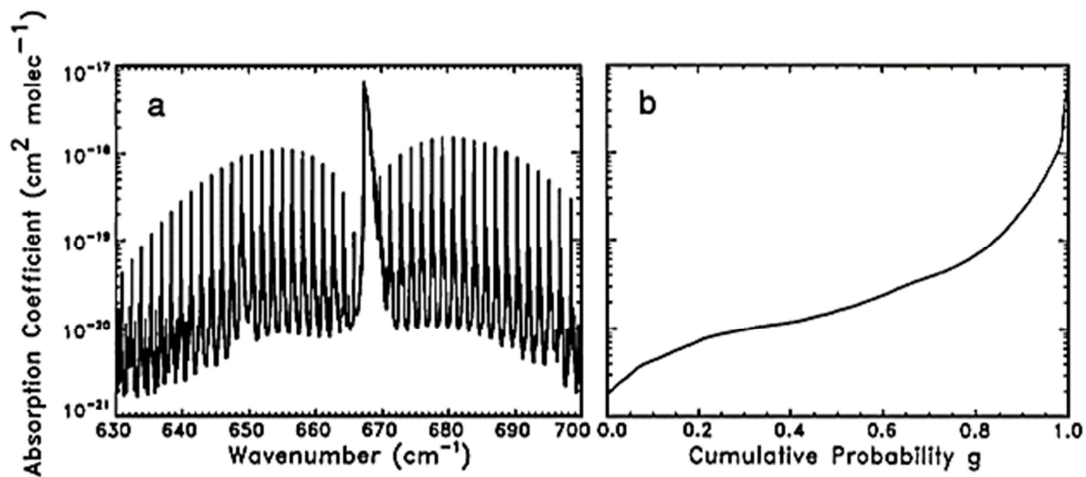


Figura 3.5 - Coeficientes de absorção devido ao dióxido de carbono para um nível de 507 mbar em uma atmosfera de verão de latitudes médias para uma faixa espectral de 630-700 cm^{-1} (a) como uma função do número de onda e (b) reordenado em ordem crescente pelo método de correlação- k (Mlawer et al., 1997).

A aproximação por correlação- k , uma das principais características do RRTMG, realiza um mapeamento dos coeficientes de absorção $k(n)$ de um espaço espectral para um espaço g em ordem linear crescente de valores, como mostra a Figura 3.5. “ $g(k)$ ” é uma fração dos coeficientes de absorção no conjunto menores do que k .

No espaço espectral os coeficientes de absorção variam irregularmente com o número de onda, não sendo adequados para a determinação de valores representativos, no entanto, no espaço ν esses coeficientes são reordenados em uma sequência, em ordem crescente, de termos na integral sobre o número de ondas na equação de transferência radiativa, permitindo uma equivalência com a radiação monocromática. No RRTMG a expressão para a radiância espectral média emergente de uma camada atmosférica é dada por:

$$\bar{R}'_{\nu_1\nu_2} = \frac{1}{\nu_2 - \nu_1} \int_{\nu_1}^{\nu_2} d\nu \left(R_0(\nu) + \int_{T_\nu}^1 [B(\nu, \theta(T'_\nu)) - R_0(\nu)] dT' \right), \quad (3.17)$$

onde ν_1 e ν_2 são os números de onda inicial e final da banda espectral, R_0 é a radiância incidente na camada, $B(\nu, \theta)$ é a função de Planck em um número de onda ν e temperatura θ , T_ν é a transmitância para o caminho óptico da camada e T'_ν é a transmitância de um ponto ao longo do caminho óptico da camada. Partindo do pressuposto de que a função de Planck varia linearmente ao longo do caminho de absorção na camada e que a camada é homogênea com relação à pressão, temperatura e distribuição de espécies com coeficientes de absorção característicos na camada, então se pode reescrever a equação (3.17) como:

$$\bar{R}'_{\nu_1\nu_2} = \frac{1}{\nu_2 - \nu_1} \int_{\nu_1}^{\nu_2} d\nu \left[B_{eff}(\nu, T_\nu) + [R_0(\nu) - B_{eff}(\nu, T_\nu)] \exp\left(-k(\nu, P, \theta) \frac{\rho \Delta z}{\cos\phi}\right) \right], \quad (3.18)$$

onde $B_{eff}(\nu, T_\nu)$ é uma função de Planck eficiente para a camada que varia com a transmitância da camada de forma a assegurar a continuidade do fluxo através dos limites da camada para condições opacas. Na equação (3.18), a dependência da transmitância na equação (3.17) foi reescrita em termos do coeficiente de absorção $k(\nu, P, \theta)$ para um nível de pressão P e temperatura θ ;

densidade de absorção na camada ρ ; espessura vertical da camada Δz e ângulo da trajetória óptica ϕ . Com o mapeamento " $\nu \rightarrow g$ " a equação (3.18) pode ser reescrita como:

$$\bar{R}'_{\nu_1\nu_2} = \int_0^1 dg \left[B_{eff}(g, T_g) + [R_0(g) - B_{eff}(g, T_\nu)] \exp\left(-k(g, P, \theta) \frac{\rho \Delta z}{\cos\phi}\right) \right] \quad (3.19)$$

Este tratamento possibilita um mapeamento do espaço espectral " ν " para um espaço g e a determinação de um valor característico k_j do coeficiente de absorção para cada sub-intervalo j , sendo utilizado também para calcular a radiância emergente para cada um desses sub-intervalos.

O método de correlação- k é estendido na vertical para obter a transferência radiativa para atmosferas não homogêneas dividindo-as em camadas e usando a radiância emergente em cada valor de g como uma radiância incidente para o mesmo valor g de uma camada vizinha. As radiâncias resultantes, ponderadas pelo tamanho dos sub-intervalos W_j (onde $\sum W_j = 1$), são somadas para produzir uma aproximação à equação (17) expressa por:

$$\bar{R}'_{\nu_1\nu_2} \cong \sum_j W_j R'_j = \sum_j W_j \left[B_{eff,j} + (R_{0j} - B_{eff,j}) \exp\left(-k_j \frac{\rho \Delta z}{\cos\phi}\right) \right] \quad (3.20)$$

A correlação- k utilizada pelo esquema RRTMG, é essencial para fornecer um método para calcular, de forma eficiente e precisa, profundidades ópticas em bandas espectrais com mais de uma espécie de absorção significativa e esse cálculo é realizado com a inclusão de uma variável adicional ou parâmetro de espécies binárias (η):

$$\eta \equiv \frac{S_1 W_1}{S_1 W_1 + S_2 W_2} \quad (3.21)$$

Onde S_1 e S_2 são as respectivas linhas integradas de força de absorção das duas espécies na banda espectral e W_1 e W_2 são as quantidades na coluna da camada correspondente, ou seja, quando $\eta \cong 0$, a espécie correspondente ao índice 2 será radiativamente dominante e quando $\eta \cong 1$, a primeira espécie será dominante (Mlawer et al., 1997).

A Atmospheric and Environmental Research (AER), disponibiliza duas versões do modelo de transferência radiativa, o RRTM que mantém a mais alta precisão em relação aos resultados linha-a-linha para cálculos em cada coluna atmosférica e o RRTMG, que fornece uma maior eficiência com mínima perda de precisão para aplicações em modelos de circulação geral.

3.2.4. Comparativo

Uma das vantagens em utilizar o esquema de onda curta do GFDL é a utilização do ajuste de uma soma de exponenciais à curva de Yamamoto (1962), favorecendo uma semelhança com a técnica de correlação-k, muito utilizada em esquemas de radiação mais modernos e que permite que o modelo de radiação seja estendido para incluir múltiplos espalhamentos.

Entretanto, uma desvantagem da utilização da curva de absorção do vapor d'água de Yamamoto, pelo pacote do GFDL, é o déficit de absorção pela atmosfera, aumentando a superestimativa de radiação incidente na superfície pelo modelo. O esquema de ondas curtas de Lacis e Hansen (1974), não considera as linhas de absorção do O₂, CO₂ e do "continuum" de vapor d'água, por serem considerados constituintes minoritários quanto à absorção da radiação solar, o que causa aumento na incidência da radiação à superfície.

No esquema de onda longa do GFDL, a vantagem é a utilização da aproximação “cool-to-space” ou “CTS”, que elimina os erros sistemáticos dos cálculos de emissividade e aumenta a precisão nos cálculos de taxas de aquecimento livre atmosférico (FELS e SCHWARZKOPF, 1975).

Em relação ao esquema RRTMG, uma das vantagens é a inclusão de um modelo mais extenso de “continuum” de vapor d’água, na importante banda rotacional entre 600 e 200 cm^{-1} (entre aproximadamente 16 e 50 micrômetros), produzindo um aumento significativo da absorção de radiação terrestre e reduzindo a radiação de onda longa emergente causando um aumento do fluxo incidente na superfície de áreas mais secas (IACONO et al., 2000).

Outra vantagem encontrada no esquema RRTMG é a utilização, para modelos de circulação geral, da aproximação de coluna independente de Monte Carlo (McICA), que possibilita a representação da variabilidade de nuvens de sub-grade com opções de sobreposição de nuvens: aleatória, máxima-aleatória e máxima.

Além de utilizar a correlação- k , o esquema RRTMG utiliza, como forma alternativa, a interpolação linear, que elimina eficientemente os efeitos de discretização. A interpolação linear é utilizada para levar em conta as variações dos coeficientes de absorção com a pressão e a temperatura na banda espectral. O RRTMG realiza a interpolação linear usando conjuntos armazenados de valores “ k_j ” (valor característico do coeficiente de absorção para cada sub-intervalo), que são fornecidos pela distribuição k e calculados para a gama completa de condições atmosféricas.

Uma desvantagem encontrada no esquema RRTMG, é o viés do fluxo de ondas curtas para céu com nuvens, produzido pelo tratamento de sobreposição de nuvens original do esquema de radiação de onda curta, ocasionando erros significativos para alguns tipos de nuvens. Esse viés pode ser reduzido com a utilização da técnica estatística de Monte Carlo (McICA) (IACONO et al., 2006). As principais características de ambos os esquemas são descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Características dos esquemas de radiação

	GFDL	RRTMG
1.CÉU CLARO		
1.1 Ondas Curtas		
Método	Método de adição ou duplicação (“Adding-Doubling”) da aproximação de dois fluxos (“two-stream approach”) e funções analíticas para a absorção do O ₃ e H ₂ O.	Aproximação de dois fluxos com <i>Practical Improved Flux Method</i> (PIMF)(ZDUNKOWSKI et al., 1980) para o cálculo de transferência radiativa e distribuição-k correlacionada para as linhas de absorção.
Característica	Esquema espectral que utiliza Ajuste de somas exponenciais. Fórmulas e coeficientes baseados em cálculos precisos de múltiplo espalhamento para atmosferas específicas do modelo.	Esquema espectral que utiliza modelo de distribuição-k correlacionada (acelerado para modelos de circulação geral).
Espalhamento Rayleigh	Incluso	Incluso (“two-stream approach”) duas formas de resolver o mesmo problema
Absorção e Espalhamento pelo Aerossol	Não Incluso. O fluxo solar no “TOA” é reduzido em 3% para levar em conta indiretamente seus efeitos.	Incluso, entretanto para este trabalho foi desligado.
H₂O	Ajuste de somas exponenciais (9 sub-intervalos por todo espectro de onda curta).	Fluxos e taxas de resfriamento em 14 bandas espectrais próximas (fontes de extinção:
CO₂	Sobreposto com H ₂ O na região do infravermelho próximo.	H ₂ O, CO ₂ , O ₃ , CH ₄ , O ₂ , N ₂ , aerossol e espalhamento
O₃	Sobreposto com H ₂ O na região Visível e Ultravioleta. Quantidade prescrita pela climatologia.	Rayleigh).
1.2 Ondas Longas		
Método	Esquema de emissividade ou banda-larga (“wide-band”) utiliza o método de troca simplificada.	Método de banda estreita (“narrow-band”). Utiliza o método de distribuição-k correlacionada.

Tabela 3.1 - Conclusão

Característica	Leva em conta os efeitos de microfísica, dióxido de carbono e ozônio.	Esquema preciso que leva em conta múltiplas bandas, gases traço e espécies de microfísica.
H₂O	6 bandas por método de emissividade e 14 bandas para modelo de banda aleatório.	Fluxos e taxas de resfriamento em 16 bandas espectrais próximas (absorvedores moleculares: H ₂ O, CO ₂ , O ₃ , N ₂ O, CH ₄ , O ₂ , N ₂ , CFC-11, CFC-12, CFC-22 e CCl ₄).
CO₂	Duas bandas (sobrepostas com H ₂ O).	
O₃	Uma banda (sobreposta com H ₂ O).	
Aerossol	Não Incluso. Redução de 3% na constante solar para considerar indiretamente os efeitos.	Pode ser incluído fornecendo a profundidade óptica da massa do aerossol no ponto médio de cada banda espectral.
2. CÉU COM NUVENS		
2.1 Ondas Curtas		
Nuvem	Absortância e Reflectância Fixa.	Fração de nuvem verdadeira (Parametrização de Hu e Stamnes) a profundidade óptica, o albedo de simples espalhamento e o parâmetro de assimetria são parametrizados como uma função de raio equivalente de nuvem e caminho de água líquida.
2.2 Ondas Longas		
Nuvem	Emitância Fixa.	Fração de nuvem verdadeira (Parametrização de Hu e Stamnes) a profundidade óptica, o albedo de simples espalhamento e o parâmetro de assimetria são parametrizados como uma função de raio equivalente de nuvem e caminho de água líquida.

3.2.5. Implementação do esquema RRTMG na versão Eta-INPE

A implementação do esquema foi inicialmente realizada baseada nas inserções feitas por Spyrou et al. (2013) no modelo grego SKIRON/Dust, cujo código é baseado na versão Eta (MESINGER et al., 1988; BLACK, 1994).

No modelo SKIRON/Dust, com a ausência da parametrização dos efeitos dos aerossóis pelo pacote do GFDL, o esquema de radiação do modelo teve que ser alterado para uma melhor representação das tempestades de areia oriundas do norte da África e que atingem diretamente a Grécia. Desde então, o modelo passou a considerar, partículas de poeira suspensas na atmosfera com a inclusão do modelo rápido de transferência radiativa RRTMG. O resultado foi uma melhora na representação do balanço de energia à superfície com a redução significativa do fluxo de onda curta incidente à superfície devido aos efeitos dos aerossóis.

Para a versão Eta do INPE, a inclusão do RRTMG, teve que ser bastante alterada, por não haver a necessidade da inserção de poeira suspensa na região sudeste do Brasil, foco deste trabalho. O modelo SKIRON também utiliza um esquema de superfície alterado, devido às diferenças na cobertura de solo da região europeia. Dessa forma, para a comparação com a versão controle, o esquema de superfície da nova versão foi alterado para o mesmo da versão controle.

Com isso, as duas versões foram integradas de forma a possibilitar a comparação dos resultados avaliando apenas os resultados apresentados com a alteração dos códigos radiativos.

3.2.6. Avaliação objetiva

Para avaliação objetiva das simulações na seção 4.4.4, foram utilizados dados de estimativa de irradiância a superfície do modelo GL, dados de radiação de onda curta incidente do CMSAF e dados de radiação global e temperatura a 2

metros do projeto SONDA na estação de Ourinhos/SP. Os campos analisados foram escolhidos de forma a manter a semelhança com os campos utilizados para identificar os erros sistemáticos e verificar se há persistência dos erros após a mudança do esquema de radiação.

A avaliação objetiva foi baseada em alguns índices estatísticos, como a raiz do erro quadrático médio (*Root Mean Squared Error* - RMSE), o viés (BIAS), o erro médio absoluto (*Mean Absolute Error* - MAE) e a correlação espacial (r).

A medida do RMSE dá a magnitude da diferença entre a simulação e os valores observados, e é fortemente influenciada pelos grandes erros de simulação. Quando se tem um valor de RMSE igual a zero, a simulação é considerada perfeita.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{1}^N (S_i - A_i)^2} \quad (3.22)$$

Onde S_i é o valor simulado, A_i é o valor observado e N é n° de simulações nos pontos avaliados.

O BIAS é a média das diferenças aritméticas entre os dados de simulação e observação e o erro médio absoluto (MAE) que calcula o módulo da média das diferenças aritméticas entre os dados de simulação e observação.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{1}^N (S_i - A_i) \quad (3.23)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{1}^N |S_i - A_i| \quad (3.24)$$

O coeficiente de correlação linear de Pearson foi utilizado para avaliar a correlação espacial entre os valores de radiação de onda curta incidente à superfície gerados pelas duas versões e pelos dados de observação. A

correlação é definida como a razão entre a covariância de uma amostra com duas variáveis " $COV(x, y)$ ", pelo produto do desvio padrão das duas variáveis S_x e S_y .

$$r_{x,y} = \frac{COV(x, y)}{S_x S_y} = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_1^N [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N [(x_i - \bar{x})^2]} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N [(y_i - \bar{y})^2]}} \quad (3.25)$$

Onde N é n° de pontos avaliados e os termos entre parênteses referem-se ao quadrado da diferença entre um valor arbitrário da variável e a média desse valor. Quando a correlação for perfeita e positivamente correlacionada, o coeficiente de correlação será 1, Quando a correlação for perfeita e negativamente correlacionada, a correlação será -1 e se não houver uma correlação ("absoluta independência") entre as variáveis o coeficiente de correlação será nulo.

4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados deste trabalho. O tópico 4.1 apresentará uma descrição do caso escolhido para o trabalho, O tópico 4.2 apresentará os resultados no campo espacial de médias para o mês de julho de 2008 para o domínio da região sudeste. O tópico 4.3 irá apresentar resultados de ciclos diurnos médios mensais para um domínio menor no interior do continente e o tópico 4.4 apresentará resultados de ciclos diurnos médios, perfis verticais médios e avaliações objetivas para o período entre 14 e 19 de julho para a estação meteorológica localizada na cidade de Ourinhos no estado de São Paulo.

4.1. Descrição de caso

O período escolhido para comparação das simulações foi o mês de Julho do ano de 2008, um mês bastante seco e praticamente sem nuvens devido à forte subsidência atmosférica existente em meados do mês, os dados abrangem o período com início às 00Z do dia 01 de Julho de 2008 e finalizando às 23Z do dia 31 de Julho de 2008. A escolha foi baseada nas informações obtidas a partir dos boletins meteorológicos do CPTEC/INPE e do INMET, com o intuito de evitar a presença de nuvens e a complexidade existente na interação da radiação solar com as nuvens na modelagem numérica. O período escolhido apresenta condições favoráveis para estudo da radiação em céu claro.

De acordo com os dados do boletim climatológico mensal do INMET, no mês de Julho de 2008 ocorreu precipitação dentro da média em grande parte da Região Sudeste. Somente no leste de São Paulo a precipitação esteve abaixo da média, principalmente no litoral onde a média é em torno de 100 mm. Destaque para a capital Paulista, onde não foi registrada chuva durante o mês, sendo considerado o mais seco de toda a história da cidade. Na maior parte da região Sudeste não ocorreu precipitação durante o mês, exceto no sul de São

Paulo e no leste e nordeste de Minas Gerais (Figura 4.1(a)). Por outro lado, a maior precipitação total mensal foi de 57,1 mm, ocorrida em Maricá/RJ.

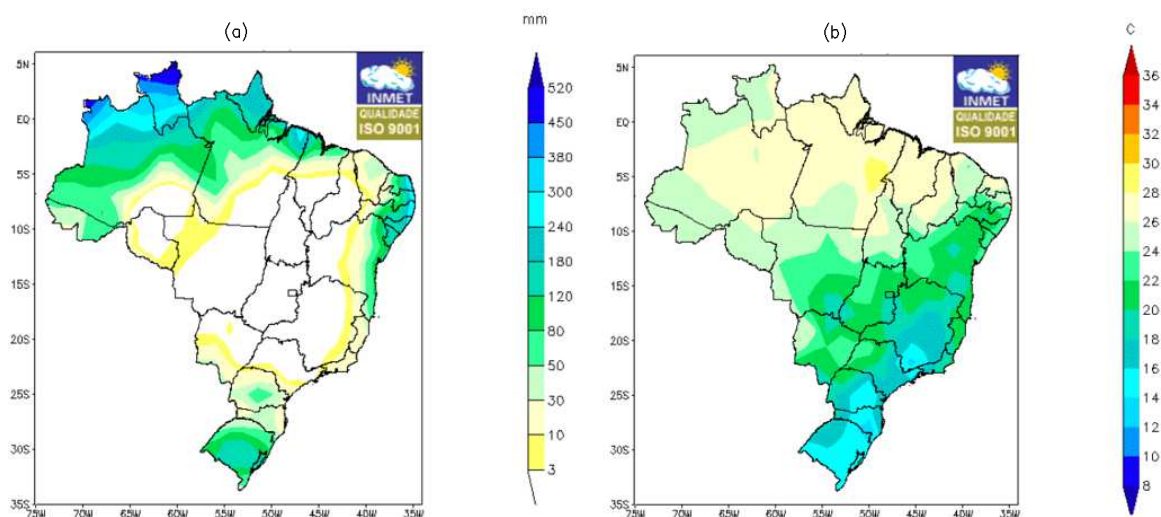


Figura 4.1 – (a) Precipitação acumulada no mês de Julho de 2008 (mm/mês) e (b) Temperatura média (°C) para o mês de Julho de 2008. Fonte: INMET.

Segundo o INMET, três frentes frias passaram sobre o leste da Região Sudeste do país, sendo que todas causaram pouca chuva. O predomínio de uma massa de ar seco foi responsável pela diminuição da umidade relativa do ar nas horas mais quentes, com destaque para a ocorrência de 9% em Uberlândia/MG no dia 24, com a intensificação da massa de ar seco.

A serra da Mantiqueira de São Paulo, o sul de Minas Gerais e a região serrana do Rio de Janeiro apresentaram baixa temperatura do ar e geada no período da madrugada atingindo cerca de $-2,2^{\circ}\text{C}$ de temperatura na cidade de Monte Verde/MG no dia 15. A média das temperaturas máximas do ar oscilou entre $18,4^{\circ}\text{C}$ em Campos do Jordão-SP e $31,0^{\circ}\text{C}$ em Ituiutaba/MG, enquanto a média das temperaturas mínimas variou entre $4,2^{\circ}\text{C}$ em Campos do Jordão e $19,1^{\circ}\text{C}$ em Vitória/ES (Figura 4.1(b)).

O mês de julho foi marcado pela persistência de uma massa de ar seco que inibiu a ocorrência de chuva na maior parte do Brasil. Consequentemente, ocorreram baixos valores de umidade relativa do ar, principalmente nas

Regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste do Brasil. A ausência de precipitação e baixa umidade relativa do ar, na maior parte do Brasil, resultaram na ocorrência de temperaturas máximas acima da média e temperaturas mínimas abaixo da média na região central do Brasil, em decorrência da perda radiativa observada no período noturno.

A figura 4.2 apresenta imagens do canal do infravermelho com temperaturas realçadas, geradas a partir do satélite GOES-10, para o período entre 14 e 19 de Julho para o horário de 12:00 UTC. Este período foi o mais seco de todo o mês e será utilizado para as avaliações da seção 4.4.

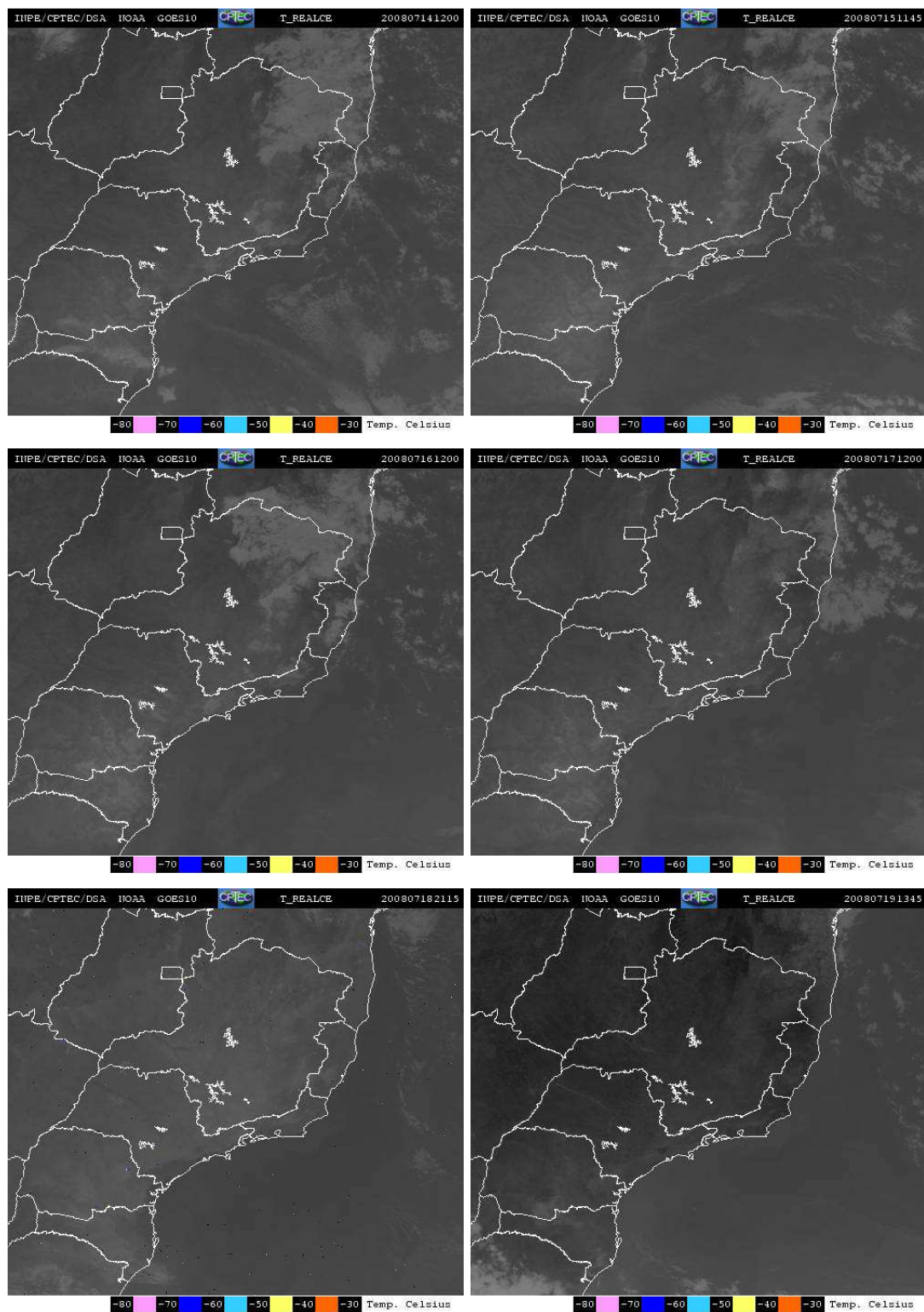


Figura 4.2 – Imagens do satélite GOES-10 do canal IR de temperatura realçada para o período entre 14 e 19 de Julho de 2008.

4.2. Campos Horizontais

Nesta seção serão avaliados os campos espaciais médios de cobertura total de nuvem e precipitação total, fluxos radiativos de onda curta e onda longa à superfície e temperatura a 2 metros para todo o domínio e para todo o mês de Julho de 2008.

Será avaliada a diferença espacial da radiação de onda curta incidente à superfície das versões entre si e o erro espacial da radiação de onda curta incidente à superfície entre ambas as versões e os dados observacionais do GL e CMSAF.

4.2.1. Cobertura de nuvens

Na cobertura média total de nuvens, comparando as duas versões do modelo Eta com os dados do CMSAF com resolução espacial de 5km interpolados para a grade do modelo e com a reanálise do CFSR com resolução espacial de 30 km, pode-se verificar, pela Figura 4.3, uma subestimativa de cobertura de nuvem no interior do continente em ambas as versões do modelo (Figuras 4.3 (c) e (d)) em comparação com os dados de observação e reanálise (Figuras 4.3 (a) e (b)) que apresentam cobertura de nuvens sobre todo o domínio na média mensal.

A comparação entre as duas versões mostra maior cobertura de nuvem na versão Eta-RRTMG em relação a Eta-GFDL. Esta diferença pode ser atribuída a uma maior quantidade de umidade específica apresentada pela versão Eta-RRTMG. Apesar da menor formação de nebulosidade no interior do continente, as duas versões conseguem representar uma quantidade de nuvens significativa no sul do Brasil e ao leste e nordeste de Minas Gerais.

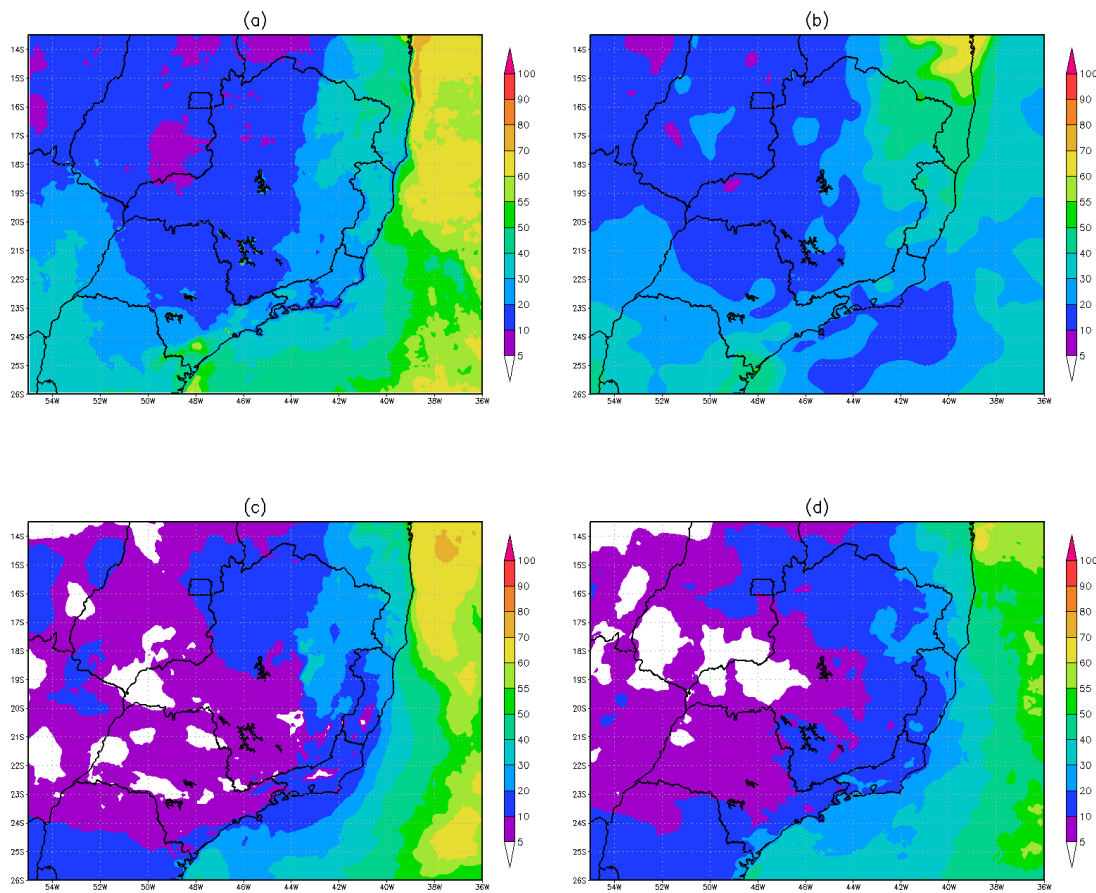


Figura 4.3 – Cobertura média total de Nuvens (%) do mês de Julho de 2008 para (a) dados do CMSAF, (b) reanálise do CFSR, versões (c) Eta-GFDL e (d) Eta-RRTMG.

4.2.1.1. Chuva

A análise do campo de precipitação é um indicador da presença de nuvens, cuja estrutura afeta substancialmente o fluxo da radiação de onda curta incidente à superfície. A Figura 4.4 mostra os dados do CMORPH com resolução espacial de 8 km interpolados para a grade do modelo e o campo de precipitação mensal das duas versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG.

No campo espacial da precipitação total, ambas as versões mostram um leve aumento de precipitação no continente, em comparação com os dados do CMORPH, entretanto no sul do Brasil, ambas as versões subestimam a precipitação em relação à observação. No oceano a versão Eta-RRTMG gera

mais precipitação, em geral, em relação à versão Eta-GFDL e em comparação aos dados do CMORPH, como mostra a Figura 4.4.

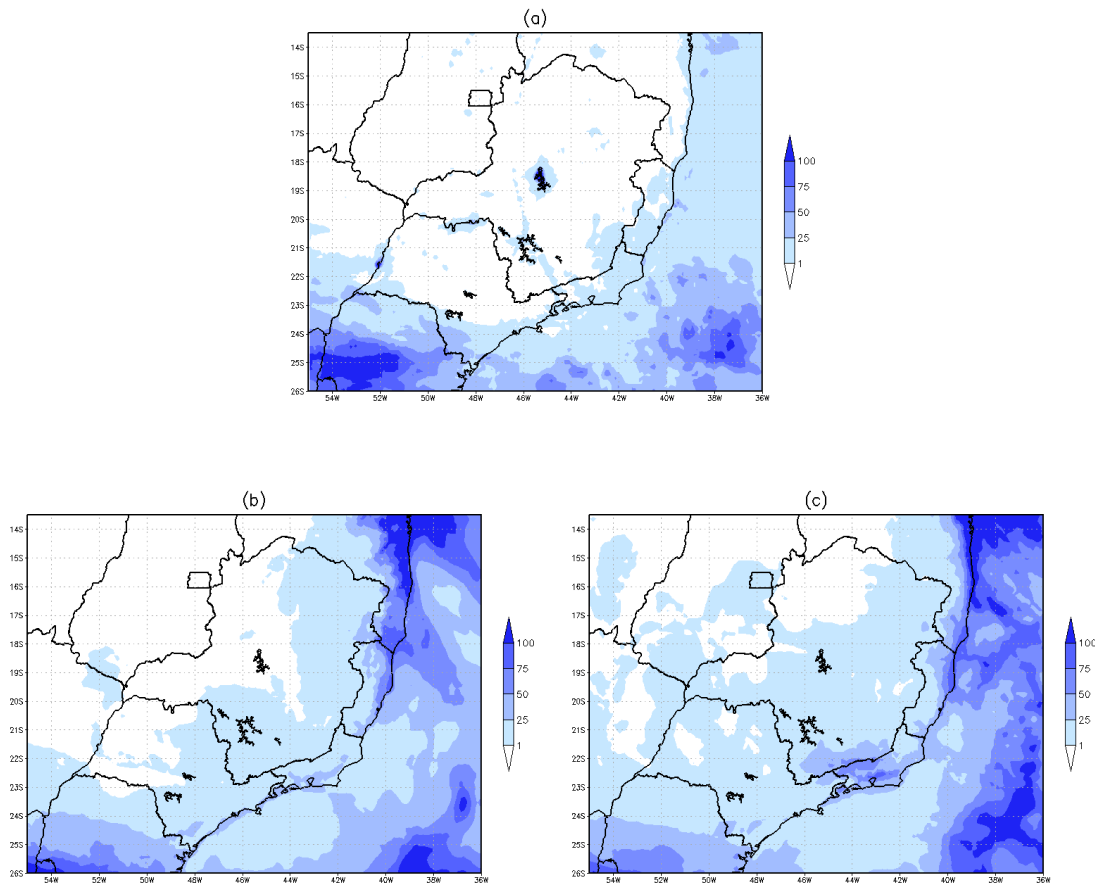


Figura 4.4 – Precipitação média total (mm) para o mês de Julho de 2008 para (a) dados do CMORPH 8 km e versões (b) Eta-GFDL e (c) Eta-RRTMG.

O aumento de precipitação apresentado pela versão Eta-RRTMG, pode ser atribuído à maior cobertura de nuvens apresentada e conseqüentemente uma maior saturação atmosférica que indica uma quantidade maior de umidade específica nos níveis mais baixos.

4.2.2. Campos de radiação

A Figura 4.5 abaixo mostra o fluxo médio de radiação de onda curta incidente à superfície para o mês de Julho de 2008, para a observação do CMSAF, observação do GL, Eta-GFDL e Eta-RRTMG. Os dois conjuntos de dados observacionais estão sendo mostrados para dar confiança nos resultados de que o modelo sistematicamente superestima a radiação de onda curta incidente à superfície continental. A frequência temporal dos dados utilizados do GL são médias diárias enquanto a frequência temporal dos dados do CMSAF e das versões são de hora em hora.

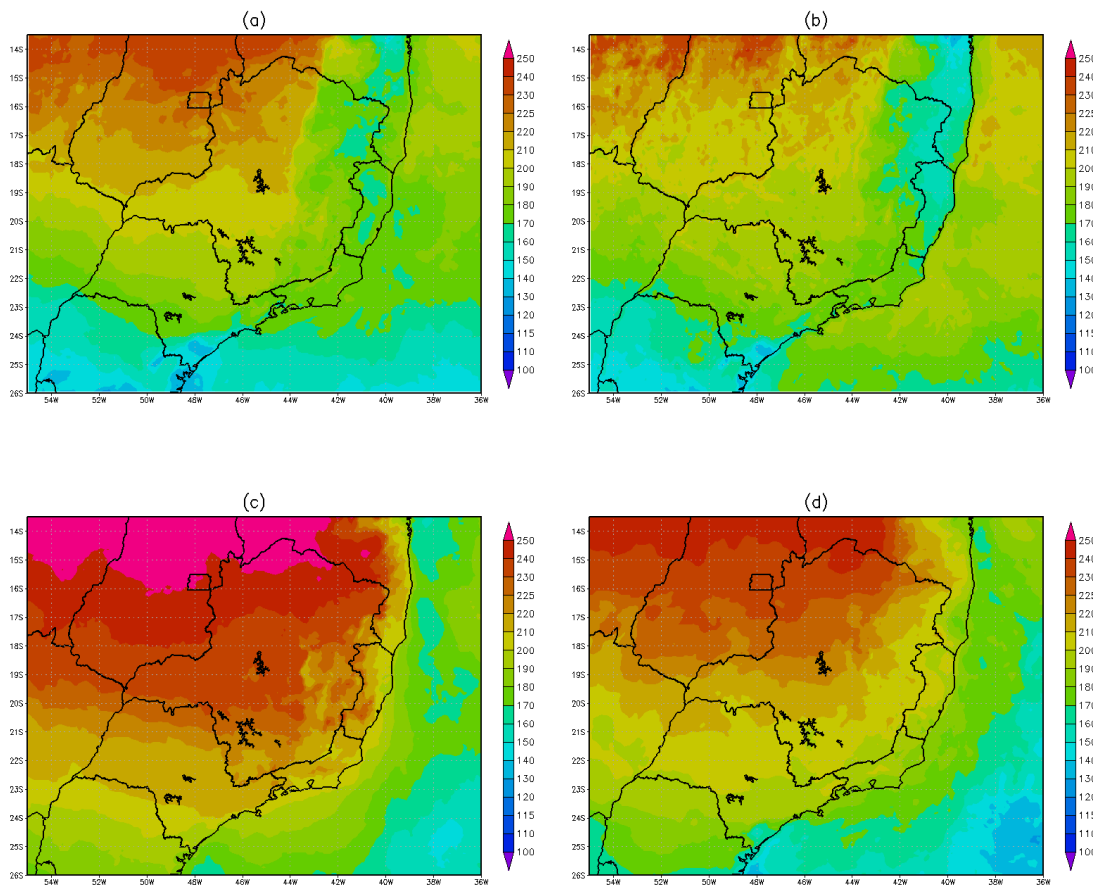


Figura 4.5 – Fluxo médio de radiação de onda curta incidente à superfície (W/m^2) do mês de Julho de 2008 para (a) dados CMSAF 5 km e do (b) GL 4 km (ambos interpolados para 10 km) e versões (c) Eta-GFDL e (d) Eta-RRTMG.

Pode-se verificar que ambas as versões mostram uma superestimativa da radiação no interior do continente quando comparados aos dados de observação. Entretanto, comparando as simulações entre si, pode-se verificar que a versão Eta-RRTMG mostra uma significativa redução do fluxo de radiação de onda curta à superfície em relação à versão Eta-GFDL. A superestimativa existente do fluxo incidente sobre o continente das versões em relação à observação, pode ser reduzida com a inclusão dos aerossóis no esquema, pois a inclusão de aerossóis afeta diretamente a incidência de radiação de onda curta e conseqüentemente o balanço energético à superfície. Essa superestimativa é devido provavelmente à ausência da combinação da absorção do ozônio e de aerossóis (ZAMORA et al., 2003). A versão Eta-GFDL não possui aerossóis e na versão Eta-RRTMG a parametrização de aerossóis foi desabilitada, entretanto, em ambas as simulações foi utilizada uma redução de 3% no valor da constante solar para considerar implicitamente seus efeitos.

No oceano, o novo esquema gera um maior bloqueio de radiação em relação ao esquema do GFDL que pode estar associado com o tipo de parametrização do raio efetivo da gota líquida e gelo de nuvem utilizado. De acordo com a teoria de espalhamento Mie, partículas líquidas com raios maiores facilitam a passagem direta de radiação incidente enquanto raios próximos de níveis moleculares tendem a espalhar a radiação.

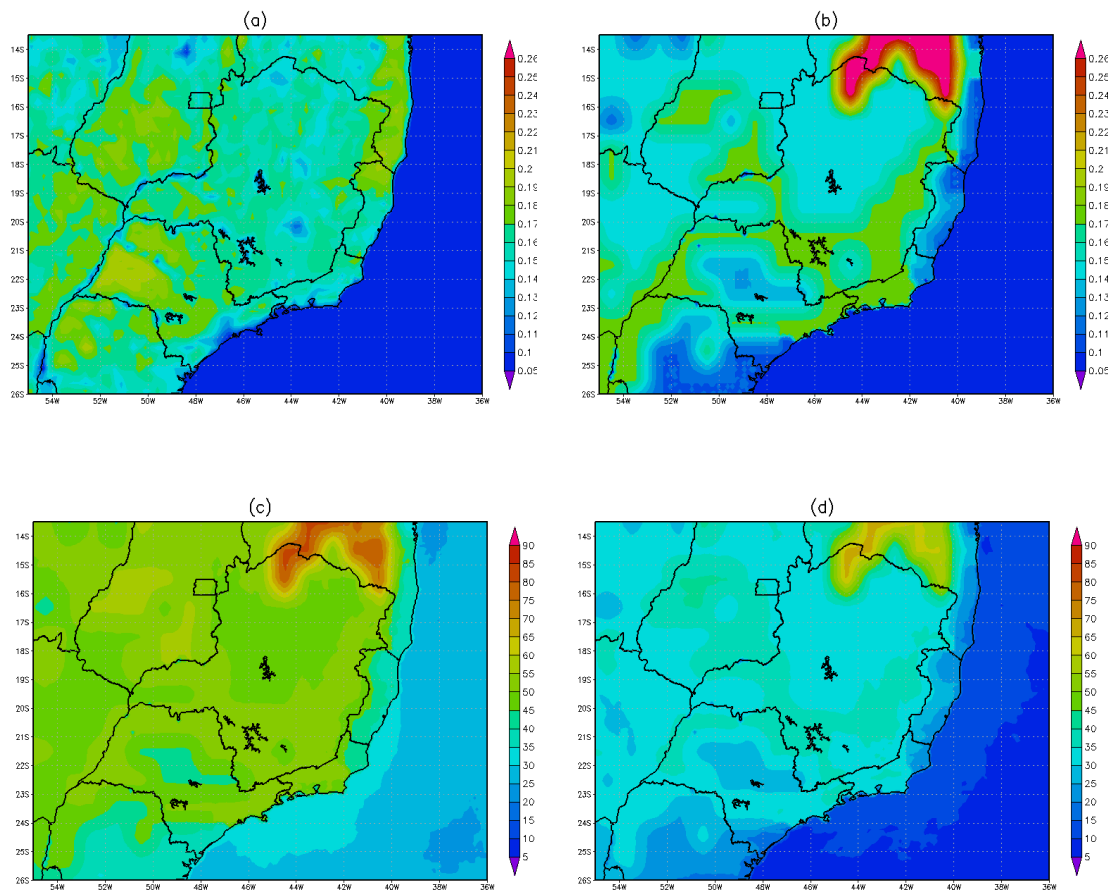


Figura 4.6 – (a) albedo estimado pelo CMSAF 25 km (0 a 1), (b) albedo gerado pelo modelo Eta (0 a 1) e o Fluxo de radiação de onda curta emergente à superfície (W/m^2) das versões (c) Eta-GFDL e (d) Eta-RRTMG para o mês de Julho de 2008.

A Figura 4.6 mostra os valores estimados de albedo dos dados do CMSAF, o valor inicial de albedo gerado pelo modelo Eta, a razão entre o fluxo de radiação de onda curta emergente e incidente à superfície e o fluxo médio de radiação de onda curta emergente à superfície para todo o mês de Julho de 2008, para ambas as versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG.

A Figura 4.6 (b) mostra o valor de albedo inicial gerado pelo modelo e que se mantém aproximadamente constante em toda a integração. Quatro arquivos de albedo sazonais são interpolados no tempo de forma que o valor de albedo inicial seja refinado pelo código levando em consideração características de

superfície, como cobertura de neve e tipos de vegetação. Dessa forma, os mesmos valores de albedo inicial são encontrados nas duas simulações independente do esquema de parametrização de radiação utilizado.

Nota-se que a versão Eta-RRTMG gera menos reflexão pela superfície tanto no solo como no oceano em comparação ao Eta-GFDL, como se pode ver nas Figuras 4.6 (c) e (d). Os menores valores do fluxo médio mensal de onda curta emergente apresentado pela versão Eta-RRTMG em relação à versão Eta-GFDL indicam uma maior absorção de radiação de onda curta incidente pela superfície, aumentando significativamente a emissão de radiação terrestre e conseqüentemente elevando as temperaturas próximas ao solo, como será mostrado mais adiante.

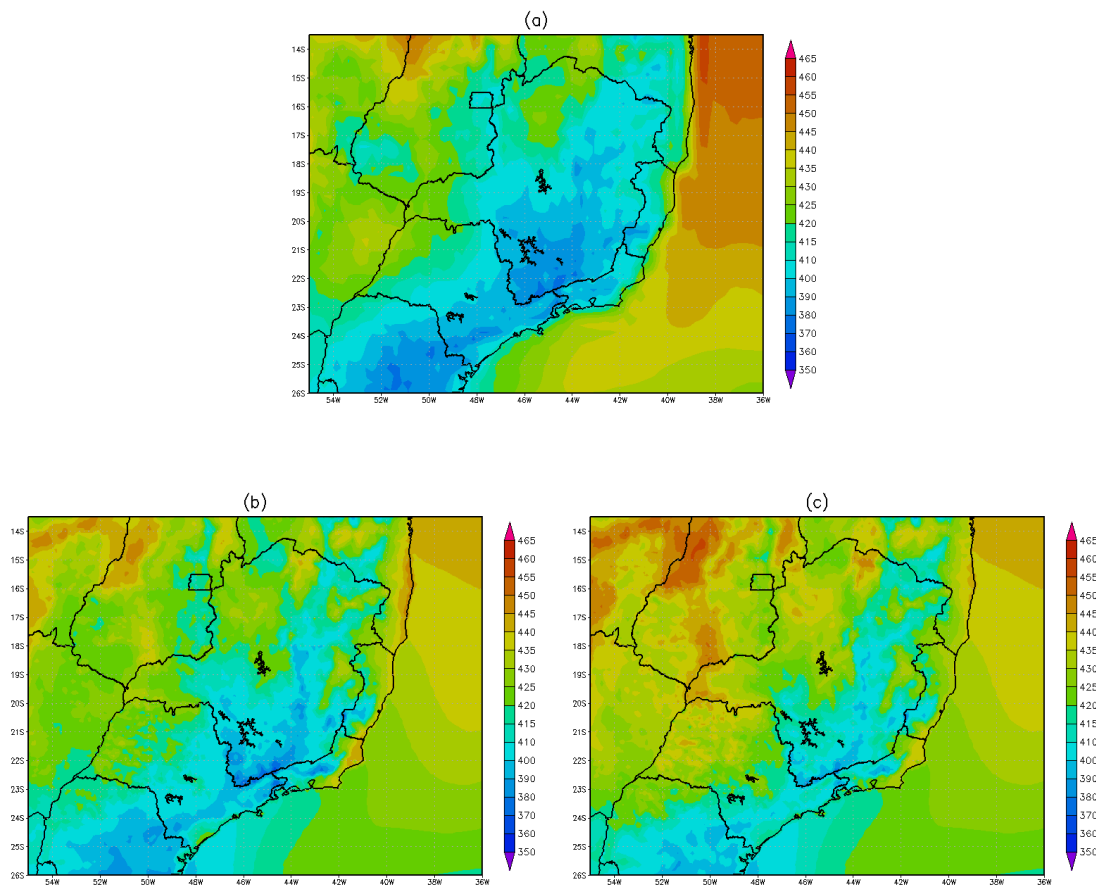


Figura 4.7 – Fluxo médio de radiação de onda longa emergente à superfície (W/m^2) do mês de Julho de 2008 para (a) dados do CMSAF 25 km, versões (b) Eta-GFDL e (c) Eta-RRTMG.

A Figura 4.7 apresenta o fluxo médio mensal de radiação de onda longa emitida pela superfície para os dados de média mensal do CMSAF com resolução espacial de 25 km, e para as versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG. Como visto na figura anterior, pode-se verificar que a maior absorção de radiação de onda curta mostrada pela versão Eta-RRTMG gera uma maior emissão de radiação de onda longa em relação à versão Eta-GFDL, que poderá ser melhor visualizado no gráfico do ciclo diurno médio mostrado mais adiante.

Nota-se que o fluxo de onda longa emergente, em ambas as versões, segue o padrão da topografia do modelo Eta, sugerindo que, com o aumento da altitude, o fluxo de radiação de onda longa emitida diminui da mesma forma que a temperatura. Este resultado mostra que os valores de radiação de onda longa emitida são bastante similares à variação de temperatura próxima ao solo, o que é esperado, sabendo que a radiação de onda longa ascendente é função direta da emissividade e da temperatura do solo.

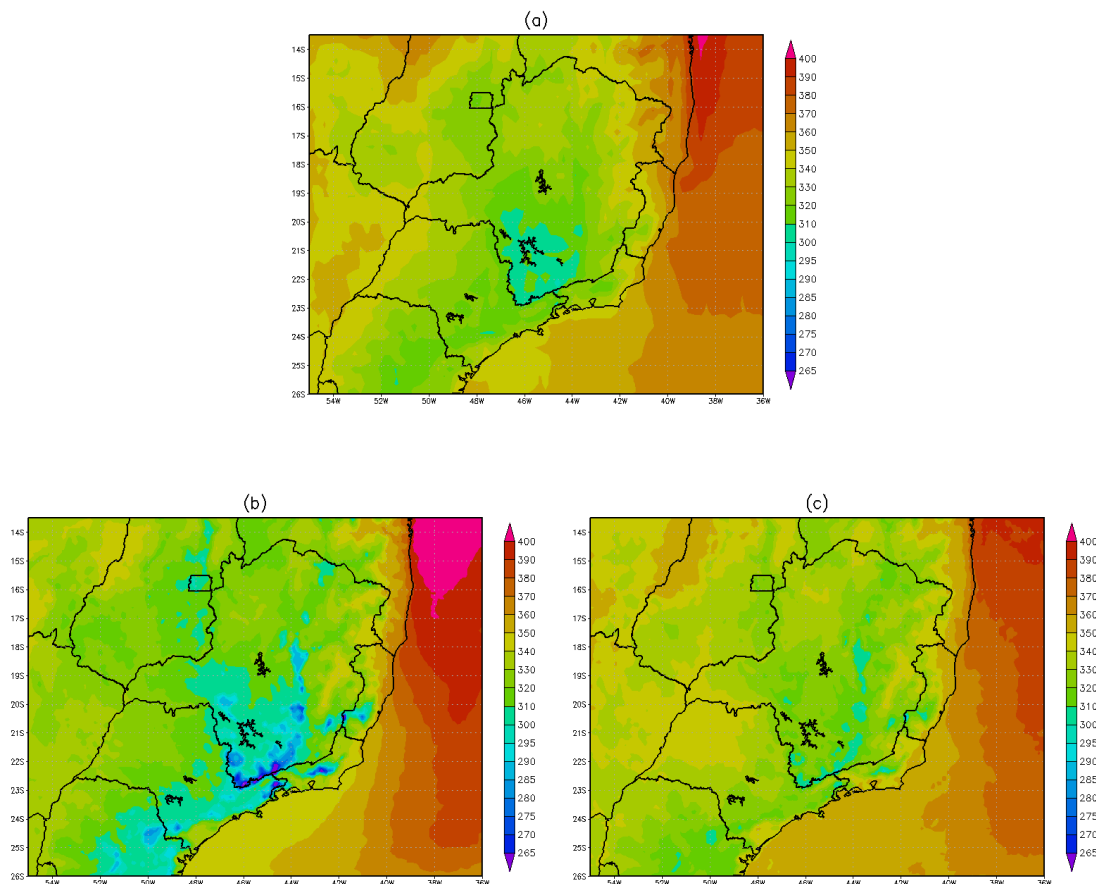


Figura 4.8 – Fluxo médio de radiação de onda longa incidente à superfície (W/m^2) do mês de Julho de 2008 para (a) dados do CMSAF 25 km, versões (b) Eta-GFDL e (c) Eta-RRTMG.

Na Figura 4.8 pode-se ver o fluxo médio mensal de onda longa incidente à superfície para os dados do CMSAF e para as versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG. Nota-se que a versão Eta-GFDL gera maiores fluxos de reemissão de onda longa no oceano em relação à observação, seguindo o padrão da cobertura de nuvens, enquanto no continente a escassez de cobertura de nuvens na região sul de Minas Gerais gera uma menor incidência de radiação de onda longa à superfície. Outro ponto importante é o padrão similar do fluxo de onda longa incidente com a topografia do modelo Eta. Comparando as Figuras 4.7(b) e 4.8(b), pode-se verificar que, com uma redução do fluxo emergente de onda longa à superfície, ocorre uma redução também da

absorção atmosférica nessas regiões mais elevadas, diminuindo a incidência do fluxo de ondas longas à superfície.

Na versão Eta-RRTMG, nota-se um equilíbrio na incidência de onda longa em todo o domínio que pode ser atribuída à maior quantidade de contribuintes atmosféricos e ao extenso continuum de vapor d'água existentes no esquema do RRTMG, o que gera uma maior absorção de onda longa emergente e consequente aumento da incidência de radiação de onda longa principalmente no continente. Em geral, a versão Eta-RRTMG se aproximou mais da observação, inclusive na porção oceânica.

4.2.2.1. Erro Espacial

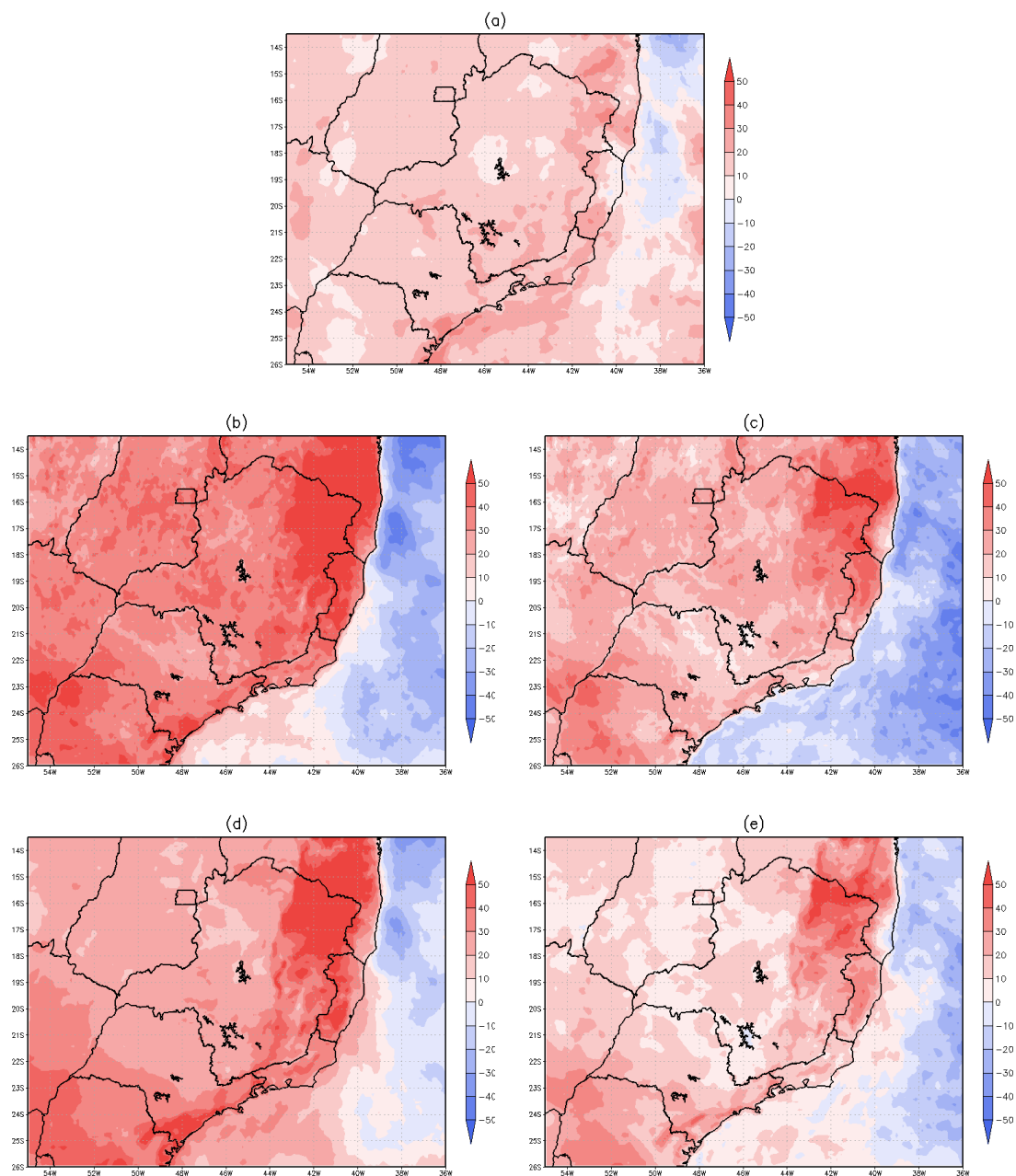


Figura 4.9 – (a) Diferença do fluxo médio de radiação de onda curta incidente à superfície (W/m^2) entre as versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG, (b) o erro entre a versão Eta-GFDL e GL, (c) o erro entre a versão Eta-RRTMG e GL, (d) o erro entre Eta-GFDL e CMSAF e (e) o erro entre Eta-RRTMG e CMSAF para o mês de Julho de 2008.

A diferença e o erro espacial são importantes para avaliar as simulações entre si e entre os dados de observação. O resultado mostra qual das versões gera um maior fluxo de onda curta incidente à superfície e qual apresenta dados mais próximos da observação.

A Figura 4.9 (a) mostra a diferença no campo espacial da radiação de onda curta incidente na superfície entre as duas simulações. Pode-se notar que em praticamente todo o continente e parte do oceano atlântico, percebe-se a diferença positiva do fluxo radiativo de onda curta apresentado pela versão Eta-GFDL em relação a versão Eta-RRTMG.

No erro espacial, onde se calcula a diferença entre as versões e os dados observados, as figuras mostram principalmente que a versão Eta-RRTMG tem um melhor desempenho na representação do fluxo radiativo de onda curta em geral, em relação a versão Eta-GFDL quando comparados com os dados do GL e do CMSAF (Figuras 4.9 (b), (c), (d) e (e)).

4.2.3. Temperatura a 2 metros

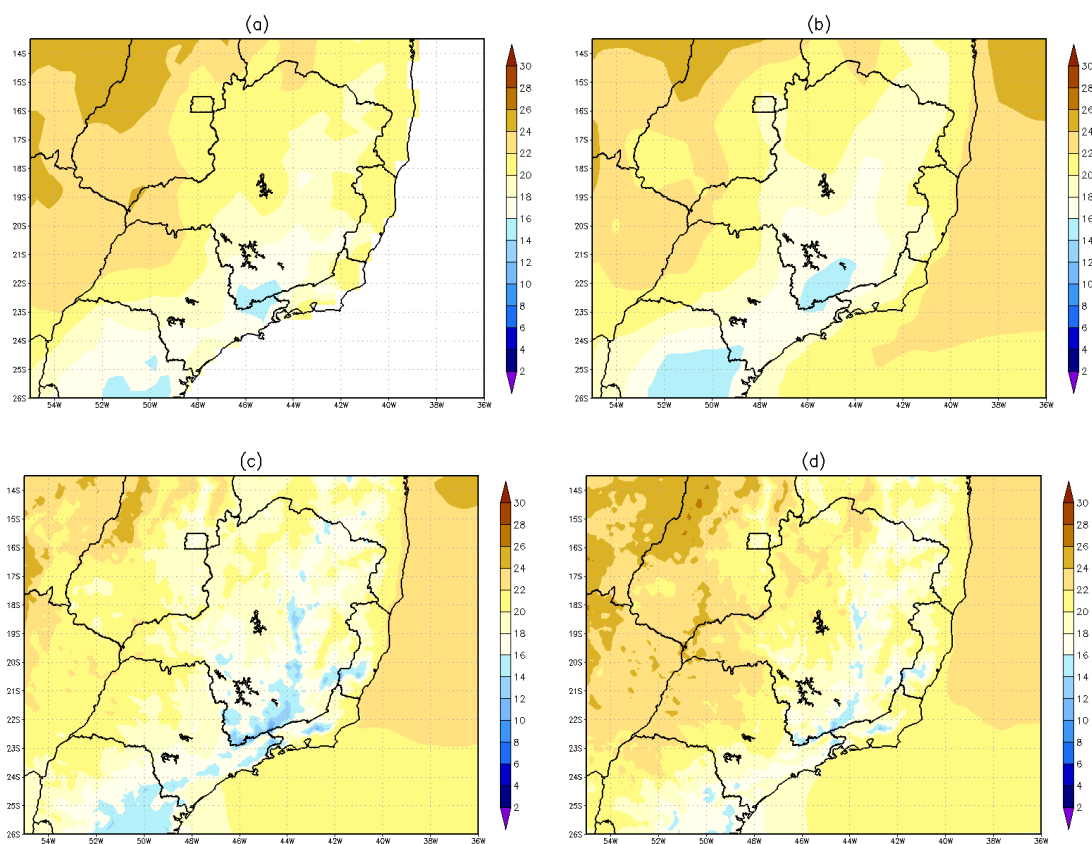


Figura 4.10 – Campo médio de temperatura a 2 metros (°C) do (a) CRU, (b) ERA-Interim, (c) Eta-GFDL e (d) Eta-RRTMG, para o mês de Julho de 2008.

Comparando o campo espacial de temperatura a 2 metros das duas simulações com a reanálise do CRU com resolução espacial de 50 km e do ERA-Interim com resolução espacial de 80 km, verifica-se pela Figura 4.10 uma subestimativa de temperatura no continente pela versão Eta-GFDL que pode ser atribuído à maior reflexão de onda curta incidente gerando menor absorção superficial de radiação.

No continente a versão Eta-RRTMG se mostra mais próxima dos dados do CRU e da reanálise do ERA-Interim, apresentando maior eficiência na representação dos máximos de temperatura.

4.3. Ciclo diurno médio

Nesta seção serão apresentados os ciclos diurnos dos fluxos radiativos e saldo de radiação para um domínio menor sobre o continente com o mínimo de nuvens durante o mês de julho de 2008. O novo domínio abrange a área entre 52°W e 46°W de longitude e 23°S e 18°S de latitude como mostra a figura 4.11.

A escolha do novo domínio para avaliação dos ciclos se dá pelo fato de apresentar menor cobertura de nuvens durante o mês de julho, auxiliando em uma melhor representação dos fluxos radiativos com o mínimo de interação com nuvens, como mostra a figura 4.12.

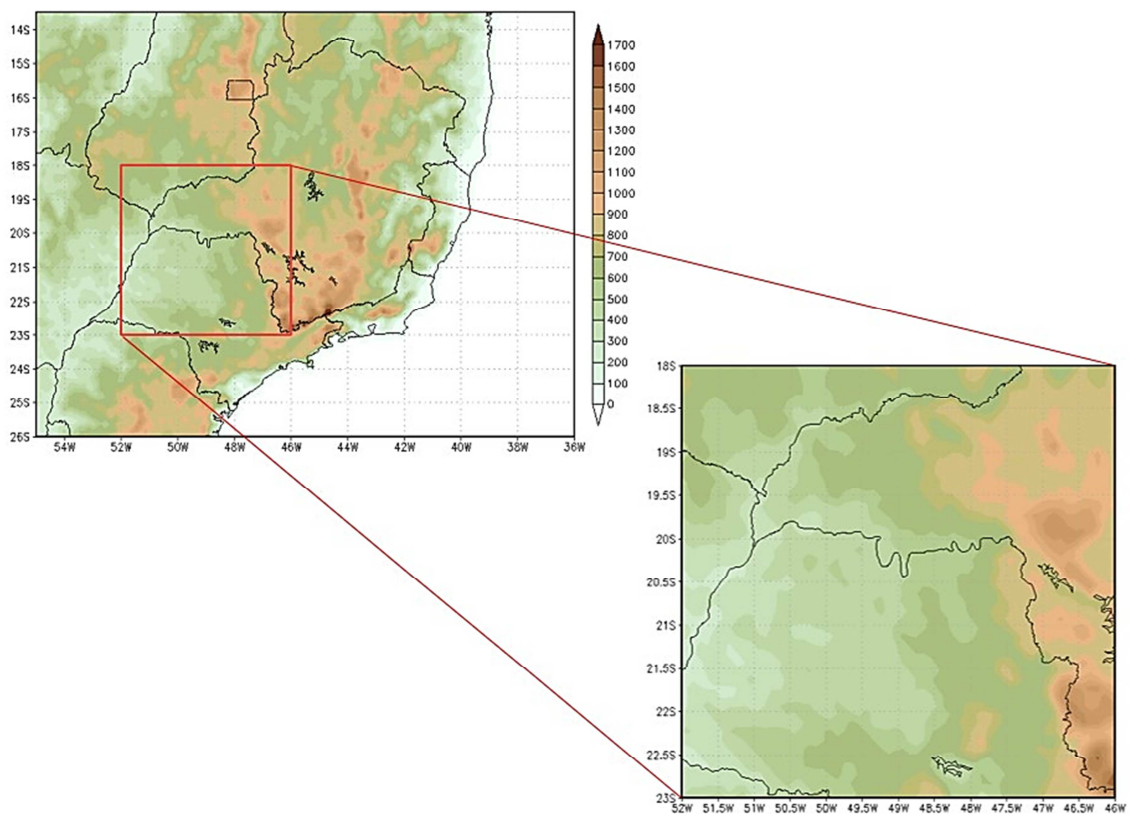


Figura 4.11 – Topografia do domínio menor.

A Figura 4.12 apresenta a média mensal de fração de cobertura de nuvens para as duas versões juntamente com a série temporal de cobertura de nuvens para o mesmo período dentro do domínio delimitado em vermelho, onde percebe-se uma condição de céu praticamente sem nuvens. Dessa forma, o domínio menor no interior do continente, foi escolhido por apresentar maior parte da cobertura de nuvens abaixo de 20% de nebulosidade, a fim de possibilitar uma avaliação direta da temperatura a 2 metros e fluxos radiativos, principalmente o fluxo de onda curta incidente entre as duas simulações em condições de céu claro para um domínio menor no interior do continente. Nota-se pelas Figuras 4.12 (a) e (b) que a versão Eta-RRTMG apresenta maior cobertura de nuvens em relação à versão Eta-GFDL no domínio marcado em vermelho.

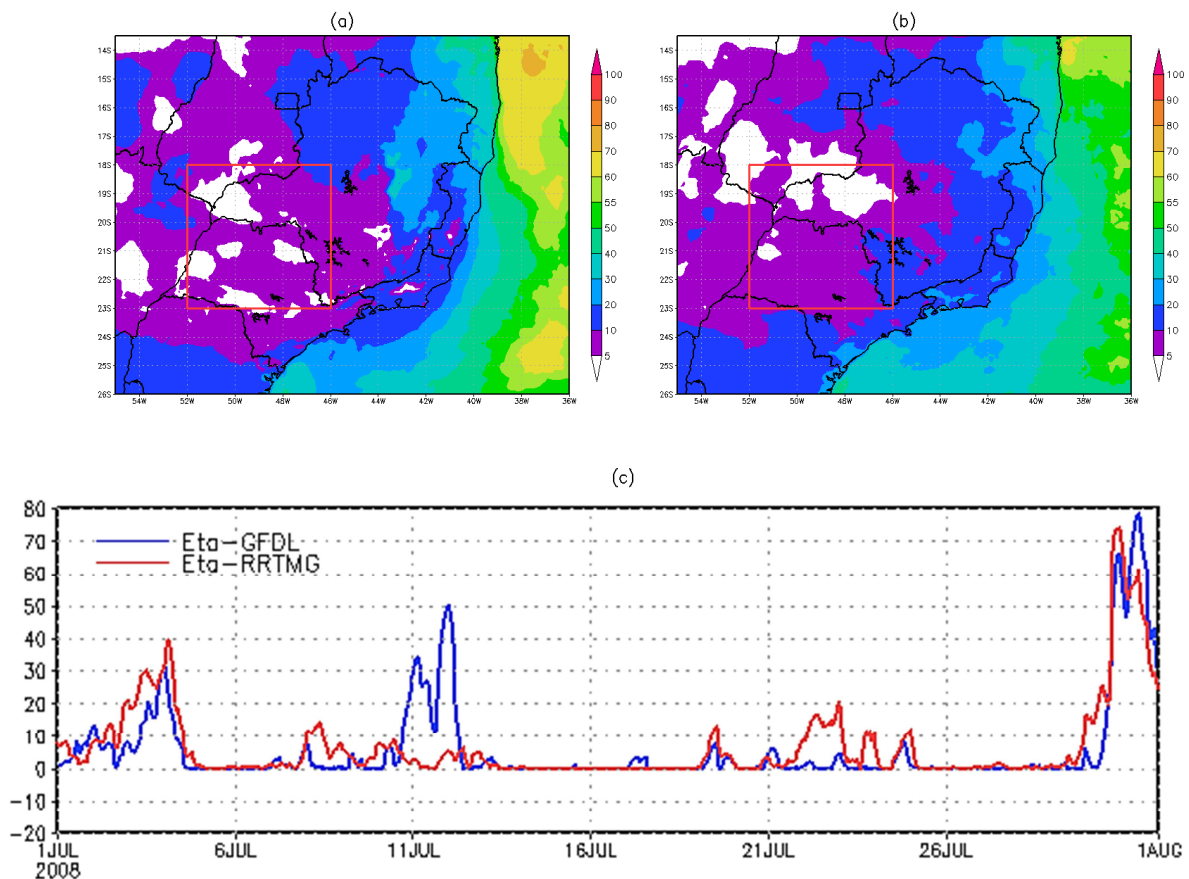


Figura 4.12 – (a) e (b) Domínio menor sobre o continente para as duas versões e (c) série temporal da cobertura média total de Nuvens (%).

4.3.1. Fluxos radiativos

A Figura 4.13 mostra o ciclo diurno médio mensal dos fluxos radiativos de onda curta e onda longa incidente e emergente de ambas as versões para o domínio menor. “Si” e “Se” são os fluxos de onda curta incidente e emergente, enquanto “Li” e “Le” são os fluxos de onda longa incidente e emergente. Por uma questão vetorial, os fluxos emergentes foram invertidos para uma melhor visualização.

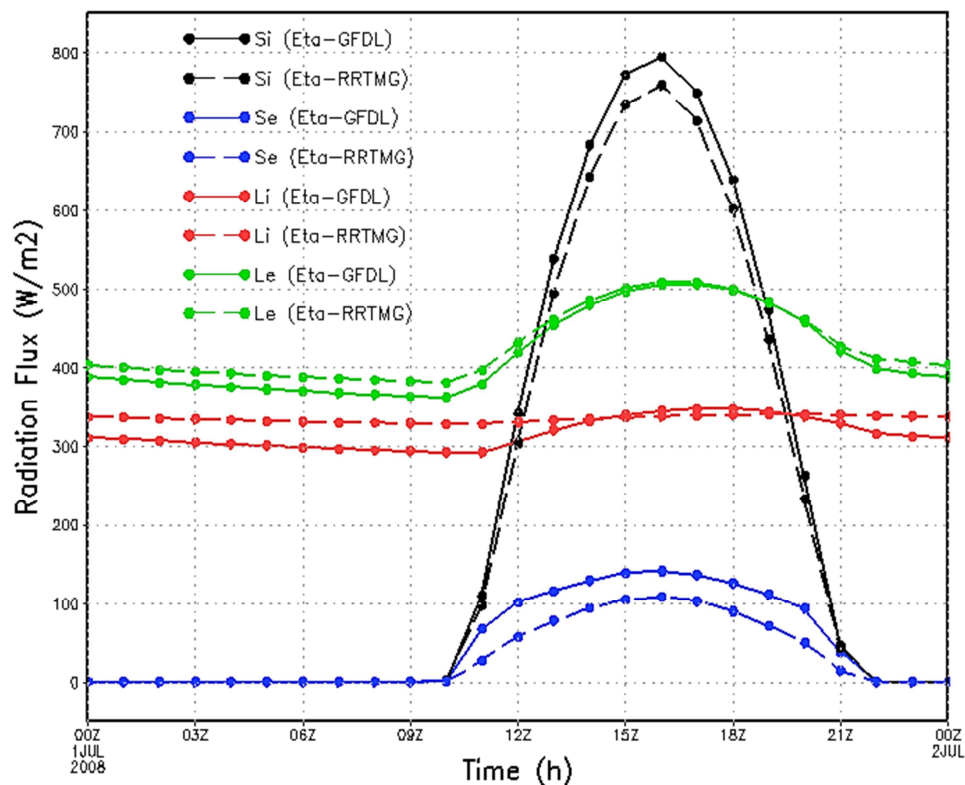


Figura 4.13 – Ciclo diurno médio dos fluxos radiativos (W/m^2) das versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG para o mês de Julho de 2008 no domínio menor.

Nota-se que a versão Eta-RRTMG apresenta valores mais baixos de fluxo de onda curta incidente e valores mais altos de fluxo de onda longa emergente em comparação a Eta-GFDL. A inserção de uma parametrização de aerossóis em trabalhos futuros na versão Eta-RRTMG pode possibilitar resultados ainda melhores nos fluxos radiativos, especialmente no fluxo de onda curta incidente, portanto o desligamento proposital dos aerossóis na versão Eta-RRTMG e um

melhor ajuste no fluxo de onda curta, bem como a redução em 3% na constante solar em ambas as versões, devem ser levados em consideração na análise da radiação de onda curta incidente à superfície.

A Figura 4.13 mostra também que, a versão Eta-RRTMG gera uma variação pequena no fluxo de onda longa incidente à superfície ao contrário da versão Eta-GFDL, que mostra uma maior variação na reemissão atmosférica. Mostra também maiores valores no fluxo de onda curta emergente, resultando em uma menor absorção da radiação de onda curta incidente pela superfície.

O ciclo diurno do fluxo de onda longa incidente da versão Eta-RRTMG revela que o novo esquema gera maior incidência de onda longa à superfície, principalmente nos horários onde não há radiação solar, que podemos atribuir principalmente aos modelos de “*continuum*” dos principais contribuintes utilizados pelo esquema RRTMG, que geram uma faixa maior de absorção de onda longa emergente.

4.3.2. Saldo de radiação

$$R_{NET} = S_i - S_e + L_i - L_e \quad (4.1)$$

O saldo de radiação líquido mostra a disponibilidade de energia para os processos físicos e biológicos que ocorrem no planeta, e tal energia é calculada a partir do somatório entre as diferenças de fluxo total incidente e emergente. Dessa forma, durante o dia, nos picos de radiação, temos o predomínio da radiação solar que fornece um saldo de radiação positivo, enquanto à noite temos o predomínio da radiação terrestre absorvida pela superfície no decorrer do dia, gerando saldos negativos.

A equação mostra as variáveis de saída da radiação do modelo Eta, onde “ S_i ” é a radiação de onda curta incidente à superfície e “ S_e ” a radiação emergente, “ L_i ” é a radiação de onda longa incidente à superfície e “ L_e ” a radiação emergente.

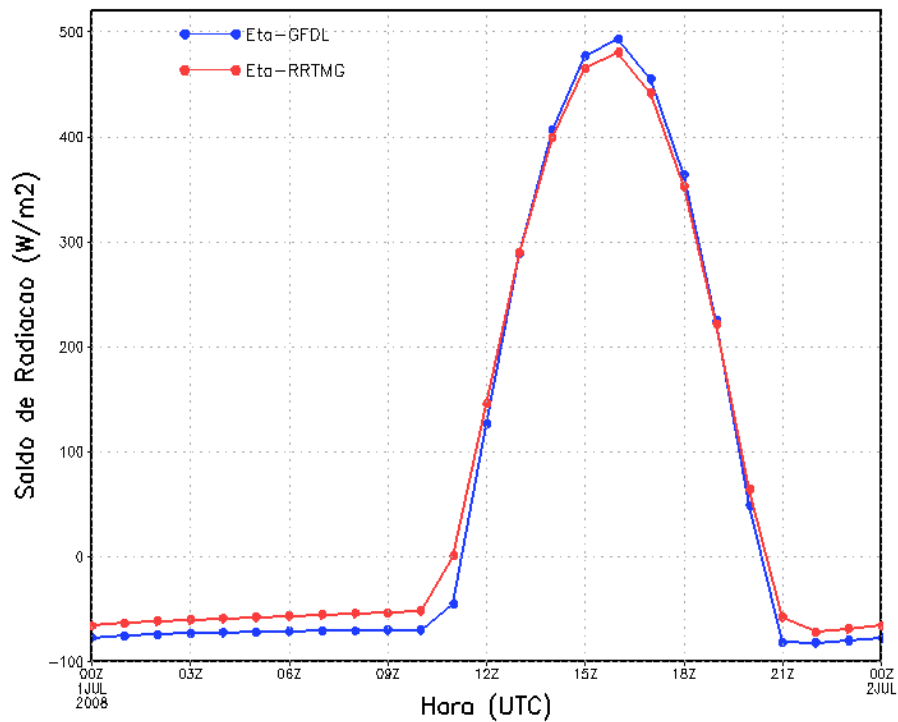


Figura 4.14 – Ciclo diurno médio do saldo radiativo (W/m^2) das duas simulações para o mês de Julho de 2008 no domínio menor.

A figura 4.14 mostra o saldo de radiação para o domínio menor e para ambas as versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG durante o mês de julho de 2008. Nota-se, no período noturno, um saldo negativo menor apresentado pela versão Eta-RRTMG em relação a Eta-GFDL, atribuído à menor diferença entre os fluxos de radiação de onda longa incidente e emergente em todo o domínio apresentado pela versão Eta-RRTMG. No período diurno, a versão Eta-GFDL apresenta um saldo positivo de radiação maior em relação à versão Eta-RRTMG, devido principalmente à uma maior diferença entre os fluxos de radiação de onda curta incidente e emergente em comparação à diferença dos mesmos fluxos apresentados pela versão Eta-RRTMG.

4.3.3. Temperatura a 2 metros

No comparativo do ciclo diurno médio da temperatura a 2 metros das duas simulações com os dados instantâneos de 6 em 6 horas da reanálise do ERA-Interim, verifica-se uma maior proximidade da versão Eta-RRTMG com a reanálise para o domínio menor sobre o continente nos horários de temperatura máxima, como mostra a Figura 4.15.

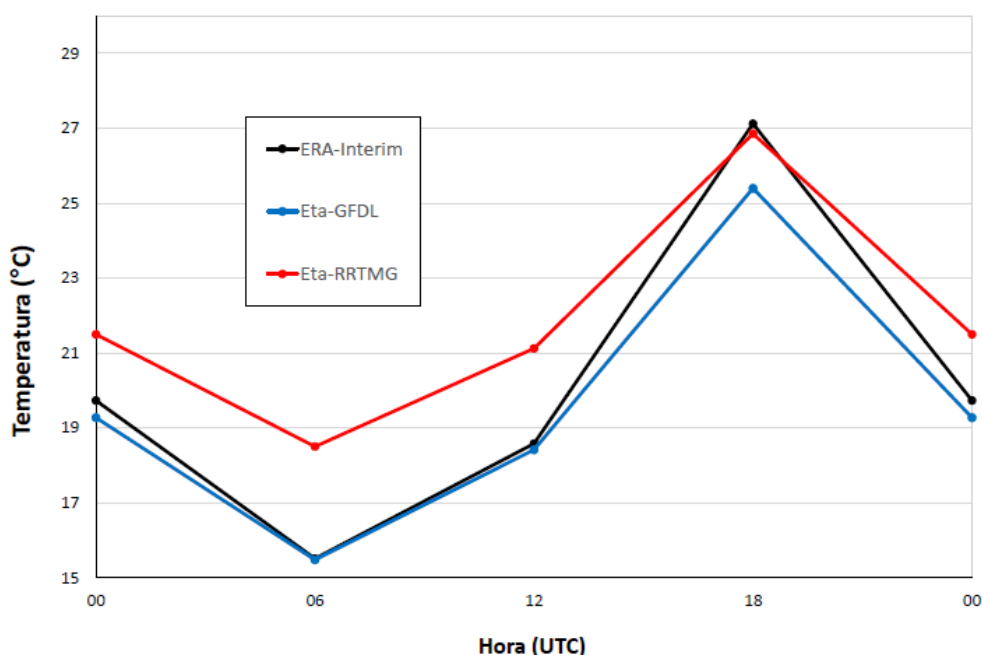


Figura 4.15 – Ciclo diurno médio da temperatura a 2 metros (°C) para o mês de Julho no domínio menor.

O gráfico revela uma proximidade maior da versão Eta-RRTMG em relação à reanálise do ERA-Interim nos horários de temperatura máxima enquanto nos horários de temperatura mínima a versão Eta-GFDL se mostrou mais próxima da reanálise. Portanto, da mesma forma que mostrado anteriormente no campo horizontal, há um aumento da temperatura a 2 metros com a utilização do esquema RRTMG (Figura 4.10), atribuído principalmente à maior absorção de energia solar pelo solo com o novo esquema.

4.4. Avaliação para a estação de Ourinhos

Para esta seção e de acordo com a Figura 4.12, foi escolhido o período com condições de céu claro bem definidas entre os dias 14 e 19 de julho. O intuito é verificar o desempenho pontual de cada versão em representar a radiação de onda curta incidente à superfície e temperatura a 2 metros baseados em dados de estação meteorológica.

Serão utilizados para avaliação das simulações, dados de temperatura do ar (superfície) e radiação global horizontal do projeto SONDA na estação meteorológica de Ourinhos/SP, localizada na posição geográfica de latitude 22° 56' 55" S e longitude 49° 53' 39" W, dados do GL e do CMSAF, para o período curto de céu claro entre 14 de julho e 19 de julho de 2008. A Figura 4.16 apresenta o resultado da validação dos dados utilizados. Percebe-se que maior parte dos dados radiométricos e meteorológicos foram aprovados no mês de Julho e auxiliam a comparação com o resultado das simulações do modelo.

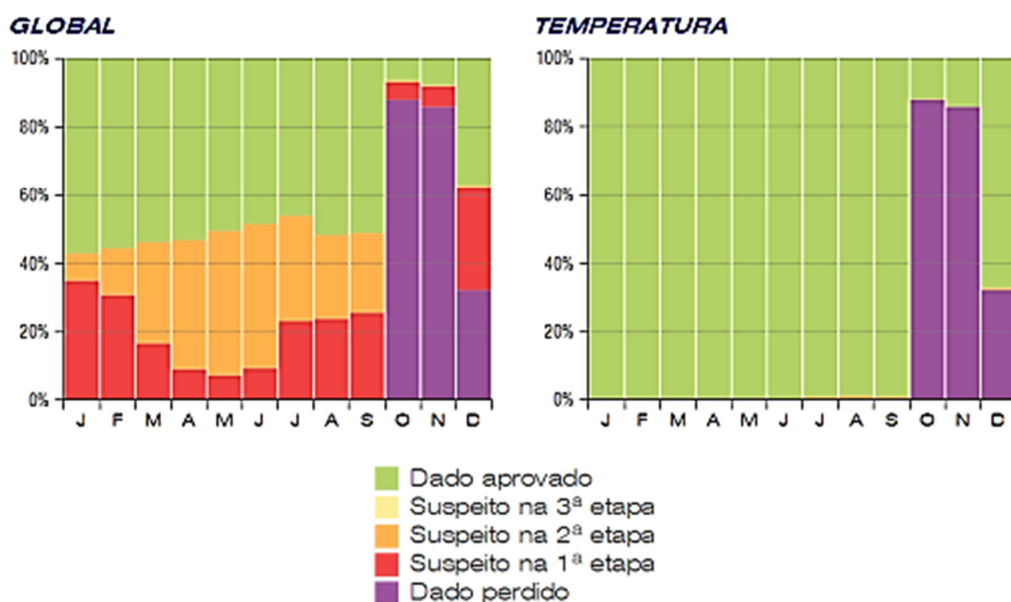


Figura 4.16 – Resultados da validação dos dados radiométricos (radiação global) e meteorológicos (temperatura) do ano de 2008 para a estação de Ourinhos/SP.

Os perfis médios de temperatura potencial equivalente e umidade específica das duas simulações, e uma avaliação objetiva dos erros apresentados pelas duas versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG em conjunto com os dados de observação do GL, SONDA e CMSAF.

4.4.1. Radiação de onda curta incidente

A Figura 4.17 mostra o ciclo diurno médio de radiação de onda curta incidente à superfície para os dados observacionais e para as duas versões em um ponto localizado na estação meteorológica. O gráfico mostra uma redução em $\sim 30 \text{ W/m}^2$ no fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície com a utilização do esquema RRTMG em relação ao GFDL.

A diferença do valor da radiação incidente no horário de pico entre a versão Eta-RRTMG e os dados da estação de Ourinhos/SP é de $\sim 41 \text{ W/m}^2$. Essa diferença diminui para $\sim 28 \text{ W/m}^2$ quando comparados com os dados do CMSAF. A comparação com os dados do GL foi prejudicada devido à ausência de dados principalmente nos horários de pico do período e durante todo o dia 18 de julho, entretanto pode-se verificar uma diferença de $\sim 45 \text{ W/m}^2$ em comparação aos dados do GL no horário das 14 UTC.

Apesar das duas versões apresentarem uma superestimativa do valor da radiação de onda curta à superfície em relação aos dados de observação, diferenças abaixo de 10% são valores aceitáveis para uma simulação numérica do fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície em condições de céu claro.

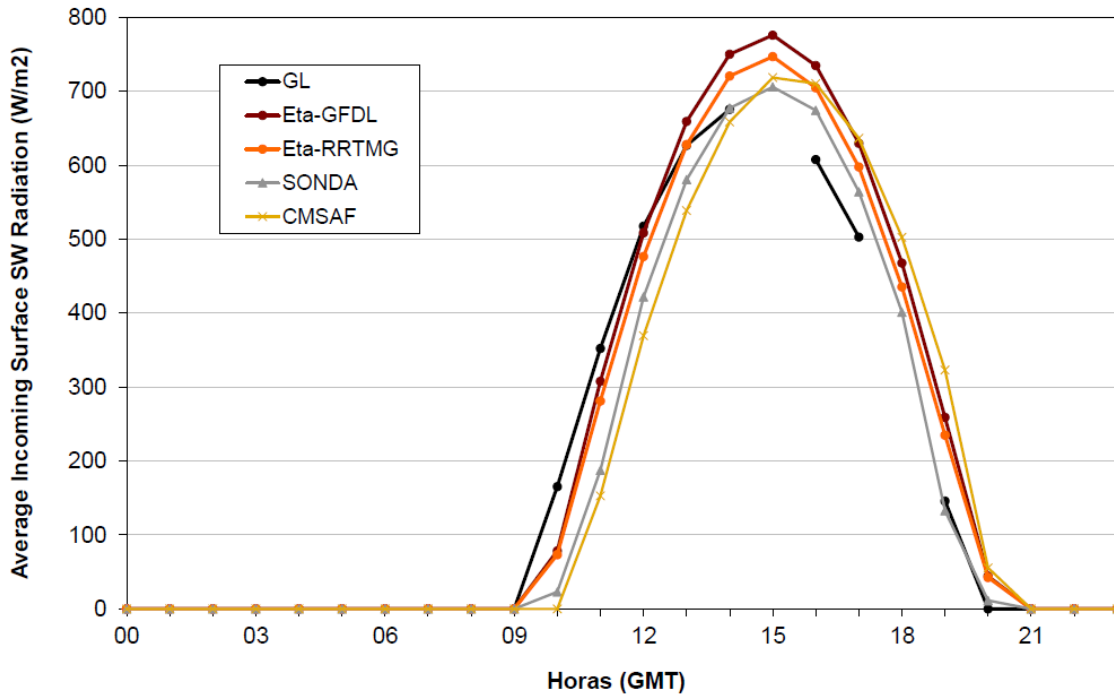


Figura 4.17 – Ciclo diurno médio de radiação de onda curta incidente à superfície (W/m^2) para a estação de Ourinhos-SP no período de 14 a 19 de julho de 2008.

4.4.2. Temperatura a 2 metros

A Figura 4.18 apresenta o ciclo diurno médio da temperatura a 2 metros para os dados da estação meteorológica e das duas simulações. O gráfico mostra desvio da versão Eta-RRTMG em relação à observação durante os horários de menor temperatura (sem radiação solar), enquanto nos horários de pico da temperatura há uma maior concordância da versão Eta-RRTMG em relação aos dados observados de Ourinhos/SP.

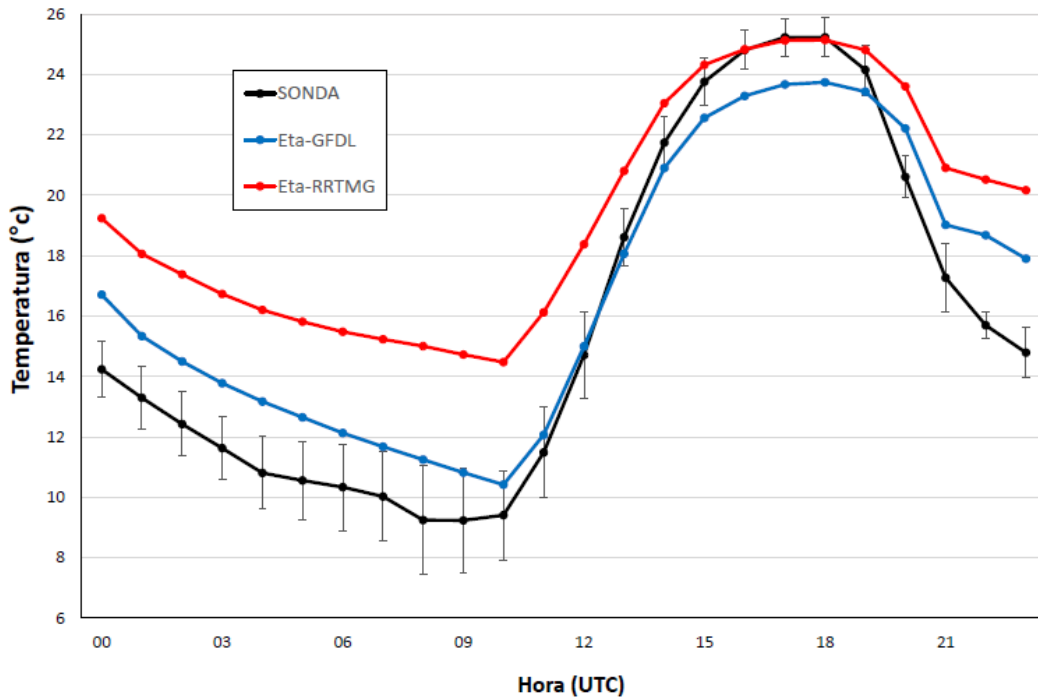


Figura 4.18 – Ciclo diurno médio da temperatura a 2 metros (°C) na estação de Ourinhos-SP para os dados do SONDA com barra de desvio padrão (preto), Eta-GFDL (azul) e Eta-RRTMG (vermelho) no período de 14 a 19 de julho de 2008.

A diferença significativa entre os valores da versão Eta-RRTMG e a observação nos horários onde não há radiação solar, pode ser atribuído ao fato do esquema RRTMG gerar mais absorção de radiação de onda curta pelo solo e conseqüentemente elevar a emissão de radiação de onda longa principalmente nos horários da madrugada, onde ocorre a predominância do fluxo de onda longa terrestre. Outra explicação para a superestimativa da temperatura a 2 metros pode ter como causa o esquema de superfície continental e camada limite superficial.

Percebe-se, na Figura 4.18, em ambas as simulações e a observação, o deslocamento do pico de temperatura em aproximadamente 17 UTC, que pode ser atribuído ao aquecimento tardio do solo a partir do horário de pico do fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície em aproximadamente 15 UTC. Este resultado mostra que o modelo superestima temperatura a 2 metros.

Infelizmente a escassez de dados radiométricos para este período limitam uma análise mais completa com a possibilidade de complementar esta avaliação, comparando com observações de outras componentes radiativas.

4.4.3. Perfis médios

Serão apresentados os perfis médios de temperatura potencial equivalente e umidade específica para avaliar o grau de absorção e emissão de radiação pela atmosfera e a quantidade de vapor d'água apresentado pelas duas versões.

A Figura 4.19 mostra o perfil médio de temperatura potencial equivalente para ambas as simulações na localização da estação de Ourinhos-SP. A temperatura potencial equivalente ou "theta-e" é a temperatura que uma parcela de ar, removendo todo seu vapor d'água, teria ao nível de pressão de referência de 1000 hPa.

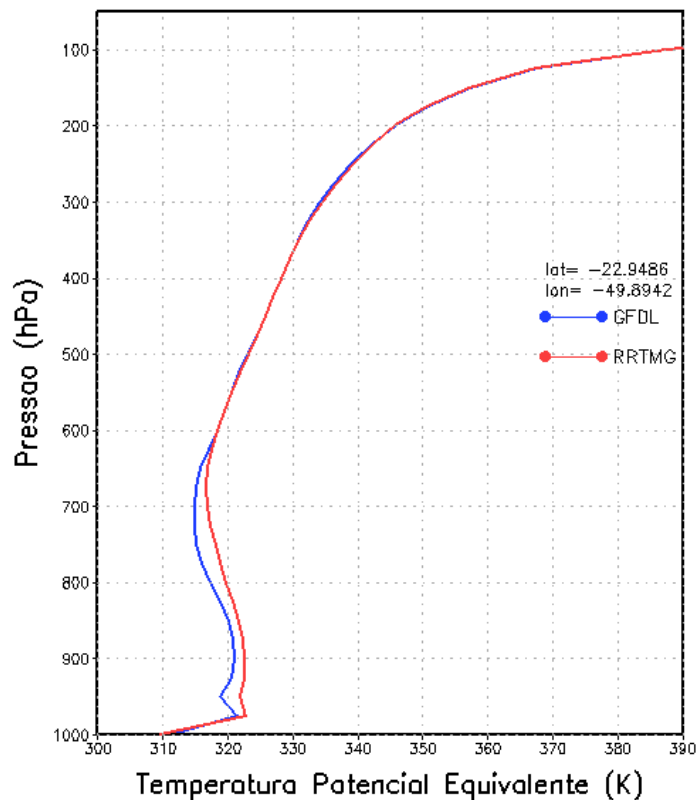


Figura 4.19 – Perfil vertical de temperatura potencial equivalente (K) para as versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG na estação de Ourinhos-SP no período de 14 a 19 de julho de 2008.

Ambas as simulações apresentam um padrão bastante semelhante da temperatura potencial equivalente exceto nas camadas atmosféricas mais baixas entre 980 e 600 hPa, onde pode-se notar uma elevação da temperatura apresentada pela versão Eta-RRTMG, que está associada à maior absorção atmosférica de radiação de onda curta pelo extenso continuum de vapor d'água implementado no novo esquema, o que caracteriza o aumento de emissão de radiação de onda longa incidente à superfície apresentado por esta versão.

Nota-se também que o perfil de temperatura potencial equivalente da versão Eta-RRTMG é mais neutro na camada entre 980 e 600 hPa. Um outro resultado interessante, que poderemos ver na Figura 4.20, é que a maior

temperatura potencial equivalente troposférica apresentada pela versão Eta-RRTMG, também sugere maior quantidade de umidade.

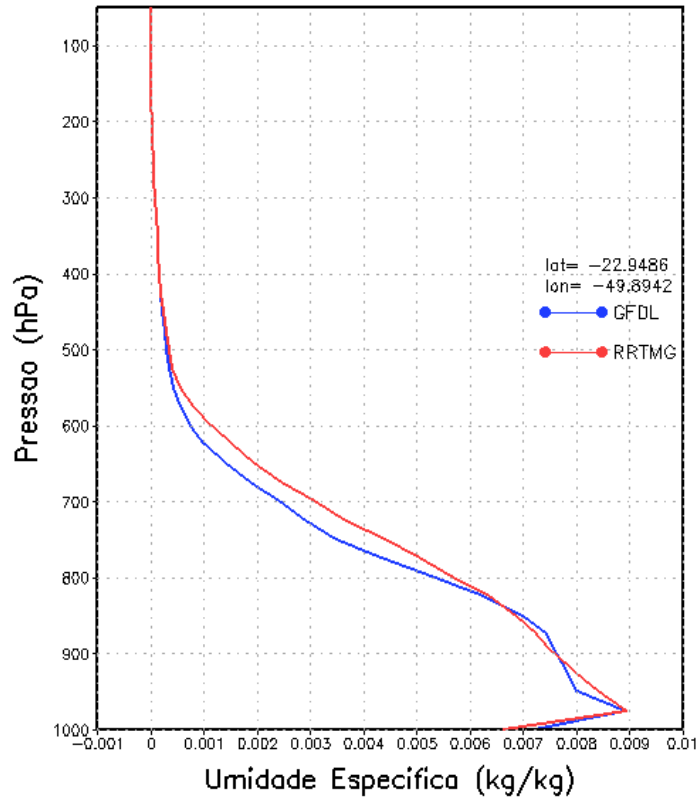


Figura 4.20 - Perfil vertical da umidade específica (kg/kg) para as versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG na estação de Ourinhos-SP no período de 14 a 19 de julho de 2008.

No caso da Figura 4.20, que apresenta a umidade específica ou a razão de quilogramas de vapor d'água por quilogramas de massa de ar úmido, nota-se que a versão Eta-RRTMG apresenta maiores valores de umidade específica em relação a versão Eta-GFDL na camada atmosférica entre 850 e 500 hPa, onde pode-se verificar a maior diferença e que está associado à uma maior absorção pelo vapor d'água fornecida pelo extenso continuum de vapor d'água existente no esquema RRTMG.

Apesar de ser uma análise pontual, este resultado pode explicar também a maior nebulosidade apresentada pela versão Eta-RRTMG.

4.4.4. Avaliação objetiva

Tabela 4.1 – Erros em relação a diferentes conjuntos de observação.

	GL		SONDA		CMSAF	
	Eta-GFDL	Eta-RRTMG	Eta-GFDL	Eta-RRTMG	Eta-GFDL	Eta-RRTMG
RMSE	48,05	41,43	55,29	39,40	58,39	49,95
BIAS	12,64	4,55	34,84	23,44	22,88	11,48
MAE	25,33	22,38	34,84	23,44	32,63	29,20
CORR	0,9733	0,9724	0,9870	0,9897	0,9695	0,9698

A Tabela 4.1 apresenta os dados de erros e correlação espacial da radiação de onda curta incidente à superfície, gerados pelas duas versões em comparação com dados do GL, dados do CMSAF e dados da estação meteorológica de Ourinhos-SP. Para esta seção, foram utilizadas as equações apresentadas na seção 3.2.6.

Nota-se que a versão Eta-RRTMG em geral, apresenta menores erros em relação a versão Eta-GFDL, como pode ser concluído também pela figura 4.21, onde apresenta um gráfico em coluna dos erros apresentados pelas duas simulações em comparação com as observações. Com destaque para a diferença de quase 16 W/m^2 na raiz do erro médio quadrático entre as versões Eta-GFDL e Eta-RRTMG, em comparação com os dados da estação de Ourinhos/SP.

Os menores erros apresentados pela nova versão são um reflexo das propriedades encontradas no esquema RRTMG, que possibilita adequar o modelo a condições atmosféricas mais realistas, com mais processos físicos e cálculos mais complexos na resolução da transferência radiativa, além da inclusão de mais contribuintes atmosféricos.

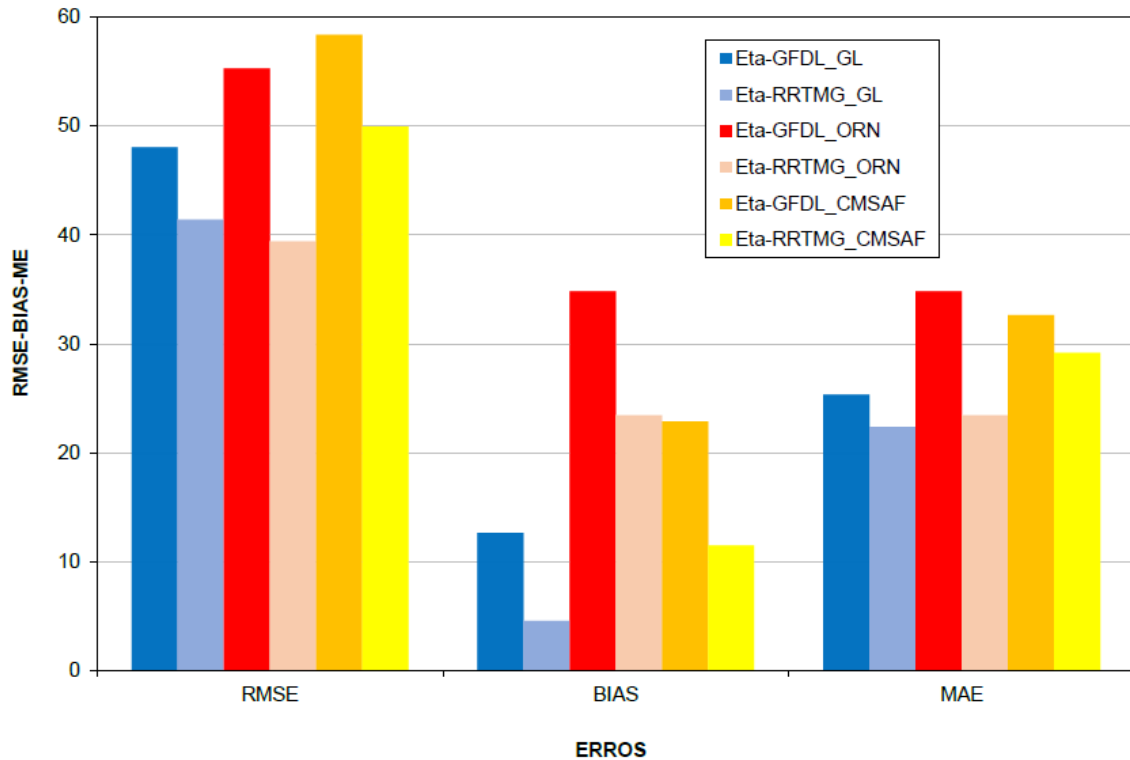


Figura 4.21 - RMSE, BIAS e MAE das duas versões em comparação com dados do GL, dados de Ourinhos e dados do CMSAF no período de 14 a 19 de julho de 2008.

A Figura 4.22 mostra os gráficos de dispersão relacionando a observação e a simulação dos dados e correlação espacial entre as versões e os dados observados. Pode-se notar que, em geral, as duas simulações apresentam boa correlação com os dados observados, contudo as correlações espaciais envolvendo a versão Eta-RRTMG e ambas as observações, se mostraram mais próximo do esperado com valores mais correlacionados em comparação com a versão Eta-GFDL

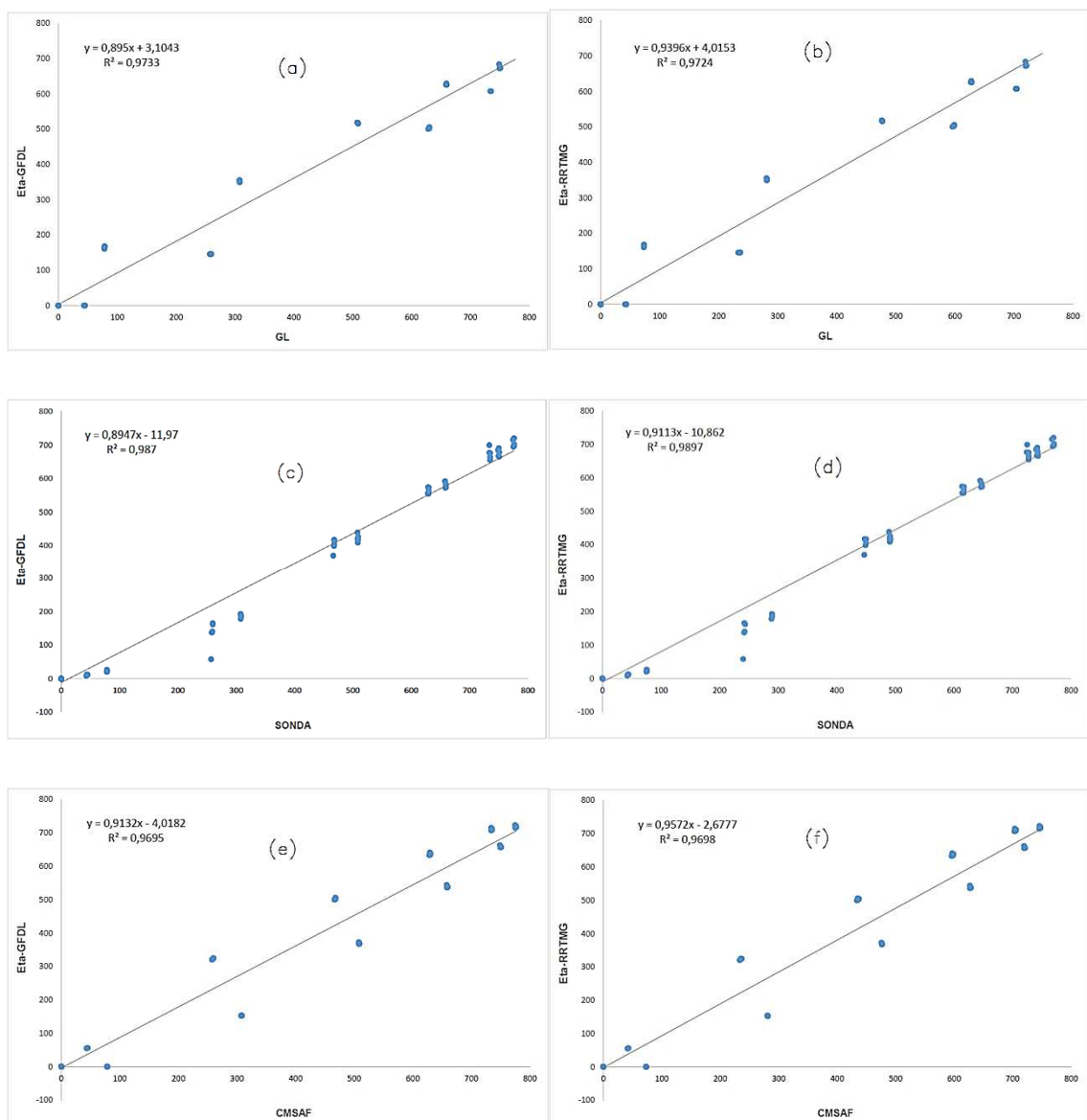


Figura 4.22 – Dispersão e correlação da radiação de onda curta incidente à superfície (W/m^2) para (a) Eta-GFDL e SONDA, (b) Eta-RRTMG e SONDA, (c) Eta-GFDL e GL, (d) Eta-RRTMG e GL, (e) Eta-GFDL e CMSAF e (f) Eta-RRTMG e CMSAF no período de 14 a 19 de julho de 2008.

5. CONCLUSÕES

Os testes apresentados neste trabalho indicam que houve uma correta implementação do esquema de parametrização de radiação atmosférica RRTMG no modelo Eta do INPE, como foi mostrado pelos resultados.

Apesar de ainda apresentar um viés positivo do fluxo de radiação de onda curta incidente à superfície em relação aos dados observados, a nova versão Eta-RRTMG mostrou melhor performance em geral, em relação à versão controle Eta-GFDL. Dessa forma, torna-se necessário realizar mais testes no modelo com a nova versão para aprimorar ainda mais a destreza do novo esquema em simular os fluxos radiativos.

Os dados e resultados apresentados confirmam que, apesar da necessidade de mais ajustes no código radiativo, como a inclusão de aerossóis, o esquema RRTMG se mostrou bastante eficiente em simular os fluxos radiativos e temperaturas próximas à superfície, reduzindo o excesso de fluxo de radiação de onda curta à superfície em relação à versão controle. O comparativo de radiação de onda curta incidente à superfície com dados observados indicam a necessidade da inserção, no modelo Eta, de um esquema de radiação mais atual e eficiente na descrição da interação da radiação solar com uma atmosfera em constante mudança. A nova versão apresentou melhores resultados também no fluxo de onda longa incidente, que é um bom indicativo da eficiência na simulação da reemissão atmosférica devido à contribuição mais ampla dos contribuintes atmosféricos inseridos no novo esquema, além de um *continuum* de vapor d'água mais extenso, que possibilita uma maior absorção atmosférica de radiação de onda longa emergente, gerando um aquecimento importante nos baixos níveis, principalmente em situações com nuvens.

Uma conclusão importante deste trabalho é que, com a correta implementação do esquema RRTMG no modelo Eta do INPE, os resultados apresentados revelam que a nova versão Eta-RRTMG foi superior à versão controle Eta-GFDL na maior parte dos casos apresentados, para as condições de céu claro

propostas neste trabalho, o que reforça a tese da necessidade de esquemas de parametrização de radiação cada vez mais precisos em modelos numéricos.

Testes futuros poderão ser realizados em rodadas de tempo em períodos com nuvens convectivas e rodadas climáticas, a fim de avaliar também o correto funcionamento do novo esquema em diversos tipos de situações atmosféricas. A realização de experimentos envolvendo períodos com bastante nebulosidade é muito importante e necessária para verificar a destreza do novo esquema em representar a cobertura de nuvens e principalmente a interação dos fluxos radiativos em céu encoberto, além de avaliar a precisão em simular casos extremos de chuva. Dessa forma, testes também no campo da precipitação serão importantes para reduzir o viés apresentado pela nova versão nos resultados.

Testes poderão ser realizados para reduzir a superestimativa do fluxo de radiação de onda longa emergente apresentado pela nova versão em relação aos dados observados, principalmente nos horários sem radiação solar, além de testes de sensibilidade na parametrização do raio efetivo de gota líquida e gelo de nuvem, para ajustar a quantidade de cobertura de nuvens e reduzir a superestimativa de precipitação da versão Eta-RRTMG, observada principalmente no oceano.

Outro teste a ser realizado é uma inserção mais realista dos efeitos de aerossóis sem a redução em 3% do valor da constante solar que foi utilizada neste trabalho em ambas as versões e cujo efeito impacta diretamente no balanço de energia, principalmente reduzindo o fluxo de radiação solar incidente à superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARADO, M. J.; PAYNE, V. H.; MLAWER, E. J.; UYMIN, G.; SHEPHARD, M. W., CADY-PEREIRA, K. E., DELAMERE, J. S., AND MONCET, J.-L. Performance of the Line-By-Line Radiative Transfer Model (LBLRTM) for temperature, water vapor, and trace gas retrievals: recent updates evaluated with IASI case studies. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 13, p. 6687-6711, 2013. doi:10.5194/acp-13-6687-2013.
- BERRISFORD, P.; DEE, D.; POLI, P.; BRUGGE, R.; FIELDING, K.; FUENTES, M.; KALLBERG, P.; KOBAYASHI, S.; UPPALA, S.; SIMMONS, A. **The ERA-Interim archive version 2.0**. Tech. rep., European Centre 647 for Medium Range Weather Forecasts, 2011. ERA report series No. 1, 23p.
- BETTS, A.K.; MILLER, M.J. A new convective adjustment scheme. Part II: single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and Arctic air-mass data sets. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v.112, p. 693-709, 1986.
- BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: Description ad forecast examples. **Wea. Forecasting**, v. 9, p. 265-278, 1994.
- BOTTINO, M. J.; VILLAS BOAS, S. Estimativa de Radiação Solar por Satélite: Processamento da Série Temporal de Janeiro de 1996 a Setembro de 2002 e Abril e Maio de 2003. Dezembro de 2006.
- BROWN, P. D.; CLOUGH, S. A.; MILLER, N. E.; SHIPPERT, T. R.; TURNER, D. D.; KNUTESON, R. O.; REVERCOMB, H. E.; SMITH, W. L.. Initial analyses of surface spectral radiance between instrument observations and line by line calculations. In: ATMOSPHERIC RADIATION MEASUREMENT (ARM) SCIENCE TEAM MEETING, 5, 1995, San Diego, California. **Proceedings...** 1995. (this volume).
- CAMPANA, K. A.; HOU, Y. Eta clear-sky radiative transfer. **MetEd, The COMET Program**. Disponível em: <http://www.meted.ucar.edu/nwp/pcu2/etarad1.htm> > Acesso em 21 de Abril de 2014. Fonte: UCAR Community Program, Maio 2005.
- CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J. O modelo GL/CPTEC de radiação solar por satélite: potencial de informações para agrometeorologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, Aracaju, SE. **Anais...** 2007. Papel. (INPE-14841-PRE/9755), 2007.

CEBALLOS, J.C.; RODRIGUES, M.L.; MACEDO, L.O. Utilização de imagens meteosat para avaliar radiação solar na América do sul: Testes com o Modelo GL versão 1.4. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17., 2012, Gramado, RS. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2012.

CHOU, S. C.; HERDIES, D. Test runs using Ncep Eta Model Over South America. In: CONFERENCE ON WEATHER ANALYSIS AND FORECASTING, 15., 1996, Norfolk, Virginia. **Proceedings...** Norfolk: American Meteorological Society 1996.

CHOU, S. C.; TANAJURA, C. A. S.; XUE, Y.; NOBRE, C. A.. Validation of the coupled Eta/SSiB Model over South America. **J. Geophys. Res.**, v. 107, n. D20, p. art. 8088, Oct. 2002. (INPE-9969-PRE/5529). doi:10.1029/2000JD000270, 2002.

CHOU, M.-D.; SUAREZ, M. J. **A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies.** Washington: NASA Tech. Rep. NASA/TM-1999-10460. v. 15, 38 p. 1999.

CLOUGH, S. A.; KNEIZYS, F. X.; DAVIES, R. W. Line shape and the water vapor continuum, **Atmos. Res.**, v. 23, p. 229-241, 1989.

CLOUGH, S. A.; IACONO, M. J.; MONCET, J.-L. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates: Application to water vapor. **J. Geophys. Res.**, v. 97, p. 15761-15785, 1992.

CLOUGH, S. A.; IACONO, M. J. Line-by-line calculation of atmospheric fluxes and cooling rates: 2. Application to carbon dioxide, ozone, methane, nitrous oxide and the halocarbons. **J. Geophys. Res.**, v. 100, n. D8, p. 16519–16535, 1995. DOI: 10.1029/95JD01386.

COLLINS, W. D., et al. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0), **NCAR Tech. Note** NCAR/TN-464+STR, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo, 2004.

EK, M.B.; MITCHELL, M.K.; LIU, Y.; ROGERS, E.; GRUNMAN, P.; KOREN, V.; GAYANO, G.; TARPLEY, J.D. Implementation of Noah Land Model advances in the NCEP operational Eta Model. **J. Geophys. Res.** V. 108, n. (D22), p. 8851-8867, 2003.

FERRARO, R. R. SSM/I derived global rainfall estimates for climatological applications, **J. Geophys. Res.**, 102, 16715-16735, 1997.

FERRARO, R. R.; WENG, F. Z.; GRODY, N. C.; ZHAO, L. M. Precipitation characteristics over land from the NOAA-15 AMSU sensor. **Geophys. Res. Lett.** 27, 2669–2672, 2000.

- FERRIER, B.S.; LIN, Y.; BLACK, T.; ROGERS, E.; DIMEGO, G. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. In: CONFERENCE ON NUMERICAL WEATHER PREDICTION, AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 15, 2002, San Antonio, TX. **Proceedings...** San Antonio, 2002. p 280–283 (preprint).
- FELS, S. B.; SCHWARZTKOPF, M. D. The simplified exchange approximation. A new method for radiative transfer calculations. **J. Atmos. Sci.**, v.32, p. 1475-1488, 1975.
- FOWLE, F. E. The transparency of aqueous vapor. **Astrophys. J.**, v. 42, p. 394-411, 1915.
- FU, Q. An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models. **J. Climate**, v. 9, p. 2058–2082, 1996. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<2058:AAPOTS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<2058:AAPOTS>2.0.CO;2).
- GEORGE, J.P.; BEGUM, Z. N. Impact of different radiation transfer parameterization schemes in a GCM on the simulation of the onset phase of Indian summer monsoon. **Atmosfera**, v.10, p. 1-22, 1997.
- HARTMANN D.L. (1994). Global physical climatology. International Geophysics series, volume 56. **Academic Press**, 412 pp.
- HINKELMAN, L. M.; ACKERMAN, T. P.; MARCHAND, R.T. An evaluation of NCEP Eta Model predictions of surface energy budget and cloud properties by comparison with measured ARM data. **J. Geophys. Res.**, v. 104, n. 19, p. 535–19 549, 1999.
- HU, Y. X.; STAMNES, K. An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models. **J. Clim.** v. 6, ; p. 728-742, 1993.
- IACONO, M. J.; MLAWER, E. J.; CLOUGH, S. A.; MORCRETTE, J.-J. Impact of an improved longwave radiation model, RRTM, on the energy budget and thermodynamic properties of the NCAR community climate model, CCM3. **J. Geophys. Res.**, v. 105, n. (D11), p. 14873–14890, 2000. doi:[10.1029/2000JD900091](https://doi.org/10.1029/2000JD900091).
- IACONO, M. J.; PINCUS, R.; HANNAY, C. Representing sub-grid scale cloud variability with McICA and RRTMG in the NCAR Community Atmosphere Model, CAM3. In: ATMOSPHERIC RADIATION MEASUREMENT (ARM) SCIENCE TEAM MEETING, 16., 2006, Albuquerque, New Mexico. **Poster Presentation...** Aluquerque, 2006.

JANJIC, Z.I. The step-mountain coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. **Mon. Weather Rev.** v.122, p. 927–945, 1994.

JANJIC, Z. I. The step-mountain coordinate: physical package, **Mon. Weather Rev.**, 118, 1429–1443, 1990.

JONES, P.D.; HARRIS, I. **CRU TS3.21**: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.21 of high resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901- Dec. 2012). University of East Anglia Climatic Research Unit, NCAS British Atmospheric Data Centre, 24th September 2013. doi:10.5285/D0E1585D-3417-485F-87AE-4FCECF10A992. 2013.

JOYCE, R. J.; JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P. A.; XIE, P. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. **J. Hydromet.**, v. 5, p. 487-503, 2004.

KALLOS, G.; NICKOVIC, S.; JOVIC, D.; KAKALIAGOU, O.; PAPADOPOULOS, A.; MISIRLIS, N.; BOUKAS, L.; MIMIKOU, N. The ETA model operational forecasting system and its parallel implementation. IN: WORKSHOP ON LARGE-SCALE SCIENTIFIC COMPUTATIONS, 1., 1997, Varna, Bulgaria, 7–11 June. **Proceedings...** Varna, 1997.

KALLOS, G.; PAPADOPOULOS, A.; KATSAFADOS, P.; NICKOVIC, S. Transatlantic Saharan dust transport: Model simulation and results. **J. Geophys. Res.**, v. 111, n. D09204, 2006. doi:10.1029/2005JD006207.

KARLSSON, K.-G.; RIIHELÄ, A.; MÜLLER, R.; MEIRINK, J. F.; SEDLAR, J.; STENGEL, M., LOCKHOFF, M., TRENTMANN, J., KASPAR, F., HOLLMANN, R.; WOLTERS, E. **CLARA-A1**: CM SAF clouds, Albedo and radiation dataset from AVHRR data - edition 1 - Monthly Means / Daily Means / Pentad Means / Monthly Histograms. Satellite Application Facility on Climate Monitoring. DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/CLARA_AVHRR/V001.http://dx.doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/CLARA_AVHRR/V001, 2012.

KUMMEROW, C.; HONG, Y.; OLSON, W. S.; YANG, S.; ADLER, R. F.; MCCOLLUM, R. J.; FERRARO, R.; PETTY, G.; SHIN, D-B.; WILHEIT, T. T. The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for Rainfall Estimation from Passive Microwave Sensors. **J. Appl. Meteor.**, 40, 1801–1820, 2001. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1801:TEOTGP>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1801:TEOTGP>2.0.CO;2).

LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. **J. Atmos. Sci.**, v., 31, p. 118-133, 1974.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; YAMASHITA, C.; PEREIRA, S. V.; MANTELLI NETO, S. L. Base de dados climático-ambientais aplicados ao setor energético - Projeto SONDA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3563-3570. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12734-PRE/8024). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.16.26>>. 2005.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysical Physics and Space Physics**, v.20, p.851–875, 1982.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models, **Riv. Meteor. Aeronaut.**, 44, 195–202, 1984.

MESINGER, F.; CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; JOVIC, D.; LYRA, A.A.; BUSTAMANTE, J.F.; BASTOS, P.R.; LAZIC, L.; MORELLI, S.; RISTIC, I. An upgraded version of Eta Model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, n. 3-4, p. 63-79, May 2012. doi:<[10.1007/s00703-012-0182-z](https://doi.org/10.1007/s00703-012-0182-z)>.

MESINGER, F.; JANJIC, Z. I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; AND DEAVEN, D. G. The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment, **Mon. Weather Rev.**, 116, 1493–1518, 1988.

MLAWER, E. J.; PAYNE, V. H.; MONCET, J.-L.; DELAMERE, J. S.; ALVARADO, M. J.; TOBIN, D. D. Development and recent evaluation of the MT_CKD model of continuum absorption. **Philos. T. Roy. Soc.**, v. 370, p. 2520–2556, 2012. doi:10.1098/rsta.2011.0295.

MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S. J.; BROWN, P. D.; IACONO, M. J.; CLOUGH, S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. **J. Geophys. Res.**, v.102, n. 16, p. 663-16,682, 1997.

MORCRETTE, J.-J.; BARKER, H. W.; COLE, J. N. S.; IACONO, M. J.; PINCUS, R. Impact of a new radiation package, McRad, in the ECMWF integrated forecasting. **System. Mon. Wea. Rev.**, v.136, p. 4773–4798, 2008. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2008MWR2363.1>.

MORCRETTE J.-J.; MLAWER, E. J.; IACONO, M. J.; CLOUGH, S. A. Impact of the radiation-transfer scheme RRTM in the ECMWF forecasting system. **ECMWF Newsletter**, n. 91, Summer 2001.

PAULSON, C.A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **Journal of Applied Meteorology**, v.9, p.857–861, 1970.

POSSELT, R.; MÜLLER, R.; STÖCKLI, R.; TRENTMANN, J. CM SAF Surface radiation MVIRI Data Set 1.0 - **Monthly Means / Daily Means / Hourly Means**. Satellite Application Facility on Climate Monitoring. DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/RAD_MVIRI/V001, 2011.
http://dx.doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/RAD_MVIRI/V001

RAMASWAMY, V.; FREIDENREICH, S.M. A study of broadband parameterizations of the solar radiative interactions with water vapor and water drops. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. (D11), p. 11487-11512, 1992.

RICHIAZZI, P.; YANG, S.; GAUTIER, C.; SOWLE, D. SBDART: A research and teaching software tool for plane parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. **Bull. American Meteor. Soc.**, v. 79, n. 10, p. 2101-2114, 1998.

RODGERS, C. D.; WALSHAW, C. D. The computation of infrared cooling rate in planetary atmospheres. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 92, p. 67-92, 1966.

ROTHMAN, L. S.; GAMACHE, R. R.; TIPPING, R. H.; RINSLAND, C. P.; SMITH, M.A.H.; BENNER, D. C.; MALATHY D., V.; FLAUD, J.-M.; CAMY-PERET, C.; PERRIN, A.; GOLDMAN, A.; MASSIE, S. T.; BROWN, L. R. TOTH, R. A. HITRAN molecular database: Edition '92. **J. Quant Spectrosc.Radiat. Transfer**, v. 48, p. 469-507, 1992.

SAHA, S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 91, p.1015-1057, 2010.

SPYROU, C.; KALLOS, G.; MITSAKOU, C.; ATHANASIADIS, P.; KALOGERI, C.; AND IACONO, M. Radiative effects of desert dust on weather and regional climate. **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, v.13, p. 1327-1365, 2013. doi:10.5194/acpd-13-1327-2013.

TARASOVA, T. A.; FERNANDEZ, J. P. R.; PISNICHENKO, I. A.; MARENGO, J. A.; CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J. Impact of new solar radiation parameterization in the eta model on the simulation of summer climate over south america. **J. Appl. Meteor. Climatol.**, v. 45, p. 318–333, 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAM2342.1>.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T. Tracking Earth's Energy: From El Niño to Global Warming, **Surv. Geophys.**, 33, 413-426, 2011.
doi: [10.1007/s10712-011-9150-2](https://doi.org/10.1007/s10712-011-9150-2)

YAMAMOTO, G. Direct absorption of solar radiation by atmospheric water vapor, carbon dioxide and molecular oxygen. **J. Atmos. Sci.**, v. 19, p. 182-188, 1962.

ZAMORA, R. J.; S. SOLOMON, E. G. DUTTON, ET AL. (2003). Comparing MM5 radiative fluxes with observations gathered during the 1995 and 1999 Nashville southern oxidant studies. **J. Geophys. Res.**, 108, 2003.
doi:10.1029/2002JD002122.

ZDUNKOWSKI, W. G.; WELSCH, R. M.; KORB, G. J. An investigation of the structure of typical 2-stream methods for the calculation of solar fluxes and heating rates in clouds. **Contrib. Atmos. Phys.**, v. 53, p. 215–238, 1980.