UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

GABRIEL PEREIRA

**Impactos das atualizações do uso e cobertura da terra e das características físico-
químicas da vegetação na América do Sul em modelos climáticos**
(Versão Corrigida)

São Paulo
2012

<p>PEREIRA G. ou PEREIRA GABRIEL</p>	<p>IMPACTOS DAS ATUALIZAÇÕES DO USO E COBERTURA DA TERRA E DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA VEGETAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL EM MODELOS CLIMÁTICOS</p>		<p>DOUTORADO FFLCH-USP 2012</p>
--	--	--	---

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

GABRIEL PEREIRA

Impactos das atualizações do uso e cobertura da terra e das características físico-químicas da vegetação na América do Sul em modelos climáticos

(Versão Corrigida)

Tese apresentada à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Geografia

Área de Concentração: Geografia Física

Orientadora: Profa. Dra. Maria Elisa Siqueira Silva

Co-Orientadora: Profa. Dra. Elisabete Caria Moraes

“De acordo”

Profa. Dra. Maria Elisa Siqueira Silva

São Paulo

2012

III

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Catálogo na Publicação
Serviço de Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

Pereira, Gabriel.

Impactos das atualizações do uso e cobertura da terra e das características físico-químicas da vegetação na América do Sul em modelos climáticos / Gabriel Pereira; orientadoras Prof. Dra. Maria Elisa Siqueira Silva e Prof. Dra. Elisabete Caria Moraes .

-- São Paulo, 2012.

111 p. -- (Tese de doutorado)

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Geografia. Área de Concentração: Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.

1. Uso e ocupação do solo. 2. Modelos Climáticos. 3. RegCM4. 4. Sensoriamento Remoto. 5. Análise Ambiental. I. Impactos das atualizações do uso e cobertura da terra e das características físico-químicas da vegetação na América do Sul em modelos climáticos.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Pereira

Impactos das atualizações do uso e cobertura da terra e das características físico-químicas da vegetação na América do Sul em modelos climáticos

Tese apresentada à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Geografia

Área de Concentração: Geografia Física

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

RESUMO

PEREIRA, G. **Impactos das atualizações do uso e cobertura da terra e das características físico-químicas da vegetação na América do Sul em modelos climáticos**. 2011. 111 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

As mudanças de uso e cobertura da terra ocasionam alterações no balanço de energia, na temperatura do ar, na precipitação, na umidade do ar e na circulação regional e global. Consequentemente, mapas de uso e cobertura da terra e suas respectivas características físico-químicas e biológicas constituem-se em uma importante variável na modelagem numérica de sistemas terrestres. Entretanto, na maioria dos modelos regionais de previsão do tempo e clima, o mapa de uso e cobertura da terra não é atualizado com frequência e encontra-se defasado, o que influencia os resultados das simulações. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo principal verificar o impacto nas simulações numéricas do RegCM4 oriundas da atualização do mapa de uso e cobertura da terra e dos parâmetros físicos como, por exemplo, o índice de área foliar (IAF), a reflectância no visível ($\leq 0,7\mu\text{m}$) e no infravermelho próximo e médio ($>0,7\mu\text{m}$) utilizados pelo *Biosphere Atmosphere Transfer Scheme* (BATS), além da validação dos dados provenientes do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Consequentemente, a comparação entre os dados de precipitação mensal estimada pelo TRMM e 183 estações meteorológicas espalhadas por todo o Brasil apresentam uma concordância de aproximadamente 97%. Ainda, em relação à precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima, obtém-se um melhor ajuste do modelo RegCM4 quando os dados de entrada do modelo são compostos pelas reanálises do SST-ERA-Interim e ERA-Interim e com a parametrização cúmulos proposta por Emmanuel. A partir da atualização do uso e cobertura da terra utilizado no modelo de superfície BATS para o ano 2007 obteve-se uma melhora de 10% na simulação da precipitação, aumentando de 0,84 para 0,92 o coeficiente de correlação (significante a $p < 0,05$, teste *t-student*). Do mesmo modo, a simulação realizada com a alteração dos valores de fração máxima de cobertura vegetal apresentou valores de precipitação 18% acima dos observados. Ainda, as alterações da reflectância no visível e no infravermelho próximo e do índice de área foliar superestimaram a precipitação em 19% e 23%. Ressalta-se que todas as simulações apresentaram boa concordância no que diz respeito à temperatura máxima e mínima, apresentando valores muito próximos ao esperado. A variação trimestral dos parâmetros físicos utilizados pelo modelo de superfície BATS reduziram para 3% as superestimativas de precipitação, provendo uma correlação de 92% (significante a $p < 0,05$, teste *t-student*). Em relação às variáveis meteorológicas, as principais diferenças encontradas na evapotranspiração, precipitação, umidade relativa do ar e temperatura a 2 metros concentram-se na região noroeste do Estado do Mato Grosso, nas divisas dos Estados de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso com a Bolívia (áreas alagadas do Pantanal brasileiro), região noroeste do Paraguai e para a região da Bacia do Rio da Prata na Argentina, Região Nordeste do Brasil entre outras, devido principalmente à alteração da classe Floresta Ombrófila Densa para áreas de pastagem e agricultura e à substituição de áreas de agricultura por áreas de gramíneas, pastagem, vegetação arbustiva e Floresta Estacional Decidual.

Palavras-Chave: Uso e cobertura da terra. RegCM4. Sensoriamento Remoto. Parâmetros físicos.

ABSTRACT

PEREIRA, G. **Impacts caused by updating the land use and land cover and the physical-chemical properties of vegetation to South America in climatic models.** 2011. 111 p. Thesis (Doctoral) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

The land use and land cover changes modify the air temperature, precipitation, air moisture, energy balance and regional and global circulations. Consequently, the land use and land cover maps and its physical-chemical and biological properties are important variables for numerical modeling of terrestrial systems. However, in most of regional weather and climate models the land use and land cover maps are not frequently updated, being out-of-date and, influencing the results of simulations. Therefore, this work has as main objective to analyze the impacts in numerical simulations by RegCM4 of land use and land cover maps updating, as well as the alteration of physical parameters, such as the leaf area index (LAI), the visible ($<0.7 \mu\text{m}$) and near infrared and medium ($> 0.7 \mu\text{m}$) reflectance used by the Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS). The validation of simulated precipitation by comparison to the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) data is also an objective. The comparison between monthly precipitation data estimated by TRMM and the 183 weather stations distributed throughout Brazil presented a concordance of approximately 97%. Also related to rainfall, maximum and minimum temperature simulations, better assessments of RegCM4 were found when SST-ERA-Interim, ERA-Interim reanalysis and cumulus parameterization proposed by Emmanuel were used. In addition, the update of the South America 2007 land use and land cover map used by BATS has improved the simulation of precipitation in 10%, increasing the correlation coefficient from 0.84 to 0.92 (significant at $p < 0.05$, t-test student). Moreover, the results show good agreement between simulated and observed maximum and minimum temperature, with correlation coefficients near to 0.95 for both variables. Correspondingly, the simulations performed with adjustments on maximum fractional of vegetation cover showed precipitation mean value 18% above the observed data. Changes in visible and infrared reflectance and in the leaf area index overestimated the precipitation in 19% and 23%, respectively. It is noteworthy that all simulations showed good agreement for maximum and minimum temperature, with values very close to those observed. The three-monthly (seasonal) change of the physical parameters, which characterize the surface model BATS, provided a reduction of 3% in the mean simulated precipitation if compared to the results obtained without seasonal variation of surface parameters. The linear correlation between simulated and observed monthly precipitation obtained by considering seasonal changes in the surface parameter was equal to 92% (significant at $p < 0.05$, Student's t-test). Regarding to atmospheric variables, the more significant differences observed in evapotranspiration, precipitation, relative humidity and temperature above two meters from surface are located in the northwest of Mato Grosso state, at the Mato Grosso do Sul, Mato Grosso states and the Bolivia bordering (placed on the Brazilian Pantanal wetlands), over Northeastern Brazil region, northwestern Paraguay, and River Plate Basin, among others. These important differences are due to the substitution of Tropical Rain Forest by pasture and agriculture and, the replacement of agricultural areas by areas of grass pasture, shrub and Deciduous Forest.

Keywords: Land-use and Land-cover. RegCM4. Remote Sensing. Physical parameters.

Lista de Ilustrações

Figura 1. Localização da área de estudo e respectiva altimetria (m).....	14
Figura 2. Massas de ar que afetam diretamente a região de estudo: mPa - Massa de ar Polar Atlântica; mTa - Massa de ar Tropical Atlântica; mEc - Massa de ar Equatorial Continental; mEa - Massa de ar Equatorial Atlântica; e mTc - Massa de ar Tropical Continental.	17
Figura 3. Estimativa para o dia 01 de janeiro de 2007 da temperatura do ar (em Kelvin) proveniente dos dados de reanálises do ERA-Interim (a) e NNPR1 (b); e estimativa de TSM (em Kelvin) a partir dos dados do SST-ERA-Interim (c) e OISST (d).	20
Figura 4. Estações meteorológicas utilizadas pelo Grupo de Previsão Climática do INPE para a Krigagem dos dados de precipitação, temperatura mínima e temperatura máxima.	21
Figura 5. Anomalia de precipitação estimada pelo TRMM para o ano 2007; valores em vermelho representam anomalias negativas (região mais seca) e os valores em azul representam anomalias positivas (mais chuvosa).	23
Figura 6. (a) Índice de vegetação mensal estimado pelo produto MOD13C2 para julho de 2007; (b) Mosaico de 16 dias para o albedo da superfície (04 a 20 de julho de 2007); e (c) Mosaico de 8 dias do índice de área foliar (IAF) entre 12 e 20 de julho de 2007.....	24
Figura 7. Imagem do sensor MODIS, composição 3B4G1R (cor verdadeira), com os dados disponibilizados pelo CANASAT (laranja) e CAFESAT (amarelo) e áreas urbanas delimitadas pelo fatiamento do mapa de luzes do OLS/DMSP (vermelho).	25
Figura 8. Mapa de uso e cobertura da terra utilizado pelo BATS proveniente do GLCC para o ano de 1992.....	29
Figura 9. Fluxograma da metodologia, dividido em 5 etapas principais.	34
Figura 10. Relação entre os dados mensais de precipitação para o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2010, disponibilizados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE (eixo x, em mm) e estimados pelo TRMM (eixo y, em mm) para: (a) Região Centro-Oeste; (b) Região Sul; (c) Região Norte; (d) Região Sudeste; (e) Região Nordeste; e (f) Brasil.....	36
Figura 11. Distribuição mensal da precipitação acumulada para as regiões brasileiras: (a) Centro-Oeste; (b) Norte; (c) Nordeste; (d) Sul; e (e) Sudeste.	38
Figura 12. Valores médios da precipitação anual para o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2010. (a) Valores médios da precipitação anual estimada a partir dos dados disponibilizados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE (SYNOP/INMET, PCDs e parceiros do PMTCRH/INPE); e (b) Valores médios da precipitação anual estimada pelo TRMM.	40
Figura 13. Valores anuais médios para o ano de 2007 da precipitação (mm), da temperatura máxima (°C) e da temperatura mínima (°C) simulados pelo RegCM4 e observados pelo TRMM e INMET/CPTEC (e, f, g).	41
Figura 14. Valores anuais médios para o ano de 2007 da precipitação (mm), da temperatura máxima (°C) e da temperatura mínima (°C) estimados pelo TRMM e pelo INMET/CPTEC e a	

partir das simulações realizadas no RegCM4 utilizando o modelo de superfície CLM e diferentes condições iniciais, de contorno lateral e de parametrização cúmulos.45

Figura 15. (a) Mapa de uso e cobertura da terra de 1992 do GLCC atualmente inserido no modelo RegCM4; (b) Mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2007 proveniente do produto MCD12Q1 (para a América do Sul); (c) Atualização do mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2007 elaborado com base no produto MCD12Q1 e nos dados do PRODES, CANASAT, CAFESAT e mapa de luzes.....47

Figura 16. Relação entre os dados mensais de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima a 2 metros simulados pelo RegCM4 com base no mapa de uso e cobertura original (GLCC 1992; a, c, e) e com a alteração do mapa de uso e cobertura (b, d, f) para o ano de 2007 e seus respectivos coeficientes de determinação (r^2) e equação da reta, com base nos dados das estações meteorológicas do INMET/CPTEC.....51

Figura 17. Simulações de precipitação (a, b), temperatura máxima (d, e) e temperatura mínima (g, h) para o ano de 2007 a partir do emprego do mapa de uso e cobertura original (**B_UO_SE_EI_EM**) e a partir do mapa atualizado para 2007 (**B_UA_SE_EI_EM**), respectivamente; (c) mapa anual de precipitação estimada pelo TRMM; (f) mapa anual da média de temperatura máxima proveniente do INMET/CPTEC; (i) mapa anual da média de temperatura mínima estimado do INMET/CPTEC.53

Figura 18. (a) Precipitação anual total em 2007 estimada a partir do emprego do mapa de uso e cobertura atualizado para 2007 (**B_UA_SE_EI_EM**) sem alteração dos valores de FCV; (b) Precipitação anual total estimada considerando-se a alteração dos valores de FCV (**B_UA_SE_EI_EM_BA-FCV**); e (c) Relação entre os dados mensais de precipitação simulados pelo RegCM4 com a alteração dos valores de FCV e do uso e cobertura do solo (eixo y) e os dados de precipitação estimados pelo TRMM (eixo x).....55

Figura 19. (a) Precipitação anual total (2007) estimada pelo emprego do mapa de uso e cobertura atualizado para 2007 (**B_UA_SE_EI_EM**) sem alteração dos valores de RVIVPM; (b) Precipitação anual total estimada com a alteração dos valores de RVIVPM (**B_UA_SE_EI_EM_BA-REF**); e (c) Relação linear entre os dados mensais de precipitação simulados pelo RegCM4 pela alteração dos valores de RVIVPM e do uso e cobertura do solo (eixo y) e os dados de precipitação estimados pelo TRMM (eixo x).....57

Figura 20. IAF para a região noroeste da Floresta Amazônica demonstrando a interferência das nuvens no produto MCD15A2 (20/07/2007).58

Figura 21. (a) Precipitação anual total para 2007 estimada a partir do emprego do mapa de uso e cobertura atualizado para 2007 (**B_UA_SE_EI_EM**) sem alteração dos valores de IAF; (b) Precipitação anual total estimada a partir da alteração dos valores de IAF (**B_UA_SE_EI_EM_BA-IAF**); e (c) Relação entre os dados mensais de precipitação simulados pelo RegCM4, para 2007, a partir da alteração dos valores de IAF e do uso e cobertura da terra (eixo y) e os dados de precipitação estimados pelo TRMM (eixo x)..... 60

Figura 22. (a) Valores de NDVI para os meses de Janeiro, Fevereiro e Março (JFM); (b) Valores de NDVI para os meses de Abril, Maio e Junho (AMJ); (c) Valores de NDVI para os

meses de Julho, Agosto e Setembro (JAS); e (d) Valores de NDVI para os meses de Outubro, Novembro e Dezembro (OND) para o ano de 2007..... 61

Figura 23. (a) Precipitação anual total estimada a partir do emprego do mapa de uso e cobertura da terra atualizado para 2007 (**B-UA-SE-EI-EM**); (b) Mapa anual de precipitação estimada pelo TRMM para o ano de 2007; (c) e (d) Precipitação anual total estimada a partir da variação trimestral dos parâmetros físicos e alteração da parametrização cúmulos, respectivamente (**B-UA-SE-EI-EM ou EMMOD**)-**BA-FCV-IAF-REF-TMP**); (e) e (f) Relação entre os dados mensais de precipitação simulados pelo RegCM4 e os dados de precipitação estimados pelo TRMM para cada simulação, respectivamente (EM e EMMOD). 63

Figura 24. Diferença entre a evapotranspiração trimestral média (mm.dia^{-1}) estimada a partir da simulação da variação dos parâmetros físicos (FCV, IAF, REF) e as condições originais do modelo de superfície BATS para o ano de 2007. 65

Figura 25. (a) Evapotranspiração anual total para 2007 simulado no RegCM4; (b) Evapotranspiração anual total para 2007 estimada a partir da alteração dos parâmetros físicos a cada 3 meses utilizado pelo modelo de superfície BATS; (c) Evapotranspiração anual total para 2007 estimada pelo sensor MODIS (produto MOD16A3). 66

Figura 26. Diferença entre a evapotranspiração trimestral média (mm.dia^{-1}) estimada a partir da simulação da variação dos parâmetros físicos (FCV, IAF, REF) e com as condições originais do modelo de superfície BATS para o período de 10 anos, 2000 a 2009. 68

Figura 27. Mapa atualizado do uso e cobertura da terra (a), (c), e (e); mapa de uso e cobertura da terra de 1992 do GLCC utilizado como padrão para o modelo de superfície BATS (b), (d) e (f) para a borda da Floresta Amazônica (I), Região Nordeste (II) e Região Sul e Sudeste (III), respectivamente. O quadro superior indica as regiões I, II e III. 69

Figura 28. Média da evapotranspiração anual entre 2000 e 2009 para: (a) simulação realizada pelo RegCM4; (b) simulação pelo RegCM4 considerando-se a alteração dos parâmetros físicos utilizados pelo modelo de superfície BATS; e (c) estimada pelo sensor MODIS (produto MOD16A3). 71

Figura 29. Diferença trimestral da precipitação simulada pelo RegCM4 com e sem alterações da parametrização física do BATS e utilizando as condições padrão (a-d); e precipitação anual de 2007 a partir das simulações no RegCM4 com a alteração dos parâmetros físicos e uso e cobertura da terra (e), com as condições padrão do modelo (f) e estimada pelo TRMM (g)... 73

Figura 30. Diferença nas estimativas trimestrais (a-d) de precipitação decadal (2000-2009) entre as simulações realizadas pelo RegCM4 com e sem alteração na parametrização física do BATS. Média decadal da precipitação anual a partir das simulações no RegCM4 com a alteração dos parâmetros físicos e uso e cobertura da terra (e), com as condições padrão do modelo (f) e estimada pelo TRMM (g). 75

Figura 31. Diferença entre a umidade relativa do ar trimestral média (%) estimada a partir da simulação da variação dos parâmetros físicos (FCV, IAF, REF) e as condições originais do modelo de superfície BATS para o ano de 2007. 77

Figura 32. Diferença das estimativas da umidade relativa do ar trimestral, (a) JAN/FEV/MAR, (b) ABR/MAI/JUN, (c) JUL/AGO/SET e (d) OUT/NOV/DEZ, resultantes das duas simulações realizadas para o período de 2000 a 2009. Média decadal da umidade relativa do ar anual para as simulações obtidas do RegCM4 e para a climatologia estimada pelos dados do INMET/CPTEC (1961 a 2001), (e), (f) e (g), respectivamente.....	79
Figura 33. Diferença nas estimativas trimestrais da temperatura do ar a 2 metros de altitude resultantes das simulações realizadas pelo RegCM4 para (a) JAN/FEV/MAR, (b) ABR/MAI/JUN, (c) JUL/AGO/SET e, (d) OUT/NOV/DEZ.....	81
Figura 34. Diferença nas estimativas trimestrais da temperatura do ar a dois metros da superfície (2000-2009) para (a) JAN/FEV/MAR, (b) ABR/MAI/JUN, (c) JUL/AGO/SET e (d) OUT/NOV/DEZ considerando se as duas simulações propostas; e (e, f) média anual da temperatura do ar a 2 metros da superfície para o período de 2000 a 2009 e (g) estimada com base nos dados do INMET/CPTEC para o período de 1961 a 2001.	83
Figura 35. Áreas de uso e cobertura da terra (em marrom) que foram substituídas por outros usos relativos ao mapa do MCD12 (2007) quando comparados ao mapa original (GLCC, 1992) implementado no modelo RegCM4 e utilizado pelo esquema de superfície BATS; localização dos seis pontos selecionados para estudos de caso.....	85
Figura 36. Valores mensais de evapotranspiração (mm.dia^{-1}), precipitação (mm), temperatura a dois metros de altura ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar incidente (W.m^{-2}) para o ponto 1, de Jan/2000 a Jan/2010, referente à substituição de áreas de floresta ombrófila densa por pastagem e agricultura para a simulação de controle (em vermelho) e para a simulação com alteração dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra (em preto, linha tracejada).	86
Figura 37. Valores mensais de evapotranspiração (mm.dia^{-1}), precipitação (mm), temperatura a dois metros de altura ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar incidente (W.m^{-2}) para o ponto 2, de Jan/2000 a Jan/2010, referente à substituição de vegetação herbácea para mosaico de Floresta/pastagem para a simulação de controle (em vermelho) e para a simulação com alteração dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra (em preto, linha tracejada).	87
Figura 38. Valores mensais de evapotranspiração (mm.dia^{-1}), precipitação (mm), temperatura a dois metros de altura ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar incidente (W.m^{-2}) para o ponto 3, de Jan/2000 a Jan/2010, referente à substituição de áreas de agricultura por vegetação arbustiva decidual para a simulação de controle (em vermelho) e para a simulação com alteração dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra (em preto, linha tracejada).	88
Figura 39. Valores mensais de evapotranspiração (mm.dia^{-1}), precipitação (mm), temperatura a dois metros de altura ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar incidente (W.m^{-2}) para o ponto 4, de Jan/2000 a Jan/2010, referente à substituição de vegetação herbácea por áreas de agricultura e mosaico de Floresta/pastagem para a simulação de controle (em vermelho) e para a simulação com alteração dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra (em preto, linha tracejada).	89
Figura 40. Valores mensais de evapotranspiração (mm.dia^{-1}), precipitação (mm), temperatura a dois metros de altura ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar incidente (W.m^{-2}) para o ponto 5, de Jan/2000 a Jan/2010, referente à substituição de gramíneas por Floresta Estacional Semidecidual para a	

simulação de controle (em vermelho) e para a simulação com alteração dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra (em preto, linha tracejada).....90

Figura 41. Valores mensais de evapotranspiração (mm.dia^{-1}), precipitação (mm), temperatura a dois metros de altura ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar incidente (W.m^{-2}) para o ponto 6, de Jan/2000 a Jan/2010, referente à substituição de mosaico de Floresta/pastagem por áreas agrícolas e de pecuária para a simulação de controle (em vermelho) e para a simulação com alteração dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra (em preto, linha tracejada).91

Lista de tabelas

Tabela 1. Classes de uso e cobertura da Terra do GLCC utilizadas pelo BATS.....	30
Tabela 2. Remapeamento das classes do IGBP para as classes do BATS.	31
Tabela 3. Valores mensais médios do coeficiente de correlação, RMSE, BIAS e erro absoluto.....	37
Tabela 4. Correlações entre os dados observados e os dados simulados no RegCM4.....	43
Tabela 5. Área alterada entre as informações de cobertura da terra obtidas do GLCC 1992 e para o ano 2007. A tabulação cruzada indica a fração da área alterada entre os dois conjuntos de informação.	48
Tabela 6. Valores da FCV para cada classe de uso e cobertura da terra utilizados pelo esquema de superfície BATS e os novos valores extraídos dos dados de NDVI.....	54
Tabela 7. Valores originais e para o ano de 2007 da RVIVPM para cada classe de uso e cobertura da terra.	56
Tabela 8. Valores de IAF para cada classe de uso e cobertura da terra presente no BATS.	59

Lista de abreviaturas e siglas

AB	-	Alta da Bolívia
APP	-	Áreas de preservação permanente
AVHRR	-	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
BATS (B)	-	<i>Biosphere Atmosphere Transfer Scheme</i>
BA-parâmetro	-	Parâmetros físicos do BATS alterado
BIAS	-	Erro sistemático
CLM (C)	-	<i>Community Land Model</i>
CLP	-	Camada limite planetária
CPTEC	-	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CCM	-	Complexos convectivos de mesoescala
DMSP	-	<i>Defense Meteorological Satellite Program</i>
EEM	-	Espectro eletromagnético
EI	-	ERA-Interim
EM	-	Esquema de convecção cúmulos Emmanuel
EMMOD	-	Esquema de convecção cúmulos Emmanuel modificado
ENSO	-	El Niño/Oscilação Sul
ECMWF	-	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
FCV	-	<i>Fração máxima de cobertura vegetal</i>
GCOS	-	<i>Global Climate Observing System</i>
GLC2000	-	<i>Global Land Cover 2000</i>
GLCC	-	<i>Global Land Cover Characterization</i>
GR	-	Esquema de convecção cúmulos Grell
IAF	-	Índice de área foliar
IDL	-	<i>Interactive Data Language</i>
IGBP	-	<i>International Geosphere-Biosphere Programme</i>
ISKB	-	Índice de Seca Keetch-Byram
INMET	-	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NDVI	-	Índice de vegetação por diferença normalizada
JAXA	-	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LEGAL	-	Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
mEa	-	Massa Equatorial Atlântica
mEc	-	Massa Equatorial Continental
MERIS	-	<i>Medium Resolution Imaging Spectrometer</i>
MMA	-	Ministério do Meio Ambiente
MM4	-	<i>Mesoscale Model</i> versão 4
MODIS	-	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MODIS LC-I	-	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Land Cover Map</i>
mPa	-	Massa de Ar Polar Atlântica
mTa	-	Massa Tropical Atlântica
mTc	-	Massa Tropical Continental
NASA	-	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCAR	-	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	-	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NetCDF	-	<i>Network Common Data Form</i>
NN	-	NNPR1
NOAA	-	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>

OLS	- <i>Operational Linescan System</i>
OISST (OS)	- <i>Optimum Interpolation Sea Surface Temperature</i>
PRODES	- Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia
RVIVPM	- Reflectância no visível e no infravermelho próximo e médio
RegCM4	- <i>Regional Climate Model system</i> versão 4
REM	- Radiação eletromagnética
RMSE	- Erro médio quadrático
SE	- SST-ERA-Interim
SPOT	- <i>Vegetation</i> a bordo do <i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>
SPRING	- Sistema de Processamento de Informações Geográficas
SYNOP	- <i>Surface Synoptic Observations</i>
TRMM	- <i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
TSM	- Temperatura da superfície do mar
UA	- Uso e cobertura da terra atualizado
UO	- Uso e cobertura da terra original do modelo
ZCAS	- Zona de convergência do Atlântico Sul
ZCIT	- Zona de convergência intertropical

Lista de símbolos

Ar	-	Argônio
C	-	Carbono
CO₂	-	Dióxido de Carbono
CH₄	-	Metano
L_{λ}	-	Radiância espectral
N	-	Nitrogênio
NO_x	-	Óxidos Nitrosos
O₂	-	Oxigênio
O₃	-	Ozônio
H₂O	-	Vapor d'água
ρ_{ivp}	-	Reflectância no infravermelho próximo
$\rho_{vermelho}$	-	Reflectância na região do vermelho
σ_v	-	Fração de cobertura vegetal

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações	I
Lista de tabelas	XIII
Lista de abreviaturas e siglas	XIV
Lista de símbolos	XVI
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Problema	3
1.3 Objetivos Gerais	5
1.3.1 Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO 2	7
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 Simulações regionais do tempo e clima	8
2.2 Uso e cobertura da terra por Sensoriamento Remoto	11
CAPÍTULO 3	14
3. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO	14
3.1 Área de estudo	14
3.2 Padrões de circulação na América do Sul	15
CAPÍTULO 4	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1 Materiais utilizados	19
4.1.1 Dados de entrada do modelo RegCM4	19
4.1.2 Dados meteorológicos	21
4.1.3 Dados do Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)	22
4.1.4 Dados do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)	23
4.1.5 Dados complementares	24
4.2 Metodologia	25
4.2.1 Simulações no RegCM4	25
4.2.2 Atualização do mapa de uso e cobertura da terra utilizado pelo BATS	28
4.2.3 Alteração dos parâmetros físicos utilizados pelo BATS	31
4.2.4 Estimativas da fração máxima de cobertura vegetal	32

4.2.5 Fluxograma da metodologia	33
CAPÍTULO 5.....	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 Validação dos dados do TRMM.....	35
5.2 Simulações no RegCM4 e condições iniciais e de contorno lateral	40
5.3 Atualização do uso do solo e simulação no RegCM4	46
5.4 Estimativa e modelagem da fração máxima de cobertura vegetal (FCV)	53
5.5 Estimativas da reflectância no visível e no infravermelho próximo e médio (RVIVPM) e simulação no RegCM4	55
5.6 Estimativas do índice de área foliar (IAF) e simulação com o RegCM4	58
5.7 Variação temporal dos parâmetros físicos, parametrização cúmulos e simulação no RegCM4	60
5.8 Análise da variabilidade trimestral e decadal das simulações no RegCM4	64
5.8.1 Evapotranspiração.....	64
5.8.2 Precipitação.....	71
5.8.3 Umidade Relativa do ar	76
5.8.4 Temperatura do ar	80
5.9 Alterações no uso e cobertura da terra: estudos de caso.....	84
CAPÍTULO 6.....	92
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
CAPÍTULO 7.....	96
7. REFERÊNCIAS.....	96
ANEXO 1	106

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A Terra pode ser considerada, a partir da abordagem sistêmica, um sistema dinâmico aberto que interage com a radiação eletromagnética proveniente do Sol. Este sistema dinâmico incorpora diversas variáveis (atmosfera, litosfera, biosfera, hidrosfera) no estudo de suas inter-relações, que originam todos os aspectos morfológicos e estruturais de nosso Planeta (relevo, clima, solos, distribuição de espécies, entre outros). Neste contexto, a teoria geral dos sistemas baseia-se na explicação das interações entre os aspectos antropogênicos e naturais e os inúmeros feedbacks que a compõem (BERTALANFFY, 1973; SOTCHAVA, 1977; VEADO, 1998; CHRISTOFOLETTI, 1999).

Os geossistemas fundamentam-se nas conexões entre os diversos elementos naturais e antropogênicos e suas relações com a dinâmica e estrutura funcional (BERTRAND, 1972). Monteiro (1971, 1976) com sua abordagem dinâmica das combinações geográficas contribuiu consideravelmente no que diz respeito à teoria dos geossistemas ao propor uma análise geográfica do clima tendo os sistemas meteorológicos e sua dinâmica como paradigma.

Na interação dos seres humanos com o meio ambiente, destaca-se que ao longo dos milênios a cobertura da terra sofre alterações devido às mudanças naturais como, por exemplo, o deslocamento dos continentes e glaciações periódicas, no entanto atualmente o desenvolvimento humano pode ser considerado como a principal fonte de mudanças na paisagem e na biodiversidade (FORMAN, 1995). Estas mudanças ocorrem desde a pré-história, na qual a crescente domesticação de animais e a manipulação de espécies vegetais proporcionaram a utilização do fogo para transformar florestas em pastagens e áreas agrícolas e áreas urbanas (GOLDEWIJK e RAMANKUTTY, 2004).

Frequentemente utilizado na literatura, o termo “uso e cobertura da terra” pode ser dividido em: I) “Uso da terra”, que se refere às atividades antropogênicas ou ações imediatas de modificação e conversão de coberturas vegetais, englobando áreas urbanas e rurais, áreas agrícolas, áreas de preservação permanente (APP), unidades de conservação, entre outras; e II) “Cobertura da terra”, que diz respeito aos tipos de cobertura vegetal natural de uma determinada área, como, por exemplo, floresta ombrófila, cerrado, caatinga, savanas, tundra, entre outros (DE SHERBININ, 2002).

Nos últimos séculos, com o advento da revolução industrial, as mudanças no uso e cobertura da terra sofreram uma constante aceleração devido à globalização dos mercados, à

expansão populacional e ao aumento da capacidade tecnológica. A substituição da cobertura natural ao longo do tempo tem provocado a diminuição no número de indivíduos e espécies, extinção, domesticação e mudanças de habitat de várias espécies (MEYER e TURNER, 1994). Além disto, o desflorestamento, o uso de pastagens para criação de rebanhos, a expansão de áreas agrícolas e urbanas, a drenagem de áreas alagadas e represas, entre outros usos, nunca se expandiram tão rapidamente em todo o mundo. Atualmente, grande parte das áreas do globo sofre algum tipo de manejo, os quais variam em diversos graus de intensidade (RICHARDS, 1990).

Estima-se que nos últimos três séculos aproximadamente 1200 milhões de hectares (Mha) de florestas e vegetação arbustiva foram derrubadas e 560 Mha de gramíneas e pastagens foram convertidas em outros usos e cobertura da terra. Neste mesmo período, as áreas agrícolas em todo o globo aumentaram aproximadamente 1200 Mha, passando de 265 Mha no século XVIII (RICHARDS, 1990) para aproximadamente 1500 Mha nos dias atuais (FAO, 2002). Estas mudanças afetam significativamente o tempo e o clima (NIYOGI et al., 2009), e têm recebido atenção especial nas últimas décadas devido ao seu papel na forçante radiativa global.

Na década de 70 diversos estudos constataavam que as mudanças no albedo, ocasionadas por alterações das características físico-químicas e biológicas da superfície, possuíam implicações no balanço de energia e, conseqüentemente, no clima regional (OTTERMAN, 1974; SAGAN et al., 1979). Na década de 80 estudos sobre os ecossistemas terrestres, como sumidouros de Carbono (C), já examinavam os impactos das mudanças do uso e cobertura da terra no clima a partir do seu papel no ciclo do C (LANLY, 1982; HOUGHTON et al., 1985). No entanto, mesmo com a diminuição das incertezas nas fontes e sumidouros de C, o balanço deste elemento ainda é um dos grandes desafios atuais.

Os impactos nas mudanças de uso e cobertura da terra abrangem alterações no balanço de energia, na temperatura do ar, na precipitação, na umidade do ar e na circulação regional e global (HOUGHTON et al., 1996; MCGUFFIE e HENDERSON-SELLERS, 2001; DAVID et al., 2011). Ainda, estes impactos provocam a degradação dos solos (ISLAM e WEIL, 2000), dos mananciais de água (CARTER et al., 2004) e a alteração do escoamento superficial (MOLDERS e RUHAAK, 2002).

Desta forma, o uso e cobertura da terra devem ser considerados como um fator fundamental na modelagem numérica do tempo e clima, visto que quanto melhor for a representação física do acoplamento dos sistemas terra-atmosfera melhor será a representação

das condições meteorológicas local e global. Uma vez que cada alvo que compõe a superfície terrestre interage com a radiação eletromagnética (REM) solar e terrestre, produz trocas de energia entre a biosfera-atmosfera, além de interagir com a circulação local. Atualmente, ações antropogênicas provocam mudanças nas características da superfície em escala regional, entre as mais importantes pode-se citar a desertificação, o desflorestamento, a regeneração de áreas degradadas e a urbanização, as quais influenciam o clima global. O surgimento de regiões áridas e semiáridas deve-se principalmente ao uso intenso da terra para a agricultura e pastoreio (KASSAS, 1995; ALLINGTON e VALONE, 2010). Nestas regiões, a remoção da vegetação e a exposição dos solos ocasionam a redução da capacidade de retenção de água no solo e o aumento do escoamento superficial e do albedo (HENDERSON-SELLERS, 1996; VERSTRAETE ET al., 2008). Esta mudança nas características físico-químicas e biológicas da superfície reduz o fluxo de calor latente e aumenta a temperatura da superfície (WANG et al., 2007).

Atualmente, aproximadamente 30% da superfície terrestre é composta por formações florestais. Entretanto, as áreas de florestas em todo o globo estão diminuindo rapidamente, principalmente nos trópicos, enquanto que em médias latitudes pode-se constatar uma regeneração de florestas temperadas (ASSELIN et al., 2001; GRADOWSKI et al., 2010). No Brasil, segundo o Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES), estima-se que aproximadamente 135 mil km² da Floresta Amazônica sofreu algum processo de desmatamento desde 1988. Este desmatamento ocasionou grandes modificações nas características da superfície (MCGUFFIE e HENDERSON-SELLERS, 2001), e dentre os principais impactos destaca-se as alterações no balanço hídrico, uma vez que a evapotranspiração proveniente das formações florestais é bem maior que em áreas agrícolas ou de pastagem. A alteração do albedo da superfície e da evapotranspiração modificam significativamente a precipitação nestas regiões, influenciando o balanço hídrico regional (NOBRE et al., 1991; LATIFOVIC e POULIOT, 2007). Além disto, estes impactos podem ocasionar o empobrecimento do solo e a redução da biodiversidade das áreas desmatadas (FUJISAKA et al., 1998; D'OLIVEIRA et al., 2011).

1.2 Problema

Dadas às circunstâncias acima descritas, mapas de uso e cobertura da terra e suas respectivas características físico-químicas e biológicas constituem-se em uma importante variável para a modelagem numérica de sistemas terrestres. Diversos modelos de previsão do

tempo e clima, assim como, modelos biogeoquímicos, necessitam destes dados como parâmetro de entrada para simular os processos físicos que ocorrem na camada biosfera-atmosfera (MCGUFFIE e HENDERSON-SELLERS, 2001). Entretanto, na maioria dos modelos regionais de previsão do tempo e clima, o mapa de uso e cobertura da terra não é atualizado com frequência e encontra-se defasado, influenciando, desta forma, nos resultados obtidos a partir das simulações. Pode-se citar como exemplo a utilização do mapa de uso e cobertura da terra de 1992 do *Global Land Cover Characterization* (GLCC) atualmente inserido no modelo *Regional Climate Model system* versão 4 (RegCM4), originado a partir de dados orbitais do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo do satélite *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) com resolução espacial nominal de 1 km.

Nas últimas décadas, devido ao aumento do número de satélites obtendo informações da superfície terrestre, os dados de Sensoriamento Remoto têm sido amplamente utilizados para originar mapas globais de uso e cobertura da terra. O desenvolvimento de produtos de uso e cobertura da terra derivados de satélites ambientais teve como objetivo inicial suprir a demanda dos modelos globais e regionais (ZHAN et al., 1999). Estes buscavam analisar os impactos das ações antropogênicas no sistema terrestre a partir da conversão de áreas naturais em outros usos da terra.

Atualmente, encontram-se disponíveis vários produtos originados por diversos sensores orbitais que contém informações sobre o uso e cobertura da terra, como, por exemplo, o GLOBCOVER, o *Global Land Cover 2000* (GLC2000) e o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Land Cover Map* (MODIS LC-I). A utilização do Sensoriamento Remoto proporciona uma fonte alternativa para produzir informações sobre o uso e cobertura da terra devido à visão sinótica e possibilidade de aquisição de informações em intervalos regulares e em várias escalas espaciais (XIE et al., 2008).

Ainda, o Sistema Global de Observação do Clima (do inglês, *Global Climate Observing System* – GCOS) identificou o uso e cobertura da terra como uma das variáveis climáticas que devem ser derivadas a partir de satélites ambientais, uma vez que métodos tradicionais (coleta de dados em campo, revisões bibliográficas e outros tipos de processamentos de dados) demandam um período de análise muito grande e com grandes custos operacionais (GCOS, 2006). Neste contexto, os produtos globais e regionais que permitem estimar o uso e a cobertura da superfície terrestre a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto podem ser empregados para atualizar os dados de entrada de modelos

atmosféricos, regionais ou globais, em que o uso e cobertura da terra esteja defasado em relação ao uso atual. Além disto, as imagens orbitais possibilitam a estimativa de diversos parâmetros físico-químicos e biológicos (reflectância *in-band*, radiação fotossinteticamente ativa) e índices (vigor vegetativo, área foliar, entre outros).

1.3 Objetivos Gerais

O principal objetivo deste estudo é avaliar o impacto nas simulações numéricas do RegCM4 derivadas da atualização das classes de uso e cobertura da terra e dos parâmetros físico-químicos e biológicos utilizados pelo *Biosphere Atmosphere Transfer Scheme* (BATS).

1.3.1 Objetivos Específicos

- a) Validar os dados de precipitação estimados pelo TRMM a partir dos dados do INMET/CPTEC, com o objetivo de utilizar este dado para a verificação da precipitação resultante da modelagem numérica;
- b) Simular as principais variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura, umidade, vento, entre outros) para a América do Sul com o RegCM4 utilizando diferentes condições de contorno, temperatura da superfície do mar (TSM) e parametrização cúmulos;
- c) Originar um mapa de uso e cobertura da terra para o ano de 2007 a partir da integração de diversos produtos orbitais e dados disponíveis e utilizar os mapas atualizados como parâmetro de entrada no RegCM4;
- d) Estimar a fração máxima de cobertura vegetal a partir do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para cada uso e cobertura da terra e atualizar os valores máximos e mínimos do BATS;
- e) Atualizar os valores máximos e mínimos do índice de área foliar (IAF) para cada classe de uso e cobertura da terra presente no BATS a partir de produtos orbitais;
- f) Estimar os valores de reflectância na faixa espectral do visível ($\leq 0,7\mu\text{m}$) e do infravermelho próximo e médio ($>0,7\mu\text{m}$) a partir de produtos orbitais e atualizar estes valores no BATS;
- g) Estimar a variação sazonal da fração máxima de cobertura vegetal, do índice de área foliar, da reflectância no visível ($\leq 0,7\mu\text{m}$) e no infravermelho próximo e médio ($>0,7\mu\text{m}$) e simular, no RegCM4, as principais variáveis meteorológicas a partir destas alterações;

- h) Avaliar o resultado das simulações com base nos dados de precipitação e temperatura medidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) / Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC);
- i) Avaliar o resultado das simulações para o período de 10 anos (2000-2009) com base nos dados de umidade relativa e temperatura medidos pelo INMET/CPTEC, nos dados de precipitação do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) e nos dados de evapotranspiração estimados pelo sensor MODIS/TERRA;

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As condições meteorológicas e o clima influenciam significativamente a vida e a distribuição de biomas pelo planeta. O sistema climático consiste de um sistema dinâmico formado por cinco componentes principais: a atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a litosfera e a biosfera. Estas componentes são influenciadas por diversos mecanismos externos, como por exemplo o Sol, e pelas alterações antropogênicas (BAEDE et al., 2001).

No sistema climático, a atmosfera é a componente mais instável e dinâmica e apresenta as maiores mudanças (HOLTON, 2004). Esta é composta principalmente pelos gases Nitrogênio (N), Oxigênio (O₂) e Argônio (Ar) que possuem uma interação espectral limitada com a radiação solar e com a radiação na faixa do espectro eletromagnético (EEM) referente ao infravermelho termal. Entretanto, na atmosfera é comum encontrar diversas espécies de gases traço (correspondendo a aproximadamente 0,1% de sua composição química), como o Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxidos Nitrosos (NO_x) e Ozônio (O₃), que absorvem e emitem radiação termal, modificando o balanço de energia do planeta (SALBY, 1992). Além destes gases, a atmosfera contém vapor d'água (H₂O) que interage com as radiações nas faixas do solar/ termal e funciona como um gás do efeito estufa natural.

A hidrosfera é composta pelas águas superficiais e subterrâneas (rios, lagos, aquíferos, oceanos). Esta componente é responsável pelo transporte de energia do equador para os polos a partir de correntes oceânicas e pela remoção e armazenamento de grandes quantidades de CO₂ a partir do fitoplâncton. A criosfera descreve as porções territoriais da Terra compostas por água em estado sólido e estão localizadas sobre a Groelândia e a Antártica, nos glaciares, em regiões com neve, entre outros. Esta componente é importante no balanço de radiação e energia por refletir fortemente a radiação solar (altos valores de albedo) e influenciar no saldo de radiação termal, devido à sua condutividade térmica, à sua inércia termal e ao papel crucial na circulação profunda dos oceanos (BAEDE et al., 2001).

O uso e cobertura da terra que compõem a superfície terrestre controlam as interações da atmosfera com as radiações solar e termal, visto que as características físico-químicas e biológicas da superfície terrestre modela a energia radiativa que retorna para a atmosfera, bem como afeta a composição e as características da atmosfera, principalmente na camada limite planetária. Desta forma, a radiação solar pode interagir com os objetos terrestres e a porção absorvida por estes é transformada em calor. Os objetos terrestres emitem radiação termal,

que é absorvida pela atmosfera, e ocasiona seu aquecimento. A radiação solar absorvida pela superfície e a contrarradiação termal podem ser utilizadas para evaporar a água presente no solo, nas folhas de plantas e nos corpos d'água. Além disto, outro fator importante da superfície terrestre é a rugosidade, pois influencia na circulação dos ventos. A biosfera, composta por regiões marinhas e terrestres, influencia na composição atmosférica a partir do sequestro e liberação de gases do efeito estufa, bem como é primordial na liberação de água para a atmosfera. Logo, a biosfera tem um papel fundamental no ciclo da água e do carbono, assim como, em outros ciclos como o do CH_4 e NO_2 . Ainda, a liberação de compostos orgânicos voláteis pela biosfera atua na física atmosférica, na formação de aerossóis, alterando, desta forma, a formação de nuvens e o clima (ISIDOROV et al., 1985).

2.1 Simulações regionais do tempo e clima

Nas últimas décadas, modelos numéricos regionais têm sido largamente utilizados para estudos climáticos (GIORGI, 1991; MCGREGOR, 1997; ANYAH e SEMAZZI, 2004; SILVA et al., 2006; ABIODUM et al., 2008; DA ROCHA et al., 2009). Em simulações regionais, a solução das equações no modelo considera as informações da forçante lateral e as condições meteorológicas iniciais (GIORGI e BI, 2000). Consequentemente, em domínios pequenos as fronteiras laterais exercem maior influência sobre as simulações numéricas. Desta forma, a análise da sensibilidade de determinado parâmetro, como, por exemplo, as mudanças no uso e cobertura da terra devem ser realizadas em domínios espaciais maiores, permitindo respostas relevantes às mudanças propostas nos processos físicos envolvidos (LEDUC e LAPRISE, 2009), minimizando a influência das fronteiras laterais.

Atualmente, encontram-se disponíveis à comunidade científica diversos modelos regionais que permitem a previsão do tempo e os estudos climáticos. Pode-se citar, por exemplo, o RegCM, que é um modelo tridimensional em coordenadas sigma e de equações primitivas. Este modelo regional é amplamente utilizado para analisar aspectos do clima da Terra, variações regionais na precipitação e temperatura devido às mudanças naturais e antrópicas, entre outras aplicações (DICKINSON et al., 1993; GRELL, 1993; LIU et al., 1996; DAI et al., 1999; CUADRA e DA ROCHA, 2006).

Mearns et al. (1995) analisaram a variabilidade e frequência da precipitação para 31 anos utilizando as concentrações de CO_2 atuais e simulando o dobro desta no modelo RegCM, com o objetivo de verificar a variabilidade diária da precipitação e analisar os erros e limitações do modelo em simular cenários de mudanças climáticas. Os resultados deste

trabalho apontam que as estimativas médias diárias ou mensais podem mascarar erros de intensidade e frequência na precipitação. Desta forma, erros sistemáticos introduzidos pelo modelo têm implicações na avaliação dos impactos climáticos, ou seja, se estes dados de precipitação, por exemplo, forem utilizados em modelos de produtividade agrícola, a representação do ciclo hidrológico pode ocasionar erros consideráveis.

Brown et al. (2000) verificaram o potencial de produção agrícola e formação de áreas com gramíneas a partir das alterações climáticas na região central do Estados Unidos a partir de simulações numéricas. As análises indicam que as mudanças climáticas resultantes do RegCM diminuiriam as áreas agrícolas mais ao sul e leste devido às altas temperaturas. Além disto, o aumento da disponibilidade de CO₂ para áreas agrícolas e aumento da precipitação proporcionariam melhorias na eficiência fotossintética e hídrica de culturas de inverno como, por exemplo, a soja e o trigo.

Liu (2005) utilizou o modelo RegCM para verificar os impactos da queima de biomassa no balanço de radiação e no clima da América do Sul. Os resultados da simulação indicaram que o modelo foi consistente em indicar que gases traços e aerossóis provenientes das queimadas na Amazônia afetam significativamente o balanço de radiação de ondas curtas, visto que menor quantidade de irradiância atinge a superfície terrestre e as camadas atmosféricas mais próximas da superfície. Ainda, a magnitude do impacto, no entanto, é substancialmente reduzida devido à retroalimentação da atmosfera, que é significativa na região da Amazônia. Nas simulações ficou evidente que a trajetória das nuvens de precipitação é afetada pelo forçamento radiativo da fumaça, na qual a menor transferência de água da superfície e da camada limite planetária (CLP) para a formação de nuvens e a tendência de subsidência são os principais fatores para inibir a formação de nuvens.

Posteriormente, Liu et al. (2010) utilizaram a precipitação e temperatura máxima do ar simuladas para calcular o Índice de Seca Keetch-Byram (ISKB), que é comumente empregado para avaliar o risco de incêndios. Desta forma, modelos climáticos regionais podem ser considerados como uma ferramenta útil para estimar áreas susceptíveis à queimada, pois disponibilizam informações meteorológicas necessárias ao cálculo deste índice e permitem a previsão de anomalias na umidade do solo.

Além de aplicações ambientais, muitos estudos alteram as características do modelo, os esquemas de parametrização das variáveis meteorológicas, os dados de superfície (uso e cobertura da terra e relevo) e as condições de contorno do RegCM para verificar a sensibilidade e consistência para diferentes regiões do globo (GAO et al., 2003; PAL et al.,

2004; GAO et al., 2006; ABIODUM et al., 2008; ALO e WANG, 2010).

Contudo, a utilização de modelos regionais para estudos climáticos depende da acurácia do modelo em reproduzir as características da região. Segele et al. (2009) avaliaram a climatologia e a variabilidade interanual da precipitação para a região central do continente africano utilizando o modelo RegCM versão 3 (RegCM3). As simulações realizadas compararam dois anos bem distintos (seco e chuvoso), e indicaram que embora a parametrização cúmulos desenvolvida por Emmanuel (1991) superestime a precipitação, esta permite uma melhor representação da variação interanual e do padrão espacial das chuvas. Ainda, estes autores realizaram várias simulações para verificar a sensibilidade das parametrizações de Emmanuel (1991), variando os principais parâmetros que controlam a taxa de fluxo de massa convectivo, fração de água condensada convertida em precipitação, além das características de umedecimento e aquecimento da superfície. Os resultados mostram que a quantidade de água condensada que é convertida em precipitação é a principal responsável pelos altos valores de precipitação desta parametrização cúmulos.

Da Rocha et al. (2009) realizaram uma avaliação do ciclo diurno da precipitação e da climatologia de verão na América do Sul a partir de simulações de 17 verões. Os resultados das simulações foram comparados com diferentes conjuntos de dados de precipitação disponíveis. As análises indicam que, apesar das especificidades de cada região, o RegCM3 simula as principais características da climatologia de verão associadas à precipitação e à temperatura do ar na América do Sul. Entretanto, os principais erros encontrados decorrem da subestimação da precipitação no setor norte da ZCAS e valores inconsistentes na região montanhosa dos Andes.

Gao et al. (2006) investigaram o papel da resolução espacial e da topografia do modelo RegCM nas estimativas de precipitação para o leste da Ásia. Nestes experimentos, evidenciou-se que quanto melhor a resolução espacial melhor as estimativas de precipitação. Bergant et al. (2007) verificaram os erros originados do uso das condições de contorno disponibilizadas pelo NCEP/NCAR a partir de simulações de 40 anos no REGCM na Europa. Em geral, o uso destas condições de contorno ocasionaram subestimativas de temperatura e umidade por toda a área de estudo. Ainda, os autores verificaram que a quantidade de chuva é menor em áreas com altos valores anuais, principalmente nos Alpes e na costa ocidental da Península Ibérica.

Abiodum et al. (2008) analisaram os mecanismos de retroalimentação entre as mudanças no uso e cobertura da terra e as monções na região oeste do continente africano.

Neste estudo, os autores simularam três possíveis condições para a vegetação (desflorestamento, desertificação e potencial), verificaram que as alterações na representação das classes de uso e cobertura da terra provocaram mudanças significativas nas variáveis meteorológicas analisadas. Desta forma, conclui-se que o uso e cobertura da terra deve ser considerado nas simulações de tempo e clima e devem ser atualizados no decorrer dos anos para representar o uso e cobertura atual.

2.2 Uso e cobertura da terra por Sensoriamento Remoto

O grande desenvolvimento de programas voltados à aquisição de dados ambientais a partir de satélites, como o programa *Earth Resource Technology Satellite* (ERTS), criado na década de 60, provocou o surgimento de numerosas técnicas para a extração de informações destes dados orbitais. Neste contexto, diversos produtos derivados das aquisições orbitais são desenvolvidos anualmente para caracterizar o uso e cobertura da terra em escala regional, continental e global. Na década de 80, Tucker et al. (1985), Townshend et al. (1987) e Stone et al. (1990) já desenvolviam produtos de uso e cobertura da terra baseados na utilização de dados multitemporais para observar a dinâmica da vegetação e sua variação fenológica ao longo do ano.

Na década de 90, produtos globais de uso e cobertura da terra com resolução espacial de 112 km e 8 km foram desenvolvidos a partir dos dados do sensor AVHRR por DeFries e Townshend (1994) e DeFries et al. (1998), respectivamente. Atualmente, os produtos globais que caracterizam a cobertura e uso da superfície terrestre apresentam uma melhor resolução espacial, que pode chegar a centenas de metros. Consequentemente, com a melhora da resolução espacial há um aprimoramento na análise das mudanças de uso e cobertura da terra derivadas das ações antropogênicas.

Com o avanço de satélites de média resolução espacial como, por exemplo, o sensor MODIS presente nas plataformas Aqua e Terra (JUSTICE et al., 1998), o sensor Vegetation a bordo do *Satellite Pour l'Observation de la Terre* (SPOT) CNES, 2000) e o sensor *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS) proveniente do ENVISAT (ESA, 2004), diversos produtos de uso e cobertura da terra encontram-se disponíveis para a utilização da comunidade científica. Apesar dos esforços de cada programa em disponibilizar gratuitamente os dados, estes produtos derivados do sensoriamento remoto apresentam limitações inerentes a cada tipo de processamento, originando confusões na delimitação de diferentes usos e cobertura da terra (HEROLD et al., 2008).

Consequentemente, diversos estudos foram realizados para verificar a consistência destes produtos, compreendendo a escala local, regional e global (SCEPAN, 1999; MORISTETTE et al., 2002; NEUMANN et al., 2007; TCHUENTÉ et al., 2011). Na maioria das vezes os produtos de uso e cobertura da terra possuem uma acurácia média de 70%, porém, estes valores podem variar de acordo com a região e com as características espaciais (HEROLD et al., 2008). Mayaux et al. (2006) validaram o produto GLC2000 baseados na comparação com dados auxiliares e amostragem aleatória para cada classe. Neste trabalho, os autores selecionaram 554 pontos de controle e obtiveram uma acurácia global de 68,6%, ou seja, aproximadamente 30% da classificação possuía erros introduzidos no processo de classificação.

Friedl et al. (2002) avaliaram a consistência do produto de uso e cobertura da terra provenientes dos sensores MODIS (MOD12Q1) a partir de matrizes de confusão. Neste procedimento, as amostras utilizadas no treinamento de cada classe eram aleatoriamente selecionadas e retiradas do processo de classificação e, posteriormente, utilizadas para a determinação da acurácia de cada classe. Os resultados desta validação cruzada apontam uma concordância que pode variar de 60% a 90% para diferentes classes de uso e cobertura, com uma acurácia global de 78,3%.

Além disto, existem diferenças entre os diversos produtos de uso e cobertura da terra. Recentemente, Tchuente et al. (2011) compararam quatro produtos disponíveis (GLC2000, GLOBCOVER, MOD12Q1 e ECOCLIMAP). Embora cada mapa compreenda grandes extensões territoriais e contenham fontes de informação relevantes, cada produto é originado a partir de padrões de mapeamento distintos e utilizam algoritmos de classificação que podem variar significativamente entre eles. A comparação entre os quatro mapas de uso e cobertura da terra foi realizada a partir do coeficiente Kappa. O índice Kappa é um método estatístico utilizado para avaliar a correlação entre duas ou mais classificações, permitindo a utilização de uma matriz de erro que determina a acurácia global e a acurácia de cada classe (CONGALTON e GREEN, 1998).

Para os autores, as diferenças encontradas entre os quatro mapas foram significantes. Os valores do Kappa variaram de 0,45 a 0,59 e a acurácia global entre 56% e 69%. Nesta avaliação, os mapas GLOBCOVER e GLC2000 foram os mais similares, enquanto que a combinação entre o ECOCLIMAP e MOD12Q1 foram os mais distintos. Desta forma, mapas de uso e cobertura da terra que utilizam o mesmo sensor orbital como, por exemplo, os mapas ECOCLIMAP e GLC2000 originados a partir dos dados do VEGETATION/SPOT, podem ser

substancialmente diferentes (TCHUENTÉ et al., 2011).

Neste contexto, uma alternativa para aumentar a acurácia global e de cada classe de uso e cobertura da terra consiste em utilizar mapeamentos oficiais. Pode-se citar, por exemplo, o caso do Brasil, que possui diversos mapeamentos realizados pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), programas voltados à detecção de áreas desmatadas (PRODES), mapeamento de áreas com cana-de-açúcar e café (CANASAT e CAFESAT, respectivamente), entre outros. Além disto, produtos auxiliares, como o mapa de luzes com cobertura global originados pelo sensor *Operational Linescan System* (OLS) do *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP) podem ser utilizados para extrair informações sobre áreas urbanas, permitindo, desta forma, a confecção de mapas de uso e cobertura da terra com uma melhor acurácia.

CAPÍTULO 3

3. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Área de estudo

A área de estudo (**Figura 1**) compreende a América do Sul, com exceção do extremo sul, localizada entre as coordenadas geográficas com latitudes entre 10°N e 40°S, longitudes entre 95°W e 30°W, e representa um recorte do domínio espacial utilizado nas simulações com o modelo RegCM. A região selecionada destaca-se principalmente pelas diferenças econômicas, culturais e pela grande biodiversidade.

Figura 1. Localização da área de estudo e respectiva altimetria (m).

O maior país em extensão e economia é o Brasil, nele encontram-se seis grandes domínios paisagísticos que comportam um mostruário bastante complexo das principais paisagens e ecologias do mundo (AB'SABER, 1977). Quatro deles são intertropicais e dois deles subtropicais: domínio das terras baixas florestadas da Amazônia; domínio das depressões interplanálticas semiáridas do Nordeste; domínio dos “mares de morros” florestados da fachada atlântica brasileira; domínio dos chapadões recobertos por cerrados e

penetrados por florestas-galerias; domínio dos planaltos de Araucárias do Brasil Meridional; e domínio das pradarias mistas do sudeste do Rio Grande do Sul, terras uruguaias e argentinas.

O domínio das terras baixas florestadas da Amazônia pode ser caracterizado por uma área zonal ao longo da faixa do Equador, com mais de 2 milhões de km², composto por uma zona de planícies de inundação, morros baixos mamelonares, vertentes convexizadas e cristas descontínuas. Neste domínio é comum encontrar superfícies aplainadas modernas, drenagens extensivamente perenes, porém suscetíveis a cortes nas áreas de desmatamento extensivo em planaltos sedimentares de solos porosos (AB'SABER, 1977).

O domínio dos chapadões recobertos por cerrados e penetrados por florestas-galerias compreende uma região de maciços planaltos de estrutura complexa e planaltos sedimentares compartimentados. Neste domínio é comum encontrar planícies aluviais, em geral, não meândricas, incluindo florestas galerias contínuas (AB'SABER, 1977). Do mesmo modo, o domínio das depressões interplanálticas semiáridas do Nordeste caracteriza-se por uma região de planícies de erosão, devido à grande extensão dos pediplanos. Neste domínio há uma área de fraca decomposição de rochas, com mantos de alteração variando entre 0 e 3 m, com drenagens intermitentes, relacionadas com o ciclo hidrológico (AB'SABER, 1977).

O domínio dos “mares de morros” florestados da fachada atlântica brasileira apresenta área de mamelonização extensiva e eventuais terraços com presença de forte decomposição de rochas cristalinas. Ainda, é possível encontrar planícies meândricas, com esporões sucessivos e escalonados, contendo grandes reservatórios (AB'SABER, 1977). O domínio dos planaltos das Araucárias está sujeito a climas subtropicais úmidos, com invernos relativamente brandos. Planaltos com altitude média, variando entre 800 a 1300 m, revestidos por bosques de Araucárias, incluindo mosaicos de pradarias mistas (AB'SABER, 1977).

O domínio das pradarias mistas do Rio Grande do Sul apresenta um padrão bem individualizado de paisagens do subdomínio das pradarias mistas. Área ecológica típica de zona temperada subúmida, sujeita a alguma estiagem de fim de ano. O domínio morfoclimático das pradarias mistas abrange terrenos sedimentares de diferentes idades, terrenos basálticos e pequenos setores de áreas metamórficas inseridas no escudo uruguaio-sul-riograndense.

3.2 Padrões de circulação na América do Sul

A partir de processos de resfriamento e aquecimento do ar criam-se as condições necessárias para a formação de células dinâmicas na circulação geral, que, por sua vez,

originam áreas de convergência (baixa pressão) e divergência (alta pressão). Nestas, as propriedades físicas, como gradiente vertical de temperatura, umidade e temperatura, são relativamente homogêneas no decorrer de vários quilômetros de extensão (HOLTON, 2004).

Segundo Monteiro (1971), no continente Sul-americano destacam-se cinco sistemas formadores de massas de ar: (I) Anticiclone Migratório Polar, caracterizado como uma célula de alta pressão com origem no acúmulo de ar frio sobre o oceano na região subpolar; (II) Depressão do Chaco, caracterizado como uma célula de baixa pressão com origem no acúmulo de ar sobre o continente; (III) Anticiclone Semifixo do Atlântico Sul, caracterizado como uma célula de alta pressão com origem na acumulação de ar sobre o oceano Atlântico; (IV) Bacia Amazônica, região que dá origem a uma massa de ar quente e úmida; e (V) Centro de Alta Pressão Subtropical do Atlântico Norte, com origem no acúmulo de ar quente e úmido sobre o oceano Atlântico.

Na América do Sul podem-se encontrar várias massas de ar que influenciam significativamente o tempo e o clima (NIMER, 1979), como visualizado na **Figura 2**. Entre as principais massas de ar, destacam-se: (I) Massa de Ar Polar Atlântica (mPa), formada no Anticiclone Migratório Polar, composta por um ar muito frio e seco e com forte subsidência superior; (II) Massa Tropical Atlântica (mTa), formada no Anticiclone do Atlântico Sul, caracterizada como quente, úmida (devido ao contato da sua parte basal com o oceano) e estável; (III) Massa Tropical Continental (mTc), originada na região do Chaco e relacionada com o aquecimento do interior do continente, constituindo-se em uma massa de ar quente, seca, instável e desprovida de nebulosidade; (IV) Massa Equatorial Continental (mEc), originada na Bacia Amazônica, uma zona de baixa pressão e grande concentração de umidade, caracterizada como uma massa de ar quente, úmida e instável; e (V) Massa Equatorial Atlântica (mEa), formada nas altas pressões subtropicais do Atlântico Norte, caracterizada como uma massa de ar quente e úmida.

Figura 2. Massas de ar que afetam diretamente a região de estudo: mPa - Massa de ar Polar Atlântica; mTa - Massa de ar Tropical Atlântica; mEc - Massa de ar Equatorial Continental; mEa - Massa de ar Equatorial Atlântica; e mTc - Massa de ar Tropical Continental.

Consequentemente, cada massa de ar ocasionará um padrão de circulação local e regional que constituirá o tempo e o clima de determinadas regiões, influenciando significativamente no padrão de precipitação. A região Norte do Brasil, caracterizada como clima equatorial, não apresenta uma estação seca bem definida, nesta região as chuvas são ocasionadas, principalmente, por processos convectivos, sendo que os meses de menor atividade convectiva concentram-se entre maio e setembro (FISCH et al., 1996). Nesta região os principais sistemas atmosféricos que alteram as características do tempo são as friagens, a Alta da Bolívia (AB), o El Niño/Oscilação Sul (ENSO), as linhas de instabilidade, as brisas fluviais e a penetração de sistemas frontais e organização da convecção na Amazônia (FISCH et al., 1996).

Na região Nordeste a estação chuvosa apresenta baixos valores pluviométricos, típico de um clima semiárido, sendo que a época chuvosa ocorre, em sua grande maioria, das correntes perturbadas de leste e da ondulação da zona de convergência intertropical (ZCIT) (QUADRO et al., 1996). Nesta região, a estação chuvosa ocorre de abril a julho, enquanto que

a estação seca, para a maior parte da região, ocorre de setembro a dezembro.

No Centro-Oeste e Sudeste do Brasil é possível verificar uma estação seca no inverno e uma estação chuvosa no verão, e entre os sistemas tropicais e de latitudes médias que atuam nesta região pode-se citar as frentes polares e a zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (ROCHA e GANDU, 1996). O Sul do país, de clima temperado, não possui uma estação seca bem definida, entre os principais sistemas meteorológicos que ocorrem nessa região, podem-se citar as correntes perturbadas de sul (frente polar atlântica), os complexos convectivos de mesoescala (CCM) (SILVA DIAS, 1996), entre outros.

CAPÍTULO 4

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais utilizados

4.1.1 Dados de entrada do modelo RegCM4

O RegCM4 pode ser considerado como um modelo numérico de área limitada, caracterizado pela boa consistência na representação dos fenômenos meteorológicos (Giorgi et al., 2012). No entanto, sua eficácia depende das condições iniciais e de contorno lateral provenientes de modelos globais que irão suprir as informações necessárias ao início dos processamentos. Atualmente, encontram-se disponíveis diversos produtos globais para uso em modelos regionais de previsão do tempo e clima, que apresentam distintas características e resoluções espaciais. Além destes dados, o modelo RegCM4 necessita de informações de TSM, altimetria, índice de área foliar, uso e cobertura da terra, tipo funcional da vegetação, textura e cor dos solos, entre outras (KALNAY et al., 1996).

Neste trabalho, optou-se por verificar a sensibilidade de dois produtos contendo as informações das condições iniciais e de contorno lateral, bem como de dois produtos contendo as informações de TSM. Desta forma, utilizaram-se os dados provenientes das reanálises do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) / *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) denominado NNPR1 e do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) denominado ERA-Interim (DEE et al., 2011). Os dados das reanálises representam as estimativas globais dos principais parâmetros meteorológicos utilizados em modelos regionais e globais, modelados a partir da assimilação de dados de superfície, navios, radiossondas, aviões, sensoriamento remoto, entre outros.

Os dados do NNPR1 estão disponíveis desde 1948, apresentam uma resolução espacial de 2,5° (aproximadamente 280x280km) e 17 níveis de pressão. Estes fornecem informações sobre a temperatura, altura geopotencial, umidade relativa, componente meridional e componente zonal do vento, entre outros (KALNAY et al., 1996). Os dados do ERA-Interim estão disponíveis desde 1989, possuem resolução espacial de 1,5° (aproximadamente 170x170km), 37 níveis de pressão e fornecem informações de diversas variáveis meteorológicas a cada 6 horas (DEE et al., 2011).

As informações de TSM utilizadas neste trabalho compreendem os produtos disponibilizados pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) denominado *Optimum Interpolation* (OI) *Sea Surface Temperature* (SST) e pelo ECMWF, denominado SST-ERA-Interim. Os dados do OISST possuem resolução espacial de 1°

(112x112km) e representam estimativas médias semanais de TSM (REYNOLDS et al., 2002). Os dados provenientes do SST-ERA-Interim apresentam as mesmas características do produto de reanálises, sendo que os dados de TSM são estimados a partir do produto de monitoramento global em tempo real da temperatura do oceano do NCEP (FIORINO, 2004). A **Figura 3** exibe um exemplo da diferença das estimativas de temperatura do ar a partir dos dados do ERA-Interim (**Figura 3a**) e do NNPR1 (**Figura 3b**), assim como os dados de TSM derivados do SST-ERA-Interim (**Figura 3c**) e do OISST (**Figura 3d**). Ressalta-se que os dados sobre o continente do produto OISST são descartadas na etapa de processamento de dados do modelo.

Figura 3. Estimativa para o dia 01 de janeiro de 2007 da temperatura do ar (em Kelvin) proveniente dos dados de reanálises do ERA-Interim (a) e NNPR1 (b); e estimativa de TSM (em Kelvin) a partir dos dados do SST-ERA-Interim (c) e OISST (d).

4.1.2 Dados meteorológicos

Para avaliar as simulações realizadas no RegCM4 utilizaram-se as séries históricas de precipitação (mm), temperatura mínima (°C) e temperatura máxima (°C) disponibilizadas pelo CPTEC. Estes dados correspondem às informações derivadas do *Surface Synoptic Observations* (SYNOP/INMET), das plataformas de coleta de dados (PCDs) do Centro de Missão de Coleta de Dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CMCD/INPE) e parceiros do Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos (PMTCRH/INPE).

Os dados meteorológicos, disponibilizados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE com resolução espacial de $0,25^\circ$ (aproximadamente $28 \times 28 \text{ km}$), foram obtidos a partir da interpolação por Krigeagem dos dados das estações meteorológicas (**Figura 4**). O período de abrangência dos dados depende da variável meteorológica e da frequência temporal (diário ou mensal). Desta forma, os dados mensais são disponibilizados de 1961 até o presente e os dados diários são disponibilizados a partir de 1997. Para obter a climatologia destas variáveis, foram consideradas as estações meteorológicas que continham no mínimo 15 anos de registros. Como visualizado na **Figura 4**, as estações meteorológicas utilizadas no processo de Krigeagem estão concentradas principalmente no litoral brasileiro ou próximas à rede hidrográfica, sendo que no total foram utilizadas 183 estações meteorológicas, na qual 64 estão localizadas na região Nordeste, 39 no Norte, 8 no Centro-Oeste, 27 no Sul e 45 no Sudeste.

Figura 4. Estações meteorológicas utilizadas pelo Grupo de Previsão Climática do INPE para a Krigeagem dos dados de precipitação, temperatura mínima e temperatura máxima.

A Krigagem compreende um conjunto de técnicas que permitem estimar e prever, os parâmetros da superfície a partir da modelagem da estrutura de correlação espacial. Esta técnica caracteriza-se pelo emprego de técnicas de análise exploratória dos dados, geoestatística espacial e, por último, pela interpolação da superfície com base nos parâmetros estimados pelo algoritmo. Neste procedimento torna-se necessária a determinação dos semivariogramas que representam quantitativamente a variação de um fenômeno espacial (DRUCK, 2004).

4.1.3 Dados do Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

Os dados do TRMM, como exemplificado na **Figura 5**, foram utilizados neste trabalho para analisar a distribuição espacial da precipitação sobre a América do Sul e verificar a consistência dos resultados de precipitação obtidos com o RegCM4. O satélite TRMM foi desenvolvido através de uma parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a agência espacial japonesa *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). Os dados de precipitação estimados a partir dos sensores a bordo do satélite TRMM, *Precipitation Radar* (PR) e *Microwave Imager* (TMI), proporcionam a representação de aproximadamente 66% do regime hidrológico associado às chuvas. Ainda, os produtos disponibilizados pelo TRMM combinam os dados do PR e TMI com a rede de estações meteorológicas globais (HUFFMAN et al., 2007).

De um modo geral, o lançamento do satélite TRMM em novembro de 1997 permitiu a obtenção de informações sobre as características da precipitação em lugares que possuem uma baixa densidade de redes de estações meteorológicas como, por exemplo, nos Estados do Acre, Amapá, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Pará, Rondônia, Roraima, entre outros. Os dados utilizados neste trabalho foram extraídos do produto 3B43 V6, com uma resolução temporal mensal, cobertura geográfica correspondente a 50°S a 50°N e resolução espacial de 0,25° x 0,25° (disponibilizado em <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>).

Figura 5. Anomalia de precipitação estimada pelo TRMM para o ano 2007; valores em vermelho representam anomalias negativas (região mais seca) e os valores em azul representam anomalias positivas (mais chuvosa).

4.1.4 Dados do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

O sensor MODIS das plataformas Terra/Aqua possuem órbita polar, ângulo de imageamento de aproximadamente 55°, altitude de 700 km e faixa imageada de 2330 km. O horário de passagem varia sobre um dado ponto da superfície de acordo com a plataforma: enquanto a plataforma Terra, cujos produtos originados destas recebem a sigla MOD, cruza o Equador em sua órbita descendente às 10h30min e 22h30min; a plataforma Aqua, onde os produtos são denominados de MYD, em sua órbita ascendente, cruza o Equador às 13h30min e 01h30min. Ainda, os produtos originados de informações de ambas as plataformas recebem a sigla MCD.

Neste trabalho utilizaram-se os produtos MCD12Q1 (uso e cobertura da terra para a América do Sul, resolução espacial de 500x500m, anual), MCD12C1 (uso e cobertura da terra, resolução espacial de 5600x5600m, global e anual), MOD13C2 (índice de vegetação,

resolução espacial de 5600x5600m, global e mensal), MCD15A2 (índice de área foliar - IAF, resolução espacial de 1000x1000m, por regiões e a cada 8 dias), MOD16A3 (evapotranspiração, resolução espacial de 1000x1000m, global e anual) e MCD43C3 (albedo, resolução espacial de 5600x5600m, global e a cada 16 dias) disponíveis em < <https://wist.echo.nasa.gov/api/> > e exemplificados na **Figura 6**.

Figura 6. (a) Índice de vegetação mensal estimado pelo produto MOD13C2 para julho de 2007; (b) Mosaico de 16 dias para o albedo da superfície (04 a 20 de julho de 2007); e (c) Mosaico de 8 dias do índice de área foliar (IAF) entre 12 e 20 de julho de 2007.

4.1.5 Dados complementares

Neste trabalho, dados complementares foram utilizados para auxiliar no refinamento do mapa de uso e cobertura da terra proveniente do produto MCD12Q1. Entre os principais produtos empregados, destacam-se os dados do programa Mapeamento da Cana via Imagens de Satélite de Observação da Terra (CANASAT) e do CAFESAT, desenvolvido pelo INPE, os quais foram utilizados para atualizar a classe agricultura. Estes apresentam estimativas da área de cana-de-açúcar e café, obtidas a partir da interpretação visual de imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo do satélite Landsat (MOREIRA et al., 2004; RUDORFF et al., 2010). Além destes produtos, utilizaram-se os dados de intensidade de luzes originados pelo OLS/DMSP desenvolvido pela NOAA/NGDC para auxiliar na extração de áreas urbanas (CROFT, 1978). A **Figura 7** apresenta um exemplo dos dados produzidos pelo CANASAT, CAFESAT e com os dados de intensidade de luzes para a região central do Brasil.

Figura 7. Imagem do sensor MODIS, composição 3B4G1R (cor verdadeira), com os dados disponibilizados pelo CANASAT (laranja) e CAFESAT (amarelo) e áreas urbanas delimitadas pelo fatiamento do mapa de luzes do OLS/DMSP (vermelho).

4.2 Metodologia

4.2.1 Simulações no RegCM4

A primeira versão do modelo climático regional RegCM foi desenvolvida no final da década de 80 com base no modelo numérico *Mesoscale Model* versão 4 (MM4) por Dickinson et al. (1989) e Giorgi (1989). Porém, desde a primeira versão, o modelo vem sofrendo melhorias nas parametrizações físicas, na representação dos processos da superfície, na parametrização da convecção, entre outras. O RegCM4 possui dois modelos de superfície implementados, o *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* (BATS) e o *Community Land Model* (CLM) desenvolvidos por Dickinson et al. (1986) e Oleson (2004), respectivamente, assim como, diversos esquemas de convecção de cúmulos, umidade, condições iniciais e de contorno lateral, fluxos oceânicos e gradiente de pressão.

O BATS é utilizado para descrever as interações entre a biosfera e atmosfera,

simulando a influência da vegetação e umidade do solo nas trocas de momentum, energia e vapor d'água. Este modelo possui 20 tipos de uso e cobertura da terra, considera a textura e a cor dos solos (variando de grossa a fina; escura a clara), além de ponderar a camada de neve, de solo e de raízes. As parametrizações do modelo incluem a previsão do conteúdo de água no solo a partir da precipitação, do derretimento da neve, da condensação de umidade no dossel, da evapotranspiração, do escoamento superficial e da infiltração na camada de raízes (REGCM TEAM, 2010). Uma das limitações deste modelo é a utilização de parâmetros físicos estáticos para a vegetação, ou seja, não contabilizar as variações no vigor vegetativo e no ciclo fenológico de diversas espécies.

Assim como o BATS, o CLM é utilizado para descrever as interações entre a biosfera-atmosfera. Atualmente, a versão 3.5 do CLM está implementada no RegCM4, e permite uma descrição mais detalhada da superfície terrestre, utilizando parâmetros dinâmicos que variam de acordo com os meses do ano. Para representar a complexidade da superfície este modelo permite estimar a proporção de elementos em cada pixel (áreas com neve, zonas úmidas, hidrografia e vegetação), sendo que a vegetação pode ser separada em 17 tipos funcionais de plantas. Assim como no BATS, as equações de balanço hidrológico e de energia são resolvidas e agregadas novamente no modelo (REGCM TEAM, 2010).

De um modo geral, pode-se dividir o RegCM4 em 3 módulos principais: (I) Pré-processamento, onde as informações de altimetria, uso e cobertura da terra, TSM e as variáveis meteorológicas são interpoladas e reprojetadas de acordo com a área de estudo; (II) RegCM, módulo responsável pela execução do modelo; e (III) Pós-processamento, onde são realizadas operações de média (diária, mensal, anual), interpolação e conversão de variáveis.

Neste trabalho, definiram-se como parâmetros iniciais do modelo os seguintes valores: início da simulação dia 01 de outubro de 2007, final da simulação dia 01 de janeiro de 2008, 180 pontos na coordenada x (longitude), 180 pontos na coordenada y (latitude) e 18 pontos em z (altitude), resolução espacial de 50 km² e ponto de projeção central da grade em 22°S e 60°W. Estes parâmetros originaram uma grade com 32.400 pontos, abrangendo as latitudes entre 17°45'N e 52°45'S; longitudes entre 100°W e 20°W e 18 níveis em sigma.

Em relação aos parâmetros físicos do modelo, optou-se por empregar os métodos mais utilizados na literatura, adotando-se como esquema de condição de contorno lateral a técnica de relaxamento exponencial, o esquema de condições iniciais proposto, o esquema de fechamento cúmulos desenvolvido por Fritsch e Chappell (1980), o esquema de fluxo oceânico proposto por Zeng et al. (1998) e o esquema de gradiente de pressão que emprega a

dedução hidrostática com perturbação da temperatura.

Os parâmetros acima mencionados não sofreram alterações no decorrer das simulações realizadas no RegCM4. Portanto, alteraram-se apenas os esquemas de convecção cúmulos, optando pelo método proposto por Grell (GRELL, 1993) ou por Emmanuel (EMMANUEL, 1991), os dados de entrada de TSM (provenientes do OISST ou SST-ERA-Interim), os dados de entrada contendo as variáveis meteorológicas (NNPR1 ou ERA-Interim), além do uso e cobertura da terra, dos parâmetros físicos do BATS e do modelo de superfície empregado pelo RegCM4 (BATS ou CLM). Para facilitar a nomenclatura, cada parâmetro recebeu uma sigla, como descrito abaixo:

- BATS: **B**
- CLM: **C**
- NNPR1: **NN**
- ERA-Interim: **EI**
- OISST: **OS**
- SST-ERA-Interim: **SE**
- Uso e cobertura da terra original do modelo: **UO**
- Uso e cobertura da terra atualizado: **UA**
- Esquema de convecção cúmulos Grell: **GR**
- Esquema de convecção cúmulos Emmanuel: **EM**
- Esquema de convecção cúmulos Emmanuel modificado: **EMMOD**
- Parâmetros físicos do BATS alterado: **BA-parâmetro**

Para a formação da sigla das simulações, optou-se pela ordem: (I) modelo de superfície (B ou C); (II) mapa de uso e cobertura da terra (UO ou UA); (III) dados de entrada relacionados à TSM (OS ou SE); (IV) dados de entrada relacionados às variáveis meteorológicas (NN ou EI); (V) esquema de convecção cúmulos (GR, EM ou EMMOD); e parâmetros físicos do BATS que foi alterado (BA_parâmetro). Consequentemente, uma sigla formada por B_UO_OS_NN_GR significa que foi utilizado o BATS como modelo de superfície com o uso e cobertura da terra original (GLCC de 1992), TSM proveniente do OISST, variáveis meteorológicas derivadas das reanálises do NCEP/NCAR NNPR1 e esquema de convecção cúmulos proposto por Grell (1993). Ressalta-se que a sigla derivada das alterações dos parâmetros físicos do BATS só será inserida quando estas forem realizadas, como, por exemplo, B_UO_OS_NN_GR_BA-IAF, resultante da alteração do IAF de cada

fisionomia vegetal.

Neste trabalho foram realizadas 15 simulações no RegCM4. Na primeira etapa, os dados de entrada do modelo correspondentes às condições iniciais e de contorno lateral e informações de TSM foram avaliados a partir de cada modelo de superfície (BATS ou CLM) e esquema de convecção cúmulos (Grell ou Emmanuel). A partir da comparação com os dados de estações meteorológicas e estimados por satélites, selecionaram-se os dados de entrada e esquema de convecção cúmulos que obtiveram os melhores resultados, que foram utilizados nas demais simulações. A segunda etapa consistiu na alteração do uso e cobertura da terra do modelo e na modificação da fração de água condensada convertida em precipitação a partir do coeficiente proposto por Segele et al. (2009).

A terceira etapa de simulações consistiu na alteração das propriedades físicas utilizadas pelo modelo de superfície BATS. Nesta etapa, foram alteradas as variáveis correspondentes à fração máxima de cobertura vegetal, IAF máximo e mínimo, reflectância *in-band* para comprimentos de onda menores ou igual a $0,7\mu\text{m}$ e reflectância *in-band* para comprimentos de onda maiores que $0,7\mu\text{m}$. Nesta etapa, cada alteração foi processada separadamente para verificar a sensibilidade do modelo ao parâmetro alterado, ao final foram simuladas todas as alterações em conjunto.

A quarta etapa consistiu na simulação das alterações sazonais (a cada 3 meses) da fração máxima de cobertura vegetal, IAF máximo e mínimo, reflectância *in-band* para comprimentos de onda menores ou igual a $0,7\mu\text{m}$ e reflectância *in-band* para comprimentos de onda maiores que $0,7\mu\text{m}$. Posteriormente, foi realizada uma análise de 10 anos (2000-2009) para verificar a sensibilidade do modelo as alterações propostas. A simulação para o período de 2000 a 2009 seguiu os mesmos critérios utilizados na simulação do ano de 2007.

4.2.2 Atualização do mapa de uso e cobertura da terra utilizado pelo BATS

Os dados do *Global Land Cover Characterization* (GLCC) utilizados pelo BATS para modelar os processos e trocas entre a superfície e a atmosfera dividem a superfície terrestre em 20 classes de uso e cobertura da terra (**Figura 8**). Este mapa foi originado a partir de dados orbitais do sensor AVHRR/NOAA com resolução espacial nominal de 1 km para o ano de 1992. Devido à defasagem temporal do mapa, uma das maneiras para modificar o uso e cobertura da terra no RegCM4 consiste na alteração do arquivo em formato *American Standard Code for Information Interchange 2* (ASCII), originado na etapa de pré-processamento e interpolação das modificações no modelo.

Figura 8. Mapa de uso e cobertura da terra utilizado pelo BATS proveniente do GLCC para o ano de 1992.

A principal desvantagem da alteração do arquivo ASCII refere-se à localização espacial de cada classe de uso e cobertura da terra, pois o mesmo não possui coordenadas geográficas. Consequentemente, optou-se por alterar o arquivo original em formato *Network Common Data Form* (NetCDF) utilizado na etapa de pré-processamento. Este arquivo, denominado “GLCC_BATS_*.min.nc”, em que o asterisco (*) representa a resolução espacial do dado, está dividido em 21 camadas. A camada principal do arquivo constitui o código de cada classe de uso e cobertura da terra (como descrito na **Tabela 1**) e as 20 camadas seguintes indicam a proporção de cada classe no pixel.

A informação da proporção é utilizada nos processos de interpolação entre as diferentes possibilidades de resolução horizontal do modelo. Atualmente, o modelo RegCM4 utiliza mapas de uso e cobertura da terra com seis resoluções espaciais distintas, que varia de 4 a 112 km² (especificamente, 4, 6, 9, 18, 56 e 112 km²). Desta forma, ao se utilizar um mapa de uso e cobertura da terra com resolução espacial diferente à adotada nas configurações iniciais do modelo, os valores atribuídos a cada pixel são referentes à classe de uso e cobertura da terra dominante que o compõe, no entanto, os valores proporcionais de cada elemento que compõe o pixel são armazenados, de forma que os processos físicos são calculados separadamente para cada proporção identificada.

Tabela 1. Classes de uso e cobertura da Terra do GLCC utilizadas pelo BATS.

1	Predominância Agrícola	11	Semideserto
2	Gramíneas	12	Gelo / Glaciar
3	Floresta de coníferas	13	Região Pantanosa / Alagada
4	Floresta de coníferas decidual	14	Água interior
5	Floresta Estacional Decidual	15	Oceano
6	Floresta Ombrófila Densa	16	Vegetação arbustiva perene
7	Vegetação Herbácea	17	Vegetação arbustiva decidual
8	Deserto	18	Mosaico de Floresta e pastagem
9	Tundra	19	Mosaico de pastagem e floresta
10	Agricultura irrigada	20	Combinação de água e terra

Para a atualização do uso e cobertura da terra do modelo, foram empregados os dados do ano de 2007 provenientes do produto MCD12Q1 (para a América do Sul) e MCD12C1 (para o restante do globo). Nesta etapa, optou-se em utilizar o esquema de classificação proposto pelo *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP) que separa a superfície em 17 classes. A partir de diversos mapeamentos realizados por órgãos federais e produtos orbitais, o mapa proveniente do MODIS foi atualizado, eliminando eventuais erros na classificação. Desta forma, as áreas urbanas foram atualizadas a partir do fatiamento dos números digitais acima de 56 provenientes do mapa de luzes originado pelo OLS/DMSP, novas áreas agrícolas foram inseridas a partir do produto CANASAT (RUDORFF et al., 2010) e áreas com café mapeadas pelo CAFESAT (MOREIRA et al., 2004) foram agrupadas na classe Mosaico de floresta e pastagem devido à sua fenologia.

Para eliminar erros de omissão de áreas desmatadas na Floresta Amazônica, utilizaram-se os dados do PRODES referentes ao ano de 2007. Consequentemente, no novo mapa, áreas na qual a floresta havia sido derrubada e que eram classificadas como floresta pelo produto MCD12 passaram a ser atribuídas como áreas de gramíneas no novo mapa. Devido à inconsistência entre os esquemas de classificação utilizados pelo BATS e os disponibilizados pelo produto MCD12, as 17 classes do IGBP foram relacionadas com as classes equivalentes do produto GLCC, utilizado pelo BATS. A **Tabela 2** mostra as classes do IGBP e suas respectivas classes no BATS (entre parênteses) remapeadas a partir da análise espacial dos dados.

Após o remapeamento, as classes de uso e cobertura da terra foram separadas no aplicativo SPRING, desenvolvido pelo INPE, em uma camada principal e 20 camadas contendo as proporções de cada classe no pixel, sendo estas interpoladas para a resolução de 0,033 graus (aproximadamente 4 km²). Alguns procedimentos (transformação e compatibilização de diferentes dados, amostragem aleatória, extração de atributos, entre

outros) foram realizados na linguagem LEGAL, implementada no SPRING (SPRING, 2005). Esta linguagem funciona a partir de linhas de comando e foi proposta por Câmara Neto (1995) com o objetivo de auxiliar as operações espaciais e análises estatísticas. A última etapa consistiu na atualização do arquivo “GLCC_BATS_2min.nc” com os dados atualizados de uso e cobertura da terra a partir de um programa realizado no *Interactive Data Language* (IDL).

Tabela 2. Remapeamento das classes do IGBP para as classes do BATS.

Classe	Classificação do IGBP	Classificação utilizada pelo BATS
1	Hidrografia	Água interior / Oceano (14 e 15)
2	Floresta de coníferas	Floresta de coníferas (3)
3	Floresta Ombrófila Densa	Floresta Ombrófila Densa (6)
4	Floresta de coníferas decidual	Floresta de coníferas decidual (4)
5	Floresta Estacional Decidual	Floresta Estacional Decidual (5)
6	Mosaico de Floresta e pastagem	Mosaico de Floresta e pastagem (18)
7	Vegetação arbustiva fechada	Vegetação arbustiva decidual (17)
8	Vegetação arbustiva aberta	Semideserto (11)
9	Savana lenhosa	Mosaico de Floresta e pastagem (18)
10	Savana	Mosaico de pastagem e floresta (19)
11	Gramíneas	Gramíneas (2)
12	Áreas alagadas permanentemente	Região Pantanosa / Alagada (13)
13	Predominância Agrícola	Predominância Agrícola (1)
14	Áreas Urbanas	Deserto (8)
15	Mosaico de Áreas Agrícolas / Vegetação	Predominância Agrícola (1)
16	Gelo / Glaciar	Gelo / Glaciar (12)
17	Solo exposto ou vegetação rala	Deserto (8)

4.2.3 Alteração dos parâmetros físicos utilizados pelo BATS

O BATS utiliza, para o cálculo dos processos que ocorrem na superfície, uma tabela de parâmetros que contém as informações da fração máxima de cobertura vegetal, textura e cor do solo, rugosidade, valor máximo e mínimo de IAF, tamanho da folha, profundidade do solo, reflectância *in-band* para comprimentos de onda menores ou igual a 0,7 μ m, reflectância *in-band* para comprimentos de onda maiores que 0,7 μ m, entre outros. Desta forma, para cada classe de uso e cobertura da terra, estes valores são utilizados para modelar os processos que ocorrem na superfície. Uma das limitações desta tabela é a invariância das propriedades físico-químicas e biológicas da cobertura vegetal ao longo das estações do ano.

Para atualizar os principais parâmetros físicos (fração máxima de cobertura vegetal, valor máximo e mínimo de IAF, reflectância *in-band* para comprimentos de onda menores ou

igual a $0,7\mu\text{m}$ e reflectância *in-band* para comprimentos de onda maiores que $0,7\mu\text{m}$) foram utilizados diversos produtos orbitais derivados do sensor MODIS/Aqua-Terra. Consequentemente, para cada classe de uso e cobertura da terra foram extraídos os valores médios anuais, assim como, os valores médios a cada 3 meses, utilizados para simular a dinâmica da vegetação na América do Sul.

4.2.4 Estimativas da fração máxima de cobertura vegetal

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é utilizado para medir o vigor vegetativo e monitorar a cobertura vegetal de uma determinada superfície a partir das informações espectrais obtidas pelos satélites. O NDVI é estimado pela seguinte razão (ROUSE et al., 1974):

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_{vermelho}}{\rho_{ivp} + \rho_{vermelho}} \quad (1)$$

em que ρ_{ivp} representa a reflectância *in-band* na faixa do espectro eletromagnético (EEM) referente ao infravermelho próximo ($0,73\mu\text{m}$ – $1,3\mu\text{m}$) e $\rho_{vermelho}$ representa a faixa do EEM referente ao vermelho ($0,622\mu\text{m}$ – $0,700\mu\text{m}$). Ressalta-se que a faixa do EEM imageada pelos sensores pode variar de sensor para sensor. Com base no NDVI pode-se estimar a fração de cobertura vegetal (σ_v) a partir de três metodologias diferentes.

De uma maneira geral, cada pixel que compõem uma imagem orbital pode ser representado por uma média ponderada da radiância espectral de cada elemento. Esta mistura ocorre devido à existência de mais de um alvo na área de abrangência de cada pixel, no qual o valor digital possui informações sobre a proporção da mistura de cada alvo (ROBERTS et al., 1998). Consequentemente, a resposta espectral dos pixels em qualquer comprimento de onda pode ser considerada como uma combinação de cada componente da mistura (SHIMABUKURO e SMITH, 1991).

Considerando o nível digital como uma média ponderada entre os elementos que compõem o pixel, a radiância espectral estimada pelo sensor (L_λ) pode ser definida como o somatório linear das componentes da vegetação (σ_v) e do solo exposto ($1-\sigma_v$):

$$L_\lambda = L_{\lambda,v} \sigma_v + (1 - \sigma_v) L_{\lambda,s} \quad (2)$$

em que $L_{\lambda,v}$ representa a radiância espectral da vegetação e $L_{\lambda,s}$ a radiância espectral do solo. Aplicando esta relação linear no NDVI, pode-se determinar a fração de cobertura vegetal a partir de:

$$\sigma_v = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (3)$$

Embora alguns estudos indiquem que existe uma relação não-linear entre o NDVI e a fração de cobertura vegetal (CARLSON e RIPLEY, 1997), outros estudos propõem que a abordagem linear para estudos globais é adequada, devido principalmente, à falta de dados necessários à solução das equações não-lineares. Desta forma, a Equação 3 será utilizada neste trabalho para determinar a fração máxima de cobertura vegetal a partir dos dados de NDVI estimados pelo sensor MODIS/TERRA.

4.2.5 Fluxograma da metodologia

A **Figura 9** contém o fluxograma da metodologia, dividido em 5 etapas principais. A primeira etapa (I) consiste nas simulações com o RegCM4 com o mapa de uso e cobertura da terra original do modelo (GLCC de 1992), utilizando diversas fontes de condições iniciais, contorno lateral e TSM, os modelos de superfície disponíveis (BATS ou CLM) e os esquemas de convecção cúmulos (Grell ou Emmanuel). Nesta etapa, os resultados das simulações são avaliados a partir dos dados provenientes do INMET/CPTEC e do TRMM, consequentemente, a simulação que apresentar a maior coerência com os dados observados será escolhida como a simulação padrão, a qual será utilizada para comparar os resultados obtidos a partir das demais modificações realizadas no modelo.

A segunda e terceira etapas (II e III) referem-se à atualização do mapa de uso e cobertura da terra a partir de produtos e dados orbitais disponíveis atualmente e a obtenção e atualização dos parâmetros físicos utilizados no BATS, respectivamente. Para cada alteração realizada no modelo, os resultados da simulação serão avaliados a partir dos dados meteorológicos disponíveis. A quarta etapa refere-se à validação dos dados do TRMM em relação aos dados do INMET/CPTEC. Nesta etapa, optou-se por utilizar todos os anos disponíveis deste produto (1998 a 2010). Desta forma, para cada estação meteorológica disponível (**Figura 4**) será extraído os valores correspondentes em ambos os produtos e a análise estatística será efetuada. A última etapa (V) consiste na análise de todos os resultados obtidos durante o trabalho.

Figura 9. Fluxograma da metodologia, dividido em 5 etapas principais.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Validação dos dados do TRMM

Na Figura 10 observam-se as regressões entre os dados mensais de precipitação disponibilizados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE (a partir dos dados do SYNOP/INMET, PCDs e parceiros do PMTCRH/INPE) e os dados estimados pelo TRMM para o período compreendido entre janeiro de 1998 e dezembro de 2010. Neste trabalho, os dados obtidos por ambos os produtos foram analisados para as 183 estações meteorológicas espalhadas nas cinco regiões brasileiras. Para cada região, a regressão consistiu na relação entre a média da precipitação acumulada para cada mês do período analisado, totalizando uma análise de 156 meses.

A **Figura 10a** apresenta a relação entre os dados de precipitação para a região Centro-Oeste. De um modo geral, observa-se uma concordância de 96% entre os dados observados e os dados estimados pelo TRMM (significante a $p < 0,05$, teste *t-student*). Entretanto, os dados estimados a partir do TRMM apresentam valores 9% maiores que os valores de precipitação acumulada observados pelas redes de estações meteorológicas do INMET/CPTEC. Do mesmo modo, os dados do TRMM para a região Sul (**Figura 10b**) apresentaram valores 8% maiores que os dados observados pelas estações meteorológicas e uma correlação de 95% (significante a $p < 0,05$, teste *t-student*) entre ambos os dados.

A comparação entre a precipitação mensal observada e estimada para a região Norte (**Figura 10c**) apresentou uma correlação de 97% (significante a $p < 0,05$, teste *t-student*). Nesta região, os valores do TRMM superestimaram a precipitação mensal em 6%, sendo, portanto, a região que apresentou a melhor concordância dos valores estimados ao se considerar como verdade terrestre os dados do TRMM. Para as regiões Sudeste e Nordeste (**Figuras 10d e Figura 10e**, respectivamente), a regressão entre os dados observados e estimados apresentaram uma correlação de aproximadamente 98% (significante a $p < 0,05$, teste *t-student*), porém, os valores de precipitação estimados pelo TRMM diferem significativamente entre as duas regiões. Para a região Sudeste estes valores foram superestimados em 13%, enquanto que para a região Nordeste os valores foram 9% maiores. Ao relacionar os dados estimados pelo TRMM e as 183 estações espalhadas por todo o Brasil (**Figura 10f**), constata-se que estes superestimam a precipitação mensal em aproximadamente 8% e apresentam uma concordância de aproximadamente 97%.

Figura 10. Relação entre os dados mensais de precipitação para o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2010, disponibilizados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE (eixo x, em mm) e estimados pelo TRMM (eixo y, em mm) para: (a) Região Centro-Oeste; (b) Região Sul; (c) Região Norte; (d) Região Sudeste; (e) Região Nordeste; e (f) Brasil.

Com o objetivo de analisar a variabilidade dos erros, os dados de precipitação mensal foram separados em meses do ano e agrupados para cada região do Brasil. A **Tabela 3** apresenta os valores mensais das correlações entre os dados provenientes do INMET/CPTEC e os dados estimados pelo TRMM, além do erro médio quadrático (RMSE), do erro sistemático (BIAS) e do erro absoluto (%).

Tabela 3. Valores mensais médios do coeficiente de correlação, RMSE, BIAS e erro absoluto.

Mês	Região	Coefficiente de correlação	RMSE (mm)	BIAS (mm)	Erro Absoluto (%)
Janeiro	Centro-Oeste	0,76	52,89	21,92	+18,46
	Norte	0,62	42,64	15,14	+12,29
	Nordeste	0,98	20,60	17,92	+17,24
	Sul	0,91	30,86	16,43	+16,19
	Sudeste	0,93	35,55	14,70	+12,44
Fevereiro	Centro-Oeste	0,86	34,60	13,35	+11,79
	Norte	0,67	34,26	11,58	+08,71
	Nordeste	0,98	16,05	12,11	+08,47
	Sul	0,97	19,07	10,74	+09,23
	Sudeste	0,94	25,98	16,41	+15,22
Março	Centro-Oeste	0,84	31,56	15,37	+12,93
	Norte	0,80	28,45	8,56	+02,87
	Nordeste	0,94	24,02	13,10	+11,99
	Sul	0,98	16,57	12,11	+12,11
	Sudeste	0,97	20,34	12,36	+10,93
Abril	Centro-Oeste	0,80	20,30	18,96	+11,58
	Norte	0,88	24,95	9,48	+08,31
	Nordeste	0,98	21,34	12,93	+11,33
	Sul	0,96	23,22	15,88	+13,57
	Sudeste	0,97	12,49	21,48	+19,59
Maio	Centro-Oeste	0,91	12,07	18,79	+07,86
	Norte	0,91	16,88	7,33	+06,10
	Nordeste	0,97	13,48	12,33	+09,20
	Sul	0,96	14,15	8,14	+05,00
	Sudeste	0,96	6,19	12,82	+06,26
Junho	Centro-Oeste	0,98	4,16	19,80	+05,78
	Norte	0,89	18,46	14,97	+14,77
	Nordeste	0,90	10,52	9,14	+05,83
	Sul	0,91	18,62	19,31	+18,19
	Sudeste	0,98	4,43	24,44	+22,85
Julho	Centro-Oeste	0,93	6,29	31,72	+19,23
	Norte	0,80	12,63	12,10	+11,25
	Nordeste	0,86	8,08	10,50	+00,67
	Sul	0,97	13,53	9,32	+09,25
	Sudeste	0,95	3,78	15,32	+08,41
Agosto	Centro-Oeste	0,98	8,04	32,59	+24,22
	Norte	0,84	8,52	11,58	+09,94
	Nordeste	0,94	3,96	8,39	+04,43
	Sul	0,99	7,14	6,60	+06,30
	Sudeste	0,95	7,89	34,07	+34,07
Setembro	Centro-Oeste	0,91	17,74	29,58	+20,16
	Norte	0,93	8,76	10,33	+04,57
	Nordeste	0,96	5,99	14,59	+09,90
	Sul	0,92	27,62	11,54	+07,45
	Sudeste	0,98	7,50	14,32	+10,41
Outubro	Centro-Oeste	0,73	30,05	21,53	+12,64
	Norte	0,57	19,20	16,47	+14,22
	Nordeste	0,97	7,74	28,84	+23,99
	Sul	0,95	17,49	8,55	+04,15
	Sudeste	0,96	21,96	21,81	+21,80
Novembro	Centro-Oeste	0,82	24,82	12,71	+11,89
	Norte	0,86	19,35	11,74	+09,40
	Nordeste	0,92	9,27	17,42	+12,72
	Sul	0,95	21,22	12,53	+07,08
	Sudeste	0,91	32,74	15,44	+15,44
Dezembro	Centro-Oeste	0,83	35,48	14,86	+13,44
	Norte	0,95	26,04	12,10	+10,71
	Nordeste	0,98	12,68	18,31	+17,44
	Sul	0,95	20,17	14,29	+10,87
	Sudeste	0,90	39,14	15,28	+15,28

Os resultados das correlações mensais para cada região indicam que os dados estimados pelo TRMM apresentam uma boa concordância (em média 90%) com os dados das redes de estações meteorológicas. Ainda, as análises mensais indicam que o RMSE, frequentemente utilizado para verificar as diferenças entre os dados estimados e observados, possui valores médios entre 17 ± 10 mm. Além disso, os dados do TRMM possuem a tendência de superestimar a precipitação mensal em 15%. Contudo, as estimativas de precipitação apresentam variações de acordo com a região de estudo e com o período seco ou chuvoso (**Figura 11**).

Observa-se na **Figura 11** que nos quatro primeiros meses do ano, que correspondem ao período chuvoso nas regiões Centro-Oeste, Norte, Nordeste e Sudeste, a relação entre os dados estimados e observados apresentaram comportamento similar. De uma maneira geral, as regiões Centro-Oeste e Norte apresentaram os menores valores de correlação (entre 62 e 88%) com erros de até 53 mm em relação aos dados observados. Estas diferem significativamente das demais regiões que apresentaram correlações acima de 91%. Em todas as regiões, os valores foram superestimados, variando entre 8 e 20%.

Figura 11. Distribuição mensal da precipitação acumulada para as regiões brasileiras: (a) Centro-Oeste; (b) Norte; (c) Nordeste; (d) Sul; e (e) Sudeste.

Para o período seco (maio a setembro), as correlações das regiões Centro-Oeste e Norte aumentam consideravelmente, apresentando valores acima de 80%. Neste mesmo período as correlações das demais regiões permanecem entre 90 e 98%. Na média, os valores estimados pelo TRMM superestimaram a precipitação em aproximadamente 10%. Porém, é comum encontrar casos em que os valores de precipitação são 4% (Agosto, Região Nordeste) ou mesmo 34% maiores (Agosto, Região Sudeste) do que os dados estimados pelas estações meteorológicas.

No período de transição da estação seca para a chuvosa (outubro a dezembro), os erros aumentam para as regiões Norte e Centro-Oeste (RMSE acima de 20 mm) e as correlações decrescem, podendo alcançar 57% (Região Norte, outubro). Para estes meses, os valores de precipitação foram superestimados em aproximadamente 13%. Constata-se que em média, os valores de correção podem variar de 57% (Região Norte) a 99% (Região Sul), consequentemente, os RMSE podem ser baixos como, por exemplo, 4 mm (regiões Nordeste e Sudeste) e alcançar valores superiores a 50 mm, equivalente a 25% do total de precipitação acumulada no mês em questão. Ainda, para todas as regiões do Brasil e para todos os meses, os dados do TRMM superestimaram a precipitação em aproximadamente $12 \pm 6\%$.

A **Figura 12** apresenta os valores médios da precipitação anual para o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2010. Estes valores foram estimados a partir dos dados disponibilizados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE (**Figura 12a**) e a partir dos dados do TRMM produto 3B43 V6 (**Figura 12b**). Embora os dados do TRMM apresentem apenas 13 anos de observações, obtém-se uma boa concordância entre os padrões espaciais da precipitação anual. Entre as regiões que apresentaram as maiores diferenças, pode-se citar a região noroeste do Estado do Amazonas e a região nordeste do Estado do Pará e do Amapá, com valores observados entre 2700 e 3000 mm e estimados entre 3000 e 3900 mm pelo TRMM.

Avaliando as características destas regiões, pode-se destacar que as maiores variações entre os dados originados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE e estimados pelo TRMM ocorrem em áreas com grande atividade convectiva. Entre os fatores que podem originar estes erros pode-se citar a resolução temporal do sensor, que obtém informações da precipitação em intervalos discretos regulares e a frequência de observações, que é muito maior nas altas latitudes do que em regiões próximas ao Equador (HUFFMAN et al., 2007).

Figura 12. Valores médios da precipitação anual para o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2010. (a) Valores médios da precipitação anual estimada a partir dos dados disponibilizados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE (SYNOP/INMET, PCDs e parceiros do PMTCRH/INPE); e (b) Valores médios da precipitação anual estimada pelo TRMM.

5.2 Simulações com o RegCM4 e condições iniciais e de contorno lateral

Para determinar as configurações do modelo RegCM4 que serão utilizadas como referência, realizaram-se 8 simulações, caracterizadas pela alteração das condições iniciais e de contorno lateral (NNPR1 ou ERA-Interim; OISST ou SST-ERA-Interim), parametrização cúmulos (Grell ou Emmanuel) e modelo de superfície (BATS ou CLM). Para a avaliação, os dados diários das simulações foram convertidos em médias mensais, e seus resultados comparados com os dados provenientes do TRMM e INMET/CPTEC.

A **Figura 13** apresenta o resultado das simulações utilizando o modelo de superfície BATS e diferentes condições iniciais, de contorno lateral e parametrização cúmulos. Todas as simulações utilizaram a técnica de relaxamento exponencial, o esquema de cúmulos de Grell com fechamento de Fritsch e Chappell (1980), o esquema de fluxo oceânico proposto por Zeng et al. (1998) e o esquema de gradiente de pressão que emprega a dedução hidrostática com perturbação da temperatura.

Dada às características acima mencionadas, optou-se por utilizar em conjunto os dados de TSM e de reanálise do centro europeu de previsão do tempo a médio prazo (SST-ERA-Interim e ERA-Interim, respectivamente) e os dados de TSM do NOAA e da reanálise do NCAR/NCEP (OISST e NNPR1, respectivamente), alterando, desta forma, o esquema de

parametrização cúmulos adotado para cada simulação. A **Figura 13a e 13b** exibem as médias anuais para o ano de 2007 da precipitação, da temperatura máxima e da temperatura mínima utilizando os dados provenientes do SST-ERA-Interim e ERA-Interim e com o esquema de parametrização cúmulos Emmanuel (**B_UO_SE_EI_EM**) e Grell (**B_UO_SE_EI_GR**). Do mesmo modo, as **Figuras 13c e 13d** apresentam os resultados utilizando os dados do OISST e NNPR1, com a parametrização cúmulos Emmanuel (**B_UO_OS_NN_EM**) e Grell (**B_UO_OS_NN_GR**).

Figura 13. Valores anuais médios para o ano de 2007 da precipitação (mm), da temperatura máxima (°C) e da temperatura mínima (°C) simulados pelo RegCM4 e observados pelo TRMM e INMET/CPTEC (e, f, g).

Em geral, ao se utilizar a parametrização cúmulos proposta por Emmanuel (1991) em ambas as simulações (**B_UO_SE_EI_EM** e **B_UO_OS_NN_EM**), os valores médios de precipitação são superestimados em grande parte da América do Sul, principalmente na região Amazônica, em regiões próximas à cordilheira dos Andes, nas regiões Sudeste e Centro-Oeste e no litoral da região Sul (**Figuras 13a e 13c**). Nestas áreas, os valores de precipitação podem ser 1000 mm maiores que os estimados pelo TRMM. Contudo, embora a distribuição espacial da precipitação apresente um padrão similar ao estimado pelo TRMM, a região Sul do Brasil, principalmente no oeste do Estado de Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, compreendem áreas na qual o modelo RegCM4 foi ineficiente na estimativa da distribuição da precipitação. Este erro pode estar associado à capacidade do modelo em representar os sistemas que atuam na região Sul, como, por exemplo, CCM e chuvas convectivas.

Os resultados das simulações utilizando a parametrização cúmulos proposta por Grell (1993), visualizados nas **Figuras 13b e 13d** (**B_UO_SE_EI_GR** e **B_UO_OS_NN_GR**, respectivamente) ocasionou a subestimativa da precipitação em praticamente todas as regiões da América do Sul, com exceção da região central próxima à cordilheira dos Andes. Em relação às temperaturas máximas e mínimas, todas as simulações apresentaram resultados consistentes com os observados, em geral, o uso das condições iniciais e de contorno lateral provenientes do SST-ERA-Interim e ERA-Interim proporcionaram melhores resultados. Entretanto, obtém-se uma superestimativa de ambas as temperaturas para a região Norte do Brasil.

A **Tabela 4** exhibe as correlações entre os dados simulados no RegCM4 e os dados estimados pelo TRMM e pelo INMET/CPTEC. Na análise regional da precipitação, as simulações que empregaram o modelo de superfície BATS e diferentes condições iniciais, de contorno lateral e parametrização cúmulos, indicam que os melhores resultados foram obtidos utilizando os dados do SST-ERA-Interim e ERA-Interim e com o esquema de parametrização cúmulos proposto por Emmanuel (1991). Entre as simulações com o BATS, a região Sul foi a que apresentou as piores correlações, apresentando valores inferiores a 0,30. Para as demais regiões, os valores encontrados foram superiores a 0,81, com exceção das simulações que empregaram os dados do OISST e NNPR1, nas quais os valores das correlações apresentaram valores acima de 0,66. Desta forma, assim como constatado na **Figura 13**, a parametrização cúmulos de Emmanuel (1991) apresenta menores erros nas estimativas da precipitação média mensal quando comparada à parametrização proposta por Grell (1993).

Em relação à temperatura máxima e mínima, foi obtido um bom ajuste do modelo para

todas as regiões (valores acima de 0,82), com exceção da região Nordeste. Nesta, as correlações da temperatura mínima e máxima apresentaram erros menores quando os dados de entrada do modelo eram compostos pelas reanálises do SST-ERA-Interim e ERA-Interim. Ainda, o emprego da parametrização cúmulos proposta por Emmanuel (1991) proporciona uma melhora de aproximadamente 60% nas estimativas de temperatura mínima e máxima na região Nordeste em relação à parametrização de Grell (1993). Ressalta-se que embora a parametrização de Emmanuel (1991) melhore as estimativas de precipitação para a América do Sul e de temperatura mínima na região Nordeste, reduz as correlações da temperatura mínima nas regiões Centro-Oeste e Norte devido à superestimativa da precipitação.

Tabela 4. Correlações entre os dados observados e os dados simulados no RegCM4.

Características	Região	Precipitação	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima
B_UO_SE_EI_EM	Centro-Oeste	0,904	0,833	0,974
	Norte	0,959	0,780	0,953
	Nordeste	0,873	0,759	0,720
	Sudeste	0,938	0,927	0,978
	Sul	0,244	0,987	0,990
B_UO_SE_EI_GR	Centro-Oeste	0,845	0,902	0,962
	Norte	0,878	0,942	0,951
	Nordeste	0,817	0,448	0,558
	Sudeste	0,911	0,931	0,973
	Sul	0,048	0,989	0,990
B_UO_OI_NN_EM	Centro-Oeste	0,957	0,823	0,976
	Norte	0,669	0,857	0,945
	Nordeste	0,768	0,675	0,714
	Sudeste	0,984	0,889	0,967
	Sul	0,305	0,985	0,996
B_UO_OI_NN_GR	Centro-Oeste	0,862	0,853	0,922
	Norte	0,752	0,915	0,952
	Nordeste	0,693	0,275	0,656
	Sudeste	0,957	0,946	0,978
	Sul	0,128	0,985	0,997
C_UO_SE_EI_EM	Centro-Oeste	0,932	0,850	0,975
	Norte	0,955	0,844	0,847
	Nordeste	0,949	0,881	0,639
	Sudeste	0,939	0,894	0,952
	Sul	0,252	0,989	0,992
C_UO_SE_EI_GR	Centro-Oeste	0,964	0,845	0,947
	Norte	0,927	0,945	0,897
	Nordeste	0,907	0,698	0,526
	Sudeste	0,844	0,860	0,953
	Sul	0,083	0,985	0,989
C_UO_OI_NN_EM	Centro-Oeste	0,959	0,884	0,968
	Norte	0,768	0,900	0,807
	Nordeste	0,867	0,811	0,602
	Sudeste	0,955	0,903	0,952
	Sul	-0,165	0,988	0,994
C_UO_OI_NN_GR	Centro-Oeste	0,943	0,748	0,918
	Norte	0,769	0,912	0,872
	Nordeste	0,756	0,741	0,413
	Sudeste	0,882	0,848	0,942
	Sul	0,001	0,985	0,987

Correlação

	0.9-1.0
	0.8-0.9
	0.7-0.8
	0.6-0.7
	< 0.6

A **Figura 14** apresenta o resultado das simulações utilizando o modelo de superfície CLM a partir de diferentes condições iniciais, de contorno lateral e parametrização cúmulos. Assim como nas simulações realizadas com o BATS (**Figura 13**), aplicaram-se a técnica de relaxamento exponencial, o esquema de condições iniciais proposto por Holtslag et al. (1990), o esquema de fechamento cúmulos desenvolvido por Fritsch e Chappell (1980), o esquema de fluxo oceânico proposto por Zeng et al. (1998) e o esquema de gradiente de pressão que emprega a dedução hidrostática com perturbação da temperatura.

A **Figura 14a** e **Figura 14b** exibem as médias anuais para o ano de 2007 da precipitação, da temperatura máxima e da temperatura mínima, obtidas a partir dos dados provenientes do SST-ERA-Interim e ERA-Interim e com o esquema de parametrização cúmulos Emmanuel (C_UO_SE_EI_EM) e Grell (C_UO_SE_EI_GR). Igualmente, as **Figuras 14c** e **14d** apresentam os resultados utilizando os dados do OISST e NNPR1, com a parametrização cúmulos Emmanuel (C_UO_OS_NN_EM) e Grell (C_UO_OS_NN_GR).

Na **Figura 14**, nota-se que ao utilizar a parametrização cúmulos proposta por Emmanuel (1991) e o modelo de superfície CLM (C_UO_SE_EI_EM e C_UO_OS_NN_EM), os valores médios de precipitação são superestimados principalmente na região noroeste da Floresta Amazônica, em regiões próximas à cordilheira dos Andes e nas regiões Sudeste e Centro-Oeste (**Figuras 14a** e **14c**). Assim como nas simulações realizadas com o BATS, a distribuição espacial da precipitação apresenta um padrão similar ao estimado pelo TRMM, com exceção do oeste do Estado de Santa Catarina e o Estado do Rio Grande do Sul. Ainda, os resultados das simulações utilizando a parametrização cúmulos proposta por Grell (1993), visualizados nas **Figuras 14b** e **14d** (C_UO_SE_EI_GR e C_UO_OS_NN_GR, respectivamente) ocasiona a subestimativa da precipitação em praticamente todas as regiões da América do Sul.

Deste modo, é possível constatar um ajuste geral de aproximadamente 85% do modelo CLM em relação à temperatura mínima e máxima do Brasil. Em geral, o uso das condições iniciais e de contorno lateral provenientes do SST-ERA-Interim e ERA-Interim proporcionaram melhores resultados. Entretanto, obtém-se uma superestimativa de ambas as temperaturas para a região Norte do Brasil.

Como visualizado na **Tabela 4**, as simulações realizadas a partir do modelo de superfície CLM com diferentes condições iniciais, de contorno lateral e parametrização cúmulos, indicam que os melhores resultados são obtidos utilizando os dados do SST-ERA-Interim e ERA-Interim e com o esquema de parametrização cúmulos proposto por Emmanuel

(1991), como constatado, também, com o emprego do BATS. As piores correlações são encontradas na região Sul, onde os valores oscilaram entre -0,16 a 0,25. Para as demais regiões, os valores encontrados são superiores a 0,90 (superior aos valores encontrados com a utilização do BATS). Desta forma, assim como constatado na **Figura 13**, a parametrização cúmulos de Emmanuel (1991) apresenta um melhor desempenho nas estimativas da precipitação média mensal quando comparada à parametrização proposta por Grell (1993).

Figura 14. Valores anuais médios para o ano de 2007 da precipitação (mm), da temperatura máxima (°C) e da temperatura mínima (°C) estimados pelo TRMM e pelo INMET/CPTEC e a partir das simulações realizadas no RegCM4 utilizando o modelo de superfície CLM e diferentes condições iniciais, de contorno lateral e de parametrização cúmulos.

Em relação à temperatura máxima e mínima possível constatar uma concordância do

modelo para todas as regiões (valores acima de 0,81), com exceção da temperatura mínima estimada para a região Nordeste. Nesta, as correlações da temperatura mínima e máxima apresentam um melhor ajuste quando os dados de entrada do modelo eram compostos pelas reanálises do SST-ERA-Interim e ERA-Interim. Ainda, o modelo CLM apresenta um melhor desempenho nas estimativas de precipitação e temperatura máxima se comparado com as simulações realizadas com o BATS. Este fato está relacionado com a utilização de parâmetros dinâmicos da vegetação que variam de acordo com os meses do ano. Dada às circunstâncias acima descritas, as simulações provenientes do emprego do SST-ERA-Interim e ERA-Interim com condições iniciais e de contorno lateral e da parametrização cúmulos proposta por Emmanuel (**B_UO_SE_EI_EM** e **C_UO_SE_EI_EM**) serão utilizadas para as demais análises e comparações realizadas no decorrer do trabalho.

5.3 Atualização do uso do solo e simulação no RegCM4

A **Figura 15a** mostra o mapa de uso e cobertura da terra utilizado pelo modelo de superfície BATS para determinar os parâmetros físicos (IAF, albedo, rugosidade, tipo de solo, entre outros) necessários às simulações dos processos que ocorrem entre a biosfera-atmosfera. Este dado, correspondente ao produto derivado do sensor AVHRR/NOAA com resolução espacial nominal de 1 km e obtidos no ano de 1992, encontra-se defasado e possui algumas inconsistências como, por exemplo, a classificação de áreas agrícolas no interior da região nordeste e ausência destas em Santa Catarina, Paraná e Rio grande do Sul, omissão de corpos d'água na floresta Amazônica e no bioma Pantanal. Além disto, desde a década de 90, o uso e cobertura da terra apresentou modificações significativas na América do Sul. Pode-se citar, por exemplo, o acentuado desmatamento do bioma Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, além do crescimento de áreas agrícolas.

A **Figura 15b** apresenta o mapa de uso e cobertura da terra proveniente do produto MCD12Q1 do sensor MODIS composto pelo mosaico das observações das plataformas Aqua e Terra, com resolução espacial nominal de 500 m. Entre as principais diferenças em relação à **Figura 15a**, pode-se destacar a expansão de áreas agrícolas, a diminuição de áreas florestadas como a floresta Amazônica, a delimitação de áreas agrícolas, entre outras. Considerando-se que o mapa produzido com os dados do sensor MODIS apresenta uma concordância que pode variar de 60% a 90% para diferentes classes de uso e cobertura, com uma acurácia média de 78,3%, optou-se por melhorar a classificação para a América do Sul a partir de mapeamentos provenientes do PRODES, CANASAT e CAFESAT, obtendo-se a **Figura 15c**.

Figura 15. (a) Mapa de uso e cobertura da terra de 1992 do GLCC atualmente inserido no modelo RegCM4; (b) Mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2007 proveniente do produto MCD12Q1 (para a América do Sul); (c) Atualização do mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2007 elaborado com base no produto MCD12Q1 e nos dos dados do PRODES, CANASAT, CAFESAT e mapa de luzes.

Na **Tabela 5** pode-se visualizar a tabulação cruzada entre o mapa de uso e cobertura da terra original do modelo (GLCC, 1992), representado nas linhas, e o mapa final, originado do produto MCD12Q1 (**Figura 15c**), descrito nas colunas.

Tabela 5. Área alterada entre as informações de cobertura da terra obtidas do GLCC 1992 e para o ano 2007. A tabulação cruzada indica a fração da área alterada entre os dois conjuntos de informação.

MCD12 GLCC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	TOTAL (x10 km²)
1	69.113	14.275	56	14	1408	9200	1	2112	0	836	22	2237	25	98	7	8972	14.873	54.333	177.582
2	12.941	43.083	2764	40	6518	7884	0	769	0	36.973	664	1418	105	637	0	15.952	6587	1797	138.131
3	183	35	461	0	10	323	0	1	0	0	0	39	0	0	0	1	245	67	1366
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	52.849	18.963	141	8	5899	610.907	0	1271	0	98	11	13.770	0	7	0	684	16.375	40.875	761.859
7	12.094	17.949	32	0	3188	4833	418	619	0	181	17	2862	1	0	0	637	18.741	64.716	126.289
8	290	1225	171	10	21	241	0	42.450	0	11.353	817	77	0	92	0	949	329	383	58.409
9	1504	5152	71	7	86	5901	0	3877	220	15.243	927	56	0	0	0	1295	938	1419	36.697
10	286	4	4	0	1	155	0	25	0	3	0	40	0	0	0	1	36	36	592
11	580	4880	29	6	32	268	0	641	0	43.167	22	64	24	39	0	7397	679	163	57.990
12	234	499	435	7	39	128	0	14	0	120	2420	8	0	8	0	421	127	0	4461
13	302	251	0	0	29	895	0	0	0	0	0	273	1	0	0	0	109	230	2091
14	2067	1234	107	3	191	2281	0	229	0	673	142	1667	4103	7	0	710	789	993	15.195
15	5526	1696	3378	72	693	6100	0	1989	0	2470	170	2766	10	3.555.674	6	4807	1561	587	3.587.505
16	1821	1848	3	3	107	173	0	654	0	29.260	17	47	0	59	234	7266	1008	81	42.580
17	1351	7238	100	3	24	2657	0	10.176	0	21.525	57	123	0	14	0	2260	1395	17.202	64.124
19	1157	708	5055	20	404	17.125	0	206	0	1512	902	199	43	429	0	2849	6555	20	37.185
TOTAL (x10 km²)	266.701	148.132	13.258	251	57.721	707.235	420	68.657	220	171.088	6486	31.686	4394	3.557.093	247	59.574	134.058	329.337	

Legenda:

1	Predominância Agrícola	2	Gramíneas	3	Floresta de coníferas	4	Floresta de coníferas decidual	5	Floresta Estacional Decidual		
6	Floresta Ombrófila Densa	7	Vegetação Herbácea	8	Deserto	9	Tundra	10	Agricultura irrigada		
11	Semideserto	12	Gelo/ Glaciar	13	Região Pantanosa/ Alagada	14	Água interior	15	Oceano	16	Vegetação arbustiva perene
17	Vegetação arbustiva decidual	18	Mosaico de Floresta e pastagem	19	Mosaico de pastagem e floresta	20	Combinação de água e terra				

A **Tabela 5** indica as alterações efetuadas (área, em km²) nas classes de uso e cobertura da terra com a substituição das informações provenientes do GLCC (1992) pelos dados originados do sensor MODIS (MCD12Q1). Desta forma, a última linha e a última coluna da tabela indicam a área total (x10 km²) de cada classe temática no mapa final de 2007 e do GLCC de 1992, respectivamente. Pode-se citar como exemplo, a classe 1 (Predominância Agrícola), que possuía uma área de 1.775.820 km² no mapa do GLCC de 1992 (linha 1 x coluna 20 –TOTAL) e passou para 2.667.010 km² no mapa de 2007 (linha 20 – TOTAL x coluna 1), um aumento de aproximadamente 50%. Ainda, nas colunas é possível verificar quais classes foram alteradas para dar origem ao novo mapa, e nas linhas a posição onde as áreas antigas estavam inseridas na nova classificação. Consequentemente, os valores em negrito correspondem às áreas que não sofreram alterações entre os dois mapas.

Deste modo, aproximadamente 691.130 km² foram classificados como áreas agrícolas em ambos os mapeamentos (linha 1 x coluna 1), entretanto, 528.490 km² de floresta ombrófila densa (linha 6 x coluna 1) e 120.940 km² de vegetação herbácea (linha 7 x coluna 1) foram convertidas para agricultura. Ressalta-se ainda que no mapa do GLCC, aproximadamente 108.000 km² de áreas agrícolas (soma da área restante da coluna 1 que não foram mencionadas), foram substituídas por outras classes. Esta variação pode ser verificada principalmente na região Nordeste, na qual as áreas do sertão originalmente classificadas como agrícolas (**Figura 15a**) foram consideradas como vegetação arbustiva decidual e mosaico de pastagem e floresta (**Figura 15c**). Devido à diferença de resolução e registro dos mapas, as áreas litorâneas e próximas aos corpos d'água, que eram classificadas pelo GLCC como mosaico de água e terra, foram substituídas pelas classes do MCD12Q1.

Outra modificação importante no mapa de uso e cobertura da terra refere-se à substituição de áreas de floresta ombrófila densa, vegetação herbácea (189.630 km² e 179.490 km², respectivamente linhas 6 e 7, coluna 2) e áreas agrícolas (140.275 km², linha 1 x coluna 2), por gramíneas (classe 2), correspondendo a um aumento de aproximadamente 7%. A partir da substituição das classes do MCD12Q1 para as classes de uso e cobertura relativas ao BATS, obteve-se uma melhor representação das classes que correspondem à floresta de coníferas (classe 3, 870% de aumento), floresta de coníferas decidual (classe 4,) e floresta estacional decidual (classe 5). Ressalta-se que estas duas últimas não possuíam representação na classificação do GLCC. Além disto, regiões de floresta ombrófila densa (classe 6) diminuíram 8%, contudo, em relação ao mapa do GLCC, foram mantidas apenas 86% da área original, desta forma, áreas classificadas erroneamente como agrícolas (classe 1), gramíneas

(classe 2) e mosaico de pastagem e floresta (classe 9) na antiga classificação foram substituídas por áreas de floresta neste novo mapa.

As demais classes sofreram variações menores, com destaque para a inserção de áreas compostas por mosaico de floresta e pastagem (classe 18), substituindo áreas agrícolas, floresta ombrófila densa e vegetação herbácea, além da classe 19 (mosaico de pastagem e floresta), que manteve apenas 200 km² em relação ao antigo mapa.

As **Figura 16a e 16b** exibem a relação entre os dados mensais de precipitação (eixo x) estimados pelo TRMM e simulados pelo RegCM4 para o ano de 2007 (eixo y) com o emprego do mapa de uso e cobertura original (**B_UO_SE_EI_EM**) e com a alteração do mapa de uso e cobertura pela aplicação dos dados provenientes dos produtos MCD12Q1, PRODES, CANASAT, CAFESAT e mapa de luzes (**B_UA_SE_EI_EM**), respectivamente. Nas regressões, é possível constatar uma melhora significativa na correlação da precipitação entre os dados estimados pelo TRMM e simulados pelo modelo. Desta forma, com a atualização do uso e cobertura da terra, obtém-se uma melhora de 14% na estimativa da precipitação pelo modelo no RegCM4 (simulação **B_UA_SE_EI_EM**) em relação ao dados de precipitação do TRMM ($r^2 = 0,71$ e $0,84$; respectivamente), proporcionando um aumento de $0,84$ para $0,92$ no coeficiente de correlação (r , *significante a $p < 0,05$, teste t -student*).

A partir das modificações realizadas no uso e cobertura da terra, é possível constatar que embora os resultados simulados apresentem uma melhor correlação com os dados estimados pelo TRMM ($r = 0,92$), em geral, os valores de precipitação modelados no RegCM4 encontram-se superestimados em 20%. Contudo, apesar da parametrização cúmulos desenvolvida por Emmanuel (1991) superestimar a precipitação, esta permite uma melhor representação da variação interanual e do padrão espacial das chuvas (SEGELE et al., 2009). Entre as principais fontes de erro na simulação da precipitação pode-se destacar a taxa de fluxo de massa convectivo, fração de água condensada convertida em precipitação, além das características de umedecimento e aquecimento da superfície (EMMANUEL, 1991; SEGELE et al., 2009).

As **Figuras 16c e 16d** mostram a relação entre os dados mensais de temperatura máxima a 2 metros (eixo x) fornecidos pelo INMET/CPTEC (183 estações distribuídas pelo Brasil) e simulados pelo RegCM4 (eixo y), com o emprego do mapa de uso e cobertura original (**B_UO_SE_EI_EM**) e pela utilização do mapa atualizado para 2007 (**B_UA_SE_EI_EM**), respectivamente. Nestas, é possível constatar um adequado ajuste entre os valores simulados e estimados, cuja explicação da variância nos dois conjuntos de

dados é igual a 90% ($r = 0,95$). Embora a alteração do uso e cobertura esteja associada diretamente aos parâmetros físicos como, por exemplo, albedo, IAF e fração máxima de cobertura vegetal, não se constatou uma variação espacial relevante entre as simulações realizadas para a temperatura média anual.

Figura 16. Relação entre os dados mensais de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima a 2 metros simulados pelo RegCM4 com base no mapa de uso e cobertura original (GLCC 1992; a, c, e) e com a alteração do mapa de uso e cobertura (b, d, f) para o ano de 2007 e seus respectivos coeficientes de determinação (r^2) e equação da reta, com base nos dados das estações meteorológicas do INMET/CPTEC.

O mesmo padrão pode ser verificado nas **Figuras 16e** e **16f**, que exibem a relação entre os dados mensais de temperatura mínima (eixo x) estimados pelo INMET/CPTEC e

simulados pelo RegCM4 (eixo y) pelo emprego do mapa de uso e cobertura original (B_UO_SE_EI_EM) e pela utilização do mapa atualizado para 2007 (B_UA_SE_EI_EM), respectivamente. A explicação da variância nos dois casos é igual a 95% ($r = 0,97$). Ressalta-se que as simulações de temperatura máxima e mínima apresentaram uma boa consistência com os dados do INMET/CPTEC, obtendo um valor muito próximo ao esperado. Desta forma, pode-se concluir que a atualização da cobertura do solo produziu impacto maior no processo de formação da precipitação do que na temperatura.

A **Figura 17** mostra a média anual de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima simuladas pelo RegCM4 a partir do emprego do mapa de uso e cobertura original (**Figuras 17a, 17d e 17g**; coluna à esquerda), com base nas informações do mapa atualizado para 2007 (**Figuras 17b, 17e e 17h**; coluna do centro), assim como os dados estimados pelo TRMM (**Figura 17c**) e os fornecidos pelo INMET/CPTEC (**Figuras 17f e 17i**). Com as modificações realizadas no modelo, é possível constatar que os resultados decorrentes do emprego do uso e cobertura atual apresentam melhor concordância com os dados observados, porém, observa-se que os valores de precipitação encontram-se superestimados, pelo resultado de ambas as simulações, principalmente na porção sul de Minas Gerais, no litoral do Sul e Sudeste, assim como, na região Amazônica e áreas circunvizinhas. Todavia, a região Sul do Brasil e áreas localizadas no noroeste do Estado do Pará apresentam volumes pluviométricos muito abaixo dos estimados pelo TRMM.

Em relação à temperatura máxima e mínima, é possível constatar que a simulação ajustou 95% da variação dos dados. De um modo geral, sugere-se que a falta de uma rede densa de estações nas regiões Norte e Centro-Oeste permitiu a construção de regressões lineares entre os dados simulados pelo RegCM4 e estimados pelo INMET/CPTEC muito bem ajustadas, com correlações acima de 97%. Porém, a superestimativa da temperatura na região Norte e em parte da região Centro-Oeste, a média anual da temperatura máxima e mínima, em algumas áreas, pode ficar 2°C a 5°C acima dos valores esperados. Desta forma, o aquecimento da superfície, ocasionado pela interação da radiação eletromagnética com o alvo, pode estar contribuindo para as superestimativas de precipitação nestas áreas.

Figura 17. Simulações de precipitação (a, b), temperatura máxima (d, e) e temperatura mínima (g, h) para o ano de 2007 a partir do emprego do mapa de uso e cobertura original (**B_UO_SE_EI_EM**) e a partir do mapa atualizado para 2007 (**B_UA_SE_EI_EM**), respectivamente; (c) mapa anual de precipitação estimada pelo TRMM; (f) mapa anual da média de temperatura máxima proveniente do INMET/CPTEC; (i) mapa anual da média de temperatura mínima estimado do INMET/CPTEC.

5.4 Estimativa e modelagem da fração máxima de cobertura vegetal (FCV)

A estimativa da fração máxima de cobertura vegetal (FCV) para a área de estudo foi originada a partir da análise temporal dos valores máximos de NDVI para o período compreendido entre 2000 e 2010, provenientes do produto MOD13C2 com resolução espacial de 5600x5600m e escala temporal mensal, com o objetivo de verificar a influência deste parâmetro físico nas simulações numéricas do modelo RegCM4. Para estimar a FCV referente ao ano de 2007 foram extraídos os valores de NDVI para as componentes solo e vegetação, correspondentes a 0,05 e 0,94, respectivamente. A partir do mapa de FCV extraíram-se, para cada classe de uso e cobertura da terra, os valores médios desta variável. A **Tabela 6** mostra os valores adotados pelo modelo de superfície BATS e os novos valores encontrados.

Tabela 6. Valores da FCV para cada classe de uso e cobertura da terra utilizados pelo esquema de superfície BATS e os novos valores extraídos dos dados de NDVI.

Classe de uso e cobertura da terra	Nome	FCV Antiga (%)	FCV Nova (%)	Diferença (%)
1	Predominância Agrícola	85,0	80,0	-6,0
2	Gramíneas	80,0	47,0	-41,0
3	Floresta de coníferas	80,0	84,0	5,0
4	Floresta de coníferas decidual	80,0	83,0	4,0
5	Floresta Estacional Decidual	80,0	79,0	-1,0
6	Floresta Ombrófila Densa	90,0	94,0	4,0
7	Vegetação Herbácea	80,0	75,0	-6,0
8	Deserto	-	-	-
9	Tundra	60,0	69,0	15,0
10	Agricultura irrigada	80,0	82,0	3,0
11	Semideserto	35,0	17,0	-51,0
12	Gelo / Glaciar	-	-	-
13	Região Pantanosa / Alagada	80,0	71,0	-11,0
14	Água interior	-	-	-
15	Oceano	-	-	-
16	Vegetação arbustiva perene	80,0	79,0	-1,0
17	Vegetação arbustiva decidual	80,0	32,0	-60,0
18	Mosaico de Floresta e pastagem	80,0	90,0	13,0
19	Mosaico de pastagem e floresta	80,0	84,0	5,0
20	Combinação de água e terra	80,0	80,0	-

As principais diferenças decorrentes da atualização dos valores de FCV ocorreram para as classes de uso e cobertura da terra referente à vegetação arbustiva decidual, ao semideserto, às gramíneas, à tundra, e ao mosaico de floresta e pastagem, com variações de -60%, -51%, -41%, 15 e 13%, respectivamente. Ainda, constata-se que algumas classes permaneceram com valores próximos aos antigos e outras tiveram um pequeno aumento/diminuição, como, por exemplo, a Floresta Ombrófila Densa que passou de 90% para 94%, devido principalmente a melhor resolução espacial do sensor MODIS em comparação com os dados do AVHRR.

A **Figura 18** mostra a precipitação simulada pela alteração dos valores de FCV para cada classe de uso e cobertura da terra utilizados pelo modelo de superfície BATS e pela simulação a partir do emprego do mapa de uso e cobertura atualizado para 2007. A relação entre os dados mensais de precipitação, para o ano de 2007 (**Figura 18c**), simulados pelo RegCM4 considerando-se a alteração dos valores de FCV e os dados de precipitação estimados pelo TRMM apresentam boa concordância entre os dados observados (eixo x) e os simulados (eixo y), com coeficiente de correlação próximo a 0,91 ($r^2 = 0.83$). Neste caso, os

valores simulados de precipitação são, em média, 18% maiores do que os observados (TRMM) e 2% menores do que os valores simulados para o caso sem considerar a alteração do FCV, como visualizado na **Figura 16b**. Assim, considera-se que a atualização do FCV melhora, em média, a simulação da precipitação.

Figura 18. (a) Precipitação anual total em 2007 estimada a partir do emprego do mapa de uso e cobertura atualizado para 2007 (B-UA-SE-EI-EM) sem alteração dos valores de FCV; (b) Precipitação anual total estimada considerando-se a alteração dos valores de FCV (B-UA-SE-EI-EM-BA-FCV); e (c) Relação entre os dados mensais de precipitação simulados pelo RegCM4 com a alteração dos valores de FCV e do uso e cobertura do solo (eixo y) e os dados de precipitação estimados pelo TRMM (eixo x).

5.5 Estimativas da reflectância no visível e no infravermelho próximo e médio (RVIVPM) e simulação no RegCM4

A alteração da reflectância no visível e no infravermelho próximo e médio (RVIVPM) no esquema de superfície BATS (atributo de cada classe de uso e cobertura da terra) tem como objetivo principal a atualização destes valores para o ano de 2007. A **Tabela 7** exhibe os valores adotados pelo modelo de superfície BATS e os novos valores calculados com base

nos dados do sensor MODIS/TERRA, os quais foram posteriormente alterados na tabela de atributos de cada classe de uso e cobertura da terra. Diferentemente dos dados de NDVI que representam uma composição mensal dos dados, os valores de reflectância no visível e no infravermelho próximo e médio (RVIVPM), derivados do produto MCD43C3, possuem resolução temporal de 16 dias, sendo comum encontrarem-se pixels com valores contaminados por nuvem. Desta forma, para evitar contabilizar estes pixels na extração dos valores para cada classe de uso e cobertura da terra, os valores referentes à RVIVPM foram determinados a partir da maior frequência em cada classe (moda realizada para 22 imagens).

Tabela 7. Valores originais e para o ano de 2007 da RVIVPM para cada classe de uso e cobertura da terra.

Classe	Nome	RVIVPM original	RVIVPM nova	Diferença (%)
1	Predominância Agrícola	0,10 / 0,30	0,06 / 0,26	-40 / -13
2	Gramíneas	0,10 / 0,30	0,10 / 0,27	0 / -10
3	Floresta de coníferas	0,04 / 0,20	0,04 / 0,19	0 / -5
4	Floresta de coníferas decidual	0,04 / 0,20	0,04 / 0,21	0 / 5
5	Floresta Estacional Decidual	0,06 / 0,26	0,05 / 0,22	-17 / -15
6	Floresta Ombrófila Densa	0,04 / 0,20	0,04 / 0,22	0 / 10
7	Vegetação Herbácea	0,08 / 0,30	0,07 / 0,24	-13 / -20
8	Deserto	0,20 / 0,40	0,22 / 0,38	10 / -5
9	Tundra	0,10 / 0,30	0,70 / 0,50	600 / 67
10	Agricultura irrigada	0,08 / 0,28	0,07 / 0,24	-13 / -14
11	Semideserto	0,17 / 0,34	0,14 / 0,28	-18 / -18
12	Gelo / Glaciar	0,80 / 0,60	0,92 / 0,61	15 / 2
13	Região Pantanosa / Alagada	0,06 / 0,18	0,04 / 0,20	-33 / 11
14	Água interior	0,07 / 0,20	0,08 / 0,01	14 / -95
15	Oceano	0,07 / 0,20	0,07 / 0,01	0 / -95
16	Vegetação arbustiva perene	0,05 / 0,23	0,10 / 0,27	100 / 17
17	Vegetação arbustiva decidual	0,08 / 0,28	0,06 / 0,22	-25 / -21
18	Mosaico de Floresta e pastagem	0,05 / 0,23	0,04 / 0,22	-20 / -4
19	Mosaico de pastagem e floresta	0,06 / 0,18	0,05 / 0,24	-17 / 33
20	Combinação de água e terra	0,06 / 0,18	0,05 / 0,24	-17 / 33

Entre as principais diferenças decorrentes da atualização dos valores de RVIVPM no modelo RegCM4, cita-se a alteração da precipitação em áreas com predominância agrícola, em região pantanosa / alagada, sobre água interior e oceano, sobre vegetação arbustiva perene, entre outras. A **Figura 19** exibe as diferenças da precipitação anual simulada decorrentes da alteração dos valores de RVIVPM. Em geral, é possível constatar uma diminuição do volume de precipitação total na região amazônica, com exceção do elevado

valor na região noroeste do Estado do Mato Grosso. A relação entre os dados mensais de precipitação para o ano de 2007 (**Figura 19c**) simulados pelo RegCM4 a partir da alteração dos valores de RVIVPM e os dados de precipitação estimados pelo TRMM, exibe uma boa concordância e coeficiente de correlação próximos a 0,91(significante a $p < 0,05$, teste *t-student*). Ressalta-se que os dados de precipitação apresentam-se, em média, 19% maiores que os observados e 1% menores do que os simulados sem a consideração da alteração do RVIVPM.

Figura 19. (a) Precipitação anual total (2007) estimada pelo emprego do mapa de uso e cobertura atualizado para 2007 (B-UA-SE-EI-EM) sem alteração dos valores de RVIVPM; (b) Precipitação anual total estimada com a alteração dos valores de RVIVPM (B-UA-SE-EI-EM-BA-REF); e (c) Relação linear entre os dados mensais de precipitação simulados pelo RegCM4 pela alteração dos valores de RVIVPM e do uso e cobertura do solo (eixo y) e os dados de precipitação estimados pelo TRMM (eixo x).

5.6 Estimativas do índice de área foliar (IAF) e simulação com o RegCM4

Assim como no produto MCD43C3 (Reflectância no visível e infravermelho próximo e médio), os dados de IAF, extraídos do produto MCD15A2, com resolução temporal de 8 dias, possui a influência de nuvens no decorrer de 8 dias. Os produtos MODIS representam um mosaico temporal de sucessivas imagens, sendo que o *pixel* resultante do processamento é constituído de um ou mais *pixels* sem nuvem. Porém, em muitos casos, principalmente em regiões tropicais, é comum que nos 8 ou 16 dias (dependendo do produto MODIS) haja sempre a interferência de nuvem no *pixel*. O resultado desta interferência pode ser visualizado no exemplo mostrado sobre a região amazônica (**Figura 20**). Os valores em verde claro em plena área de floresta, que contrastam com o verde escuro de áreas vizinhas, indicam a presença de nuvens em todos os dias de passagem do sensor.

Figura 20. IAF para a região noroeste da Floresta Amazônica demonstrando a interferência das nuvens no produto MCD15A2 (20/07/2007).

Dadas as circunstâncias acima mencionadas, para a extração dos valores de IAF utilizados para atualização da tabela do esquema de superfície BATS optou-se por analisar pontualmente a série temporal para o ano de 2007, e, assim, se obter os valores máximos e mínimos mais frequentes. A **Tabela 8** exhibe os valores adotados pelo modelo de superfície BATS e os novos valores encontrados para a área de estudo. Entre as principais diferenças decorrentes da atualização dos valores de IAF podem-se destacar as áreas pantanosas / alagadas, as regiões de Floresta Estacional Decidual, de vegetação arbustiva (decidual e perene) e as áreas compreendendo o mosaico de pastagem e floresta.

Tabela 8. Valores de IAF para cada classe de uso e cobertura da terra presente no BATS.

Classe	Nome	IAF máximo e mínimo antigo	IAF máximo e mínimo novo	Diferença (%)
1	Predominância Agrícola	4 / 0,5	4 / 0,1	0 / -80
2	Gramíneas	2 / 0,5	2,5 / 0,5	25 / 0
3	Floresta de coníferas	6 / 5	6,5 / 4,5	8 / -10
4	Floresta de coníferas decidual	6 / 1	6,5 / 1	8 / 0
5	Floresta Estacional Decidual	6 / 1	6,5 / 2	8 / 100
6	Floresta Ombrófila Densa	6 / 5	7 / 6,5	17 / 30
7	Vegetação Herbácea	6 / 0,5	2 / 0,5	-67 / 0
8	Deserto	0 / 0	0 / 0	0 / 0
9	Tundra	6 / 0,5	5 / 0,5	-17 / 0
10	Agricultura irrigada	6 / 0,5	4 / 0,1	-33 / -80
11	Semideserto	6 / 0,5	0,7 / 0,1	-88 / -80
12	Gelo / Glaciar	0 / 0	0 / 0	0 / 0
13	Região Pantanosa / Alagada	6 / 0,5	4 / 4	-33 / 700
14	Água interior	0 / 0	0 / 0	0 / 0
15	Oceano	0 / 0	0 / 0	0 / 0
16	Vegetação arbustiva perene	6 / 5	2 / 1	-67 / -80
17	Vegetação arbustiva decidual	6 / 1	2 / 0,5	-67 / -50
18	Mosaico de Floresta e pastagem	6 / 3	6 / 3	0 / 0
19	Mosaico de pastagem e floresta	6 / 0,5	5 / 3	-17 / 500
20	Combinação de água e terra	0,5 / 0,5	0,5 / 3	0 / 500

A **Figura 21** exhibe as simulações da precipitação obtida apenas com a alteração do uso e cobertura da terra para o ano de 2007 e a simulação da precipitação utilizando este mesmo mapa com valores atualizados de IAF. Constatase que as alterações nos valores de IAF (**Tabela 8**) não ocasionaram mudanças significativas na distribuição espacial da precipitação anual para o ano de 2007. No entanto, pode-se destacar o aumento da precipitação na região sul e no centro-oeste (Mato Grosso). A relação entre os dados mensais de precipitação para o ano de 2007 (**Figura 21c**) simulados pelo RegCM4 com a alteração dos valores de IAF e os dados de precipitação estimados pelo TRMM exhibe uma concordância de 91% entre os dados observados e simulados, com coeficiente de correlação linear igual a 92%. Nesta simulação, os valores de precipitação encontram-se, em média, 23% acima dos observados, e são 3% maiores que os obtidos na simulação sem a alteração do IAF (**Figura 21a**). Dentre as principais causas do aumento da precipitação nesta simulação pode-se citar a elevação das taxas de evapotranspiração e o contraste entre o IAF máximo e mínimo.

Figura 21. (a) Precipitação anual total para 2007 estimada a partir do emprego do mapa de uso e cobertura atualizado para 2007 (**B-UA-SE-EI-EM**) sem alteração dos valores de IAF; (b) Precipitação anual total estimada a partir da alteração dos valores de IAF (**B-UA-SE-EI-EM-BA-IAF**); e (c) Relação entre os dados mensais de precipitação simulados pelo RegCM4, para 2007, a partir da alteração dos valores de IAF e do uso e cobertura da terra (eixo y) e os dados de precipitação estimados pelo TRMM (eixo x).

5.7 Variação temporal dos parâmetros físicos, parametrização cúmulos e simulação no RegCM4

A **Figura 22** mostra a variação trimestral (janeiro-fevereiro-março; abril-maio-junho; julho-agosto-setembro; outubro-novembro-dezembro; JFM, AMJ, JAS, OND, respectivamente) do NDVI para o ano de 2007. Este índice é utilizado para indicar o vigor vegetativo e analisar a variação temporal de uma determinada superfície a partir das informações espectrais obtidas pelos sensores orbitais. É possível visualizar a dinâmica da

vegetação e sua variação fenológica ao longo do ano. Entre os meses de Janeiro a Março, época chuvosa em praticamente todo o Brasil, verifica-se valores elevados de NDVI em todas as regiões (**Figura 22a**). Consequentemente, à medida que o volume de precipitação começa a diminuir no Brasil Central e em parte da patagônia Argentina os valores de NDVI vão diminuindo gradativamente (**Figura 22b**). Entre os meses de Julho e Setembro, estação seca em grande parte da América do Sul, visualiza-se uma queda acentuada nos valores de NDVI (**Figura 22c**), em alguns casos, os valores podem cair de 0,85 para valores menores que 0,20 (como visualizado no Nordeste do Brasil). Na transição da estação seca para a chuvosa (**Figura 22d**) os valores de NDVI começam a aumentar novamente.

Figura 22. (a) Valores de NDVI para os meses de Janeiro, Fevereiro e Março (JFM); (b) Valores de NDVI para os meses de Abril, Maio e Junho (AMJ); (c) Valores de NDVI para os meses de Julho, Agosto e Setembro (JAS); e (d) Valores de NDVI para os meses de Outubro, Novembro e Dezembro (OND) para o ano de 2007.

A variação fenológica da vegetação ao longo do ano modifica a interação da radiação eletromagnética com a superfície terrestre, assim como, o balanço de energia. Além disto, variações significativas na disponibilidade de água alteram a evapotranspiração, a formação de nuvens, entre outros fatores, influenciando significativamente nas variáveis atmosféricas, como, por exemplo, temperatura do ar, calor latente e sensível, evapotranspiração, precipitação, entre outras. No modelo de superfície BATS, os parâmetros físicos da vegetação são estáticos, ou seja, não variam ao longo do ano. Desta forma, neste trabalho optou-se por realizar duas simulações no RegCM4 para avaliar a dinâmica da vegetação, que compreenderam: I) Alteração dos parâmetros físicos a cada 3 meses (IAF, RVIVPM, FMCV); II) Modificação do coeficiente de quantidade de água condensada que é convertida em precipitação na parametrização cúmulos proposta por Emmanuel (1991), tal como proposto por Segele et al. (2009), incluindo a variação trimestral dos parâmetros físicos da vegetação.

A **Figura 23** exibe a precipitação anual correspondente à simulação inicial com o mapa de uso e cobertura da terra para o ano de 2007 (**Figura 23a, B-UA-SE-EI-EM**), o mapa de precipitação anual estimado pelo TRMM (**Figura 23b**), a precipitação anual simulada no modelo RegCM4 a partir da variação trimestral dos parâmetros físicos (TMP) referentes à fração máxima de cobertura vegetal (FCV), ao índice de área foliar (IAF), à reflectância no visível e no infravermelho próximo e médio (REF) e com a parametrização cúmulos de Emmanuel (1991) sem alteração (**Figura 23c, B-UA-SE-EI-EM-BA-FCV-IAF-REF-TMP**). Além disso, a **Figura 23d** apresenta a simulação da precipitação anual com variação temporal dos parâmetros físicos e com a alteração do coeficiente de quantidade de água condensada que é convertida em precipitação (EMMOD) na parametrização cúmulos de Emmanuel (1991) (**B-UA-SE-EI-EMMOD-BA-FCV-IAF-REF-TMP**). Ainda, as **Figuras 23e e 23f** mostram a relação entre os dados mensais de precipitação simulados pelo RegCM4 e os dados de precipitação estimados pelo TRMM para cada simulação, respectivamente (EM e EMMOD).

A alteração trimestral das características físicas da vegetação (descritas no ANEXO I) ocasionou uma alteração significativa do padrão de distribuição da precipitação para o ano de 2007. Entre as principais diferenças entre as simulações (**Figura 23a e 23c**) destacam-se o aumento da precipitação na região Sul, que em algumas áreas passaram de 1800-2400 mm para 2700-3300 mm, e uma redução significativa na precipitação na região de atuação da ZCAS, principalmente nos estados de Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso, e uma redução na precipitação da região Amazônica.

Figura 23. (a) Precipitação anual total estimada a partir do emprego do mapa de uso e cobertura da terra atualizado para 2007 (**B_UA_SE_EI_EM**); (b) Mapa anual de precipitação estimada pelo TRMM para o ano de 2007; (c) e (d) Precipitação anual total estimada a partir da variação trimestral dos parâmetros físicos e alteração da parametrização cúmulos, respectivamente (**B_UA_SE_EI(EM ou EMMOD)_BA-FCV-IAF-REF-TMP**); (e) e (f) Relação entre os dados mensais de precipitação simulados pelo RegCM4 e os dados de precipitação estimados pelo TRMM para cada simulação, respectivamente (EM e EMMOD).

A **Figura 23e**, que compara os dados simulados pelo RegCM4 utilizando os parâmetros citados acima e os dados estimados pelo TRMM, indica que a variação dos parâmetros físicos da vegetação ocasionaram uma redução de 3% nas superestimativas de precipitação para a área das estações meteorológicas, com uma correlação de 92% (significante a $p < 0,05$, teste *t-student*). Entretanto, ao verificar a simulação com variação temporal dos parâmetros físicos e com a alteração do coeficiente de quantidade de água condensada que é convertida em precipitação (EMMOD) na parametrização cúmulos de Emmanuel (1991), observa-se uma diminuição acentuada por toda a América do Sul, principalmente na região Nordeste do Brasil, na ZCIT e na região Sul. Todavia, para a região Amazônica a distribuição espacial da precipitação se assemelha à estimada pelo TRMM. Para esta simulação, os dados de precipitação ficaram 18% abaixo dos estimados nas estações meteorológicas com uma correlação de 86% (significante a $p < 0,05$, teste *t-student*), portanto estes atributos iniciais ocasionaram uma piora nas simulações. Desta forma, no próximo tópico, serão analisadas a cada trimestre os dados referentes à simulação **B-UA-SE-EI-EM-BA-FCV-IAF-REF-TMP** que não altera o coeficiente de quantidade de água condensada que é convertida em precipitação.

5.8 Análise da variabilidade trimestral e decadal das simulações no RegCM4

5.8.1 Evapotranspiração

A **Figura 24** mostra a diferença trimestral para o ano de 2007 dos valores de evapotranspiração (mm.dia^{-1}) obtidos a partir da simulação da dinâmica da vegetação (variação dos principais parâmetros físicos utilizados pelo BATS) e a simulação de controle (modelo sem alterações nos parâmetros físicos). A evapotranspiração proporciona um indicativo da perda de água pela superfície a partir da evaporação e/ou da perda de água da planta no processo de transpiração. Esta variável meteorológica é a principal responsável pelo retorno da água precipitável para a atmosfera.

Entre as principais diferenças encontradas, pode-se destacar: I) o aumento da evapotranspiração na região Nordeste do Brasil com valores acima de 2 mm.dia^{-1} nos trimestres JAN/FEV/MAR, ABR/MAI/JUN (180 mm no trimestre); II) a diminuição da evapotranspiração na região noroeste do Estado do Mato Grosso com valores superiores a -2 mm.dia^{-1} nos trimestres JAN/FEV/MAR, OUT/NOV/DEZ; III) o aumento da evapotranspiração nas divisas dos Estados de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso com a Bolívia (áreas alagadas do Pantanal brasileiro) com valores superiores a -2 mm.dia^{-1} ; IV)

diminuição da evapotranspiração na região central do Brasil com valores superiores a -1 mm.dia^{-1} ; e V) aumento da variabilidade anual na região da Argentina, Paraguai e Bolívia.

Figura 24. Diferença entre a evapotranspiração trimestral média (mm.dia^{-1}) estimada a partir da simulação da variação dos parâmetros físicos (FCV, IAF, REF) e as condições originais do modelo de superfície BATS para o ano de 2007.

Ressalta-se que as principais causas da redução/aumento nos valores da evapotranspiração estão relacionadas com a modificação da temperatura de superfície, do calor específico, da alteração do regime de ventos devido à circulação local e com a substituição de determinados usos por rios ou lagos (como, por exemplo, o aumento da hidrografia no Pantanal devido à atualização do uso e cobertura da terra). Sugere-se como exemplos, as alterações na temperatura devido ao albedo e propriedades caloríficas da água (que aquece mais lentamente quando comparado com o solo), a alteração do regime de ventos, que ocasiona as modificações na velocidade do vento e, consequentemente, reduz as

interações e transportes de umidade de camadas de ar saturadas próximas aos corpos d'água, entre outros. A **Figura 25** mostra a evapotranspiração total para o ano de 2007 simulada a partir o RegCM4 para dois casos distintos: I) modelo sem alterações nos parâmetros físicos, **Figura 25a**; II) modelo com a variação trimestral dos principais parâmetros físicos utilizados pelo BATS, **Figura 25b**; e os valores estimados pelo produto MOD16 proveniente do sensor MODIS/TERRA (**Figura 25c**).

Figura 25. (a) Evapotranspiração anual total para 2007 simulado no RegCM4; (b) Evapotranspiração anual total para 2007 estimada a partir da alteração dos parâmetros físicos a cada 3 meses utilizado pelo modelo de superfície BATS; (c) Evapotranspiração anual total para 2007 estimada pelo sensor MODIS (produto MOD16A3).

O produto global de evapotranspiração MOD16, derivado de informações do sensor MODIS/TERRA, utiliza dados de uso e cobertura da terra, radiação fotosinteticamente ativa, índice de área foliar, albedo e da reanálise de dados meteorológicos provenientes de reanálises disponibilizados pela NASA para estimar a evapotranspiração diária (MU et al., 2011). Desta forma, regiões que apresentam uma grande incidência de nuvens como as Florestas Tropicais influenciam nas estimativas dos parâmetros físicos necessários ao cálculo da

evapotranspiração. Esta característica pode ser visualizada na **Figura 25c**, principalmente na região amazônica, onde os valores de evapotranspiração sofrem uma redução considerável em relação à borda da floresta. Pode-se citar como exemplo os valores encontrados na divisa entre os Estados do Mato Grosso e Amazonas, que variam entre 1400 e 1800 mm.ano⁻¹. À medida que se avança para o interior da Floresta Amazônica estes valores deveriam se manter constantes ou mesmo aumentar, porém, o que se constata é a diminuição da evapotranspiração para 800 mm.ano⁻¹ (áreas em verde).

Embora se perceba uma descontinuidade dos dados para a Floresta Amazônica, é possível verificar que nas áreas em que a incidência de nuvens é menor (geralmente nas bordas da Floresta) os valores estimados pelo modelo RegCM4 e os estimados pelo produto MOD16 estão mais coerentes, o que não ocorre na região oeste do Estado do Amazonas, norte do Pará, Amapá e Roraima. Para outras regiões da América do Sul, constata-se uma maior coerência nas estimativas da evapotranspiração, principalmente na região da Patagônia Argentina/Chilena, na bacia do Rio da Prata, Bolívia e região Nordeste e Sul do Brasil. Neste caso, as principais diferenças anuais nos valores de evapotranspiração entre os dados simulados pelo RegCM4 e os estimados pelo produto MOD16 estão localizadas na região que abrange os estados da Bahia, Tocantins, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e região sudeste do Estado do Mato Grosso. Nestas regiões, os valores estimados pela modelagem numérica variam entre 1000 e 1800 mm.ano⁻¹, entretanto, os valores estimados pelo MOD16 encontram-se entre 400 e 1200 mm.ano⁻¹. Esta discrepância está relacionada com a superestimativa da precipitação pelo modelo RegCM4, que em muitos casos pode chegar em 1000 mm nestas áreas.

Com o intuito de verificar o papel das mudanças de uso e cobertura da terra nas alterações das principais variáveis meteorológicas realizaram-se duas simulações de 10 anos para a América do Sul (2000 a 2009). A **Figura 26** exibe a diferença trimestral da evapotranspiração para as simulações de 10 anos realizadas no RegCM4 para os casos com e sem alteração das características de superfície. Nesta, é possível verificar que, em média, a diferença de uso e cobertura da terra ocasiona variações diárias de evapotranspiração entre -0,4 e 0,4 mm, porém, em alguns casos, principalmente nos meses mais quentes, é possível constatar uma variação diária de até 2 mm. Entre as principais diferenças, destacam-se a redução da evapotranspiração na porção norte dos Estados do Mato Grosso e do Pará, na região da cordilheira dos Andes (divisa com a Bolívia, Argentina e Chile) e o aumento da evapotranspiração na região do Pantanal brasileiro, Tocantins, sul do Maranhão e em grande

parte da região Nordeste.

Figura 26. Diferença entre a evapotranspiração trimestral média (mm.dia⁻¹) estimada a partir da simulação da variação dos parâmetros físicos (FCV, IAF, REF) e com as condições originais do modelo de superfície BATS para o período de 10 anos, 2000 a 2009.

De um modo geral, a diferença trimestral da evapotranspiração entre as simulações de 10 anos (2000 a 2009) com e sem alteração dos parâmetros de superfície apresenta o mesmo padrão espacial encontrado nas simulações para o ano de 2007 (visto na **Figura 24**) com suavização dos valores absolutos. A **Figura 27** exhibe as alterações efetuadas no uso e cobertura da terra entre as simulações realizadas, indicando as áreas que apresentaram grande alteração das variáveis atmosféricas nas simulações. Como descrito anteriormente, as áreas que apresentaram mudanças negativas, ou seja, diminuição dos valores de evapotranspiração, estão localizadas principalmente na borda da Floresta Amazônica (Região I) e no extremo oeste do Rio Grande do Sul e Uruguai (Região III).

Figura 27. Mapa atualizado do uso e cobertura da terra (a), (c), e (e); mapa de uso e cobertura da terra de 1992 do GLCC utilizado como padrão para o modelo de superfície BATS (b), (d) e (f) para a borda da Floresta Amazônica (I), Região Nordeste (II) e Região Sul e Sudeste (III), respectivamente. O quadro superior indica as regiões I, II e III.

As **Figuras 27a e 27b** exibem a diferença entre os usos e coberturas da terra para a Região I, utilizados como dados de entrada para o modelo de superfície BATS e empregados nas simulações do RegCM4. A Região I compreende a borda da Floresta Amazônica, área que no decorrer das últimas décadas apresentou elevada taxa de desmatamento. Desta forma, a principal variável responsável pelas alterações na evapotranspiração refere-se à substituição de áreas de Floresta Ombrófila Densa por pastagem e áreas agrícolas, cuja modificação do uso e cobertura original (vegetação) ocasiona uma redução de aproximadamente 600 mm ao ano no valor da evapotranspiração. As **Figuras 27c e 27d** mostram o uso e cobertura da terra para a Região Nordeste do Brasil, em que se percebe um aumento na evapotranspiração na simulação de 10 anos. Ressalta-se que este aumento ocorreu devido à correção das informações de áreas agrícolas, classificadas erroneamente pelo produto do GLCC e substituídas por áreas de vegetação arbustiva decidual e gramíneas/savanas. Esta mesma característica pode ser observada no estado do Piauí e Tocantins, onde áreas agrícolas foram substituídas por regiões de savana e mosaico entre pastagem e vegetação arbórea.

As **Figuras 27e e 27f** exemplificam a substituição de áreas de Floresta Ombrófila Densa e áreas de pastagem para a agricultura (principalmente a cana-de-açúcar e citros no Estado de São Paulo). Nestas áreas, pode-se constatar que a alteração no uso da terra ocasiona um aumento na evapotranspiração na estação seca (abril a setembro), como visualizado nas **Figuras 26b e 26c**. Na região do Pantanal, a inclusão de áreas de lagos e regiões pantanosas proporcionaram um aumento da disponibilidade hídrica e, conseqüentemente, o aumento da evapotranspiração nos meses com temperaturas elevadas, principalmente entre janeiro e junho. Ressalta-se que o aumento da evapotranspiração no Paraguai deve-se à substituição de áreas de pastagem e mosaico de floresta/pastagem pela Floresta Estacional Decidual existente na região.

A **Figura 28** exibe a média anual da evapotranspiração para 10 anos (2000 a 2009) utilizando-se a configuração original dos parâmetros físicos considerados pelo modelo de superfície BATS (Figura 28a) e com a configuração alterada (Figura 28b). A **Figura 28c** exibe a média anual da evapotranspiração estimada pelo sensor MODIS (produto MOD16A3). Assim como verificado na comparação da evapotranspiração simulada para o ano de 2007 e os dados do sensor MODIS, observa-se uma grande influência das nuvens nas estimativas de evapotranspiração com dados orbitais. No entanto é possível constatar uma boa concordância para a Região Sul do Brasil, para a Argentina, Chile e Paraguai. Entretanto, observa-se que a simulação de 10 anos superestima os valores de evapotranspiração para

grande parte do Brasil, principalmente para a região centro-leste. Entre as principais causas das superestimativas de evapotranspiração pelo modelo RegCM4 estão as altas taxas de precipitação para esta região, como será visto no próximo tópico.

Figura 28. Média da evapotranspiração anual entre 2000 e 2009 para: (a) simulação realizada pelo RegCM4; (b) simulação pelo RegCM4 considerando-se a alteração dos parâmetros físicos utilizados pelo modelo de superfície BATS; e (c) estimada pelo sensor MODIS (produto MOD16A3).

5.8.2 Precipitação

A **Figura 29** exibe as diferenças trimestrais (JAN/FEV/MAR, ABR/MAI/JUN, JUL/AGO/SET, OUT/NOV/DEZ) da precipitação (mm.dia^{-1}) simulada para 2007 levando-se em consideração a alteração dos parâmetros físicos em relação às condições originais do modelo de superfície BATS (mapa de uso e cobertura da terra de 1992 e parâmetros físicos inalterados). Consequentemente, valores positivos (em azul) indicam que ao alterar trimestralmente os parâmetros físicos do BATS obteve-se um aumento nos valores de precipitação estimados pelo modelo RegCM4. Consequentemente, valores negativos (em tons

de amarelo/vermelho) indicam que as alterações nos parâmetros físicos levaram à diminuição da precipitação. Ainda, as **Figuras 29e, 29f e 29g** exibem a precipitação anual para 2007 estimadas pelo modelo com e sem alterações nos parâmetros físicos e, as estimativas oriundas do TRMM, respectivamente.

De um modo geral, os trimestres que apresentaram as maiores diferenças nos valores estimados de precipitação são aqueles em que há uma elevada taxa de precipitação (estação chuvosa na região Centro-Oeste e Norte do Brasil). No trimestre referente aos meses de JAN/FEV/MAR (**Figura 29a**) pode-se destacar a redução significativa dos valores de precipitação nos Estados de Minas Gerais, Bahia, Espírito Santo, Rio Grande do Sul, na região central do Estado de Goiás e em regiões próximas à cordilheira dos Andes. Ainda, nota-se uma redução na região norte do Estado do Mato Grosso devido provavelmente à alteração da classe Floresta Ombrófila Densa para áreas de pastagem e agricultura. Do mesmo modo, é possível constatar um aumento da precipitação no Paraguai, norte da Argentina, nos Estados de Santa Catarina, Paraná, e oeste de São Paulo e, em várias regiões da Floresta Amazônica.

Nos meses de ABR/MAI/JUN, que correspondem à transição da estação chuvosa para a estação seca em grande parte do Brasil, constata-se que as alterações realizadas no modelo de superfície BATS ocasionaram uma redução significativa nos valores de precipitação para a região do Brasil Central e para diversas áreas na Floresta Amazônica, quando comparadas com a simulação com as condições originais. Entretanto, para os meses de JUL/AGO/SET, estação seca na região central do Brasil, a diferença entre os valores de precipitação obtidos com a alteração dos parâmetros físicos a cada três meses e os obtidos com a manutenção das condições padrão do modelo foi pequena para grande parte do Brasil (**Figura 29c**). Nos meses de OUT/NOV/DEZ (**Figura 29d**), as principais diferenças negativas na precipitação encontram-se em São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraguai, norte da Argentina e Bolívia. Em Minas Gerais, Bahia, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Goiás e Mato Grosso, área que forma um cinturão de anomalias com o mesmo sinal positivo na direção noroeste-sudeste.

Ainda, verifica-se que o impacto positivo na produção de precipitação observado nos meses de janeiro a março (**Figura 29a**) sobre o Paraná, oeste de São Paulo e Paraguai, e, o impacto negativo da produção de precipitação em região mais ao norte, sobre Minas Gerais, Bahia, Rio de Janeiro e Espírito Santo apresentam características opostas as observadas para as simulações realizadas para os meses de outubro a dezembro (**Figura 29d**) indicando a influência do vigor vegetativo na parametrização dos processos convectivos.

Figura 29. Diferença trimestral da precipitação simulada pelo RegCM4 com e sem alterações da parametrização física do BATS e utilizando as condições padrão (a-d); e precipitação anual de 2007 a partir das simulações no RegCM4 com a alteração dos parâmetros físicos e uso e cobertura da terra (e), com as condições padrão do modelo (f) e estimada pelo TRMM (g).

Embora exista diferença considerável entre as simulações, ressalta-se que os valores de precipitação para algumas regiões da América do Sul encontram-se superestimados, ocasionando um excesso hídrico na estimativa do balanço do modelo, o qual deve ser compensado pela evapotranspiração, fato que justifica a superestimativa da evapotranspiração apontada no tópico anterior. Entre os principais erros da superestimativa da precipitação destacam-se as áreas do interior do Brasil, compreendidas pelos Estados do Piauí, Goiás e Mato Grosso do Sul, as regiões que são influenciadas pela ZCAS (São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro) e áreas de grande atividade convectiva (Floresta Amazônica). Além disto, a versão do modelo RegCM4 com a alteração das características física da cobertura da terra não consegue estimar com eficácia o volume de precipitação para o Rio Grande do Sul, o que é observado pela comparação entre as **Figuras 29f e 29g**.

Assim como descrito na figura anterior, a **Figura 30** mostra a variação trimestral da precipitação média decadal (2000-2009) derivadas das alterações realizadas no modelo de superfície BATS (**Figura 30a-d**), a média da precipitação anual para os 10 anos originada das simulações realizadas com a alteração dos parâmetros físicos de superfície e com as condições originais do modelo, bem como a média estimada pelo TRMM (**Figuras 30e, 30f e 30g**, respectivamente). Entre as principais diferenças encontradas entre a simulação com alterações e a simulação controle destacam-se: I) a diminuição da precipitação em áreas desmatadas na região noroeste do Mato Grosso principalmente na estação chuvosa; II) a redução da precipitação na Região Sudeste, principalmente em Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, provavelmente devido ao aumento de áreas agrícolas e da classe referente ao mosaico de floresta e pastagem (**Figura 27**); III) aumento da precipitação no Estado do Tocantins, provavelmente devido à substituição da classe gramíneas por mosaico de pastagem e floresta e áreas agrícolas; e IV) aumento da precipitação nos meses de verão (janeiro a março) no Pantanal Brasileiro (Mato Grosso do Sul) e Paraguai. Em média, observa-se um pequeno decréscimo da precipitação decadal com a alteração dos parâmetros físicos da cobertura vegetal nos meses mais secos do ano (**Figura 30c**), julho a setembro, enquanto que no restante do ano a precipitação média sobre o Brasil sofre um impacto positivo.

Figura 30. Diferença nas estimativas trimestrais (a-d) de precipitação decadal (2000-2009) entre as simulações realizadas pelo RegCM4 com e sem alteração na parametrização física do BATS. Média decadal da precipitação anual a partir das simulações no RegCM4 com a alteração dos parâmetros físicos e uso e cobertura da terra (e), com as condições padrão do modelo (f) e estimada pelo TRMM (g).

Para o Brasil, as maiores diferenças nos valores de precipitação ocorrem nos meses de JAN/FEV/MAR devido possivelmente à grande atividade convectiva. Porém, à medida que os processos de convecção perdem força na região central do Brasil, a diferença entre as simulações vai diminuindo gradativamente. Nos meses de JUL/AGO/SET é possível verificar que as diferenças entre os valores de precipitação simulados no RegCM4 variam entre -0,3 a 0,3 mm.dia⁻¹, indicando que as alterações tornam-se mais sensíveis nos meses com maior atividade convectiva. Ainda, é possível verificar que as alterações realizadas nos parâmetros físicos de superfície não modificam a característica do modelo em subestimar a precipitação sobre a Região Sul do Brasil. A precipitação na Região Sul pode ter origem tanto frontal como convectiva, esta última principalmente no período mais quente do ano. É possível notar adicionalmente que os dados do TRMM evidenciam a ocorrência de precipitação intensa na região central de Santa Catarina e norte do Rio Grande do Sul (**Figura30g**) ocasionada pela influência orográfica destas regiões (**Figura 1**).

Ao comparar o resultado das simulações de 10 anos com os valores médios estimados pelo TRMM para o mesmo período (**Figuras 30e-g**), constata-se que os principais erros concentram-se na Região Sul do Brasil, Uruguai e litoral da Região Nordeste (com subestimativas de até 1000 mm em determinadas áreas), na Região do Sertão Nordestino (com valores de até 400 mm abaixo do estimado pelo TRMM) e em grande parte da região Amazônica e do Estado de Goiás e leste de São Paulo (com superestimativas de até 1000 mm). Entretanto, em algumas áreas é possível verificar um ajuste entre os valores simulados e estimados como, por exemplo, nos Estados do Mato Grosso do Sul, Piauí, Maranhão, Minas Gerais, Patagônia Argentina e Chilena, deserto do Atacama e extremo oeste da Amazônia.

5.8.3 Umidade Relativa do ar

A umidade relativa do ar é uma variável meteorológica que descreve a condição do ar em relação à sua saturação, ou seja, representa a relação entre a quantidade de moléculas de água presentes em determinado volume de ar e a capacidade total de vapor que este volume poderia conter (pressão parcial de vapor pela pressão de saturação a uma mesma temperatura) antes de iniciar o processo de saturação. As diferenças trimestrais nos valores de umidade relativa do ar provenientes das simulações realizadas com o RegCM4 para o ano de 2007, podem ser visualizadas na **Figura 31**. Os valores em azul descrevem regiões em que houve aumento na umidade relativa do ar devido às alterações dos parâmetros físicos utilizados pelo BATS, enquanto os tons em amarelo/vermelho representam a redução desta.

Figura 31. Diferença entre a umidade relativa do ar trimestral média (%) estimada a partir da simulação da variação dos parâmetros físicos (FCV, IAF, REF) e as condições originais do modelo de superfície BATS para o ano de 2007.

As alterações dos parâmetros físicos do modelo de superfície BATS, ocasionam no primeiro trimestre de 2007 (**Figura 31a**) um aumento considerável na umidade relativa do ar no Paraguai e Argentina, na Região Nordeste do Brasil, no Pará e no Amapá, sendo que nestas áreas a diferença entre as duas simulações pode alcançar 12%. Ainda, nota-se uma diminuição desta variável nos Estados do Mato Grosso e Amazonas e para a região dos Andes, entre a Argentina, Bolívia, Peru e Chile, com valores entre -6% e -15%. As diferenças para os meses de ABR/MAI/JUN (**Figura 31b**) apresentam aproximadamente o mesmo padrão espacial de mudanças que o padrão obtido para JAN/FEV/MAR (**Figura 31a**). Na estação seca (**Figura**

31c), julho a setembro, verifica-se a diminuição na umidade relativa do ar principalmente sobre o Estado do Amazonas (de -3% a 9%) e a permanência de valores positivos sobre o Paraguai, leste da Bolívia e norte da Argentina e, sobre a Região Sul do Brasil (Santa Catarina e Rio Grande do Sul), com valores entre 3% a 9%. Todavia, o trimestre que compreende os meses de OUT/NOV/DEZ apresentou um comportamento diferente dos encontrados anteriormente para o impacto na umidade relativa do ar (Figura 31d). Nestes meses, a alteração das propriedades físicas no modelo de superfície BATS proporcionaram uma redução da umidade relativa do ar em praticamente todo o Brasil, com exceção da faixa no leste do Brasil, com direção noroeste-sudeste, que se estende do norte de Minas Gerais ao nordeste do Pará e Amapá.

A **Figura 32** exibe as alterações médias ocorridas na umidade relativa do ar trimestral para os 10 anos considerados, 2000 a 2009. Igualmente às variáveis anteriores, é possível constatar que a diferença entre as simulações realizadas exibe as mesmas características trimestrais referentes ao ano de 2007, com exceção do último trimestre (OUT/NOV/DEZ, **Figura 32d**). Em geral, o desmatamento da Floresta Amazônica ocasiona a redução média da umidade relativa do ar em até 9% (**Figuras 32a e 32d**, principalmente). Do mesmo modo, a inclusão da Floresta Estacional Decidual no Paraguai no mapa de uso e cobertura da terra utilizado pelo RegCM4 ocasiona um aumento da umidade relativa de aproximadamente 6%. Ainda, o aumento das áreas agrícolas na Região Sudeste e Centro-Oeste proporciona uma elevação de até 6% desta variável (principalmente na estação seca). Entre as principais causas das alterações na umidade relativa do ar, pode-se citar o aumento/diminuição da evapotranspiração e da precipitação em determinadas áreas e as modificações no balanço de radiação (**Figuras 27 e 30**).

As **Figuras 32e-g** mostram a média da umidade relativa do ar para as simulações realizadas para os 10 anos com o RegCM4 (com alteração dos parâmetros físicos e com as condições padrão) e a climatologia disponibilizada pelo INMET/CPTEC para o período de 1961 a 2001, respectivamente. Nas figuras é possível verificar que os menores valores referentes à média da umidade relativa do ar localizam-se no interior do Brasil com valores inferiores a 70%. Ainda, os maiores valores localizam-se na Bacia Amazônica com valores superiores a 85%.

Figura 32. Diferença das estimativas da umidade relativa do ar trimestral, (a) JAN/FEV/MAR, (b) ABR/MAI/JUN, (c) JUL/AGO/SET e (d) OUT/NOV/DEZ, resultantes das duas simulações realizadas para o período de 2000 a 2009. Média decadal da umidade relativa do ar anual para as simulações obtidas do RegCM4 e para a climatologia estimada pelos dados do INMET/CPTEC (1961 a 2001), (e), (f) e (g), respectivamente.

Embora os valores climatológicos da umidade relativa do ar para o Brasil (**Figura 32g**) representem os valores médios entre 1961 e 2001 indicam o padrão da distribuição espacial desta variável para o Brasil. Desta forma, em relação à espacialização da umidade relativa do ar, é possível constatar uma boa concordância entre os dados simulados pelo RegCM4 (**Figuras 32e e 32f**) e os dados provenientes das estações meteorológicas. Porém, verifica-se que em geral os valores estimados são 5-10% inferiores aos dados observados, exceção observada na região litorânea entre Santa Catarina e São Paulo e no extremo oeste da região Amazônica, onde os valores estão próximos aos valores climatológicos. Entre as principais características encontradas nas simulações pode-se citar: I) os baixos valores de umidade relativa do ar no Estado do Pará, noroeste do Mato Grosso e do Maranhão, que apresentam valores entre 20-30% abaixo do esperado; II) as subestimativas para grande parte da região litorânea do Brasil, principalmente para os Estados da Bahia, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Rio Grande do Sul; III) a boa concordância nas estimativas para o Estado de Santa Catarina e Paraná; e IV) as subestimativas para o bioma Cerrado e Pantanal.

5.8.4 Temperatura do ar

A temperatura do ar pode ser definida como o grau de agitação dos átomos que constituem uma massa da atmosfera. A temperatura do ar está estritamente relacionada com o balanço de energia, ou seja, associada ao processo de aquecimento da superfície terrestre e da atmosfera pela interação dos corpos com a energia eletromagnética emitida pelo Sol e pela própria superfície terrestre. Entre os principais efeitos da modificação do uso e cobertura da terra, podem-se citar as alterações nas propriedades de absorver, refletir, transmitir e emitir a radiação eletromagnética. Consequentemente, o albedo da superfície está diretamente relacionado com o balanço radiativo, ocasionando alteração da radiação solar absorvida pela superfície e, consequentemente variações na temperatura e mudanças nos fluxos de calor latente e sensível, acarretando em modificações no clima local e regional.

O impacto da alteração dos parâmetros físicos da cobertura e uso da terra na temperatura do ar simulada pelo modelo RegCM4 para cada trimestre do ano de 2007 pode ser visualizado na **Figura 33**. Os valores em tons de vermelho indicam um aumento na temperatura do ar média ocasionado pela alteração do uso e cobertura da terra no modelo, assim como, pelas alterações trimestrais realizadas nos parâmetros físicos utilizados pelo modelo de superfície BATS. Valores em tons de azul referem-se a áreas onde as alterações realizadas no modelo ocasionam uma redução nos valor médio da temperatura do ar trimestral a dois metros de altura.

Figura 33. Diferença nas estimativas trimestrais da temperatura do ar a 2 metros de altitude resultantes das simulações realizadas pelo RegCM4 para (a) JAN/FEV/MAR, (b) ABR/MAI/JUN, (c) JUL/AGO/SET e, (d) OUT/NOV/DEZ.

Com as modificações realizadas no modelo de superfície BATS observa-se uma variação considerável na temperatura do ar para os trimestres de 2007. Para o trimestre de JAN/FEV/MAR (**Figura 33a**) é possível verificar uma redução de até 2°C para a região noroeste do Paraguai e para a região da Bacia do Rio da Prata na Argentina. Entre as principais causas desta redução, pode-se sugerir a substituição de áreas de pastagem e mosaico de floresta/pastagem pela Floresta Estacional Decidual no Paraguai e a substituição de áreas de Floresta por áreas agrícolas na Bacia do Prata. Igualmente, a substituição de áreas de agricultura por áreas de gramíneas, pastagem e vegetação arbustiva ocasionaram a redução de aproximadamente 1°C na Região Nordeste do Brasil. Entre os resultados não prontamente explicados citamos a redução da temperatura no Estado do Pará e no Suriname, Guiana e Guiana Francesa, sendo que a temperatura do ar a dois metros diminuiu aproximadamente

1°C sem que o uso e cobertura da terra tivessem sido alterados, provavelmente devido ao aumento da nebulosidade nestas regiões.

Entre as principais anomalias positivas de temperatura do ar podem-se citar as áreas desflorestadas no Arco do desmatamento, compostas pela porção norte do Estado do Mato Grosso, o sul do Pará e áreas em Rondônia, Acre e Amazonas. Nestas regiões desmatadas, a substituição de Florestas por áreas agrícolas e/ou de pastagem alteraram o albedo, ocasionando uma elevação de até 2°C na temperatura do ar. Este padrão pode ser encontrado para os trimestres referentes a ABR/MAI/JUN (**Figura 33b**) e JUL/AGO/SET (**Figura 33c**), porém, com uma redução gradativa das diferenças. Diferentemente dos demais trimestres, nos meses de OUT/NOV/DEZ (**Figura 33d**) é possível verificar que as diferenças na temperatura do ar apresentam uma tendência positiva, principalmente nas áreas desmatadas. Esta característica pode estar relacionada com a maior incidência de radiação eletromagnética nestes meses e com as propriedades físico-químicas e biológicas das áreas de campos e agrícolas (que substituíram as áreas de Floresta Amazônica), contribuindo para a elevação da temperatura da superfície e, conseqüentemente, da temperatura do ar. Ainda, é possível notar um aumento de temperatura na borda da Floresta Estacional Decidual no Paraguai nos meses de outubro a dezembro, referente à substituição de áreas com mosaico de pastagem/floresta e Floresta Ombrófila Densa por áreas agrícolas e de pastagem, os quais apresentam um ciclo fenológico distinto e típico destes tipos de vegetação, que influenciam diretamente na variação mensal da temperatura do ar acima destas culturas.

A **Figura 34** exibe as alterações trimestrais ocorridas na temperatura do ar a 2 metros de altitude para os 10 anos (2000 a 2009) de simulações realizadas com o RegCM4. Igualmente às variáveis anteriores, há uma diferença entre as duas simulações realizadas exibe características trimestrais similares às obtidas para o ano de 2007. Nota-se que o desmatamento da Floresta Amazônica, na área do Arco do Desflorestamento, ocasiona aumento da temperatura do ar entre 1°C e 1,4°C nos meses de verão (**Figuras 34a e 34d**); do mesmo modo, a substituição de áreas de pastagem e áreas agrícolas por áreas de Floresta Estacional Decidual, especialmente sobre o Paraguai e norte da Argentina, principalmente nos três primeiros trimestres do ano, proporciona uma redução de até -1,4°C na temperatura do ar. Ainda, as **Figuras 34e, 34f e 34g** exibem, respectivamente, a média anual da temperatura do ar a 2 metros (2000-2009) simulada pelo RegCM4 com as alterações do uso e cobertura da terra e com as condições padrão e, a climatologia estimada a partir dos dados do INMET/CPTEC (1961 a 2001). Na análise climatológica, as maiores médias da temperatura

do ar observada a 2 metros localizam-se no extremo norte do Brasil, entre os Estados do Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte com valores superiores a 25°C, assim como os menores valores médios encontrados nos Estados de Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Paraná variam entre 13 a 19°C.

Figura 34. Diferença nas estimativas trimestrais da temperatura do ar a dois metros da superfície (2000-2009) para (a) JAN/FEV/MAR, (b) ABR/MAI/JUN, (c) JUL/AGO/SET e (d) OUT/NOV/DEZ considerando se as duas simulações propostas; e (e, f) média anual da temperatura do ar a 2 metros da superfície para o período de 2000 a 2009 e (g) estimada com base nos dados do INMET/CPTEC para o período de 1961 a 2001.

Embora os dados do INMET/CPTEC representem a climatologia da temperatura do ar a 2 metros para o período compreendido entre 1961 a 2001, verifica-se boa concordância entre as simulações de 10 anos utilizando-se o modelo RegCM4 e os dados interpolados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE com base nas informações SYNOP/INMET, PCD e dos parceiros do Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos (PMTCRH/INPE). Desta forma, constata-se que as principais diferenças concentram-se na Região Amazônica e na Região Centro-Oeste, com diferenças de temperatura do ar superiores a 2°C. Em algumas áreas é possível verificar uma boa concordância entre os valores simulados e os estimados como, por exemplo, as Regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil. Além disso, o impacto do aumento de áreas desmatadas pode ser visualizado nas **Figuras 34e** e **34f**, principalmente pelo aumento da temperatura do ar nos Estado do Mato Grosso e Rondônia.

5.9 Alterações no uso e cobertura da terra: estudos de caso

Como analisado anteriormente, o uso e cobertura da terra é uma componente fundamental nas simulações numéricas de tempo e clima. Consequentemente, a representação desta variável em modelos climáticos regionais é de fundamental importância para a análise das interações entre a radiação eletromagnética solar e a superfície terrestre, para os estudos das trocas de energia entre a biosfera-atmosfera, entre outros. A **Figura 35** exhibe as áreas de uso e cobertura da terra que foram alteradas (em marrom) ou permaneceram idênticas (em branco) a partir da atualização do mapa do GLCC (1992) pelo mapa proveniente do sensor MODIS (MCD12, 2007).

Para verificar o impacto da substituição dos usos e coberturas da terra na evapotranspiração, precipitação, temperatura a dois metros de altura e radiação solar incidente mensal foram selecionados seis pontos na área de estudo relacionados com: 1) Arco do desflorestamento (substituição de área de Floresta Amazônica por áreas agrícolas e de pecuária); 2) Interior do Brasil (substituição de vegetação herbácea para mosaico de Floresta/pastagem); 3) Nordeste do Brasil (substituição de áreas de agricultura por vegetação arbustiva decidual); 4) Venezuela (substituição de vegetação herbácea por áreas de agricultura e mosaico de Floresta/pastagem); 5) Paraguai (substituição de gramíneas por Floresta Estacional Semidecidual); e 6) Argentina (substituição de mosaico de Floresta/pastagem por áreas agrícolas e de pecuária).

Figura 35. Áreas de uso e cobertura da terra (em marrom) que foram substituídas por outros usos relativos ao mapa do MCD12 (2007) quando comparados ao mapa original (GLCC, 1992) implementado no modelo RegCM4 e utilizado pelo esquema de superfície BATS; localização dos seis pontos selecionados para estudos de caso.

Para cada ponto indicado realizou-se uma média do *pixel* central e dos onze *pixels* vizinhos, totalizando uma área de 22.500 km² (150x150km), como indicado na **Figura 35**. A **Figura 36** mostra a variação temporal para 10 anos (Jan/2000 a Jan/2010) para o ponto 1 correspondente à substituição de área de Floresta Amazônica por áreas agrícolas e de pecuária. A substituição de áreas de floresta ombrófila densa por pastagens e áreas agrícolas, como indicado anteriormente, ocasiona a diminuição da evapotranspiração, principalmente pela redução da transpiração vegetal nos meses de maior atividade convectiva. Para a área analisada, é evidente a diminuição em até 1,5 mm.dia⁻¹, ou seja, 45 mm por mês. As comparações mensais da precipitação total (incluído todos os processos de formação de precipitação) para o ponto 1 indicam que, de um modo geral, há uma tendência de redução na quantidade de chuvas, principalmente para os primeiros oito anos nos períodos chuvosos. Por outro lado, como demonstrado nas simulações, estes valores simulados encontram-se superestimados em relação aos dados do TRMM (em verde). A diminuição da evapotranspiração e precipitação influenciam diretamente a formação de nuvens. A

irradiância solar incidente no topo da atmosfera não varia entre as simulações, portanto a diferença na incidência da radiação solar na superfície está diretamente relacionada com a formação de nuvens. Desta forma, se a incidência de radiação solar na superfície diminuir entre as simulações constata-se um aumento na formação de nuvens, ao contrário (aumento entre as simulações), pode-se afirmar que houve uma diminuição na quantidade de nuvens. Embora que sutilmente, há uma tendência no aumento da quantidade de nuvens na região de influência do desflorestamento devido principalmente ao aumento da temperatura da superfície. Em geral, o desflorestamento nesta áreas ocasiona um aumento de até 2°C na temperatura do ar a dois metros, como visualizado no gráfico da **Figura 36**.

Figura 36. Valores mensais de evapotranspiração (mm.dia⁻¹), precipitação (mm), temperatura a dois metros de altura (°C) e radiação solar incidente (W.m⁻²) para o ponto 1, de Jan/2000 a Jan/2010, referente à substituição de áreas de floresta ombrófila densa por pastagem e agricultura para a simulação de controle (em vermelho) e para a simulação com alteração dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra (em preto, linha tracejada).

A **Figura 37** exibe a variação temporal para 10 anos (Jan/2000 a Jan/2010) para o ponto 2 localizado no Estado do Tocantins. Neste ponto, ocorreu a mudança da vegetação

herbácea/gramíneas por áreas de Floresta/pastagem. Esta alteração no uso e cobertura da terra ocasiona um aumento na evapotranspiração diária com valores mensais superiores a 40 mm (1,3 mm.dia⁻¹). Além disso, a substituição de áreas de vegetação herbácea por mosaico de Floresta e pastagem ocasiona um aumento na precipitação devido principalmente à disponibilidade de vapor d'água para os processos convectivos. Consequentemente, há um aumento da quantidade de nuvens e um aumento da precipitação, verificando-se uma diminuição da radiação solar incidente na área. Em relação à temperatura do ar a dois metros, verifica-se uma diferença muito pequena, ou seja, a alteração do uso e cobertura da terra não ocasiona uma mudança significativa nesta variável.

Figura 37. Valores mensais de evapotranspiração (mm.dia⁻¹), precipitação (mm), temperatura a dois metros de altura (°C) e radiação solar incidente (W.m⁻²) para o ponto 2, de Jan/2000 a Jan/2010, referente à substituição de vegetação herbácea para mosaico de Floresta/pastagem para a simulação de controle (em vermelho) e para a simulação com alteração dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra (em preto, linha tracejada).

A **Figura 38** mostra as alterações ocorridas na evapotranspiração, na precipitação, na temperatura a dois metros de altura e na radiação solar incidente para as simulações entre

Janeiro de 2000 e Janeiro de 2010 para o ponto 3, localizado no interior da Região Nordeste do Brasil. Neste ponto, áreas agrícolas deram lugar a vegetação natural da região (vegetação arbustiva decidual). O ponto 3 localiza-se numa área árida com baixa evapotranspiração diária, com exceção do período chuvoso (entre outubro e fevereiro). A alteração do uso e cobertura da terra ocasionou um aumento da evapotranspiração em alguns anos, porém, há pouca diferença entre as simulações. Este mesmo padrão é visualizado para a precipitação e para a temperatura do ar a dois metros, com poucas diferenças. Entretanto, existe um aumento na quantidade de nuvens (associada à diminuição da radiação solar incidente), principalmente no período chuvoso.

Figura 38. Valores mensais de evapotranspiração (mm.dia^{-1}), precipitação (mm), temperatura a dois metros de altura ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar incidente (W.m^{-2}) para o ponto 3, de Jan/2000 a Jan/2010, referente à substituição de áreas de agricultura por vegetação arbustiva decidual para a simulação de controle (em vermelho) e para a simulação com alteração dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra (em preto, linha tracejada).

A **Figura 39** mostra os resultados das simulações para uma região na Venezuela

(Hemisfério Norte) em que áreas de vegetação herbácea foram substituídas por áreas de agricultura e mosaico de Floresta/pastagem. Entre as principais variações decorrentes desta modificação, pode-se citar a diminuição da precipitação nos meses mais chuvosos e aumento na quantidade de nebulosidade nos meses mais chuvosos. Em alguns anos, os valores de precipitação podem ficar 60 mm menores em determinados meses, principalmente na época seca. Ainda, constata-se que a evapotranspiração e a temperatura do ar a dois metros permanecem praticamente constantes entre ambas as simulações, indicando que a alteração destes usos e cobertura da terra pouco influenciou nestas variáveis meteorológicas.

Figura 39. Valores mensais de evapotranspiração (mm.dia^{-1}), precipitação (mm), temperatura a dois metros de altura ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar incidente (W.m^{-2}) para o ponto 4, de Jan/2000 a Jan/2010, referente à substituição de vegetação herbácea por áreas de agricultura e mosaico de Floresta/pastagem para a simulação de controle (em vermelho) e para a simulação com alteração dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra (em preto, linha tracejada).

A **Figura 40** exibe a variação temporal para 10 anos (Jan/2000 a Jan/2010) para o ponto 5 localizado no Paraguai. Neste ponto ocorreu a mudança de gramíneas por Floresta

Estacional Semidecidual. Esta alteração no uso e cobertura da terra ocasiona um aumento na evapotranspiração diária com valores mensais superiores a 30 mm ($1,0 \text{ mm.dia}^{-1}$). Além disso, a substituição de gramíneas por espécies arbóreas ocasiona um aumento significativo na precipitação devido principalmente à disponibilidade de vapor d'água para os processos convectivos. Em alguns anos (2005 e 2007) este aumento pode alcançar 200 mm em meses específicos. Consequentemente, O aumento da precipitação está associado à maior quantidade de nuvens que pode ser identificada pela diminuição da radiação solar incidente, principalmente na estação chuvosa (verão do Hemisfério Sul). Em relação à temperatura do ar a dois metros, observa-se a tendência de diminuição desta variável em todos os meses, o que pode ser resultado da maior disponibilidade de água no dossel.

Figura 40. Valores mensais de evapotranspiração (mm.dia^{-1}), precipitação (mm), temperatura a dois metros de altura ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar incidente (W.m^{-2}) para o ponto 5, de Jan/2000 a Jan/2010, referente à substituição de gramíneas por Floresta Estacional Semidecidual para a simulação de controle (em vermelho) e para a simulação com alteração dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra (em preto, linha tracejada).

A **Figura 41** mostra as alterações ocorridas na evapotranspiração, precipitação, temperatura a dois metros de altura e radiação solar incidente para as simulações entre janeiro de 2000 e janeiro de 2010 para o ponto 6, localizado na bacia do Rio da Prata (Argentina). Neste ponto, ocorreu a substituição de mosaico de Floresta/pastagem por áreas agrícolas e de pecuária. O ponto 6 localiza-se numa área com baixa evapotranspiração no período de inverno (julho a setembro), e com seu aumento no período chuvoso (entre outubro e fevereiro). A inserção de áreas agrícolas ocasionou poucas mudanças na estimativa da evapotranspiração se comparados os resultados das duas simulações. Este mesmo comportamento é detectado na temperatura do ar a dois metros e na radiação solar incidente. Entretanto, a variação mais significativa na precipitação diminuiu principalmente nos meses de inverno, aparentemente seguindo a pequena diminuição notada na evapotranspiração neste período.

Figura 41. Valores mensais de evapotranspiração (mm.dia^{-1}), precipitação (mm), temperatura a dois metros de altura ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar incidente (W.m^{-2}) para o ponto 6, de Jan/2000 a Jan/2010, referente à substituição de mosaico de Floresta/pastagem por áreas agrícolas e de pecuária para a simulação de controle (em vermelho) e para a simulação com alteração dos parâmetros físicos e do uso e cobertura da terra (em preto, linha tracejada).

CAPÍTULO 6

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos regionais de previsão do tempo e clima são ferramentas importantes para o entendimento das interações entre a biosfera e atmosfera, porém, sua acurácia depende de parametrizações realísticas dos processos que envolvem estas variáveis. Na maioria dos modelos regionais, o mapa de uso e cobertura da terra não é atualizado com frequência e encontra-se defasado, influenciando, nos resultados obtidos a partir das simulações.

Desta forma, os dados de sensoriamento remoto provenientes de plataformas orbitais possibilitam a obtenção de informações multiespectrais com variadas resoluções espaciais e temporais. Estas informações podem ser empregadas para atualizar os dados de entrada de modelos atmosféricos, regionais ou globais. Além disto, as imagens orbitais permitiram estimar diversos parâmetros físico-químicos e biológicos necessários na simulação das interações entre a radiação eletromagnética e os objetos que compõem a superfície terrestre.

Neste estudo, foi analisado o impacto da alteração da cobertura e uso da terra pela atualização destas informações na América do Sul obtidas a partir dos produtos originados do sensor MODIS a bordo dos satélites TERRA e AQUA. Os dados anuais e multitemporais de fração máxima de cobertura vegetal, reflectância no visível e no infravermelho próximo e do índice de área foliar foram inseridos no esquema de superfície BATS e testes de sensibilidades foram realizados para o ano de 2007 e para o período de 2000 a 2009. Consequentemente, simulações decadais distintas (com a alteração dos parâmetros descritos acima e com a configuração padrão do modelo) foram realizadas no modelo RegCM4 para verificar o impacto atmosférico decorrente destas alterações e para analisar o ajuste dos esquemas de parametrização cumulus propostas por Emmanuel (1992) e Grell (1993).

Os dados de precipitação mensal estimada pelo TRMM e por 183 estações espalhadas por todo o Brasil (64 localizadas na região Nordeste, 39 na região Norte, 8 na região Centro-Oeste, 27 na região Sul e 45 na região Sudeste) apresentam uma concordância de aproximadamente 97%. Em geral, os dados do TRMM superestimam os dados do INMET/CPTEC observados entre 1998 e 2010. Na análise, encontraram-se valores 9%, 8%, 6%, 13% e 9% maiores que os observados pelas redes de estações meteorológicas do INMET/CPTEC para as regiões Centro-Oeste, Sul, Norte, Sudeste e Nordeste, respectivamente. Embora os dados do TRMM representem apenas treze anos de observações, verifica-se um ajuste de aproximadamente 95% entre os padrões espaciais da precipitação anual obtidos com o TRMM e com as observações das estações meteorológicas.

As simulações utilizando diferentes condições iniciais e de contorno lateral, TSM e parametrização cúmulos no RegCM4 e a avaliação a partir de dados estimados por sensoriamento remoto e por redes de estações meteorológicas permitiram verificar quais dados de entrada proporcionaram as melhores simulações. A precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima apresenta um ajuste de até 95% para todas as regiões do Brasil quando os dados de entrada do modelo foram compostos pelas reanálises do SST-ERA-Interim e ERA-Interim e com a parametrização cúmulos proposta por Emmanuel, esta utilizada em todos os experimentos de sensibilidade, pois mostrou melhor desempenho em relação à parametrização proposta por Grell (1993).

Com a atualização do uso e cobertura da terra utilizado pelo modelo de superfície BATS, é possível constatar uma melhora média de 10% na simulação da precipitação, proporcionando um aumento de 84% para 92% no coeficiente de correlação (significante a $p < 0,05$, teste t-student). Ainda, nota-se uma concordância de 95% das simulações no que se diz respeito à temperatura máxima e mínima, com valores muito próximos ao esperado. Do mesmo modo, a simulação da precipitação para a América do Sul realizada com a alteração dos valores de fração máxima de cobertura vegetal, quando comparada com os dados de precipitação observados nas estações meteorológicas, apresenta um coeficiente de correlação igual a 91%; sendo, em média, 18% maiores do que os observados. Ressalta-se que a simulação de controle apresentou o valor de correlação igual a 84% com superestimativas na ordem de 12%.

Ainda, a alteração dos valores de reflectância no visível e no infravermelho próximo e do índice de área foliar estiveram associados a coeficientes de correlação entre a precipitação simulada e a observada iguais a 91% e 92%, respectivamente. Nestas simulações, os valores de precipitação foram superestimados, em média, em 19% e 23%. Ressalta-se que todas as simulações apresentaram acentuado ajuste no que diz respeito à temperatura máxima e mínima, apresentando valores muito próximos aos considerados aos observados pelos dados do INMET/CPTEC. A variação trimestral dos parâmetros físicos utilizados pelo modelo de superfície BATS reduziram em 3% as superestimativas de precipitação para a área das estações meteorológicas, apresentando uma correlação de 92% (significante a $p < 0,05$, teste t-student). Além disso, a modificação do coeficiente de quantidade de água condensada que é convertida em precipitação na parametrização cúmulos proposta por Emmanuel (1991), tal como proposto por Segele et al. (2009), ocasionou redução acentuada da precipitação por toda a América do Sul. (18% abaixo do esperado, correlação de 86%), ocasionando uma piora nas

simulações.

Em relação às demais variáveis meteorológicas analisadas, as principais diferenças encontradas na evapotranspiração, precipitação, umidade relativa do ar e temperatura a dois metros concentram-se na região noroeste do Estado do Mato Grosso, nas divisas dos Estados de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso com a Bolívia (áreas alagadas do Pantanal brasileiro), região noroeste do Paraguai e na região da Bacia do Rio da Prata na Argentina, Região Nordeste do Brasil, entre outras, devido principalmente à alteração da classe Floresta Ombrófila Densa para áreas de pastagem e agricultura, substituição de áreas de agricultura por áreas de gramíneas, pastagem, vegetação arbustiva e Floresta Estacional Decidual. Ainda, os valores climatológicos de umidade relativa do ar e de temperatura do ar a dois metros simulados pelo RegCM4 apresentaram uma distribuição espacial próxima à estimada pelos dados provenientes das estações meteorológicas.

Os valores de precipitação do modelo encontram-se superestimados para a maior parte da América do Sul, ocasionando um excesso hídrico que é compensado pela alta evapotranspiração simulada pelo modelo. Entre as principais regiões com erros significativos de superestimativa da precipitação destacam-se as áreas do interior do Brasil e na Floresta Amazônica (setores oeste e noroeste); entre as áreas com subestimativas, pode-se citar a Região Sul do Brasil. Consequentemente, ao se comparar a evapotranspiração estimada pelo RegCM4 e a estimada pelo sensor MODIS observa-se uma superestimativa dos valores para grande parte do Brasil, principalmente para a região centro-leste. Desta forma, uma das alternativas para melhorar a estimativa da precipitação seria a alteração dos coeficientes empregados nas parametrizações cúmulos atualmente implementadas no modelo RegCM4.

Para futuros estudos sugere-se a assimilação da variação trimestral dos parâmetros físico-químico e biológicos para simulações climáticas com períodos superiores a 25 anos, além de aplicar a mesma metodologia para as fitofisionomias do modelo de superfície CLM e verificar os impactos na modelagem climática. Ainda, outra possibilidade é melhorar a representação das estimativas de precipitação do modelo pela variação de parametrizações cúmulos para diferentes latitudes e regiões. Além disto, pode-se variar temporalmente o uso e cobertura da terra para cada ano analisado com base nos principais produtos de sensoriamento remoto. Para a validação pode-se optar pela amostragem aleatória de pontos sobre toda a área de estudo com o intuito de analisar regiões que não foram exploradas neste trabalho. Por último, pode-se simular as principais variáveis meteorológicas acopladas ao modelo químico do RegCM, atualizando a concentração de gases a partir dos dados do modelo CCATT-

BRAMS.

CAPÍTULO 7

7. REFERÊNCIAS

AB´SABER, A. N. Potencialidades paisagísticas brasileiras. **Seleção de Textos de Geomorfologia**. São Paulo, SP:Instituto de Geografia/USP, v. 55, p. 01-25, 1977.

ABIODUN, B.J.; PAL, J.S.; AFIESIMAMA, E.A.; GUTOWSKI, W.J.; ADEDOYIN, A. Simulation of West African monsoon using RegCM3 Part II: impacts of deforestation and desertification. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93, n.3-4, p. 245-261, 2008.

ALLINGTON, G.R.H.; VALONE, T.J. Reversal of desertification: The role of physical and chemical soil properties. **Journal of Arid Environments**, v. 74, n. 8, p. 973-977, 2010.

ALO, C.A.; Wang, G. Role of dynamic vegetation in regional climate predictions over western Africa. **Climate Dynamics**, v. 35, p. 907–922, 2010.

ANYAH, R.O.; SEMAZZI, F.H.M. Simulation of the sensitivity of Lake Victoria basin climate to lake surface temperatures. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 79, p. 55-69, 2004.

ASSELIN, H.; FORTIN, M.J.; BERGERON, Y. Spatial distribution of late-successional coniferous species regeneration following disturbance in southwestern Quebec boreal forest. **Forest Ecology and Management**, v. 140, n. 1, p. 29-37, 2001.

BAEDE, A.P.M.; AHLONSOU, E.; DING, Y.; SCHIMEL, D. The Climate System: An Overview. In Houghton, J. T. *et al.* (eds.), **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 85-98, 2001.

BERGANT, K.; BELDA, M.; HALENKA, T. Systematic errors in the simulation of european climate (1961-2000) with RegCM3 driven by NCEP/NCAR reanalysis. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 455-472, 2007.

BERTALANFFY, L. **Teoria Geral dos Sistemas**. Tradução de Francisco M. Guimarães. Petrópolis: Vozes, 1973.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico. **Caderno de ciências da terra**, São Paulo, n.13, 1972. 27p.

BROWN, R.A.; ROSENBERG, N.J.; HAYS, C.J.; EASTERLING, W.E.; MEARNS, L.O. Potential production and environmental effects of switchgrass and traditional crops under current and greenhouse-altered climate in the central United States: a simulation study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 78, n. 1, p. 31-47, 2000.

CÂMARA NETO, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para banco de dados geográficos**. [Tese de Doutorado]. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.

CARLSON, T. N.; RIPLEY, D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, p. 241-252, 1997.

CARTER, N.; KREUTZWISER, R.D.; LOE, R.C. Closing the circle: linking land use planning and water management at the local level. **Land Use Policy**, v. 22, n. 2, p. 115-127, 2005.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

CNES (2000). "**SPOT-Vegetation Instrument**." Centre National pour l'Etudes d'Espace. Disponível em: http://spot4.cnes.fr/spot4_gb. Acesso em: 13 de agosto de 2011.

CONGALTON, R.G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practics**. New York: 137 p., 1998.

CROFT, T.A. Nighttime images of the earth from space. **Scientific America**, v. 239, p. 86-98, 1978.

CUADRA, S.V.; DA ROCHA, R.P. Simulação Numérica do Clima de Verão Sobre o Sudeste do Brasil e sua Variabilidade. **Rev. Bras. Meteorol.**, n. 21, p. 271–282, 2006.

DAI, A.; GIORGI, F.; TRENBERTH, K.E. Observed and model-simulated diurnal cycles of precipitation over the contiguous United States. **J. Geophys. Res.**, v. 104, p. 6377-6402, 1999.

DAVID, M.; WALKO, R.L.; AVISSAR, R. Effects of Deforestation on Spatiotemporal Distributions of Precipitation in South America. **J. Climate**, n. 24, p. 2147–2163, 2011.

DA ROCHA, R.P.; MORALES, C.A.; CUADRA, S.V.; AMBRIZZI, T. Precipitation diurnal cycle and summer climatology assessment over South America: An evaluation of Regional Climate Model version 3 simulations. **J. Geophys. Res.**, v. 114, D10108, 2009.

DEE, D.P.; UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M.A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A.C.M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A.J.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S.B.; HERSBACH, H.; HÓLM, E.V.; ISAKSEN, L.; KALLBERG, P.; KOHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A.P.; MONGE-SANZ, B.M.; MORCRETTE, J-J.; PARK, B-K.; PEUBEY, C.; DE ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J-N.; VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 137, p. 553–597, 2011.

DEFRIES, R.S.; TOWNSHEND, J.R.G. Global land cover: comparison of ground-based data

sets to classifications with AVHRR data, In: **Environmental Remote Sensing from Regional to Global Scales**. Edited by G. Foody and P. Curran, Environmental Remote Sensing from Regional to Global Scales, 1994.

DEFRIES, R.S.; TOWNSHEND, J.R.G. NDVI-derived land cover classification at global scales. **International Journal of Remote Sensing**, n. 15, p. 3567-3586, 1994.

DEFRIES, R.S.; HANSEN, M.; TOWNSHEND, J.R.G.; SOHLBERG, R. Global land cover classifications at 8 km spatial resolution: the use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, p. 3141-3168, 1998.

DE SHERBININ, A. Land-Use and Land-Cover Change, **A CIESIN Thematic Guide**, Palisades, NY: Center for International Earth Science Information Network of Columbia University, 2002. Disponível em: http://sedac.ciesin.columbia.edu/tg/guide_frame.jsp?g=47. Acesso em: 08 de agosto de 2011.

DICKINSON, R.E.; KENNEDY, P.J.; HENDERSON-SELLERS, A.; WILSON, M. Biosphere-atmosphere transfer scheme (bats) for the near community climate model. **Tech. Rep. NCARE/TN-275+STR**, National Center for Atmospheric Research, 1986.

DICKINSON, R. E.; ERRICO, R. M.; GIORGI, F.; BATES, G.T. A regional climate model for the western United States. **Climatic Change**, n. 15, p. 383-422, 1989.

DICKINSON R.E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P.J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1E as coupled to the NCAR Community Climate Model. **NCAR Tech. Note**, 72pp, National Center for Atmospheric Research, 1993.

D'OLIVEIRA, M.V.N.; ALVARADO, E.C.; SANTOS, J.C.; CARVALHO JR., J.A. Forest natural regeneration and biomass production after slash and burn in a seasonally dry forest in the Southern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 9, p. 1490-1498, 2011.

DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília, EMBRAPA, 2004 (ISBN: 85-7383-260-6).

EMANUEL, K.A. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, n. 48, p. 2313-2335, 1991.

ESA. **MERIS Introduction**. European Space Agency, 2004. Disponível em: <http://envisat.esa.int/instruments/meris/>. Acesso em: 13 de agosto de 2011.

FAO, 2002. **World agriculture towards 2015/30**. Summary report. ISBN: 9251047618 FAO, Rome.

FISCH, G.; MARENGO, J.; NOBRE, C.A. Clima da Amazônia. **Climanálise Especial**, Edição Comemorativa de 10 anos, p. 24-41, 1996.

FIORINO, M. A multi-decadal daily sea surface temperature and sea ice concentration data set for the ERA-40 reanalysis, **ERA-40 Project Report Series**, n. 12, ECMWF: Reading, UK., 2004.

FORMAN, R.T.T. **Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions**. Cambridge University Press, Cambridge, 1995.

FRITSCH, J.M.; CHAPPELL, C.F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. part i: Convective parameterization. **J. Atmos. Sci.**, n. 37, p. 1722–1733, 1980.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D.W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D.C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; VAN DORLAND, R. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

FRIEDL, M.A.; MCIVER, D.K.; HODGES, J.C.F.; ZHANG, X.Y.; MUCHONEY, D.; STRAHLER, A.H.; WOODCOCK, C.E.; GOPAL, S.; SCHNEIDER, A.; COOPER, A.; BACCINI, A.; GAO, F.; SCHAAF, C. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1–2, p. 287–302, 2002.

FUJISAKA, S.; CASTILLA, C.; ESCOBAR, G.; RODRIGUES, V.; VENEKLAAS, E.J.; THOMAS, R.; FISHER, M. The effects of forest conversion on annual crops and pastures: Estimates of carbon emissions and plant species loss in a Brazilian Amazon colony. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 69, n. 1, p. 17-26, 1998.

GAO, X.J.; LUO, Y.; LIN, W.; ZHAO, Z.; GIORGI, F. Simulation of effects of landuse change on climate in China by a regional climate model. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 20, n. 4, p. 583-592, 2003.

GAO, X.J.; XU, Y.; ZHAO, Z.-C.; PAL, J.S.; GIORGI, F. On the role of resolution and topography in the simulation of East Asia precipitation. **Theoretical and Applied Climatology**, n. 86, p. 173-185, 2006.

GIORGI, F. Two-dimensional simulations of possible mesoscale effects of nuclear war fires. **J. Geophys. Res.**, n. 94, p. 1127–1144, 1989.

GIORGI, F. Sensitivity of simulated summertime precipitation over the western United States to different physics parameterization. **Mon. Wea. Rev.**, n. 119, p. 2870-2888, 1991.

GIORGI, F.; BI, X. A study of internal variability of a regional climate model. **J. Geophys. Res.**, v. 105, n. D24, p. 29.503–29.521, 2000.

GIORGI F.; COPPOLA, E.; SOLMON, F.; MARIOTTI, L.; et al. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. **Clim. Res.**, v. 52, p. 7–29, 2012.

GCOS. **Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate**, vol. 107. GCOS, 90 pp, 2006.

GOLDEWIJK, K.K.; RAMANKUTTY, N. Land cover change over the last three centuries due to human activities: the availability of new global data sets. **Geojournal**, n. 61, p. 335–344, 2004.

GRADOWSKI, T.; LIEFFERS, V.J.; LANDHAUSSER, S.M.; SIDDER, D.; VOLNEY, J.; SPENCE, J.R. Regeneration of Populus nine years after variable retention harvest in boreal mixedwood forests. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 3, p. 383–389, 2010.

GRELL, G. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. **Mon. Wea. Rev.**, v. 121, p. 764–787, 1993.

HENDERSON-SELLERS A. Special issue—soil moisture simulation—selected papers from the rice and PILPS moisture workshop held at Macquarie University, Sydney, Australia in November 1994. **Global and Planetary Change**, n. 13, p. 1–2, 1996.

HEROLD, M.; MAYAUX, P.; WOODCOCK, C. E.; BACCINI, A.; SCHMULLIUS, C. Challenges in global land cover mapping: an assessment of agreement and accuracy in existing 1km datasets. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 2538–2556, 2008.

HOLTON, J.R. **An Introduction to Dynamic Meteorology**, Academic Press, International Geophysics Series, v. 88, n. 5, 535 p., 2004.

HOLTSLAG, A.A.M.; DE BRUIJN, E.I.F.; PAN, H.-L. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. **Mon. Wea. Rev.**, n. 118, p. 1561–1575, 1990.

HOUGHTON, R.A.; BOONE, R.D.; MELILLO, J.M.; PALM, C.A.; WOODWELL, G.M.; MYERS, N.; MOORE, B.; SKOLE, D.L. Net flux of carbon dioxide from tropical forests in 1980. **Nature**, n. 316, p. 617–620, 1985.

HOUGHTON, J.T.; MERA FILHO, L.G.; CALLANDER, B.A.; HARRIS, N.; KATTENBERG, A.; MASKELL, K. **Climate Change 1995—The Science of Climate Change. Contribution of Working Group 1 to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press: Cambridge, 1996.

HUFFMAN, G. J.; ADLER, R. F.; BOLVIN, D. T.; GU, G.; NELKIN, E. J.; BOWMAN, K. P.; HONG, Y.; STOCKER, E. F.; WOLFF, D. B. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, p. 38-55, 2007.

ISIDOROV, V.A.; ZENKEVICH, I.G.; IOFFE, B.V. Volatile organic compounds in the atmosphere of forests. **Atmospheric Environment**, v. 19, n. 1, p. 1-8, 1985.

ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **J. Soil Water Conser.**, n. 55, p. 69-78, 2000.

JUSTICE, C.O.; VERMOTE, E.; TOWNSEND, J.R.G.; DEFRIES, R.; ROY, D.P.; HALL, D.K.; SALOMONSON, V.V.; PRIVETTE, J.L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R.B.; KNYAZIKHIN, Y.S.; RUNNING, W.; NEMANI, R.R.; WAN, Z.; HUETE, A.R.; VAN LEEUWEN, W.; WOLFE, R.E.; GIGLIO, L.; MULLER, J.-P.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M.J. The Moderate Resolution Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, n. 36, p. 1228-1249, 1998.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, B.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K.C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, n. 77, p. 437-472, 1996.

KASSAS, M. Desertification: a general review. **Journal of Arid Environments**, v. 30, n. 2, p. 115-128, 1995.

LANLY, J.-P. **Tropical Forest Resources**, FAO Forestry Pap. 30, FAO, Rome, 1982.

LATIFOVIC, R.; POULIOT, D. Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record. **Remote Sensing of Environment**, 106, p. 492-507, 2007.

LEDUC, M.; LAPRISE, R. Regional climate model sensitivity to domain size. **Climate Dynamics**, v. 32, n. 6, p. 833-854, 2008.

LIU, Y.-Q.; AVISSAR, R.; GIORGI, F. A simulation with the regional climate model RegCM2 of extremely anomalous precipitation during the 1991 East Asian flood: An evaluation study. **J. Geophys. Res.**, v. 101, p. 26199-26216, 1996.

LIU, Y. Atmospheric response and feedback to radiative forcing from biomass burning in tropical South America. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 133, n. 1-4, p. 40-53, 2005;

LIU, Y.; STANTURF, J.; GOODRICK, S. Wildfire potential evaluation during a drought event with a regional climate model and NDVI. **Ecological Informatics**, v. 5, n. 5, p. 418-428, 2010.

MAYAUX, P.; STRAHLER, A.; EVA, H.; HEROLD, M.; SHEFALI, A.; NAUMOV, S. Validation of the Global Land Cover 2000 Map. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 7, p. 1728–1739, 2006.

MCGREGOR, J.J. Regional climate modeling. **Meteorol. Atmos. Phys.**, v. 63, p. 105-117, 1997.

MCGUFFIE, K.; HENDERSON-SELLERS, A. Forty years of numerical climate modelling. **International Journal of Climatology**, v. 21, n. 9, p. 1067-1109, 2001.

MEARNS, L.O.; GIORGI, F.; MCDANIEL, L.; SHIELDS, C. Analysis of daily variability of precipitation in a nested regional climate model: comparison with observations and doubled CO₂ results. **Global and Planetary Change**, v. 10, n. 1-4, p. 55-78, 1995.

MEYER, W.B.; TURNER, B.L. **Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

MONTEIRO, C. A. de F. **Análise rítmica em climatologia**. São Paulo: USP/Igeog, 1971 (Climatologia, 1).

MONTEIRO. Carlos A. F. **Teoria e clima urbano**. São Paulo: IGEO/USP, 1976. 181 p. (Série Teses e Monografias, 25)

MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 3, p. 223-231, 2004.

MORISSETTE, J.T.; PRIVETTE, J.L.; JUSTICE, C.O. A framework for the validation of MODIS Land products. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 77-96, 2002.

MOLDERS, N.; RUHAAK, W. On the impact of explicitly predicted runoff on the simulated atmospheric response to small-scale land-use changes--an integrated modeling approach. **Atmospheric Research**, v. 63, n. 1-2, p. 3-38, 2002.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S.W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, 2011.

NRC. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Radiative Forcing of Climate Change: Expanding the Concept and Addressing Uncertainties**. The National Academies Press: Washington, DC; 208 pp., 2005.

NEUMANN, K.; HEROLD, M.; HARTLEY, A.; SCHMULLIUS, C. Comparative assessment of CORINE2000 and GLC2000: Spatial analysis of land cover data for Europe. **Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 9, p. 425–437, 2007.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 422p., 1979.

NIYOGI D.; MAHMOOD, R.; ADEGOKE, J.O. Land-use/land-cover change and its impacts on weather and climate. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 133, p. 297–298, 2009.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **J. Clim.**, 4, 957-988, 1991.

OLESON, K.E.A. Technical description of the Community Land Model (CLM). **Tech. Rep. Technical Note**, NCAR/TN-461+STR, NCAR, 2004.

OTTERMAN, J. Baring high-albedo soils by overgrazing: a hypothesized desertification mechanism. **Science**, v. 186, p. 531–533, 1974.

PAL, J.S.; GIORGI, F.; BI, X. Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. **Geophysical Research Letters**, v. 31, p. L13202, 2004.

RICHARDS, J.F. Land transformation, **In:** Turner II B.L. et al. (eds.), *The Earth as Transformed by Human Action*, p. 163–178, Cambridge Univ. Press, New York, 1990.

QUADRO, M. F. L.; MACHADO, L. H. R.; CALBETE, S.; BATISTA, N. N. M.; OLIVEIRA, G. S. Climatologia da precipitação e temperatura. **Climanalise**, Edição Especial, p. 136 – 139, 1996.

REGCM TEAM. **RegCM Version 4.0 Core Description**. Disponível em: <http://eforge.escience-lab.org/gf/download/docmanfileversion/4/235/regcm-guide.pdf>. Acesso: 18 de agosto de 2011.

REYNOLDS, R.W.; RAYNER, N.A.; SMITH, T.M.; STOKES, D.C.; WANG, W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. **J. Climate**, v. 15, p. 1609-1625, 2002.

ROBERTS, D. A.; BATISTA, G. T.; PEREIRA, J. L. G.; WALLER, E. K.; NELSON, B. W. Change identification using multitemporal spectral mixture analysis: applications in eastern Amazonia. **In:** Lunetta R. S.; Elvidge C. D. (ed.). *Remote sensing change detection: environmental monitoring methods and applications*. Michigan: Ann Arbor Press, v.1, cap. 9, p. 137 – 161, 1998.

ROCHA, A.G.; GANDU, A.W. A zona de convergência do atlântico sul. **Climanalise**, Edição Especial, p. 140-142, 1996.

ROUSE, J.W.; HAAS JR., R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. **Final Report**, NASA/GSFC, Greenbelt, MD, 371 p., 1977.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

SAGAN, C.; TOON, O.B.; POLLACK, J.B. Anthropogenic albedo changes and the Earth's climate. **Science**, v. 206, p. 1363–1368, 1979.

SALBY, M.L. The Atmosphere. **In:** Trenberth, K. E. (ed.), *Climate System Modeling*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 53-115, 1992.

SCEPAN, J. Thematic validation of high-resolution global land-cover data sets. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 65, p. 1051-1060, 1999.

SEGELE, Z.T.; LESLIE, L.M.; LAMB, P.J. Evaluation and adaptation of a regional climate model for the Horn of Africa: rainfall climatology and interannual variability. **Inter J Climatol.**, v. 29, p. 47–65, 2009.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, Jan. 1991.

SILVA DIAS, M.A. Complexos convectivos de mesoescala sobre a região sul do Brasil. **Climanálise**, Edição Especial, p. 173-179, 1996.

SILVA, M.E.S.; FRANCHITO, S.H.; RAO, V.B. Effects of amazonian deforestation on climate: a numerical experiment with a coupled biosphere-atmosphere model with soil hydrology. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 85, p. 1-18, 2006.

SOTCHAVA, V.B. **O estudo de Geossistemas**. Métodos em Questão. São Paulo: USP/IG, n. 16, 1977.

SPRING. 2005. **Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas**. Versão 4.3. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

STONE, T.A.; SCHLESINGER, P.; HOUGHTON, R.A.; WOODWELL, G.M. A map of the vegetation of South America based on satellite imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 60, p. 541-551, 1994.

STRAHER, A.N. **Introduction to Physical Geography**. New York: John Wiley e Sons, 1965.

TCHUENTE, A.T.K.; ROUJEAN, J-L.; DE JONG, S.M. Comparison and relative quality assessment of the GLC2000, GLOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets

at the African continental scale. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 2, p. 207-219, 2011.

TOWNSHEND, J.R.G.; JUSTICE, C.O.; KALB, V.T. Characterization and classification of South American land cover types using satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, n. 8, p. 1189-1207, 1987.

TUCKER, C.J.; TOWNSHEND, J.R.G.; GOFF, T.E. African land-cover classification using satellite data. **Science**, v. 227, p. 369-375, 1985.

VEADO, R.W.V. Geossistemas de Santa Catarina. Rio Claro, UNESP/IGCE, 1998. (**Tese de Doutorado**)

VERSTRAETE, M.M.; BRINK, A.B.; SCHOLLES, R.J.; BENISTON, M.; SMITH, M.S. Climate change and desertification: Where do we stand, where should we go?. **Global and Planetary Change**, v. 64, n. 3-4, p. 105-110, 2008.

WANG, S.; DAVIDSON, A. Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, n. 2-4, p. 133-142, 2007.

XIE, Y.; SHA, Z.; YU, M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. **J. Plant Ecol.**, v. 1, p. 9–23, 2008.

ZHAN, X.; DEFRIES, R.M.; HANSEN, M.; TOWNSHEND, J.R.G.; DIMICELI, C.; SOHLBERG, R.; HUANG, C. MODIS Enhanced Land Cover and Land Cover Change Product, **Algorithm Theoretical Basis Documents (ATBD)** Version 2.0., NASA, GSFC, Greenbelt, MD 94pp., 1999.

ZENG, X.; ZHAO, M.; DICKINSON, R.E. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using toga coare and tao data. **J. Climate**, v. 11, p. 2628–2644, 1998.

ANEXO 1

Tabelas com as variações trimestrais dos parâmetros físicos do modelo de superfície BATS

Tabela 1 – Fração Máxima de Cobertura vegetal

Classes	Jan/Fev/Mar	Abr/Mai/Jun	Jul/Ago/Set	Out/Nov/Dez
1	0,72	0,79	0,79	0,60
2	0,42	0,43	0,43	0,33
3	0,34	0,77	0,77	0,80
4	0,23	0,72	0,72	0,79
5	0,75	0,72	0,72	0,72
6	0,94	0,94	0,94	0,94
7	0,73	0,72	0,72	0,70
8	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,16	0,51	0,51	0,51
10	0,73	0,78	0,78	0,77
11	0,17	0,16	0,16	0,15
12	0	0,0	0,0	0,0
13	0,7	0,71	0,71	0,68
14	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,77	0,60	0,60	0,54
17	0,32	0,28	0,28	0,19
18	0,85	0,71	0,71	0,60
19	0,80	0,72	0,72	0,63
20	0,80	0,80	0,80	0,80

Tabela 2 – Reflectância no visível

Classes	Jan/Fev/Mar	Abr/Mai/Jun	Jul/Ago/Set	Out/Nov/Dez
1	0,06	0,08	0,08	0,08
2	0,08	0,09	0,09	0,11
3	0,05	0,06	0,06	0,04
4	0,37	0,06	0,06	0,43
5	0,06	0,05	0,05	0,05
6	0,04	0,04	0,04	0,04
7	0,07	0,07	0,07	0,08
8	0,25	0,24	0,24	0,23
9	0,55	0,90	0,90	0,06
10	0,08	0,08	0,08	0,08
11	0,11	0,13	0,13	0,15
12	0,95	0,86	0,86	0,97
13	0,05	0,04	0,04	0,05
14	0,08	0,05	0,05	0,08
15	0,06	0,07	0,07	0,07
16	0,11	0,09	0,09	0,11
17	0,08	0,08	0,08	0,06
18	0,04	0,05	0,05	0,05
19	0,06	0,05	0,05	0,06
20	0,06	0,05	0,05	0,06

Tabela 3 – Reflectância no infravermelho próximo e médio

Classes	Jan/Fev/Mar	Abr/Mai/Jun	Jul/Ago/Set	Out/Nov/Dez
1	0,30	0,27	0,27	0,26
2	0,26	0,28	0,28	0,25
3	0,22	0,20	0,20	0,20
4	0,33	0,21	0,21	0,32
5	0,24	0,22	0,22	0,24
6	0,22	0,23	0,23	0,22
7	0,26	0,24	0,24	0,25
8	0,40	0,45	0,45	0,39
9	0,62	0,64	0,64	0,41
10	0,25	0,26	0,26	0,25
11	0,26	0,29	0,29	0,26
12	0,64	0,54	0,54	0,68
13	0,20	0,23	0,23	0,24
14	0,01	0,01	0,01	0,01
15	0,01	0,01	0,01	0,01
16	0,29	0,27	0,27	0,29
17	0,21	0,25	0,25	0,23
18	0,26	0,25	0,24	0,21
19	0,25	0,27	0,27	0,24
20	0,25	0,27	0,27	0,24

Tabela 4 – Índice de área foliar mínimo

Classes	Jan/Fev/Mar	Abr/Mai/Jun	Jul/Ago/Set	Out/Nov/Dez
1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,5	0,5	0,5	0,5
3	4,5	4,5	4,5	4,5
4	1,0	0,1	1,0	1,0
5	2,0	2,0	2,0	2,0
6	6,0	6,0	6,0	6,0
7	0,5	0,5	0,5	0,5
8	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,1	0,1	0,1	0,1
11	0,1	0,1	0,1	0,1
12	0,0	0,0	0,0	0,0
13	4,0	4,0	4,0	4,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0
16	1,0	1,0	1,0	1,0
17	5,0	0,5	0,5	0,5
18	3,0	3,0	3,0	3,0
19	3,0	3,0	3,0	3,0
20	1,0	1,0	1,0	1,0

Tabela 5 – Índice de área foliar máximo

Classes	Jan/Fev/Mar	Abr/Mai/Jun	Jul/Ago/Set	Out/Nov/Dez
1	4,0	4,0	4,0	4,0
2	2,5	2,5	2,5	2,5
3	6,5	6,5	6,5	6,5
4	6,5	6,5	6,5	6,5
5	6,0	6,0	6,0	6,0
6	7,0	7,0	7,0	7,0
7	2,0	2,0	2,0	2,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0
9	5,0	5,0	5,0	5,0
10	4,0	4,0	4,0	4,0
11	0,7	0,7	0,7	0,7
12	0,0	0,0	0,0	0,0
13	4,0	4,0	4,0	4,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0
16	2,0	2,0	2,0	2,0
17	2,0	2,0	2,0	2,0
18	6,0	6,0	6,0	6,0
19	5,0	5,0	5,0	5,0
20	1,0	1,0	1,0	1,0

ANEXO 2

Tabelas com as variações dos parâmetros físicos utilizados para os 10 anos de simulação

Tabela 1 – Fração Máxima de Cobertura vegetal

Classe	Nome	FCV (%)
1	Predominância Agrícola	81,0
2	Gramíneas	53,0
3	Floresta de coníferas	84,0
4	Floresta de coníferas decidual	83,0
5	Floresta Estacional Decidual	78,0
6	Floresta Ombrófila Densa	95,0
7	Vegetação Herbácea	72,0
8	Deserto	-
9	Tundra	69,0
10	Agricultura irrigada	80,0
11	Semideserto	17,0
12	Gelo / Glaciar	-
13	Região Pantanosa / Alagada	73,0
14	Água interior	-
15	Oceano	-
16	Vegetação arbustiva perene	75,0
17	Vegetação arbustiva decidual	30,0
18	Mosaico de Floresta e pastagem	92,0
19	Mosaico de pastagem e floresta	81,0
20	Combinação de água e terra	80,0

Tabela 2 – Reflectância no visível e no infravermelho próximo e médio

Classe	Nome	RVIVPM
1	Predominância Agrícola	0,07 / 0,25
2	Gramíneas	0,8 / 0,30
3	Floresta de coníferas	0,05 / 0,19
4	Floresta de coníferas decidual	0,05 / 0,22
5	Floresta Estacional Decidual	0,06 / 0,24
6	Floresta Ombrófila Densa	0,05 / 0,25
7	Vegetação Herbácea	0,07 / 0,24
8	Deserto	0,22 / 0,38
9	Tundra	0,70 / 0,50
10	Agricultura irrigada	0,06 / 0,22
11	Semideserto	0,14 / 0,28
12	Gelo / Glaciar	0,92 / 0,61
13	Região Pantanosa / Alagada	0,05 / 0,22
14	Água interior	0,08 / 0,01
15	Oceano	0,07 / 0,01
16	Vegetação arbustiva perene	0,11 / 0,25
17	Vegetação arbustiva decidual	0,07 / 0,21
18	Mosaico de Floresta e pastagem	0,04 / 0,22
19	Mosaico de pastagem e floresta	0,05 / 0,24
20	Combinação de água e terra	0,05 / 0,24

Tabela 3 – Índice de área foliar mínimo e máximo

Classe	Nome	IAF máximo e mínimo novo
1	Predominância Agrícola	4 / 0,1
2	Gramíneas	2,0 / 0,5
3	Floresta de coníferas	6,5 / 4,5
4	Floresta de coníferas decidual	6,5 / 1,5
5	Floresta Estacional Decidual	6,5 / 3
6	Floresta Ombrófila Densa	7 / 6,5
7	Vegetação Herbácea	3 / 1
8	Deserto	0 / 0
9	Tundra	5 / 0,5
10	Agricultura irrigada	4 / 0,1
11	Semideserto	0,7 / 0,1
12	Gelo / Glaciar	0 / 0
13	Região Pantanosa / Alagada	4 / 3,5
14	Água interior	0 / 0
15	Oceano	0 / 0
16	Vegetação arbustiva perene	2 / 1
17	Vegetação arbustiva decidual	2 / 0,5
18	Mosaico de Floresta e pastagem	6 / 3
19	Mosaico de pastagem e floresta	5 / 3
20	Combinação de água e terra	0,5 / 3