

MARCOS PAULO SANTOS PEREIRA

**INTERAÇÃO ENTRE ECOSISTEMAS TERRESTRES E A ATMOSFERA NA
AMAZÔNIA: CONEXÕES BIOGEOFÍSICAS E BIOGEOQUÍMICAS**

**Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Meteorologia Agrícola,
para obtenção do título de “Magister
Scientiae”.**

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2006**

MARCOS PAULO SANTOS PEREIRA

**INTERAÇÃO ENTRE ECOSISTEMAS TERRESTRES E A ATMOSFERA NA
AMAZÔNIA: CONEXÕES BIOGEOFÍSICAS E BIOGEOQUÍMICAS**

**Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Meteorologia Agrícola,
para obtenção do título de “Magister
Scientiae”.**

APROVADA: 18 de maio de 2006

**Prof. Gilberto Chokaku Sediyaama
(Co-orientador)**

**Prof. Aristides Ribeiro
(Co-orientador)**

Dr^a. Francisca Zenaide de Lima

Prof^a. Alice Marlene Grimm

**Prof. Marcos Heil Costa
(Orientador)**

A Deus,
por sempre me dar força diante das dificuldades e por ter
conseguido dar mais um passo na caminhada da minha vida.

À minha família,
especialmente minha mainha querida, por tudo.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Neste trabalho não poderia deixar de expressar o meu sincero agradecimento às pessoas que cooperaram para a concretização desta pesquisa. Assim, as minhas palavras de gratidão vão para:

- a Deus que me deu o dom da vida e entre outras coisas a possibilidade de realizar meus objetivos.

- à minha família, em especial a minha mãe. Mesmo estando longe, vocês nunca deixaram de me incentivar e de acreditar em mim. Obrigado a todos vocês por tudo!

- à Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de participar de seu programa de pós-graduação e utilização de suas instalações.

- ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudo, e a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), pelo financiamento para a efetiva realização desta pesquisa.

- a meu orientador, Professor Marcos Heil Costa, pela oportunidade concedida, dedicação, disponibilidade, sugestões, ensinamentos, amizade e colaboração em todas as fases de desenvolvimento deste trabalho.

- à Francisca Lima e aos meus conselheiros professores Gilberto Chokaku Sedyama e Aristides Ribeiro pela atenção, contribuições e sugestões dadas no desenvolvimento deste trabalho.

- aos professores do curso de Meteorologia Agrícola, pelo conhecimento que me foram passados durante esses anos em que estivemos juntos.

- aos amigos de trabalho Clever, Cristiane, Edson, Gleidson, Hewlley, Kelly, Lucía, Márcia, Mônica, Silvia, Thomé e Varejão, pela amizade formada no grupo de pesquisa e esclarecimento de dúvidas ao longo deste trabalho, estão deixando saudades.

- a todos os meus amigos de Meteorologia Agrícola – UFV, em particular, Evaldo, Givanildo, Ranieri, Zé Luiz, Michelly, Rochane, Raquel e Murilo, Marcelo, Danilo, Hermani, Maria Emília, Wellian, Wesley, Vanda, Romeo, Rogério, Evandro, Leonardo, Thieres, Rosa, Ricardo, Rosandro, José de Paula, pela convivência e momentos de alegrias.

- às amizades feitas em Viçosa-MG que me deram apoio, ânimo e diálogos iuuu iuuu ao longo destes dois anos, em especial, Alessandra, Karine, Joselaine, Meirelaine, Wallisson, Fafá, Mario, Bigode, Delfran, Elder e Salomão.

- a todos os meus amigos meteorologistas: Alailson, Alexandre (Puffy), Ana, Carlos, Cléia, Daniel, Djane, Edivania, Fernando, Georgenes, Glauber, Gyrlene, Gustavo, Heliofabio, Helber, Isa, Joana, Joaquim, Juliana, Junior, Marcio, Monique, Manoel, Paulo, Rodrigo, Rosana, Rosiberto, Samuellson, Taciana e todos os meus professores de graduação.

-a todos que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

MARCOS PAULO SANTOS PEREIRA, filho de João José Pereira e Maria Terezinha dos Santos, nasceu em 16 de agosto de 1980, na cidade de Maceió – AL.

Em março de 2003 concluiu o curso de graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

Em março de 2004 iniciou o curso de pós-graduação, em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
RESUMO.....	xxi
ABSTRACT.....	xxiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METODOLOGIA.....	5
2.1 Descrição do modelo.....	5
2.2 Descrição do experimento.....	7
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
3.1 Validação da simulação de controle.....	11
3.2 Resumo do experimento.....	22
3.3 Efeito do desmatamento no clima regional.....	25
3.4 Efeito radiativo do aumento da concentração de CO ₂ no clima regional.....	44
3.5 Efeito ecológico do aumento da concentração de CO ₂ no clima regional.....	57
3.6 Efeito biogeoquímico do aumento da concentração de CO ₂ no clima regional, sob condições de floresta e desmatamento.....	70
4. CONCLUSÕES.....	97
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
Apêndice A.....	106
Apêndice B.....	111

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidades
B	Biomassa	kg C.m ⁻²
C	Carbono	-
c ₀	coeficientes de autoconversão da precipitação	m ⁻¹
E	Evapotranspiração	mm.dia ⁻¹
F _l	Fração da cobertura abaixo do dossel	-
F _u	Fração da cobertura acima do dossel	-
H	Fluxo de calor sensível	W.m ⁻²
IAF-t	Índice da área foliar na árvore	m ² .m ⁻²
IAF-b	Índice da área foliar na vegetação rasteira	m ² .m ⁻²
LE	Fluxo de calor latente	W.m ⁻²
NEE	Produção líquida do ecossistema	kg C.m ⁻²
NPP	Produção primária líquida	kg C.m ⁻²
P	Precipitação	mm.dia ⁻¹
R _{dossel}	Taxa de respiração nas folhas e caules	kg C.m ⁻²
R _{solo}	Taxa de respiração no solo	kg C.m ⁻²
R _{raiz}	Taxa de respiração nas raízes	kg C.m ⁻²
RN	Saldo de radiação	W.m ⁻²
ET	Escoamento Total	mm.dia ⁻¹
T	Temperatura	°C
δz	profundidade da atividade convectiva	m

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- BATS - *Biosphere Atmosphere Transfer Scheme*
- CAM3 - *NCAR Community Atmosphere Model*
- CCM3 - *NCAR Community Climate Model*
- CPTEC - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
- CRU - *Climate Research Unit*
- CSU - *Colorado State University General Circulation Model*
- D - Desmatamento parcial
- DRE - Desflorestamento parcial, mais os efeitos radiativos e ecológicos do CO₂
- DREB - Desflorestamento parcial, mais os efeitos radiativos e ecológicos do CO₂, considerando ainda a retroalimentação biogeoquímica da vegetação no ciclo do carbono
- ECMWF - *European Center for Medium-Range Weather Forecasts*
- F - Simulação de controle
- FR - Efeito radiativo do CO₂
- FRE - Efeitos radiativos e ecológicos do CO₂
- FREB - Efeitos radiativos e ecológicos do CO₂, considerando ainda a retroalimentação biogeoquímica da vegetação no ciclo do carbono
- IBIS - *Integrated Biosphere Simulator*
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- GENESIS - *Global Environmental and Ecological Simulation of Interactive Systems*
- GISS-ER - *NASA/Goddard Institute for Space Studies (USA)*

- LMD - *Laboratoire de Meteorologie Dynamique*
- MCGA - *Modelo de Circulação Geral da Atmosfera*
- NCAR - *National Center for Atmospheric Research*
- NMC - *National Meteorological Center*
- SECHIBA - *Schematisation des Echanges Hydriques a Interface entre le Biosphere et
Atmosphere*
- SSiB - *Simplified Simple Biosphere Model*
- SiB2 - *Simple Biosphere model*
- TRIFFID - *Top-down Representation of Interactive Foliage and Flora Including
Dynamics*
- TRMM - *Tropical Rainfall Measuring Mission*
- UKMO-
HadCM3 - *Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office (UK)*

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Resultados das médias anuais da precipitação (P) para a simulação de controle sobre a floresta Amazônica, em comparação com outros estudos.	16
Tabela 2 - Resultados das médias anuais da evapotranspiração (E) para a simulação de controle sobre a floresta Amazônica, em comparação com outros estudos.	18
Tabela 3 - Resultados das médias anuais do escoamento total (ET) para a simulação de controle sobre a floresta Amazônica, em comparação com outros estudos.	18
Tabela 4 - Resultados das médias anuais da Temperatura (T) para a simulação de controle sobre a floresta Amazônica, em comparação com outros estudos.	19
Tabela 5 - Resultados das médias anuais de fluxo de calor latente (LE) para a simulação de controle sobre a floresta Amazônica, em comparação com outros estudos.	19
Tabela 6 - Resultados das médias anuais do fluxo de calor sensível (H) para a simulação de controle sobre a floresta Amazônica, em comparação com outros estudos.	20
Tabela 7 - Resultados das médias anuais do saldo de radiação (RN) para a simulação de controle sobre a floresta Amazônica, em comparação com outros estudos.	20

Tabela 8 -	Resultados das médias anuais do índice da área foliar (IAF) para a simulação de controle sobre a floresta Amazônica, em comparação com outros estudos.	21
Tabela 9 -	Média anual das variáveis e de alguns parâmetros biogeofísicos, calculados sobre a bacia Amazônica (IAF-t e IAF-b, índice da área foliar nas árvores e na vegetação rasteira; NEE, produção líquida no ecossistema; B, biomassa total; NPP, produção primária líquida; F_u e F_l fração de cobertura da parte superior do dossel (árvores) e abaixo do dossel; R_{raiz} , R_{dossel} e R_{solo} respiração na raiz, respiração nas folhas e caule, e respiração no solo).	22
Tabela 10 -	Média anual das variáveis e de alguns parâmetros biogeofísicos, calculados sobre a região desmatada.	23
Tabela 11 -	Diferença da média anual das variáveis climáticas e de alguns parâmetros biogeofísicos referente ao experimento, calculados sobre a bacia Amazônica (BA) e na área parcialmente desmatada (AD).	24
Tabela 12 -	Comparação dos resultados de alguns experimentos de desmatamento utilizando MCGA (ΔP , precipitação; ΔE , evapotranspiração; ΔT , temperatura).	31

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Modelo climático NCAR CCM3 acoplado ao modelo de dinâmica de vegetação e ciclo do carbono IBIS. C , E , A e M representam os fluxos de carbono, energia, água e momentum, respectivamente.	7
Figura 2 - Mapas da cobertura da bacia Amazônica usada para as simulações (a) que tenham cobertura do solo original e (b) que envolvam mudança antropogênica na cobertura vegetal.	10
Figura 3 - Variação sazonal da precipitação (mm.dia^{-1}) sobre a bacia Amazônica da simulação de controle comparadas com dados observados (a) do CRU e (b) do Legates e Wilmott (1990).	15
Figura 4 - Média anual da precipitação (mm.dia^{-1}) para valores do (a) banco de dados do CRU, (b) valores da simulação de controle e (c) diferença entre os resultados (b-a).	17
Figura 5 - Média anual da precipitação (mm.dia^{-1}) para valores do (a) banco de dados do Legates e Wilmott (1990), (b) valores da simulação de controle e (c) diferença entre os resultados (b-a).	17
Figura 6 - Variação média trimestral do índice da área foliar na vegetação rasteira ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) para (a) valores da simulação (F) em Fevereiro-Março-Abril (FMA), (b) valores da simulação (D) em FMA, (c) diferença entre as simulações (D – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em Junho-Julho-Agosto (JJA), (e) valores da simulação (D) em JJA e (f) diferença entre as simulações (D – F) em (JJA). As regiões pontilhadas indicam	32

que os valores F e D são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

- Figura 7 - Como na Figura 6, mas para o índice da área foliar nas árvores ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) 33
- Figura 8 - Variação sazonal (a) do índice da área foliar nas árvores ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) na área parcialmente desmatada, (b) do índice da área foliar das árvores ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) na bacia amazônica, (c) do índice da área foliar na vegetação rasteira ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) na área parcialmente desmatada e (d) do índice da área foliar na vegetação rasteira ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) na bacia Amazônica. 34
- Figura 9 - Variação média trimestral de diferença entre as simulações (D – F) para o albedo (%) (a) FMA e (b) JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e D são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t. 35
- Figura 10 - Como na Figura 6, mas para o fluxo de calor latente ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 36
- Figura 11 - Como na Figura 6, mas para o fluxo de calor sensível ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 37
- Figura 12 - Variação sazonal do (a) fluxo do calor latente ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) na área parcialmente desmatada, (b) fluxo do calor latente ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) na bacia amazônica, (c) fluxo de calor sensível ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) na área parcialmente desmatada e (d) fluxo de calor sensível ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) na bacia Amazônica. 38
- Figura 13 - Como na Figura 6, mas para a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) 39
- Figura 14 - Variação sazonal da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (a) na área parcialmente desmatada e (b) na bacia amazônica. 39

Figura 15 -	Como na Figura 6, mas para a precipitação (mm.dia^{-1})	40
Figura 16 -	Como na Figura 6, mas para a evapotranspiração (mm.dia^{-1})	41
Figura 17 -	Variação sazonal da (a) evapotranspiração (mm.dia^{-1}) na área parcialmente desmatada, (b) evapotranspiração (mm.dia^{-1}) na bacia amazônica, (c) precipitação (mm.dia^{-1}) na área parcialmente desmatada e (d) precipitação (mm.dia^{-1}) na bacia Amazônica.	42
Figura 18 -	Como na Figura 6, mas para o escoamento total (mm.dia^{-1})	43
Figura 19 -	Variação sazonal do (a) escoamento total (mm.dia^{-1}) na área parcialmente desmatada, (b) escoamento total (mm.dia^{-1}) na bacia amazônica.	43
Figura 20 -	Variação média trimestral da precipitação (mm.dia^{-1}) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (FR) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FR – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (FR) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FR – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e FR são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.	48
Figura 21 -	Como na Figura 20, mas para a evapotranspiração (mm.dia^{-1})	49
Figura 22 -	Como na Figura 20, mas para o fluxo do calor latente (W.m^{-2})	50
Figura 23 -	Como na Figura 20, mas para o fluxo do calor sensível (W.m^{-2})	51
Figura 24 -	Como na Figura 20, mas para a temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	52

Figura 25 -	Como na Figura 20, mas para o escoamento total (mm.dia^{-1})	53
Figura 26 -	Variação sazonal do (a) fluxo do calor latente (W.m^{-2}), (b) fluxo de calor sensível (W.m^{-2}), (c) precipitação (mm.dia^{-1}) e (d) temperatura ($^{\circ}\text{C}$) na bacia Amazônica.	54
Figura 27 -	Variação sazonal da (a) evapotranspiração (mm.dia^{-1}), (b) escoamento total (mm.dia^{-1}) na bacia amazônica.	54
Figura 28 -	Como na Figura 20, mas para o índice da área foliar das árvores ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$)	55
Figura 29 -	Como na Figura 20, mas para o índice da área foliar da vegetação rasteira ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$)	55
Figura 30 -	Variação sazonal do (a) índice da área foliar das árvores ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$), (b) índice da área foliar da vegetação rasteira ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) na bacia amazônica.	56
Figura 31 -	Variação média trimestral da precipitação (mm.dia^{-1}) para (a) valores da simulação (FR) em FMA, (b) valores da simulação (FRE) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FRE – FR) em FMA, (d) valores da simulação (FR) em JJA, (e) valores da simulação (FRE) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FRE – FR) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FR e FRE são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.	61
Figura 32 -	Como na Figura 31, mas para o fluxo de calor latente (W.m^{-2})	62
Figura 33 -	Como na Figura 31, mas para o fluxo de calor sensível (W.m^{-2})	63
Figura 34 -	Como na Figura 31, mas para a temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	64

Figura 35 -	Variação sazonal do (a) fluxo do calor latente ($W.m^{-2}$), (b) fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$), (c) precipitação ($mm.dia^{-1}$) e (d) temperatura ($^{\circ}C$) na bacia Amazônica.	65
Figura 36 -	Como na Figura 31, mas para a evapotranspiração ($mm.dia^{-1}$)	66
Figura 37 -	Como na Figura 31, mas para o escoamento total ($mm.dia^{-1}$)	67
Figura 38 -	Variação sazonal da (a) evapotranspiração ($mm.dia^{-1}$), (b) escoamento total ($mm.dia^{-1}$) na bacia amazônica.	67
Figura 39 -	Como na Figura 31, mas para o índice da área foliar das árvores ($m^2.m^{-2}$)	68
Figura 40 -	Como na Figura 31, mas para o índice da área foliar da vegetação rasteira ($m^2.m^{-2}$)	69
Figura 41 -	Variação sazonal do (a) índice da área foliar da vegetação rasteira ($m^2.m^{-2}$) e (b) índice da área foliar das árvores ($m^2.m^{-2}$), na bacia amazônica.	69
Figura 42 -	Variação média trimestral da precipitação ($mm.dia^{-1}$) sob condições de floresta para (a) valores da simulação (FRE) em FMA, (b) valores da simulação (FREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em FMA, (d) valores da simulação (FRE) em JJA, (e) valores da simulação (FREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FRE e FREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.	75

Figura 43 -	Varição média trimestral da precipitação (mm.dia^{-1}) sob condições de desmatamento parcial para (a) valores da simulação (DRE) em FMA, (b) valores da simulação (DREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em FMA, (d) valores da simulação (DRE) em JJA, (e) valores da simulação (DREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores DRE e DREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.	76
Figura 44 -	Como na Figura 42, mas para o fluxo de calor latente (W.m^{-2})	77
Figura 45 -	Como na Figura 43, mas para o fluxo de calor latente (W.m^{-2})	78
Figura 46 -	Como na Figura 42, mas para o fluxo de calor sensível (W.m^{-2})	79
Figura 47 -	Como na Figura 43, mas para o fluxo de calor sensível (W.m^{-2})	80
Figura 48 -	Como na Figura 42, mas para a temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	81
Figura 49 -	Como na Figura 43, mas para a temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	82
Figura 50 -	Varição sazonal do (a) fluxo do calor latente (W.m^{-2}), (b) fluxo de calor sensível (W.m^{-2}), (c) precipitação (mm.dia^{-1}) e (d) temperatura ($^{\circ}\text{C}$) sob condições de floresta na bacia Amazônica.	83
Figura 51 -	Varição sazonal do (a) fluxo do calor latente (W.m^{-2}) na área parcialmente desmatada, (b) fluxo do calor latente (W.m^{-2}) na bacia Amazônica, (c) fluxo de calor sensível (W.m^{-2}) na área parcialmente desmatada, (d) fluxo de calor sensível (W.m^{-2}) na bacia Amazônica, sob condições de desmatamento parcial.	84

Figura 52 -	Varição sazonal do (a) temperatura (°c) na área parcialmente desmatada, (b) temperatura (°C) na bacia Amazônica, (c) precipitação (mm.dia ⁻¹) na área parcialmente desmatada, (d) precipitação (mm.dia ⁻¹) na bacia Amazônica, sob condições de desmatamento parcial.	85
Figura 53 -	Como na Figura 42, mas para a evapotranspiração (mm.dia ⁻¹)	86
Figura 54 -	Como na Figura 43, mas para a evapotranspiração (mm.dia ⁻¹)	87
Figura 55 -	Como na Figura 42, mas para o escoamento total (mm.dia ⁻¹)	88
Figura 56 -	Como na Figura 43, mas para o escoamento total (mm.dia ⁻¹)	89
Figura 57 -	Varição sazonal do (a) evapotranspiração (mm.dia ⁻¹), (b) escoamento total (mm.dia ⁻¹) sob condições de floresta na bacia Amazônica.	90
Figura 58 -	Varição sazonal do (a) evapotranspiração (mm.dia ⁻¹) na área parcialmente desmatada, (b) evapotranspiração (mm.dia ⁻¹) na bacia Amazônica, (c) escoamento total (mm.dia ⁻¹) na área parcialmente desmatada, (d) escoamento total (mm.dia ⁻¹) na bacia Amazônica, sob condições de desmatamento parcial.	90
Figura 59 -	Como na Figura 42, mas para o índice da área foliar na vegetação rasteira (m ² .m ⁻²).	91
Figura 60 -	Como na Figura 43, mas para o índice da área foliar na vegetação rasteira (m ² .m ⁻²).	92
Figura 61 -	Como na Figura 42, mas para o índice da área foliar nas árvores (m ² .m ⁻²).	93

- Figura 62 - Como na Figura 43, mas para o índice da área foliar nas árvores ($m^2.m^{-2}$). 94
- Figura 63 - Variação sazonal do (a) índice da área foliar na vegetação rasteira ($m^2.m^{-2}$), (b) tendência do índice da área foliar na vegetação rasteira ($m^2.m^{-2}$), (c) índice da área foliar nas árvores ($m^2.m^{-2}$), (d) tendência índice da área foliar nas árvores ($m^2.m^{-2}$) sob condições de floresta na bacia Amazônica. 95
- Figura 64 - Variação sazonal do (a) índice da área foliar na vegetação rasteira ($m^2.m^{-2}$) na área parcialmente desmatada, (b) índice da área foliar na vegetação rasteira ($m^2.m^{-2}$) na bacia amazônica, (c) tendência do índice da área foliar na vegetação rasteira ($m^2.m^{-2}$) na bacia Amazônica, (d) índice da área foliar nas árvores ($m^2.m^{-2}$) na área parcialmente desmatada, (e) índice da área foliar nas árvores ($m^2.m^{-2}$) na bacia Amazônica (f) tendência índice da área foliar nas árvores ($m^2.m^{-2}$) sob condições de desmatamento parcial. 96
- Figura 65 - Média anual da precipitação ($mm.dia^{-1}$) para diferença entre os valores o banco de dados do CRU e os valores das simulações do CCM3: (a) com $c_0 = 4.10^{-4}$, (b) $c_0 = 2. 10^{-4}$, (c) $c_0 = 0,5. 10^{-4}$, (d) $c_0 = 0,25. 10^{-4}$. 107
- Figura 66 Variação sazonal da precipitação ($mm.dia^{-1}$) obtidas do banco de dados do CRU e dos valores das simulações do CCM3 (F): (a) com $c_0 = 4.10^{-4}$, (b) $c_0 = 2. 10^{-4}$, (c) $c_0 = 0,5. 10^{-4}$, (d) $c_0 = 0,25. 10^{-4}$. 108
- Figura 67 Média anual da precipitação ($mm.dia^{-1}$) para diferença entre os valores o banco de dados do CRU e os valores das simulações do CCM3: (a) com $\delta z = 0$ (b) $\delta z = 0,5$ (c) $\delta z = 2,0$ e (d) $= 5,0$. 109

Figura 68 Variação sazonal da precipitação (mm.dia^{-1}) obtidas do banco 110
de dados do CRU e dos valores das simulações do CCM3 (F):
(a) com $\delta z = 0$ (b) $\delta z = 0,5$ (c) $\delta z = 2,0$ e (d) $= 5,0$.

RESUMO

PEREIRA, Marcos Paulo Santos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2006.
Interação entre ecossistemas terrestres e a atmosfera na Amazônia: conexões biogeofísicas e biogeoquímicas. Orientador: Marcos Heil Costa. Co-orientadores: Aristides Ribeiro e Gilberto Chokaku Sediya.

A Amazônia é considerada por muitos uma das mais importantes regiões do planeta, abrangendo extensas áreas de floresta tropical. Entretanto, essa floresta vem sendo modificada dramaticamente, pelo desmatamento e pelas modificações na concentração de CO₂ que também podem alterar a estrutura da floresta. Este trabalho visa entender melhor a interação biosfera-atmosfera na Amazônia, incluindo tanto os efeitos biogeofísicos quanto os biogeoquímicos desta interação. Para esta finalidade, utilizou-se um modelo de circulação geral da atmosfera CCM3 acoplado ao modelo de superfície IBIS. Foram realizadas sete simulações, isto é, simulação de controle (F), desmatamento parcial (D), efeitos radiativos do CO₂ (FR), efeitos radiativos e ecológicos do CO₂ (FRE), efeitos radiativos e ecológicos do CO₂ considerando a retroalimentação biogeoquímica da vegetação no ciclo do carbono (FREB), desmatamento parcial com os efeitos radiativos e ecológicos do CO₂ (DRE), e desmatamento parcial com os efeitos radiativos e ecológicos do CO₂ considerando a retroalimentação biogeoquímica da vegetação no ciclo do carbono (DREB). Nessas simulações, o efeito do desmatamento modificou o balanço de energia e de água, com mudanças mais significativas na estação seca, mostrando um acréscimo do albedo na área parcialmente desmatada, levando a uma diminuição na evapotranspiração e na precipitação. O efeito radiativo do aumento

na concentração do CO₂ disponibilizou mais energia na superfície aumentando o fluxo de calor sensível, a temperatura, e afetando a precipitação, mas não ocasionou mudanças na média anual da evapotranspiração. Já o efeito ecológico do aumento da concentração do CO₂ alterou a estrutura da floresta Amazônica, aumentando o IAF e a biomassa da bacia Amazônica em 0,61 kg C.m⁻². Houve reduções nas taxas de precipitação, evapotranspiração e nos fluxos de calor latente e sensível. Ao ser considerado o efeito biogeoquímico do crescimento da vegetação, sob condições de floresta total e desmatamento parcial, percebe-se reduções na concentração atmosférica de CO₂, pequenas mudanças no clima, mostrando uma diminuição do saldo de radiação, e na temperatura, causando um aumento na precipitação sob condições de floresta e reduzindo com o desmatamento sobre a bacia Amazônica.

ABSTRACT

PEREIRA, Marcos Paulo Santos, M.S., Universidade Federal Viçosa, May 2006.
Interaction between terrestrial ecosystems and the atmosphere in Amazonia: biogeophysical and biogeochemical connections. Adviser: Marcos Heil Costa.
Co-Advisers: Aristides Ribeiro and Gilberto Chokaku Sedyama.

The Amazon is considered by many one of the most important areas of the planet, including extensive areas of tropical forest. However, the forest has been dramatically modified by the deforestation changes in the CO₂ concentration might also affect the forest structure. This work aims at better understand the biosphere-atmosphere interaction in the Amazonian, including both the biogeophysical and the biogeochemical effects of this interaction. For this purpose, an atmosphere general circulation model (CCM3), coupled to the surface model (IBIS), was used. Seven simulations were run: control simulation (F), partial deforestation (D), radiative effects of CO₂ (FR), radiative and ecological effects of CO₂ (FRE), radiative and ecological effects of CO₂ considering the feedback biogeochemical of the vegetation in the carbon cycle (FREB), partial deforestation with the radiative and ecological effects of CO₂ (DRE), and partial deforestation with the radiative and ecological effects of CO₂ considering the biogeochemical feedback of the vegetation in the carbon cycle (DREB). In these simulations, the effect of the deforestation modify the exchange of energy and water, with more significant changes in the dry season, showing an increase in the albedo in the deforested area, causing a decrease in the evapotranspiration and in the precipitation. The radiative effect of the increase in the CO₂ concentration increased the

availability of energy at the surface, increasing the sensible heat flux, temperature, and affecting the precipitation, but does not cause changes in the annual mean evapotranspiration. The increase of CO₂ concentration alter the structure of the Amazonian forest, increasing LAI and the biomass of the Amazonian basin by 0.61 kg C.m⁻², causing a decrease in the precipitation, evapotranspiration and in the latent and sensible heat fluxes. The biogeochemical effect of the vegetation growth, under conditions of total forest and partial deforestation, is noticed in a decrease in the atmospheric CO₂ concentration, small changes in climate, showing a decrease in the radiation balance and temperature.

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia é considerada por muitos uma das mais importantes regiões do planeta contendo uma das maiores áreas de floresta tropical. Essas florestas representam aproximadamente 10% da produção primária líquida da biomassa terrestre, e têm um papel fundamental na regulação do ciclo do carbono e do clima terrestre (Cox et al. 2000), além de ser habitat para incontáveis plantas e animais. O sistema hidrológico da Amazônia é um importante componente do ciclo hidrológico terrestre. Para se ter uma idéia de magnitude deste sistema, o rio Amazonas, considerando apenas a sua vazão, despeja aproximadamente 20% de toda a água doce nos oceanos do planeta, carregando mais água do que os outros nove maiores rios do planeta combinados. A região Amazônica tem também um importante papel na circulação geral da atmosfera. Sendo um dos três principais centros de convecção dos trópicos, ela é um dos responsáveis pelas circulações

de Hadley e Walker. Grandes mudanças na cobertura do solo, com subsequentes reduções na energia absorvida pela superfície, podem reduzir a intensidade da convecção atmosférica sobre a Amazônia, modificando o clima regional e global (Nobre et al. 1991; Costa e Foley 2000).

A Amazônia está sendo modificada dramaticamente. Nas últimas décadas, correntes migratórias e pressões por desenvolvimento levaram a importantes mudanças na cobertura do solo da região (Skole e Tucker 1993; Fearnside 1993; Nepstad et al. 1999; INPE 1999). Recente relatório do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2004) previu que de 1980 a 2020 a população dos estados da Amazônia legal (AC, AM, AP, MT, PA, RO, RR e TO) aumentará de 7,7 milhões para 22,6 milhões de habitantes, o que corresponde um aumento de 194%.

Segundo estimativa do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o desmatamento na floresta amazônica legal, no período de agosto de 1977 a agosto de 2005, foi de aproximadamente de 560 000 km², com uma margem de erro de 4%. Além disso, observou-se que a floresta Amazônica já foi desmatada em cerca de 15%. Para os próximos anos e décadas, as taxas de desmatamento provavelmente aumentarão, à medida que mais estradas sejam construídas ao longo da floresta, e os mercados continuem a demandar produtos agrícolas e florestais (Laurance et al. 2001).

Considerando a importância das mudanças das condições ambientais na Amazônia, atenção crescente tem sido dedicada aos sistemas ecológico, hidrológico e climático da região, visando o entendimento do funcionamento da Amazônia como uma entidade regional integrada, incluindo as interações entre os ecossistemas terrestres, o sistema hidrológico e a atmosfera. Dentro deste contexto, existe uma necessidade particular de melhorar nosso entendimento sobre os processos biogeoquímicos, hidrológicos e climáticos que ocorrem na escala regional, e como essas interações são afetadas por

atividades humanas ou pelas mudanças climáticas globais. Apesar de diversos estudos terem considerado os efeitos do desmatamento na circulação geral da atmosfera (p. ex. Nobre et al. 1991; Costa e Foley 2000), e pelo menos um estudo abordou, de maneira exploratória, o papel da Amazônia no ciclo do carbono global (Cox et al. 2000), ainda existem muitas questões em aberto relacionadas ao papel completo da Amazônia no sistema climático.

Ao examinar as conexões entre o clima e os ecossistemas, deve-se considerar tanto as rápidas interações biogeofísicas entre a superfície terrestre e a atmosfera (trocas de energia, água, carbono e momentum), quanto as retroalimentações de longo-prazo entre os ecossistemas e o clima (por exemplo, mudanças na cobertura vegetal e nos estoques de carbono e seus efeitos nos processos superficiais e no balanço de carbono). Pode-se então considerar as retroalimentações biogeofísicas de mudanças na cobertura do solo, dos efeitos radiativos do CO₂, além de seus efeitos ecológicos, incluindo os efeitos fisiológicos (mudanças na eficiência fotossintética e na condutância estomática) e estruturais (mudanças na estrutura da vegetação, como o índice de área foliar e a biomassa da vegetação) no clima regional e global, ao mesmo tempo em que se consideram as retroalimentações biogeoquímicas do ciclo do carbono terrestre nas concentrações atmosféricas de CO₂ e no sistema global terrestre.

Este trabalho visa entender melhor a interação biosfera-atmosfera na Amazônia, incluindo tanto os efeitos biogeofísicos quanto os efeitos biogeoquímicos desta interação. Para tanto será realizado um experimento climático utilizando nas simulações o acoplamento de um modelo climático global (CCM3) e um modelo de superfície (IBIS), com os seguintes objetivos:

- determinar os efeitos que o desmatamento da Amazônia tem no clima regional;

- determinar o efeito radiativo que o aumento da concentração atmosférica de CO₂ tem no clima regional;
- determinar o efeito ecológico que o aumento da concentração atmosférica de CO₂ tem no clima regional;
- determinar o efeito biogeoquímico que o aumento da concentração atmosférica do CO₂ tem no clima regional, sob condições de floresta e de desmatamento.

2. METODOLOGIA

2.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

Este estudo utilizou o modelo climático global CCM3 (Kiehl et al. 1996) acoplado ao modelo integrado de dinâmica da biosfera IBIS (Foley et al. 1996). O modelo acoplado CCM3-IBIS (Figura 1) simula tanto as rápidas interações biogeofísicas entre a superfície da terra e a atmosfera (i.e., trocas de energia, carbono, água e momentum), quanto as retroalimentações de longo prazo entre a vegetação e o clima (i.e., mudanças na cobertura vegetal e nos reservatórios de carbono na vegetação e no solo, e seus efeitos nos processos superficiais e no balanço de carbono). Além disso, o modelo simula também o fluxo e estoques de carbono e as interações bi-direcionais entre os ecossistemas e clima, e os seus efeitos nas trocas de energia, água, carbono e momentum entre a cobertura vegetal e a

atmosfera. Finalmente, o modelo simula os efeitos que as mudanças no balanço de carbono terrestre têm na concentração de CO₂ atmosférica e no clima.

O CCM3 representa a terceira versão do modelo de circulação geral da atmosfera do National Center for Atmospheric Research (NCAR) que por sua vez foi derivado do modelo espectral australiano (Bourke et al. 1997; McAvaney et al. 1978) e do ECMWF (Baede et al. 1979). A sua versão original vem dos modelos CCM0A (Washington 1982) e do CCM0B (Williamson et al. 1983) apresentando mudanças na maioria dos parâmetros dinâmicos e físicos. As propriedades dinâmicas são expressas em termos de vorticidade, divergência, temperatura, umidade específica e logaritmo de pressão da superfície. Nesta versão a concentração do dióxido de carbono está em 355 ppm para o controle e foram incorporados gases traços de radiação de onda longa (CH₄, N₂O, CFC11, CFC12) e aerossóis no modelo. A parametrização convectiva do CCM3 está baseada em equações simplificadas de energia estática úmida que inclui o fluxo de massa convectivo, um “parâmetro de penetração” beta (varia de 0 a 1) que regula a saída de água líquida, e temperatura e perturbação de umidade fornecida pela parametrização da camada limite planetária. A formação de nuvens é determinada pela umidade relativa, velocidade vertical, estabilidade atmosférica, e a taxa de precipitação convectiva (Kiehl et al. 1996).

Utilizamos uma versão atualizada do IBIS de Foley et al. (1996) e Kucharik et al. (2000), que basear-se nos processos físicos de interação entre a superfície terrestre e atmosfera, incorporando efeitos fisiológicos do dossel (fotossíntese, condutância estomática e respiração), fenologia (aparecimento e crescimento das folhas), dinâmica e competição da vegetação (índice da área foliar e biomassa para 12 tipos funcionais de plantas), e o ciclo do carbono e nutrientes terrestre (produtividade primária líquida, respiração do solo e decomposição). Para uma descrição completa do modelo, e validação do ciclo do carbono global, ver Delire et al. (2003).

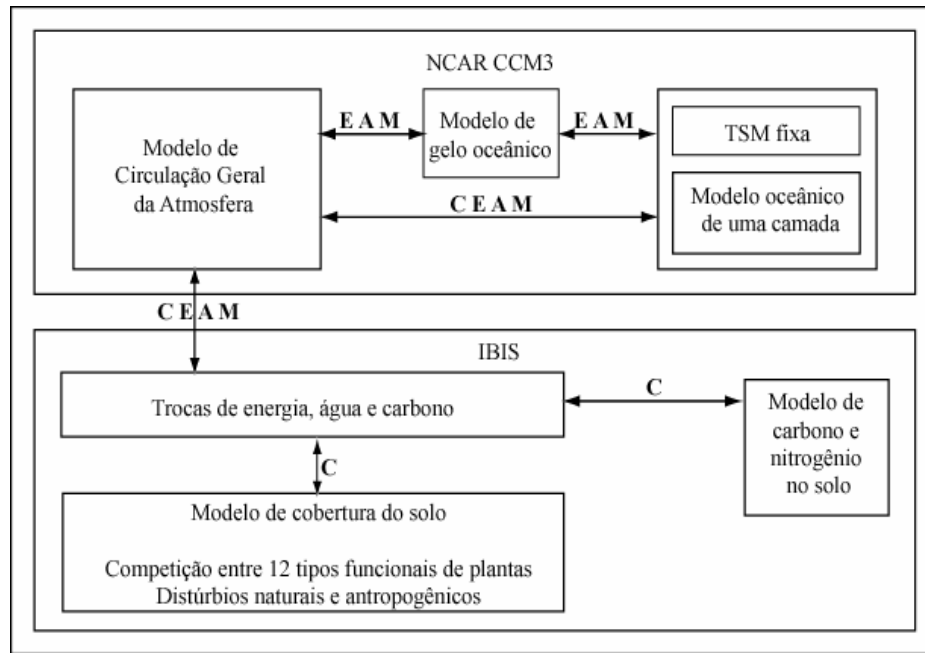


Figura 1: Modelo climático NCAR CCM3 acoplado ao modelo de dinâmica de vegetação e ciclo do carbono IBIS. C, E, A e M representam os fluxos de carbono, energia, água e momentum, respectivamente.

2.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Um experimento climático foi concebido para elucidar, de maneira individual e combinada, as conexões biogeofísicas e biogeoquímicas entre a atmosfera e a biosfera na Amazônia. Todas as simulações foram executadas por um período de 15 anos, partindo das mesmas condições iniciais. O experimento foi executado à resolução horizontal T42 (2.81° x 2.81°) e um intervalo de integração de 20 minutos, suficiente para análises climáticas. A mesma configuração foi usada por Bonan et al. (2002), que estudaram a climatologia da superfície da Terra utilizando três modelos de superfície acoplados ao CCM3.

Foi calculada a média dos últimos 12 anos para analisar os resultados das simulações, sendo que os três primeiros anos são desprezados para o modelo se aproximar do estado de equilíbrio.

Foram realizadas as seguintes simulações:

(a) F – simulação de controle: Solo coberto por florestas, concentração atmosférica de CO₂ igual à do período 1980-2000, ou seja, 355 ppm.

(b) D – desmatamento parcial: Cenário de cobertura do solo esperado para 2020-2030, e concentração atmosférica de CO₂ igual à do período 1980-2000.

(c) FR – efeitos radiativos do CO₂: Semelhante ao experimento F, mas com a concentração atmosférica de CO₂ elevada aos níveis esperados para o período 2020-2030, ou seja, 420 ppm. Apenas o efeito radiativo do CO₂ é considerado.

(d) FRE – efeitos radiativos e ecológicos do CO₂: Semelhante ao experimento FR mas, além do efeito radiativo do CO₂, considera também os efeitos do CO₂ na fisiologia vegetal e na estrutura do ecossistema. A concentração atmosférica de CO₂ é prescrita e não sofre influência da dinâmica dos ecossistemas.

(e) FREB – efeitos radiativos e ecológicos do CO₂, considerando ainda a retroalimentação biogeoquímica da vegetação no ciclo do carbono: Semelhante ao experimento FRE, mas a concentração atmosférica de CO₂ é igual à simulação FRE mais a emissão líquida de CO₂ pela Amazônia menos a parte dessa emissão líquida absorvida pelos oceanos.

(f) DRE – desmatamento parcial, mais os efeitos radiativos e ecológicos do CO₂: Semelhante ao experimento D, mas com a concentração de CO₂ elevada aos níveis esperados para o período 2020-2030, ou seja, 420 ppm. Considera os efeitos do CO₂ no balanço de radiação atmosférica, na fisiologia das plantas, e na estrutura das plantas. A concentração atmosférica de CO₂ é prescrita e não sofre influência da dinâmica dos ecossistemas.

(g) DREB – desmatamento parcial, mais os efeitos radiativos e ecológicos do CO₂, considerando ainda a retroalimentação biogeoquímica da vegetação no ciclo do carbono: Semelhante ao experimento DRE, mas a concentração atmosférica de CO₂ é igual à simulação DRE, mais a emissão líquida de CO₂ pela Amazônia menos a parte dessa emissão líquida absorvida pelos oceanos.

Para a simulação de controle e para a família de experimentos que tenham cobertura do solo original, a cobertura vegetal foi definida de acordo com a vegetação de equilíbrio do IBIS com o clima (Figura 2-a). O uso da cobertura vegetal em equilíbrio com o clima é importante para a obtenção de uma estrutura da vegetação adequada. Para a família de simulações que envolvam mudança antropogênica na cobertura vegetal (D), a cobertura inicial do solo foi prescrita de acordo com o esperado para o período 2020-2030 (Figura 2-b) (cenário de Laurence et al. 2001). Este cenário apresenta um desmatamento parcial de 44% das células marcadas na Figura 2-b, totalizando uma área de 940.000 km² estimados para o período 2020-2030.

As análises das diferenças entre as simulações D e F, FR e F, e FRE e FR avaliam, respectivamente, diferentes aspectos biogeofísicos da interação atmosfera-biosfera: efeito do desmatamento, efeito radiativo do aumento da concentração de CO₂, e efeito ecológico do aumento da concentração de CO₂ (que na verdade se manifesta através de um diferente índice da área foliar, um diferente balanço de radiação, e um diferente particionamento do balanço de radiação entre o fluxo de calor sensível e o fluxo do calor latente). Apesar destes efeitos já terem sido discutidos por diversos autores, em especial por Costa e Foley (2000), acredita-se que é importante repetir algumas dessas simulações dentro do contexto deste novo experimento, devido a diversas mudanças nos modelos, incluindo uma nova calibração, e a algumas modificações nas condições de contorno. Por outro lado, as análises de FREB-FRE e DREB-DRE, ainda inéditas, permitem determinar os aspectos

biogeoquímicos da interação atmosfera-biosfera, sob condições de floresta total e desmatamento parcial.

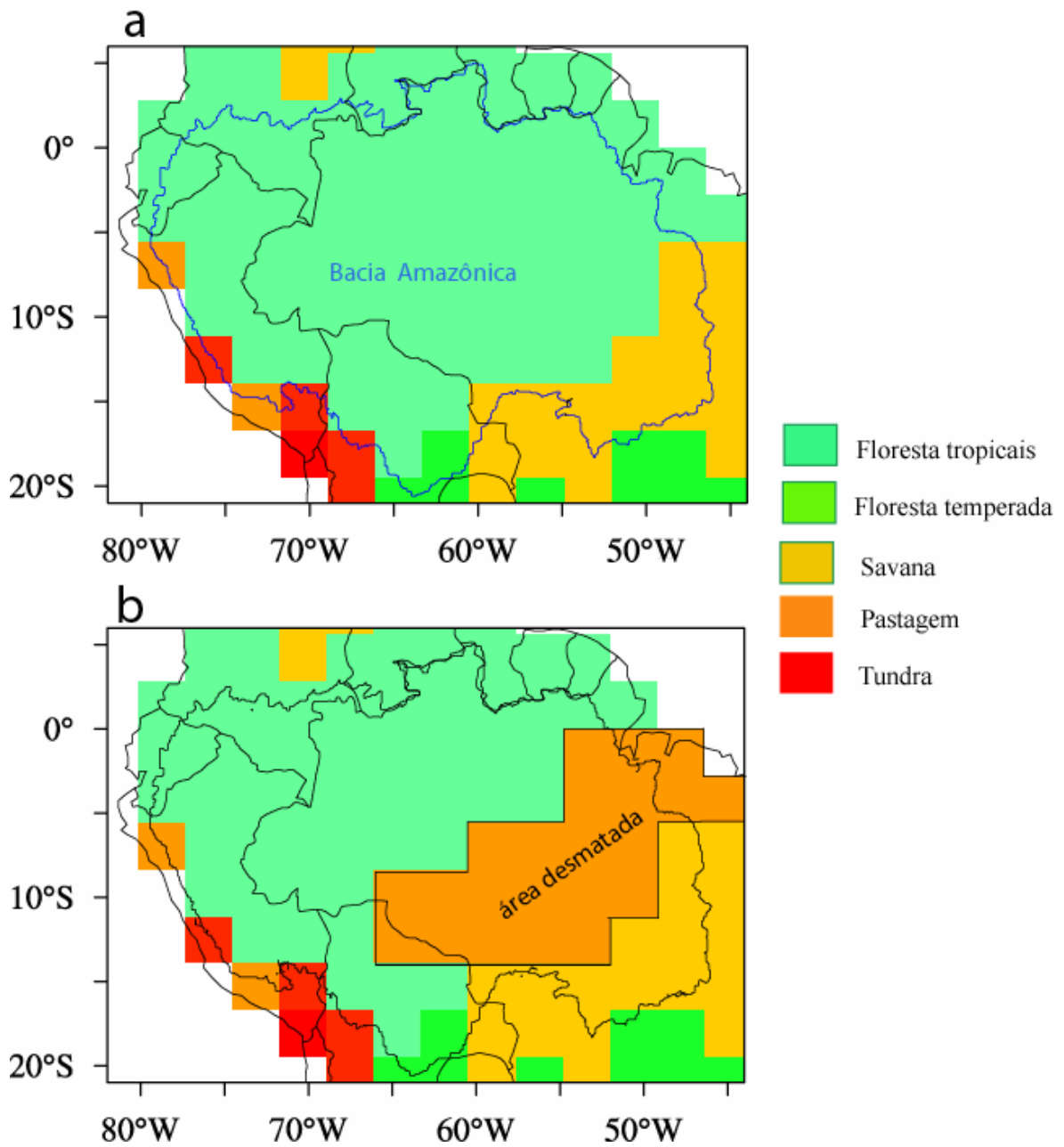


Figura 2: Mapas da cobertura da bacia Amazônica usada para as simulações (a) que tenham cobertura do solo original e (b) que envolvam mudança antropogênica na cobertura vegetal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE CONTROLE (F)

Nesta seção, apresentam-se os resultados da simulação de controle utilizando a distribuição de tipos de vegetação e os respectivos parâmetros biogeofísicos, montada a partir de recentes estudos sobre a região amazônica. Os resultados de precipitação desta simulação são comparados com o banco de dados climáticos obtidos do Climate Research Unit (CRU) da Universidade de East Anglia (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>) e com o banco de dados de precipitação de Legates e Wilmott (1990).

Os dados observados de precipitação à superfície do CRU são médias mensais climáticas de 30 anos (1961-1990), em ponto de grade, a partir de 19800 estações de precipitação para todo o globo terrestre (exceto para Antártida). Esses dados foram interpolados para resolução de 0,5 graus, utilizando o método “*Thin-plan spline*” que

considera funções polinomiais e utiliza dados pontuais para ajustar uma superfície, dado um conjunto de pontos. A superfície gerada por esta interpolação é função da latitude, longitude e elevação (New et al. 1999).

Legates e Wilmott (1990) criaram um banco de dados climático global da precipitação terrestre de médias mensais, a partir de 24.635 registros de estações terrestres e 2.223 registros de ponto de grade oceânica. Os dados foram corrigidos e interpolados numa grade de 0,5 graus de latitude-longitude.

Antes de se iniciar a simulação de controle foi realizada uma análise de sensibilidade da precipitação simulada pelo CCM3 a diversos parâmetros do modelo (Apêndice A).

A variação sazonal da simulação de controle para a estimativa da precipitação é apresentada na Figura 3. Nesta figura, pode-se observar que a curva de precipitação simulada pelo modelo apresenta comportamento semelhante quando comparada com as curvas dos dados observados do CRU e Legates e Wilmott (1990). A Tabela 1 mostra que a média anual da precipitação na bacia Amazônica superestima em $0,4 \text{ mm.dia}^{-1}$ (6,8%) a média dos dados observados do CRU, e em $0,24 \text{ mm.dia}^{-1}$ (4%) a média de Legates e Wilmott (1990). O modelo subestima o observado de abril a agosto, e superestima nos demais meses. Os meses de Fevereiro, Março e Abril (FMA) são escolhidos como representativos dos meses mais chuvosos do ano, e os meses de Junho, Julho e Agosto (JJA) dos meses mais secos.

Nas Figuras 4 e 5 observam-se anomalias positivas mais intensas na precipitação sobre o noroeste da bacia Amazônica, região onde predomina o efeito da ascensão orográfica da umidade transportada pelos ventos alísios de leste da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Li et al. (2006) apresentaram resultados de comparações de precipitação sobre Amazônia para 11 modelos climáticos, observando que as médias

anuais da precipitação de alguns modelos superestimavam em aproximadamente $1,0 \text{ mm.dia}^{-1}$ em relação aos dados observados.

As Tabelas 1 a 7 apresentam um resumo comparativo entre os resultados deste estudo e de outros publicados para médias anuais do clima, para simulações de controle sobre a bacia Amazônica.

A média anual da evapotranspiração obtida com a nossa simulação de controle e os resultados de outros trabalhos publicados são expostos na Tabela 2. Aqui podemos observar que a evapotranspiração deste trabalho superestima em até $0,41 \text{ mm.dia}^{-1}$ a média dos dados medidos em campo ($3,44 \text{ mm.dia}^{-1}$) sobre a bacia Amazônica.

Neste trabalho a média anual do escoamento total é de $2,48 \text{ mm.dia}^{-1}$ (Tabela 3), estando, portanto, enquadrado na faixa de outros resultados obtidos com modelos numéricos que variam de $1,17$ a $3,30 \text{ mm.dia}^{-1}$ estimados para o rio Amazonas.

Os resultados da média anual da temperatura compilados em outros estudos mostram diferenças que variam de $-1,5$ a $+1,5^\circ\text{C}$ em relação à temperatura simulada neste estudo. Quando esta temperatura ($25,1^\circ\text{C}$) é comparada com a média dos dados coletados em estação meteorológica sobre a bacia Amazônica, mostra-se subestimada em até $0,5^\circ\text{C}$ (Tabela 4).

A simulação de controle deste estudo apresenta uma média anual do fluxo de calor latente de $111,5 \text{ W.m}^{-2}$. Comparando esse valor com os dados observados sobre a Amazônia, que variam de $71,3$ a $115,0 \text{ W.m}^{-2}$, verifica-se que esta simulação está dentro da faixa de valores observadas. Já os resultados obtidos por modelagem são subestimados em até $4,5 \text{ W.m}^{-2}$, em relação a simulação de controle deste estudo sobre a bacia Amazônica (Tabela 5).

É apresentada na Tabela 6 a média anual do fluxo de calor sensível deste estudo, $39,0 \text{ W.m}^{-2}$, que superestima em $15,3 \text{ W.m}^{-2}$ a média dos dados observados da floresta tropical da Amazônia e subestima em $7,1 \text{ W.m}^{-2}$ a média de outros estudos de modelagem.

Os dados observados da média anual do saldo de radiação, apresentados na Tabela 7, mostram uma variação entre $127,3$ a $145,0 \text{ W.m}^{-2}$. Neste trabalho, o saldo de radiação simulado ($150,5 \text{ W.m}^{-2}$) superestima em $12,2 \text{ W.m}^{-2}$ a média dos dados observados sobre a bacia a Amazônia. Já os valores de outros experimentos numérico que variam de 147 a 172 W.m^{-2} , apresentam uma diferença na média de $+10,8 \text{ W.m}^{-2}$ quando comparado com o resultado deste experimento.

O índice da área foliar (IAF) calculado pelo modelo foi usado para descrever a fenologia da vegetação, que é a relação existente entre a área foliar e a área do solo. Neste trabalho, o IAF da floresta, que foi de $5,9$ está de acordo com valores propostos em outros estudos (Tabela 8).

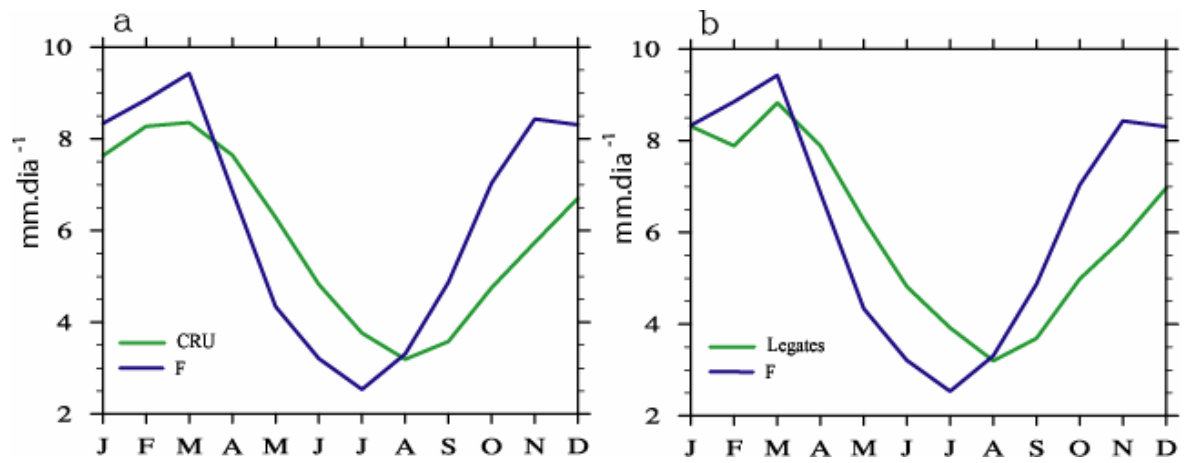


Figura 3: Variação sazonal da precipitação (mm.dia⁻¹) sobre a bacia Amazônica da simulação de controle comparadas com dados observados (a) do CRU e (b) do Legates e Wilmott (1990).

Tabela 1: Resultados das médias anuais da precipitação (P) para a simulação de controle sobre a bacia Amazônica, em comparação com outros estudos.

Fonte	Método	P (mm.dia ⁻¹)
Cox et al. (2004)	Modelagem	4,56
Voldoire e Royer (2004)	Modelagem	4,60
Correia (2005)	Modelagem	4,62
Levis et al. (2000)	Modelagem	5,22
Hoffman et al. (2003)	Modelagem	5,24
Zhang et al. (2001)	Modelagem	5,30
Sud et al. (1996)	Modelagem	5,40
Dickinson e Kennedy (1992)	Modelagem	5,50
Lean e Rowtree (1993)	Modelagem	5,69
CRU	Observado	5,89
Costa e Foley (2000)	Modelagem	5,92
Hahmann e Dickinson (1997)	Modelagem	5,99
Legates e Wilmott (1990)	Observado	6,05
Eltahir e Bras (1994)	Modelagem	6,10
Este experimento (F)	Modelagem	6,29
Lean e Warrilow (1989)	Modelagem	6,60
Shukla et al. (1990)	Modelagem	6,75
Polcher e Laval (1994)	Modelagem	7,17

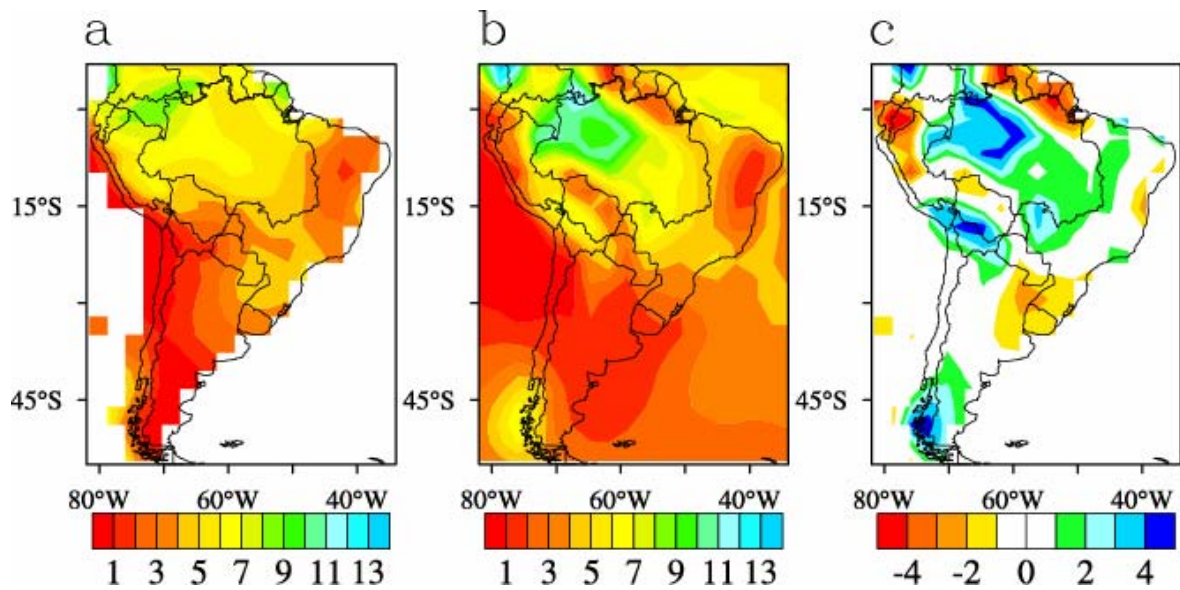


Figura 4: Média anual da precipitação (mm.dia^{-1}) para valores do (a) banco de dados do CRU, (b) valores da simulação de controle e (c) diferença entre os resultados (b-a).

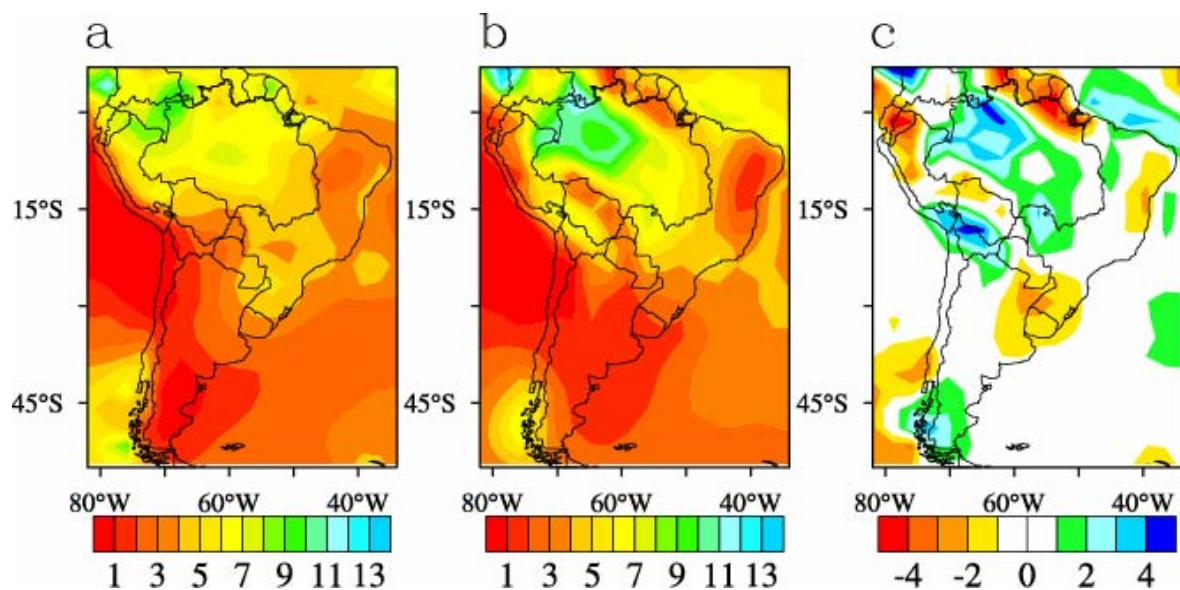


Figura 5: Média anual da precipitação (mm.dia^{-1}) para valores do (a) banco de dados do Legates e Wilmott (1990), (b) valores da simulação de controle e (c) diferença entre os resultados (b-a).

Tabela 2: Resultados das médias anuais da evapotranspiração (E) para a simulação de controle sobre a bacia Amazônica, em comparação com outros estudos.

Fonte	Método	E (mm.dia ⁻¹)
Lean e Warrilow (1989)	Modelagem	3,05
Lesack (1993)	Observado	3,10
Cox et al. (2004)	Modelagem	3,14
Voldoire e Royer (2004)	Modelagem	3,14
Biajoli (2005); Santarém km 67	Observado	3,30
Correia (2005)	Modelagem	3,36
Biajoli (2005); Caxiuanã	Observado	3,39
Dicknson e Kennedy (1992)	Modelagem	3,50
Levis et al. (2000)	Modelagem	3,50
Zhang et al. (2001)	Modelagem	3,50
Biajoli (2005); Manaus km 34	Observado	3,58
Biajoli (2005); Santarém km 83	Observado	3,68
Sud et al. (1996)	Modelagem	3,80
Este experimento (F)	Modelagem	3,85
Costa e Foley (2000)	Modelagem	3,86
Costa e Foley (1997)	Modelagem	4,20

Tabela 3: Resultados das médias anuais do escoamento total (ET) para a simulação de controle sobre a bacia Amazônica, em comparação com outros estudos.

Fonte	Método	ET (mm.dia ⁻¹)
Correia (2005)	Modelagem	1,17
Sud et al. (1996)	Modelagem	1,60
Dickinson e Kennedy (1992)	Modelagem	2,00
Este experimento (F)	Modelagem	2,48
Hahmann e Dickinson (1997)	Modelagem	2,80
Lean e Warrilow (1989)	Modelagem	3,30

Tabela 4: Resultados das médias anuais da Temperatura (T) para a simulação de controle sobre a bacia Amazônica, em comparação com outros estudos.

Fonte	Método	T (°C)
Lean e Warrilow (1989)	Modelagem	23,6
Culf et al. (1996); Ji-Paraná	Observado	24,8
Biajoli (2005); Jaru	Observado	25,1
Este experimento (F)	Modelagem	25,1
Biajoli (2005); Sinop	Observado	25,5
Zhang et al. (2001)	Modelagem	25,5
Costa e Foley (2000)	Modelagem	25,6
Biajoli (2005); Manaus km 34	Observado	25,6
Dicknson e Kennedy (1992)	Modelagem	25,6
Biajoli (2005); Santarém km 67	Observado	25,7
Culf et al. (1996); Marabá	Observado	25,7
Culf et al. (1996); Manaus	Observado	25,7
Sud et al. (1996)	Modelagem	26,0
Biajoli (2005); Santarém km 83	Observado	26,1
Voldoire e Royer (2004)	Modelagem	26,2
Biajoli (2005); Caxiuanã	Observado	26,3
Levis et al. (2000)	Modelagem	26,6

Tabela 5: Resultados das médias anuais de fluxo de calor latente (LE) para a simulação de controle sobre a bacia Amazônica, em comparação com outros estudos.

Fonte	Método	LE (W.m ⁻²)
Imbuzeiro (2005); Jaru	Observado	89,9
Voldoire e Royer (2004)	Modelagem	107,0
Sud et al. (1996)	Modelagem	110,6
Este experimento (F)	Modelagem	111,5
Imbuzeiro (2005); Santarém km 83	Observado	115,0

Tabela 6: Resultados das médias anuais do fluxo de calor sensível (H) para a simulação de controle sobre a bacia Amazônica, em comparação com outros estudos.

Fonte	Método	H (W.m ⁻²)
Imbuzeiro (2005); Santarém km 67	Observado	20,7
Imbuzeiro (2005); Santarém km 83	Observado	22,0
Imbuzeiro (2005); Manaus km 34	Observado	24,6
Voldoire e Royer (2004)	Modelagem	25,9
Imbuzeiro (2005); Jaru	Observado	27,4
Levis et al. (2000)	Modelagem	30,7
Este experimento (F)	Modelagem	39,0
Polcher e Laval (1994)	Modelagem	40,0
Shukla et al. (1990)	Modelagem	44,0
Sud et al. (1996)	Modelagem	49,8
Dickinson e Kennedy (1992)	Modelagem	52,0
Zhang et al. (2001)	Modelagem	56,8
Correia (2005)	Modelagem	59,0

Tabela 7: Resultados das médias anuais do saldo de radiação (RN) para a simulação de controle sobre a bacia Amazônica, em comparação com outros estudos.

Fonte	Método	RN (W.m ⁻²)
Imbuzeiro (2005); Santarém km 83	Observado	127,3
Biajoli (2005); Sinop	Observado	130,2
Imbuzeiro (2005); Jaru	Observado	141,8
Imbuzeiro (2005); Manaus km 34	Observado	142,3
Biajoli (2005); Santarém km 67	Observado	143,1
Biajoli (2005); Caxiuanã	Observado	145,0
Lean e Warrilow (1989)	Modelagem	147,0
Este experimento (F)	Modelagem	150,5
Polcher e Laval (1994)	Modelagem	165,0
Shukla et al. (1990)	Modelagem	172,0

Tabela 8: Resultados das médias anuais do índice da área foliar (IAF) para a simulação de controle sobre a bacia Amazônica, em comparação com outros estudos.

Fonte	Método	IAF (m ² .m ⁻²)
Roberts et al. (1996); Ji-Paraná	Observado	4,36
Sud et al. (1996)	Modelagem	5,00
Levis et al. (2000)	Modelagem	5,20
Costa e Foley (2000)	Modelagem	5,32
Roberts et al. (1996); Marabá	Observado	5,38
Zhang et al. (2001)	Modelagem	5,50
Voldoire e Royer (2004)	Modelagem	5,50
McWilliam et al. (1993); Manaus	Observado	5,70
Neilson e Drapek (1998)	Modelagem	5,90
Este experimento (F)	Modelagem	5,96
Roberts et al. (1996); Manaus	Observado	6,10

3.2 RESUMO DO EXPERIMENTO

Nesta seção apresenta-se um resumo das médias anuais das variáveis climáticas e de alguns parâmetros biogeofísicos calculados sobre a bacia Amazônica e a região desmatada (Tabelas 8, 9 e 10).

Tabela 9 : Média anual das variáveis e de alguns parâmetros biogeofísicos, calculados sobre a bacia Amazônica (IAF-t e IAF-b, índice da área foliar nas árvores e na vegetação rasteira; NEE, produção líquida no ecossistema; B, biomassa total; NPP, produção primária líquida; F_u e F_l fração de cobertura da parte superior do dossel (árvores) e abaixo do dossel; R_{raiz} respiração na raiz, R_{dossel} respiração nas folhas e caule e R_{solo} respiração no solo).

	Experimento						
	F	FR	FRE	FREB	D	DRE	DREB
P (mm.dia ⁻¹)	6,29	6,31	6,18	6,20	6,09	6,21	6,17
E (mm.dia ⁻¹)	3,85	3,85	3,80	3,79	3,75	3,78	3,79
T (°C)	25,1	25,2	26,3	26,1	25,1	26,3	26,2
ET (mm.dia ⁻¹)	2,48	2,50	2,42	2,41	2,41	2,48	2,43
IAF-t (m ² .m ⁻²)	5,23	5,24	8,02	7,92	3,65	7,82	7,49
IAF-b (m ² .m ⁻²)	0,55	0,57	0,15	0,16	1,25	0,28	0,43
RN (W.m ⁻²)	150,5	150,9	146,1	145,5	149,3	146	145,9
H (W.m ⁻²)	39,0	39,3	35,9	35,5	40,5	36,4	36,8
LE (W.m ⁻²)	111,5	111,6	110,2	110,0	108,8	109,6	109,1
NEE (kg C.m ⁻²)			0,338	0,320		0,382	0,364
B (kg C.m ⁻²)	7,16	7,16	7,76	7,70	5,18	6,14	6,01
NPP (kg C.m ⁻²)			1,12	1,10		1,11	1,08
F_u	0,956	0,956	0,966	0,965	0,857	0,960	0,956
F_l	0,560	0,560	0,264	0,268	0,675	0,305	0,326
R_{raiz} (kg C.m ⁻²)			0,461	0,453		0,472	0,467
R_{dossel} (kg C.m ⁻²)			0,678	0,675		0,641	0,634
R_{solo} (kg C.m ⁻²)			1,140	1,128		1,112	1,102

Tabela 10 : Média anual das variáveis e de alguns parâmetros biogeofísicos, calculados sobre a região desmatada.

	Experimento			
	F	D	DRE	DREB
P (mm.dia ⁻¹)	5,79	5,33	6,00	5,90
E (mm.dia ⁻¹)	3,66	3,28	3,67	3,62
T (°C)	26,7	26,2	27,5	27,4
ET (mm.dia ⁻¹)	2,13	2,06	2,32	2,15
IAF-t (m ² .m ⁻²)	5,55	0,45	6,77	6,36
IAF-b (m ² .m ⁻²)	0,41	2,64	0,60	0,94
RN (W.m ⁻²)	152,3	145,0	149,1	149,0
H (W.m ⁻²)	45,9	49,8	42,4	44,2
LE (W.m ⁻²)	106,4	95,2	106,7	104,8
NEE (kg C.m ⁻²)			0,469	0,439
B (kg C.m ⁻²)	8,24	0,41	2,02	1,82
NPP (kg C.m ⁻²)			1,04	0,99
F _u	0,956	0,566	0,948	0,931
F _l	0,522	0,975	0,425	0,498
R _{raiz} (kg C.m ⁻²)			0,488	0,505
R _{dossel} (kg C.m ⁻²)			0,524	0,514
R _{solo} (kg C.m ⁻²)			1,012	1,019

Tabela 11: Diferença da média anual das variáveis climáticas e de alguns parâmetros biogeofísicos referente ao experimento, calculados sobre a bacia Amazônica (BA) e na área parcialmente desmatada (AD).

	Experimento						
	D-F		FR-F	FRE-FR	FREB-FRE	DREB-DRE	
	BA	AD	BA	BA	BA	BA	AD
P (mm.dia ⁻¹)	-0,20	-0,46	0,02	-0,13	0,02	-0,04	-0,10
E (mm.dia ⁻¹)	-0,10	-0,38	0,00	-0,05	-0,01	0,01	-0,05
T (°C)	0,00	-0,50	0,10	1,13	-0,02	-0,10	-0,17
ET (mm.dia ⁻¹)	-0,07	-0,07	0,02	-0,08	-0,01	-0,05	-0,10
IAF-t (m ² .m ⁻²)	-1,58	-5,10	0,01	2,78	-0,10	-0,33	-0,41
IAF-b (m ² .m ⁻²)	0,70	2,23	0,02	-0,42	0,01	0,15	0,34
RN (W.m ⁻²)	1,6	-7,3	0,4	-4,8	-0,6	-0,1	-0,1
H (W.m ⁻²)	1,5	3,9	0,3	-3,4	-0,4	0,4	1,8
LE (W.m ⁻²)	-2,7	-11,2	0,2	-1,5	-0,2	-0,5	-1,9
NEE (kg C.m ⁻²)					-0,02	-0,02	-0,03
B (kg C.m ⁻²)	-1,98	-7,83		0,61	-0,06	-0,12	-0,20
NPP (kg C.m ⁻²)					-0,02	-0,03	-0,04
F _u	-0,1	-0,39		0,01	0,00	0,00	-0,02
F _l	-0,1	0,45		-0,30	0,04	0,02	0,07
R _{raiz} (kg C.m ⁻²)					-0,01	0,00	0,01
R _{dossel} (kg C.m ⁻²)					0,00	-0,01	-0,01
R _{solo} (kg C.m ⁻²)					-0,01	-0,01	0,01

3.3 EFEITO DO DESMATAMENTO NO CLIMA REGIONAL

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos com o tratamento de desflorestamento parcial (D). O efeito do desmatamento é obtido através da diferença entre os resultados dos experimentos D e F. A significância estatística das anomalias foi avaliada utilizando-se o teste t de Student, usando o nível de confiança de 95%.

3.3.1 - Efeito do desmatamento no índice da área foliar (IAF)

Os resultados do IAF obtidos na região de pastagem (Tabela 9) ficaram próximos daqueles observados no campo (Roberts et al. 1996; Wandell e Marques Filho 1999). Nas Figuras 6, 7 e 8 observa-se que o IAF na vegetação rasteira da simulação D foi maior em relação à simulação F, como era de se esperar o IAF nas árvores foi maior na simulação F. Segundo Costa e Foley (2000), o IAF na pastagem depende de vários fatores, incluindo: espécies das plantas (que é difícil simular), a característica sazonal das gramíneas (possível simular), e em reais condições, o consumo de gramíneas por gado (atualmente difícil simular). Apesar do IAF da pastagem ser um parâmetro que apresenta elevado grau de dificuldade quando se trabalha com este tipo de simulação, ele é uma variável importante de se conhecer, pois é através da superfície das folhas que ocorrem as trocas gasosas: perda de água pelas folhas (transpiração) e absorção de CO₂.

3.3.2 - Efeito do desmatamento no albedo

O albedo é uma reconhecida forçante para mudanças no clima após o desmatamento. Berbet e Costa (2003), ao avaliarem a variabilidade sazonal do albedo após desmatamento tropical, concluíram que existe uma relação linear entre mudanças de precipitação e a anomalia na radiação refletida pela superfície.

A anomalia do albedo de superfície para este tratamento apresenta um acréscimo de 0,04 na área parcialmente desmatada na estação chuvosa (Figura 9a). Como pode ser observado pela análise de significância estatística, com nível de confiança de 95% pelo teste t Student, não teve diferenças entre a floresta e a pastagem, neste período a pastagem esta com um índice da área foliar maior minimizando assim as diferenças do albedo. Na estação seca a área de pastagem encontra-se com menor cobertura do solo, o que aumenta a refletividade da superfície, causando um significativo aumento no albedo que foi de 0,06, indicando que a floresta absorve mais energia solar do que a pastagem no período seco (Figura 9b). Resultados semelhantes foram encontrados por Costa e Foley (2000), que determinaram os efeitos do desmatamento em grande escala no clima da Amazônia e por Voldoire e Royer (2004), que avaliaram o desflorestamento nos trópicos, utilizando um modelo de circulação geral APREGGE acoplado ao esquema ISBA (Tabela 12). Pesquisando sobre os efeitos do desmatamento Amazônico no clima regional, Costa e Yanagi (2006) concluíram que a diferença no albedo entre pastagens e florestas tropicais representa o parâmetro que mais atua na sensibilidade dos modelos climáticos.

3.3.3 - Efeito do desmatamento nos fluxos de calor latente e calor sensível

A mudança na cobertura do solo causa mudanças nos fluxos de superfície, afetando a termodinâmica da atmosfera. Na estação chuvosa (FMA) observa-se redução no fluxo de calor latente e aumento no fluxo de calor sensível sobre a área parcialmente desmatada. Comportamento semelhante para estas anomalias foi observado na estação seca (Figuras 10 e 11), porém com maior intensidade. O acréscimo do albedo na estação chuvosa teve um papel importante na diminuição do saldo da radiação, fazendo com que menos radiação ficasse disponível para ser particionada entre os fluxos de calor latente e calor sensível. As variações sazonais do fluxo de calor latente e sensível e suas mudanças após o

desmatamento são mostradas na Figura 12. Nesta figura, observa-se que o fluxo de calor sensível apresenta um aumento durante todo o ano sobre a região desmatada enquanto o fluxo de calor latente da região apresenta reduções após do desmatamento, ocasionando diminuição no saldo de radiação (Tabelas 9 a 11). Análise semelhante foi encontrada recentemente por Li et al. (2006) quando examinaram resultados do modelo climático global (UKMO-HadCM3). Correia (2005) observou no seu experimento que de um modo geral o fluxo de calor latente apresenta redução após o desmatamento, causada principalmente pela redução na transpiração em relação à perda por interceptação.

3.3.4 - Efeito do desmatamento na temperatura

A substituição da floresta por pastagem diminui a temperatura da superfície tanto na estação chuvosa quanto na estação seca, com valores mais intensos na estação seca, sobre a área parcialmente desmatada (Figura 13). Este resfriamento sobre a região desmatada, deve-se a uma menor energia na superfície proporcionada pela redução do saldo de radiação (Tabela 11), que por sua vez foi provocado pelo aumento do albedo. A Figura 14 apresenta a variação sazonal da temperatura à superfície sobre a área parcialmente desmatada e na bacia Amazônica, os quais mostram que houve diminuições mais significantes nos meses de maio, junho e julho. Voldoire e Royer (2004) também encontraram uma redução na média anual da temperatura de $-0,1^{\circ}\text{C}$, depois do desmatamento total sobre a floresta amazônica. No experimento de mudança da cobertura do solo global utilizando o MCGA NCAR CAM3, Gibbard et al. (2005) encontraram que a substituição global da vegetação atual por árvores conduziria a um aquecimento médio global de $1,3^{\circ}\text{C}$, enquanto a substituição por gramíneas resultaria num resfriamento do ar de $0,4^{\circ}\text{C}$. Por outro lado, os resultados encontrados na maioria dos estudos de desmatamento na Amazônia conduziram a um aquecimento na região (Tabela 12). O

comportamento anômalo da temperatura do ar neste experimento pode ser explicado pelos efeitos conflitantes entre os processos de diminuição do saldo de radiação (que tende a resfriar a superfície) e de redução do fluxo de calor latente (que tende a aquecer a superfície). Enquanto, na maioria dos experimentos amazônicos, o segundo processo dominou sobre o primeiro, neste experimento ocorre o inverso, provavelmente porque a escala de desmatamento neste caso é muito inferior aos demais.

3.3.5 - Efeito do desmatamento na precipitação

Um dos efeitos climáticos mais imediatos do desmatamento ao longo da bacia Amazônica refere-se às mudanças no seu ciclo hidrológico. Observa-se na Tabela 11, diminuições na precipitação depois do desmatamento (D-F), fato que é constado na maioria dos experimentos de MCGA. É o caso do estudo Dickinson e Kennedy (1992), que realizaram simulações com o MCGA CCM1 acoplado ao modelo de superfície BATS, a fim de avaliar o impacto no clima regional pelo desmatamento total na Amazônia, encontrando uma redução na precipitação de $1,4 \text{ mm.dia}^{-1}$ (25%). Ao contrário dos demais estudos, que sempre apresentaram redução na precipitação após o desmatamento, Polcher e Laval (1994) encontrou um aumento da ordem $1,1 \text{ mm.dia}^{-1}$ (15%) na precipitação, quando realizaram um experimento de desmatamento tropical utilizando o MCGA LMD acoplado ao modelo de vegetação SECHIBA. Correia (2005) utilizou o MCGA do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) para realiza três tipos de cenários diferentes de desmatamento (alterações atuais, previstas para 2033 e desmatamento total), e comparou os resultados a uma simulação de controle de desmatamento zero. Os resultados encontrados da média anual da precipitação sobre a área parcialmente desmatada na Amazônia foram $+0,35$, $-0,25$ e $-0,19 \text{ mm.dia}^{-1}$, respectivamente. Vale ressaltar que o desmatamento parcial na Amazônia pode levar a um acréscimo na

precipitação em escala local, contudo, se o processo de desmatamento continuar, essa condição não será sustentável, conduzindo a uma condição mais seca sobre a região e, conseqüentemente, a uma redução na precipitação sobre a Amazônia (Correia 2005).

Neste estudo, que tem um cenário da cobertura do solo previsto para 2010-2030, observa-se na variação sazonal da precipitação reduções durante todo ano (Figura 17-c e 17-d), sendo a diminuição da média anual da precipitação de aproximadamente de $0,49 \text{ mm.dia}^{-1}$ (8%), em relação aos resultados da simulação de controle (Tabela 11) sobre a região desmatada.

Na Figura 15, observam-se diminuições na precipitação em torno de $1,5 \text{ mm.dia}^{-1}$ sobre a área parcialmente desmatada, na estação chuvosa (FMA), e no centro da Amazônia em torno de 2 mm.dia^{-1} na estação seca (JJA). Assim, o efeito do desmatamento não só afeta a área parcialmente desmatada, mas toda a bacia Amazônica. O efeito do desmatamento Amazônico na circulação atmosférica e no clima do hemisfério norte, foram estudados por Gedney e Valdes (2000), que demonstraram que o desmatamento na Amazônia poderia causar um efeito significativo no clima sobre o norte do Oceano Atlântico.

3.3.6 - Efeito do desmatamento na evapotranspiração

A evapotranspiração também diminui depois do desmatamento, o que também é um resultado comum em outros estudos sobre o efeito do desmatamento no clima regional (Tabela 12). Com menor IAF na pastagem, tem-se diminuição da taxa de transpiração, conseqüentemente reduz a evapotranspiração. Neste estudo, a evapotranspiração no período FMA apresenta uma pequena diminuição sobre a área parcialmente desmatada. No período JJA a evapotranspiração foi consideravelmente menor em D que em F. Este resultado mostra que a pastagem é mais dependente da umidade do solo em relação à

floresta, como mostra Figura 16. A variação sazonal da evapotranspiração apresentou reduções durante todo ano (Figura 17-a e 17-b).

Existem várias razões que fazem a evapotranspiração da pastagem ser menor que a da floresta. Dentre estas, as principais são as mudanças no albedo e comprimento da rugosidade aerodinâmico (Hahmann e Dickinson 1997). O albedo na pastagem é mais alto, disponibilizando menos energia para ser absorvida pela superfície. Já a diminuição do comprimento da rugosidade na pastagem, por sua vez, reduz a transferência de massa e energia entre a atmosfera e a superfície da terra. Além disso, diferenças que passam a existir na área foliar e na profundidade das raízes, quando uma floresta é substituída por área de pastagem, também contribuem para a diminuição da evapotranspiração. Isso ocorre porque a nova vegetação possui sistema radicular bem menos profundo em relação à floresta, significando que a sua capacidade de extração de água limita-se às camadas superficiais do solo, enquanto a vegetação de floresta consegue extrair água da camada mais profunda. Todos esses fatores (mudança no albedo, comprimento da rugosidade, profundidade do sistema radicular e área foliar) contribuem para uma redução na evapotranspiração e no fluxo de calor latente, principalmente na estação seca.

3.3.7 - Efeito do desmatamento no escoamento total

O escoamento total, obtido pelo balanço entre a precipitação e evapotranspiração, é uma das partes do ciclo hidrológico mais difíceis de ser simulada em um MCGA. Costa e Foley (2000) observaram uma pequena redução na média anual através do desmatamento, porém durante a estação chuvosa o escoamento total aumentou e na estação seca aconteceu o inverso. Neste estudo, o escoamento total na estação chuvosa reduz-se na área parcialmente desmatada, e na estação seca não apresenta mudanças (Figura 18). A média anual do escoamento total diminui 3,5% sobre a área parcialmente desmatada, devido à

mudança na intensidade da precipitação (Tabela 11). Por outro lado, os resultados encontrados por Costa et al. (1997, 2003) mostraram que o desmatamento poderia produzir aumentos significativos no escoamento total.

Tabela 12: Comparação dos resultados de alguns experimentos de desmatamento utilizando MCGA (ΔP , precipitação; ΔE , evapotranspiração; ΔT , temperatura).

Estudo	Duração da simulação	Desmatamento	Albedo	ΔP (mm.dia ⁻¹)	ΔE (mm.dia ⁻¹)	ΔT (°C)
Dickinson e Henderson-Sellers (1988)	1,1 ano	Total	+0,07	0	-6,4	+3,0
Lean e Warrilow (1989)	3 anos	Total	+0,04	-1,30	-0,8	+2,4
Nobre et al. (1991)	1 ano	Total	+0,07	-1,80	-1,4	+2,0
Dickinson e Kennedy (1992)	3 anos	Total	+0,07	-1,40	-0,7	+0,6
Lean e Rowtree (1993)	3 anos	Total	+0,05	-0,80	-0,6	+2,1
Polcher e Laval (1994)	1,1 ano	Total	+0,08	+1,10	-2,7	+3,8
Hahmann e Dickinson (1997)	10 anos	Total	+0,07	-1,00	-0,4	+1,0
Costa e Foley (2000)	15 anos	Total	+0,04	-0,70	-0,6	+1,4
Voltaire e Royer (2004)	29 anos	Total	+0,04	-0,40	-0,4	-0,1
Correia (2005)	1,1 ano	Parcial	+0,05	-0,25	-1,1	+1,2
Este experimento	15 anos	Parcial	+0,04	-0,46	-0,38	-0,52

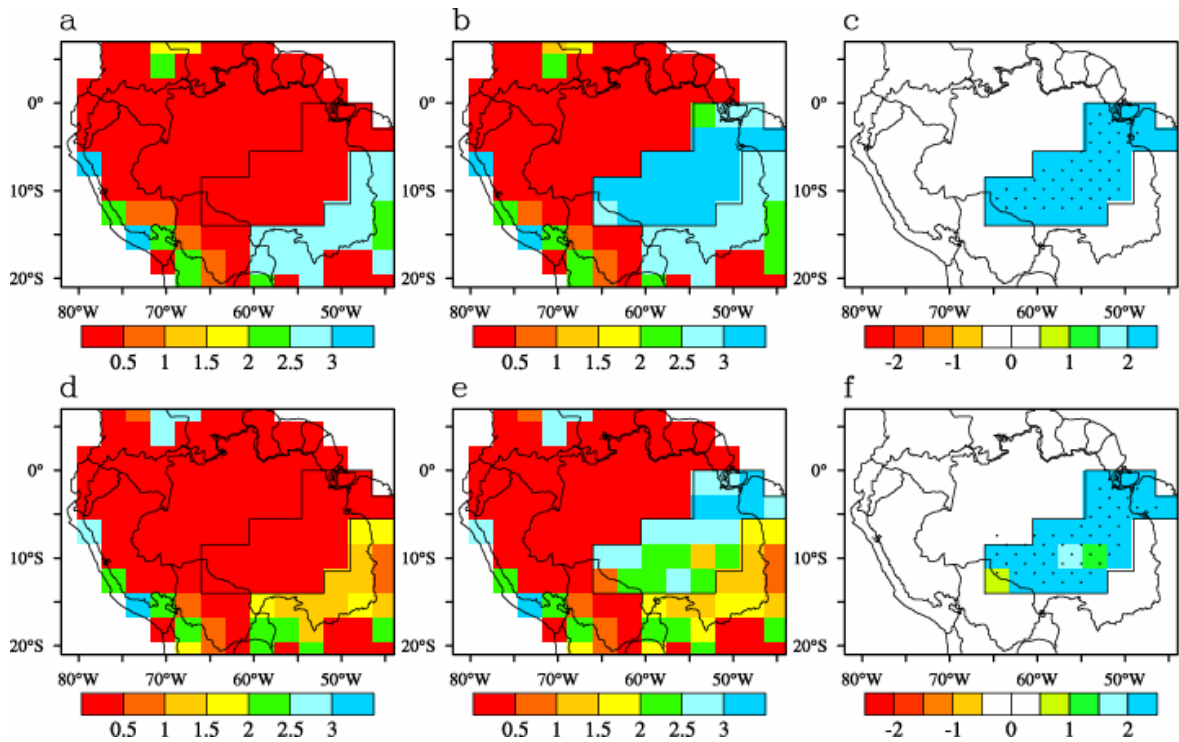


Figura 6: Variação média trimestral do índice da área foliar na vegetação rasteira ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) para (a) valores da simulação (F) em Fevereiro-Março-Abril (FMA), (b) valores da simulação (D) em FMA, (c) diferença entre as simulações (D – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em Junho-Julho-Agosto (JJA), (e) valores da simulação (D) em JJA e (f) diferença entre as simulações (D – F) em (JJA). As regiões pontilhadas indicam que os valores F e D são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

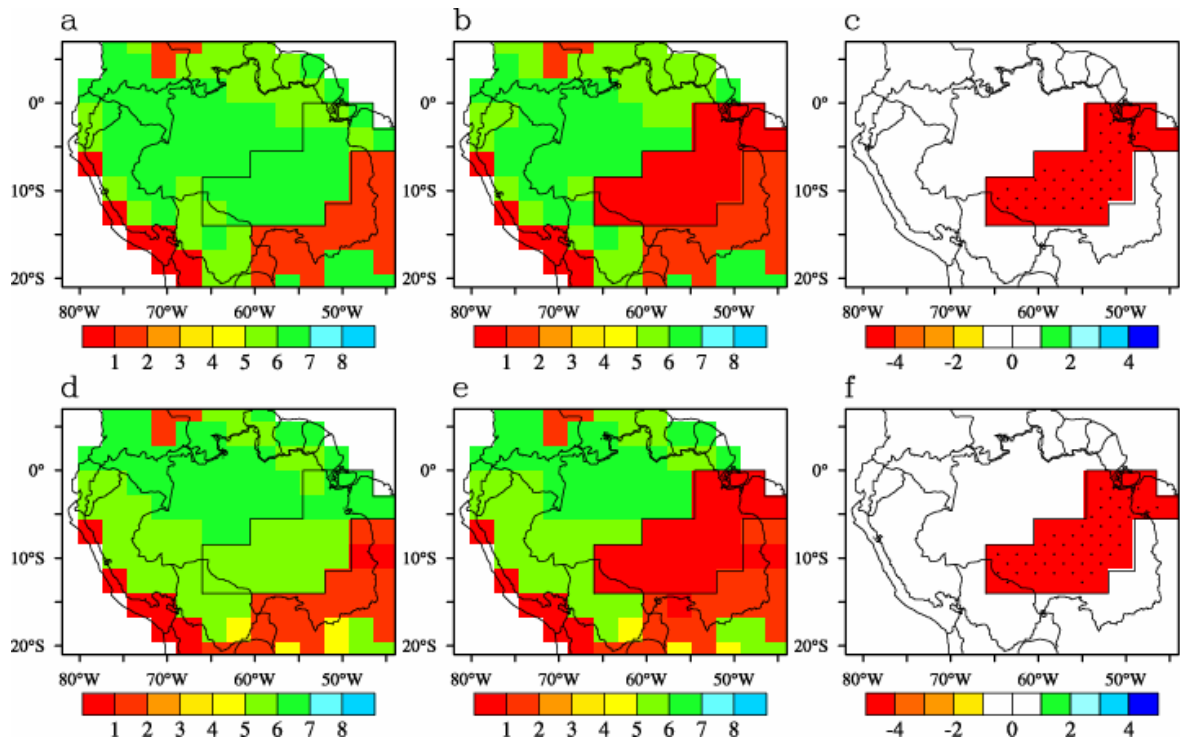


Figura 7: Variação média trimestral do índice da área foliar nas árvores ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (D) em FMA, (c) diferença entre as simulações (D – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (D) em JJA e (f) diferença entre as simulações (D – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e D são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

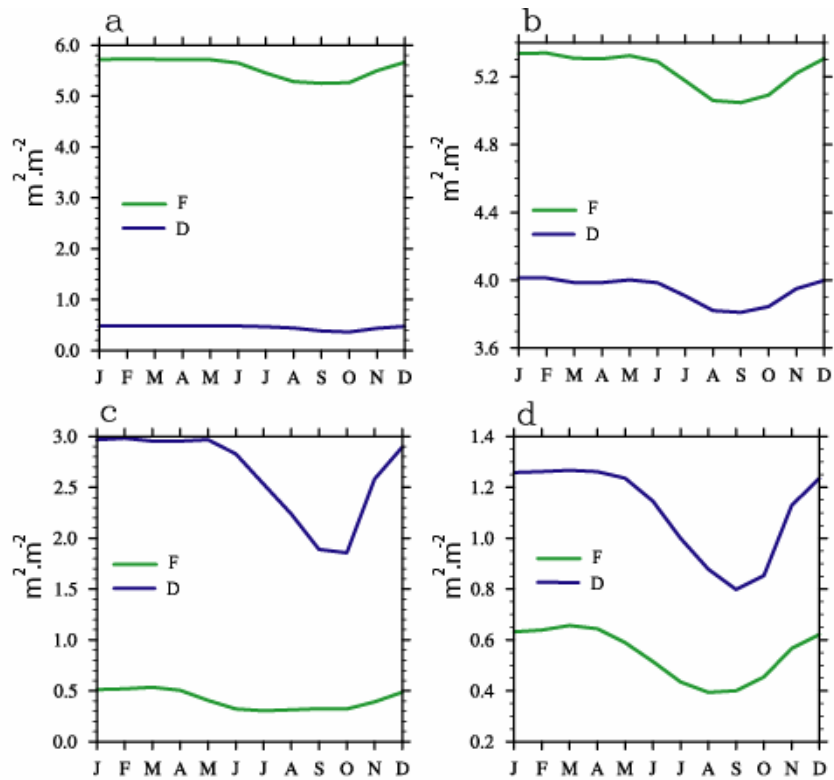


Figura 8: Variação sazonal (a) do índice da área foliar nas árvores ($m^2 \cdot m^{-2}$) na área parcialmente desmatada, (b) do índice da área foliar das árvores ($m^2 \cdot m^{-2}$) na bacia amazônica, (c) do índice da área foliar na vegetação rasteira ($m^2 \cdot m^{-2}$) na área parcialmente desmatada e (d) do índice da área foliar na vegetação rasteira ($m^2 \cdot m^{-2}$) na bacia Amazônica.

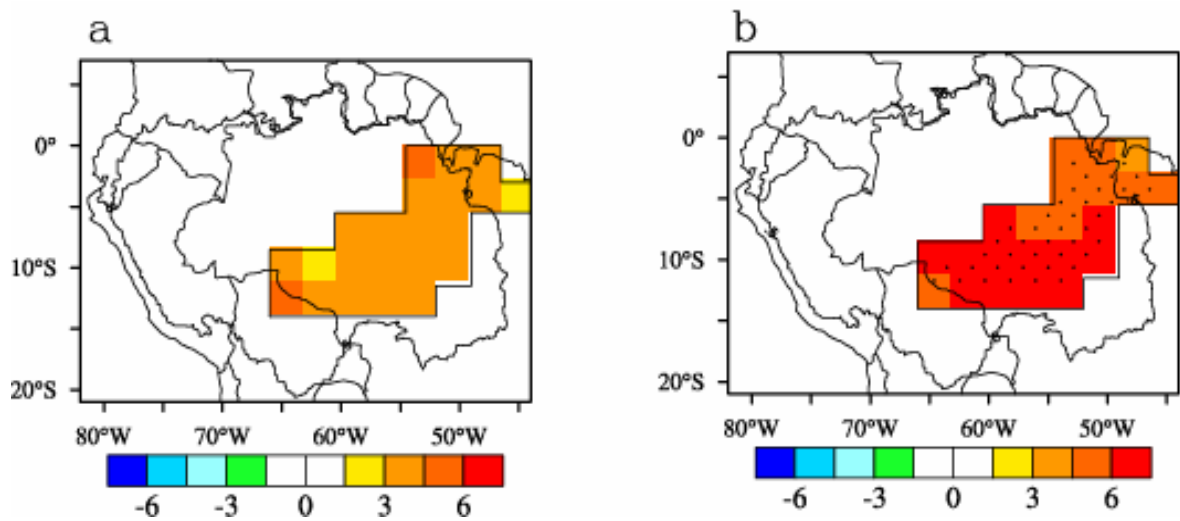


Figura 9: Variação média trimestral de diferença entre as simulações (D – F) para o albedo (%) para (a) FMA e (b) JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e D são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

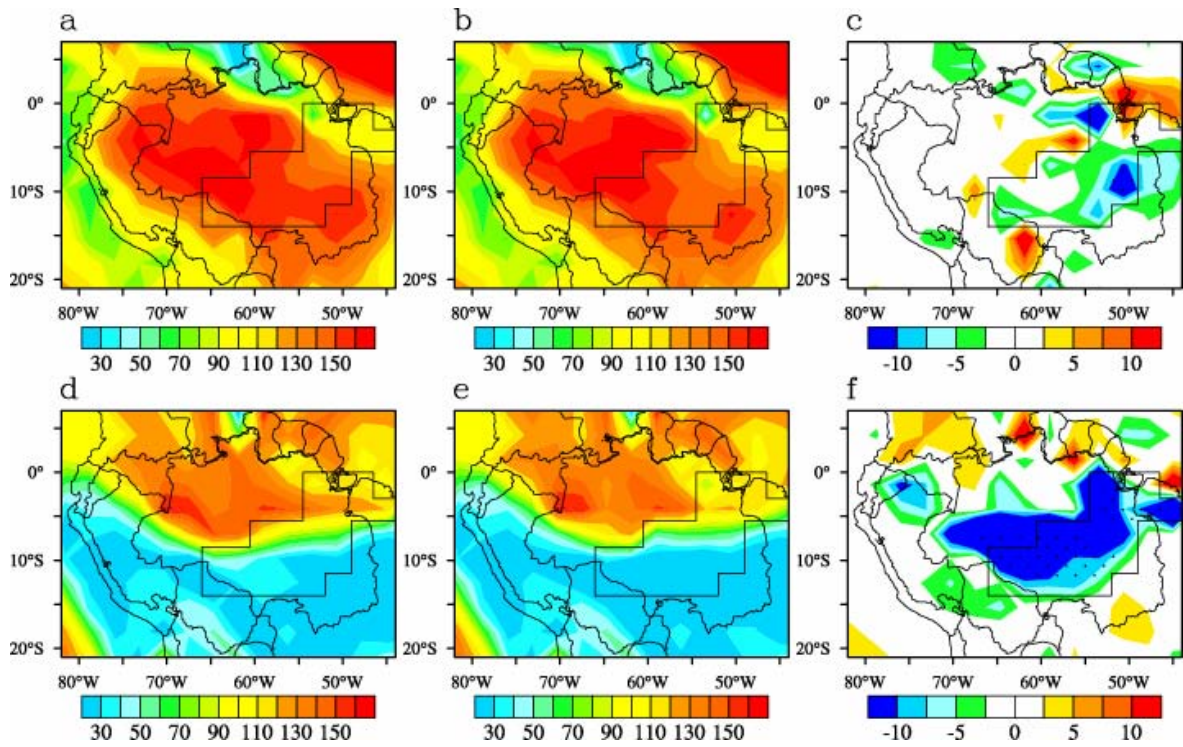


Figura 10: Variação média trimestral do fluxo de calor latente ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (D) em FMA, (c) diferença entre as simulações (D – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (D) em JJA e (f) diferença entre as simulações (D – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e D são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

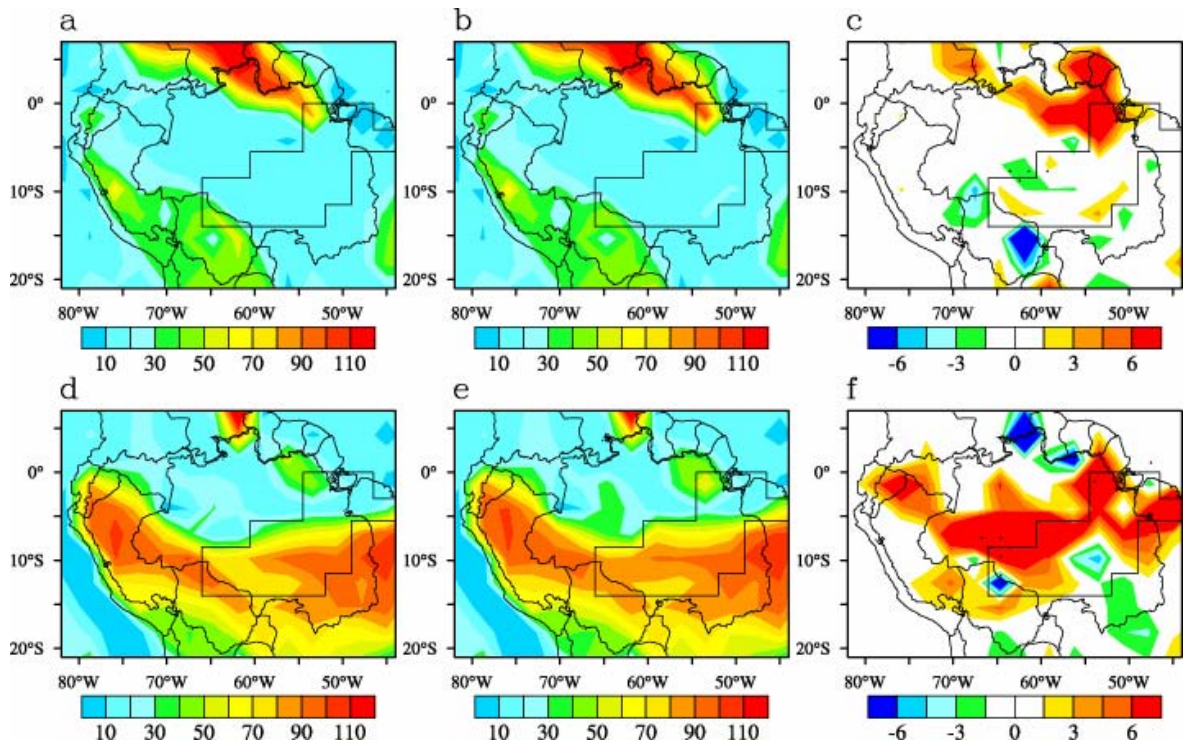


Figura 11: Variação média trimestral do fluxo de calor sensível (W.m^{-2}) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (D) em FMA, (c) diferença entre as simulações (D – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (D) em JJA e (f) diferença entre as simulações (D – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e D são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

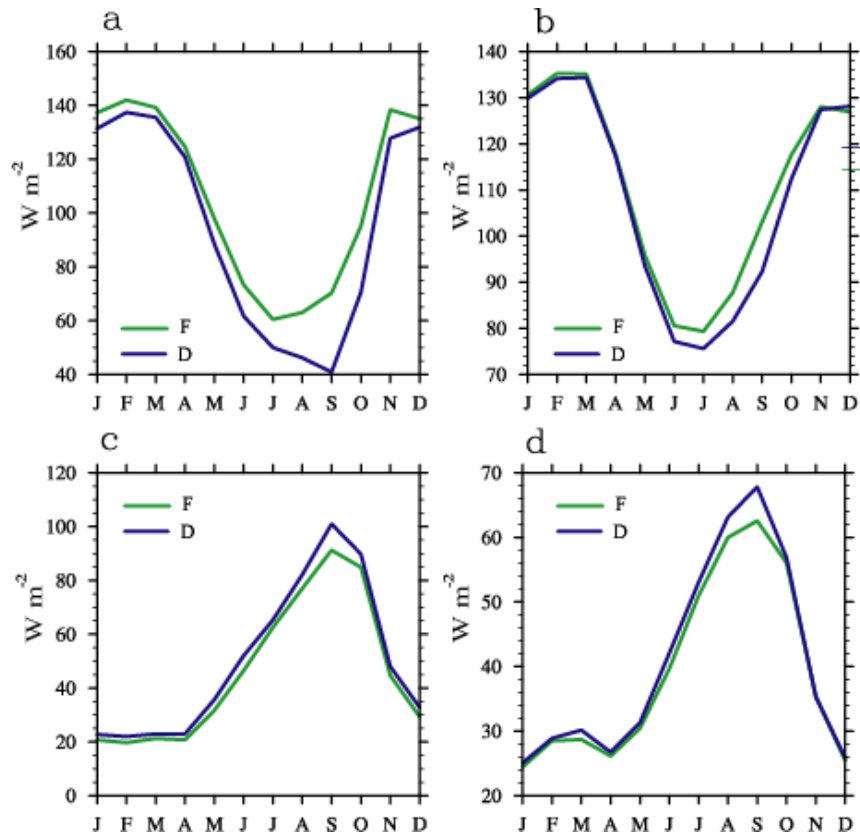


Figura 12: Variação sazonal do (a) fluxo do calor latente ($W.m^{-2}$) na área parcialmente desmatada, (b) fluxo do calor latente ($W.m^{-2}$) na bacia amazônica, (c) fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$) na área parcialmente desmatada e (d) fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$) na bacia Amazônica.

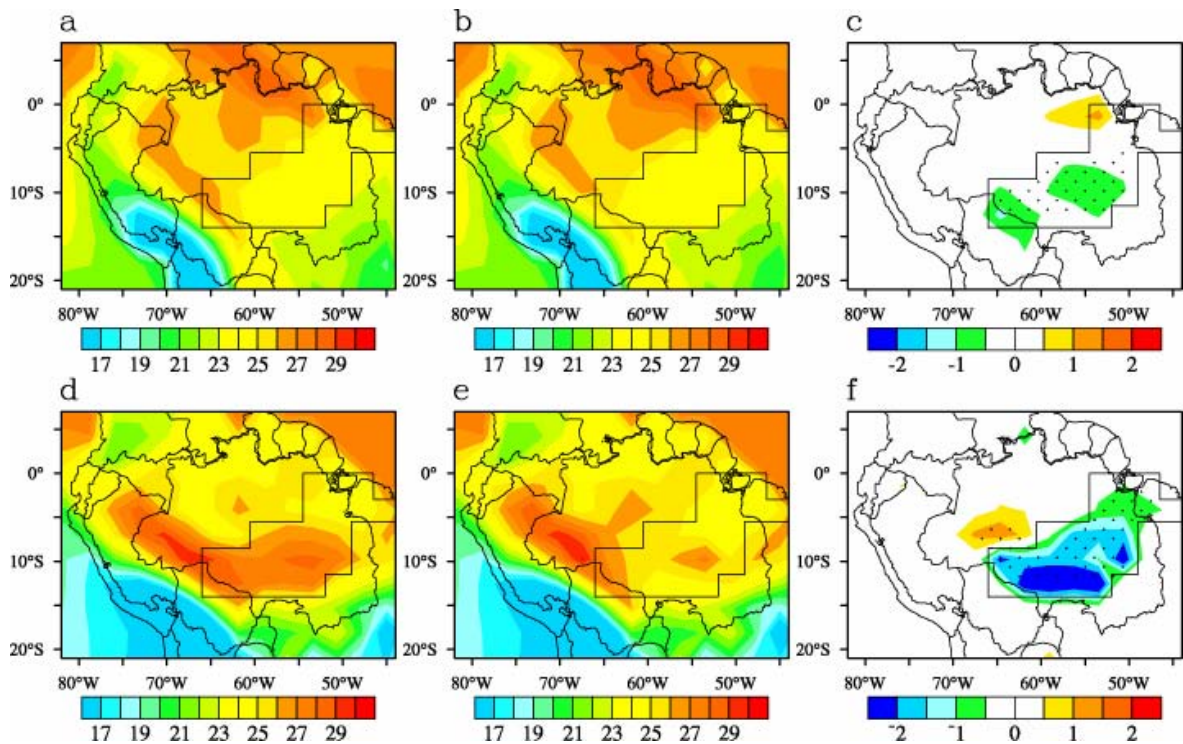


Figura 13: Variação média trimestral da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (D) em FMA, (c) diferença entre as simulações (D – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (D) em JJA e (f) diferença entre as simulações (D – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e D são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

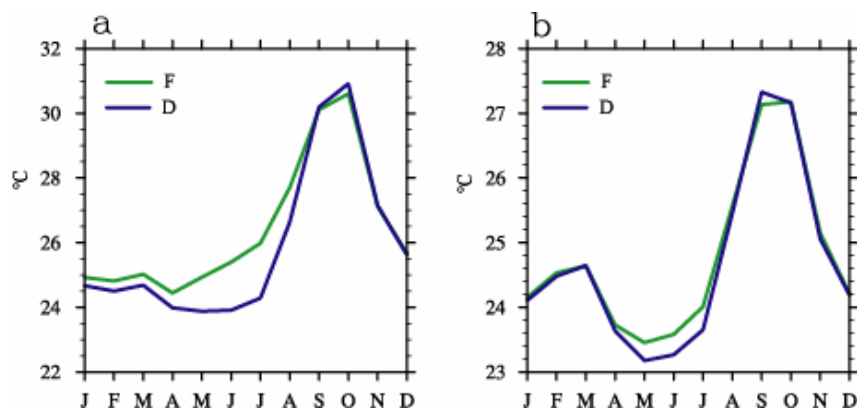


Figura 14: Variação sazonal da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (a) na área parcialmente desmatada e (b) na bacia amazônica.

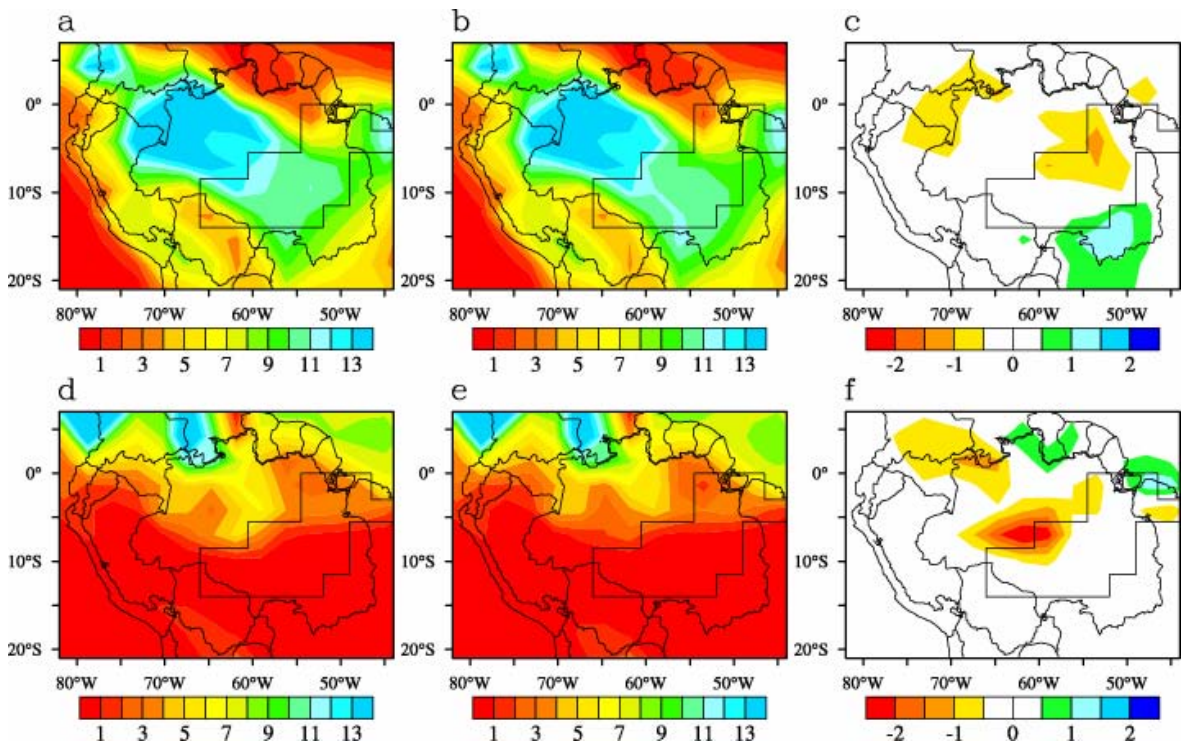


Figura 15: Variação média trimestral da precipitação (mm.dia^{-1}) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (D) em FMA, (c) diferença entre as simulações (D – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (D) em JJA e (f) diferença entre as simulações (D – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e D são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

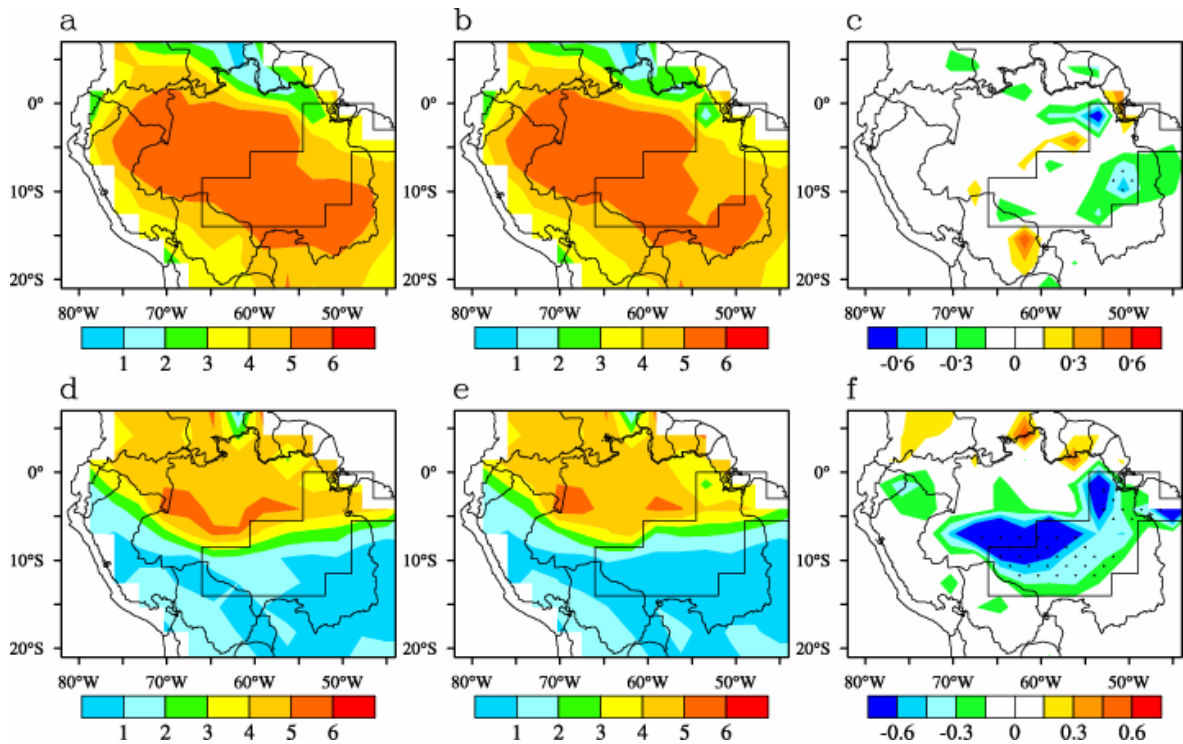


Figura 16: Variação média trimestral da evapotranspiração ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (D) em FMA, (c) diferença entre as simulações (D – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (D) em JJA e (f) diferença entre as simulações (D – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e D são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

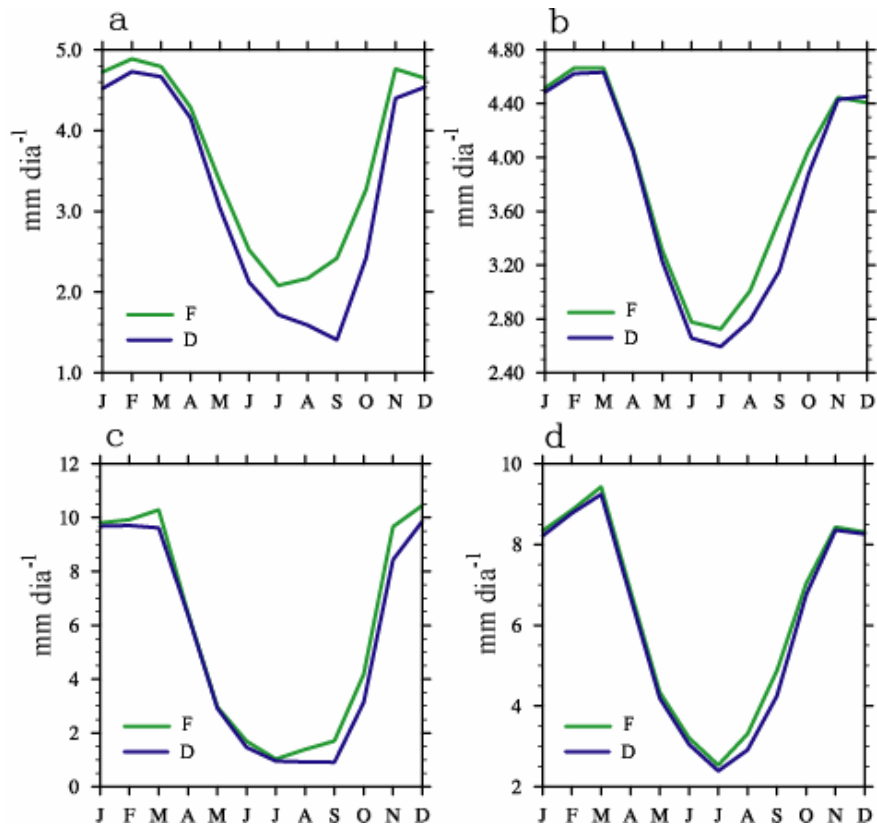


Figura 17: Variação sazonal da (a) evapotranspiração ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) na área parcialmente desmatada, (b) evapotranspiração ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) na bacia amazônica, (c) precipitação ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) na área parcialmente desmatada e (d) precipitação ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) na bacia Amazônica.

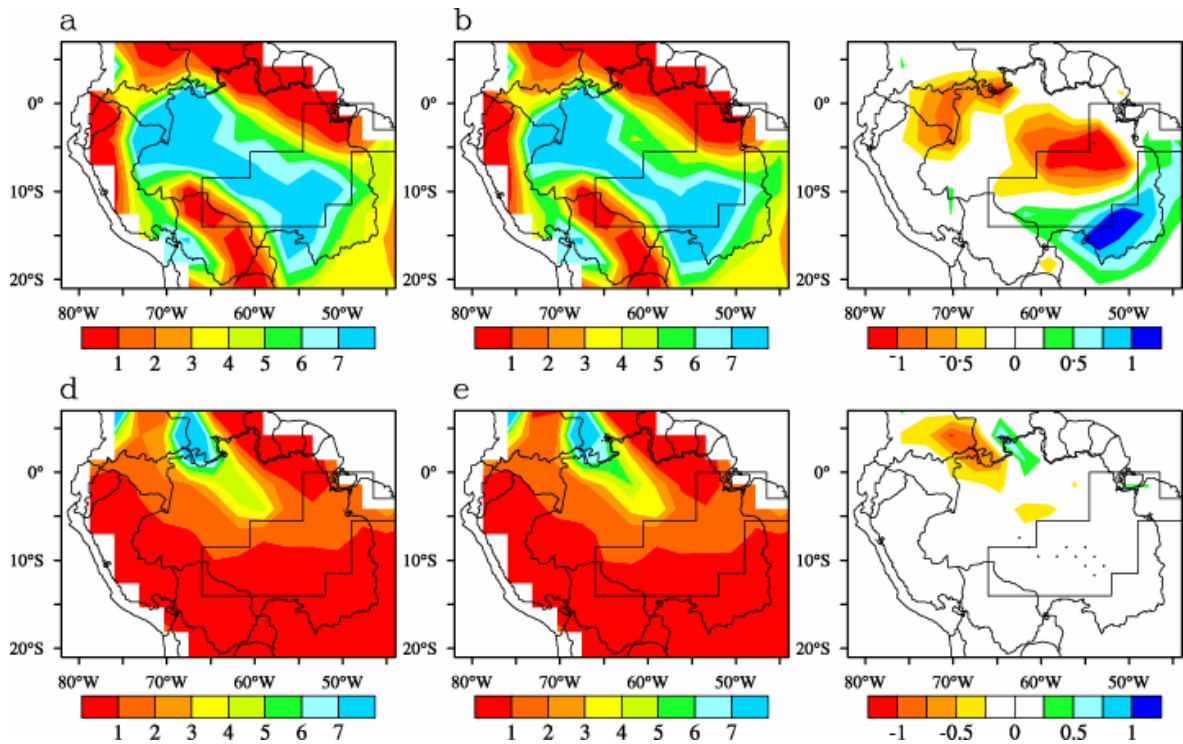


Figura 18: Variação média trimestral do escoamento total ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (D) em FMA, (c) diferença entre as simulações (D – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (D) em JJA e (f) diferença entre as simulações (D – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e D são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

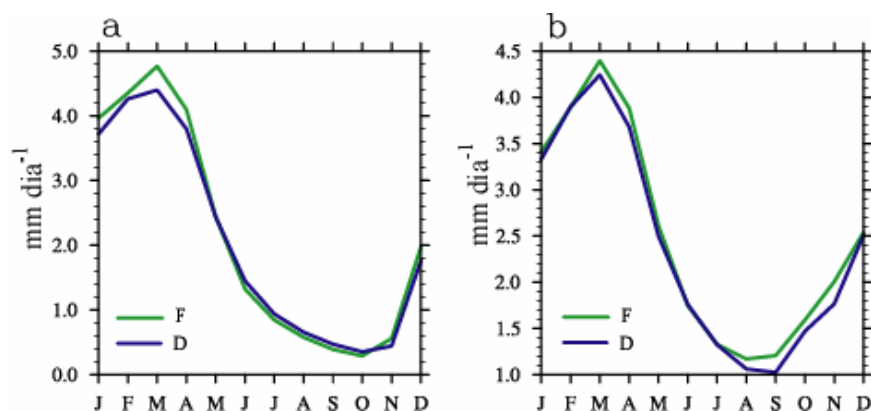


Figura 19: Variação sazonal do (a) escoamento total ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) na área parcialmente desmatada, (b) escoamento total ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) na bacia amazônica.

3.4 EFEITO RADIATIVO DO AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE CO₂ NO CLIMA REGIONAL

Nesta seção, apresentam-se os resultados do tratamento que avalia o efeito radiativo do CO₂ (FR) no clima da bacia Amazônica, sendo obtido pela análise da precipitação, evapotranspiração, fluxos de calor latente e sensível, temperatura, escoamento total e índice da área foliar. O efeito radiativo do aumento da concentração atmosférica do CO₂ foi determinado pela diferença do resultado dos experimentos FR e F. A significância estatística das anomalias foi avaliada utilizando-se o teste t de Student, usando o nível de confiança de 95%.

3.4.1- Efeito radiativo do aumento do CO₂ na precipitação

A Figura 20 mostra as mudanças ocorridas na precipitação, nos trimestres mais e menos chuvosos, em decorrência do efeito radiativo proporcionado pelo aumento da concentração do CO₂ na atmosfera. Na estação chuvosa (FMA) ocorrem anomalias positivas ao oeste e sudoeste da bacia Amazônica. Já na estação seca (JJA) apresentam-se anomalias negativas no centro da bacia Amazônica, significando que o aumento do CO₂, durante esta estação, reduz em 1 mm.dia⁻¹ a precipitação em uma pequena parte da bacia. Portanto, neste trabalho, o efeito radiativo no que se refere às mudanças ocorridas na precipitação difere espacial e sazonalmente, quando se analisam as estações chuvosa e seca da bacia separadamente. Mas, essas mudanças não se refletem na variação sazonal da precipitação, uma vez que não se observam resultados significantes ao longo do ano (Figura 26-c). Apenas foi verificado um pequeno aumento de 0,02 mm.dia⁻¹ (0,32%) na média anual sobre a bacia Amazônica. Estes resultados apresentam-se subestimados em relação a outros estudos anteriores, em que foram observados aumentos mais expressivos na precipitação, em decorrência do aumento da concentração do CO₂. As análises de Costa

e Foley (2000), por exemplo, constataram um aumento de $0,2 \text{ mm.dia}^{-1}$ (3,4%) na precipitação da bacia Amazônica. Já Bounouar et al. (1999) utilizaram um período de 30 anos no modelo de circulação geral da atmosfera CSU acoplado ao esquema de superfície SiB2, a fim de avaliar o efeito da duplicação da concentração do CO_2 atmosférico no clima, obtendo um aumento na precipitação de $0,22 \text{ mm.dia}^{-1}$ (5%) sobre a região Tropical ($15^\circ\text{S} - 15^\circ\text{N}$).

3.4.2 - Efeito radiativo do aumento do CO_2 na evapotranspiração

Da mesma forma que na precipitação, na estação seca (Figura 21) observa-se uma redução na evapotranspiração no centro da bacia Amazônica, mas não foi observada nenhuma anomalia significativa na estação chuvosa. As variações sazonais da evapotranspiração não mostram muitas diferenças no decorrer do ano (Figura 27-a), uma vez que não se verifica nenhuma mudança na variação da sua média anual em relação à simulação de controle (Tabela 11). No experimento de Costa e Foley (2000), o efeito radiativo tendeu a aumentar a evapotranspiração, por promover mais energia a este processo. Levis et al. (2000) também encontraram que a evapotranspiração aumentou ($0,17 \text{ mm.dia}^{-1}$) nos Trópicos continentais ($15^\circ\text{S} - 15^\circ\text{N}$), justificado pelo aquecimento provocado pelo aumento da concentração do CO_2 na atmosfera.

3.4.3 - Efeito radiativo do aumento do CO_2 no fluxo de calor latente e calor sensível

Observa-se na maior parte da bacia Amazônica, na estação chuvosa, um aumento do fluxo de calor latente, enquanto na estação seca este fluxo diminui na maior parte da bacia Amazônica (Figura 22). Como pode ser mostrada na Figura 26-a, a variação sazonal do fluxo do calor latente não apresenta muita significância, acompanhando a evapotranspiração. O modelo climático global UKMO-HadCM3, analisado por Li et al.

(2006), apresentou reduções no fluxo de calor latente durante todo ano sobre a bacia Amazônica para o século XXI. Por outro lado, Li et al. (2006) apresentam resultados do modelo GISS-ER sobre a bacia Amazônica, os quais houve acréscimos no fluxo de calor latente no decorrer do ano.

O efeito radiativo resulta em um aumento na energia disponível na superfície terrestre, aumentando assim a média anual do fluxo de calor sensível (Tabela 11) sobre bacia Amazônica. Observa-se na Figura 26-b, que a variação sazonal do fluxo de calor sensível aumenta na maioria dos meses do ano. Na estação chuvosa observam-se tanto anomalias negativas como positivas, entretanto, na estação seca, notam-se altos valores de anomalias positivas sobre a bacia Amazônica (Figura 23), provocando mudanças na temperatura.

3.4.4 - Efeito radiativo do aumento do CO₂ na temperatura

Conforme o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC 2001), considerando os efeitos naturais e antropogênicos, é esperado que a temperatura global aumente, nos próximos 100 anos, entre 1,4 e 5,8°C, tendo a média de 1990 como referência. As concentrações do CO₂ na atmosfera aumentaram aproximadamente de 285 ppm em 1750 para 366 ppm atualmente, o que representa um aumento de aproximadamente 28% desde o começo da Revolução Industrial até os dias atuais. Neste estudo, observa-se um aumento na temperatura variando até 0,6°C sobre a bacia Amazônica, tanto na estação chuvosa como na estação seca (Figura 24). A variação da temperatura na maioria dos meses do ano é crescente, menos para os meses de maio e outubro (Figura 26-d). Levis et al. (2000) exploraram as interações entre a vegetação terrestre e a atmosfera devido ao efeito da duplicação da concentração de CO₂, utilizando o modelo global GENESIS acoplado ao IBIS, e concluíram que na região tropical (15°S –

15°N) o efeito radiativo aumentaria a temperatura nos continentes em cerca de 2,1°C, o que intensificaria o ciclo hidrológico.

3.4.5 - Efeito radiativo do aumento do CO₂ no escoamento total

O escoamento total, na maior parte da bacia Amazônia, apresenta aumento na estação chuvosa. Na estação seca verifica-se um pequeno aumento no Nordeste da bacia Amazônica (Figura 25). A média anual do escoamento total aumenta, aproximadamente, 0,02 mm.dia⁻¹ em relação aos resultados da simulação de controle (Tabela 11). Na Figura 27-b tem-se a variação sazonal do escoamento total, onde verifica-se uma maior intensidade no mês de março.

3.4.6 - Efeito radiativo do aumento do CO₂ no índice da área foliar

O IAF desempenha um papel importante em estudos global climático e ciclos de carbono. Observa-se nas Figuras 28 e 29 no IAF, tanto das árvores como das vegetações rasteira, que os aumentos são mais significativos na estação seca do que na estação chuvosa. A variação sazonal do IAF da vegetação rasteira, devido ao aumento da concentração de CO₂, apresenta acréscimos durante todo ano (Figura 30-b), enquanto que para árvores seus valores são mais intensos apenas durante os meses de agosto e setembro, como pode ser observado na Figura 30-a. Essa diferença fenológica está associada à maior eficiência de uso da água pelas árvores em cenários de CO₂ elevado, o que reduz o stress hídrico no período seco.

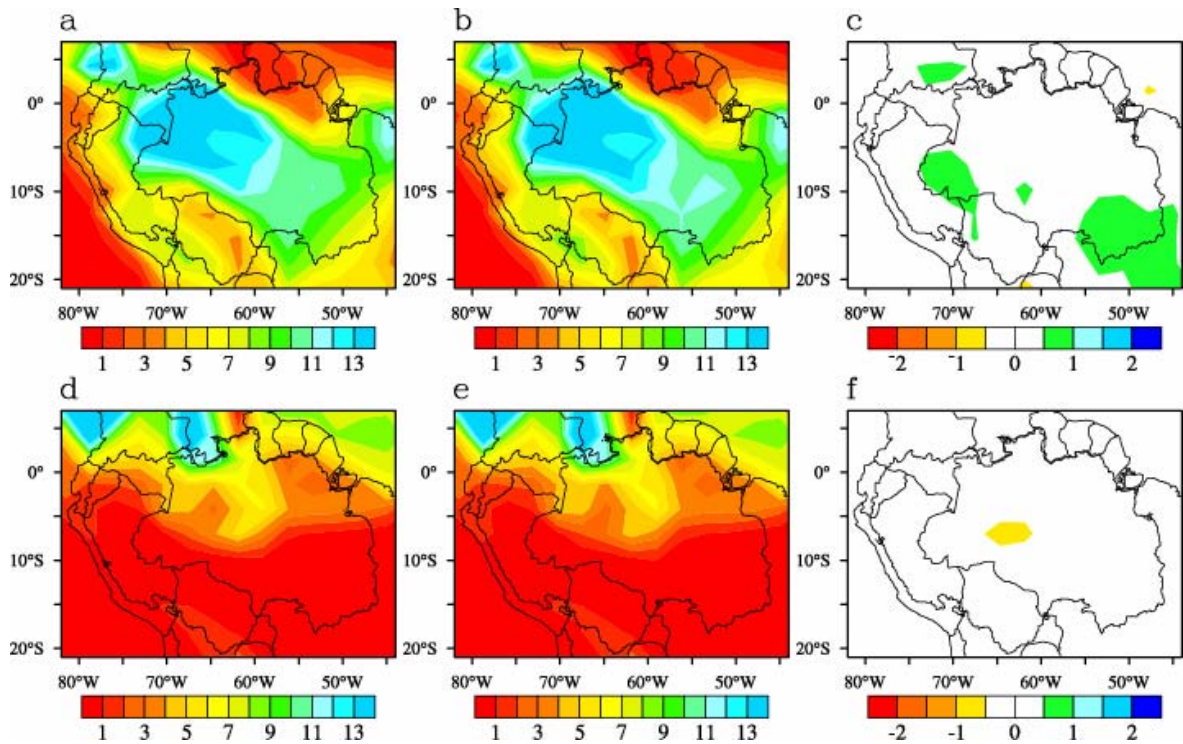


Figura 20: Variação média trimestral da precipitação ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (FR) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FR - F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (FR) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FR - F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e FR são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

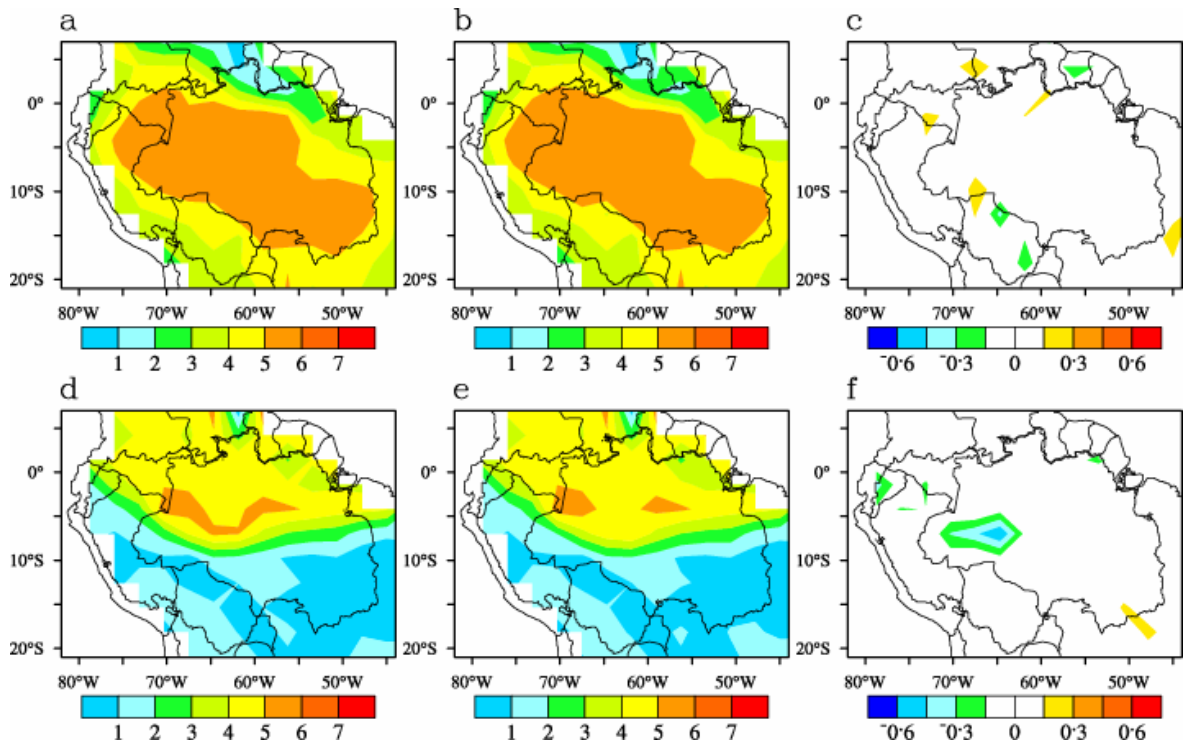


Figura 21: Variação média trimestral da evapotranspiração ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (FR) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FR - F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (FR) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FR - F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e FR são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

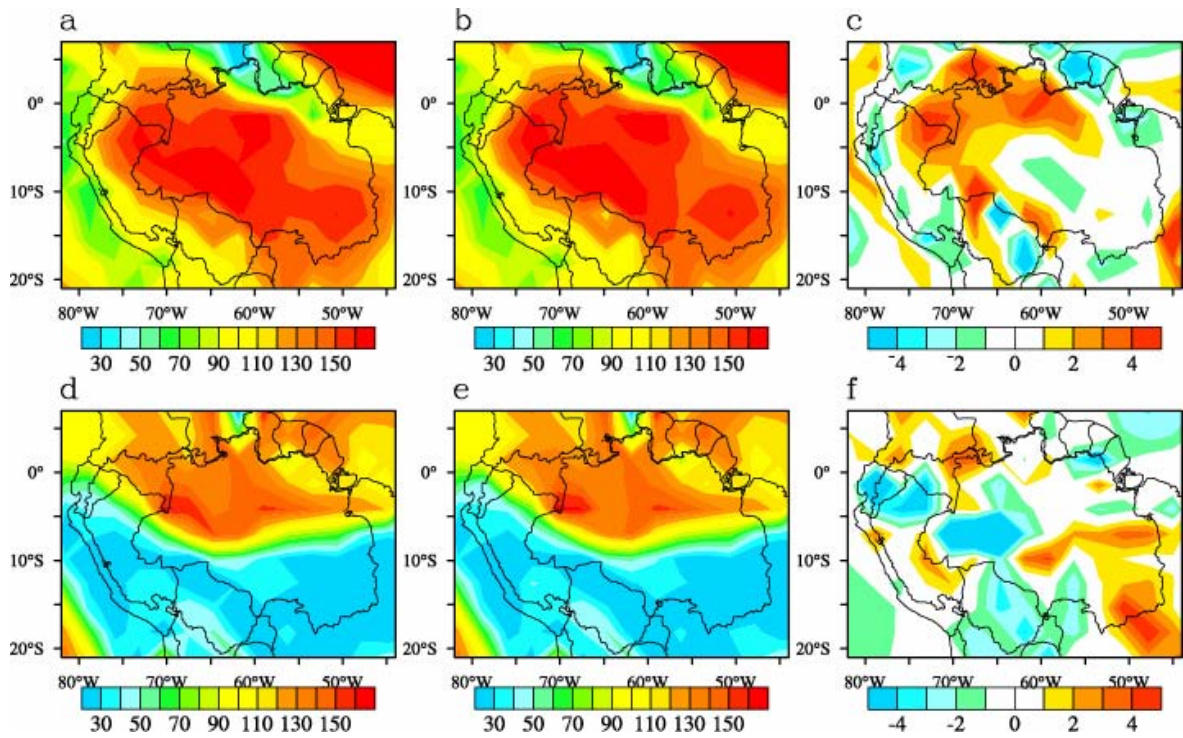


Figura 22: Variação média trimestral do fluxo do calor latente ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (FR) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FR – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (FR) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FR – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e FR são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

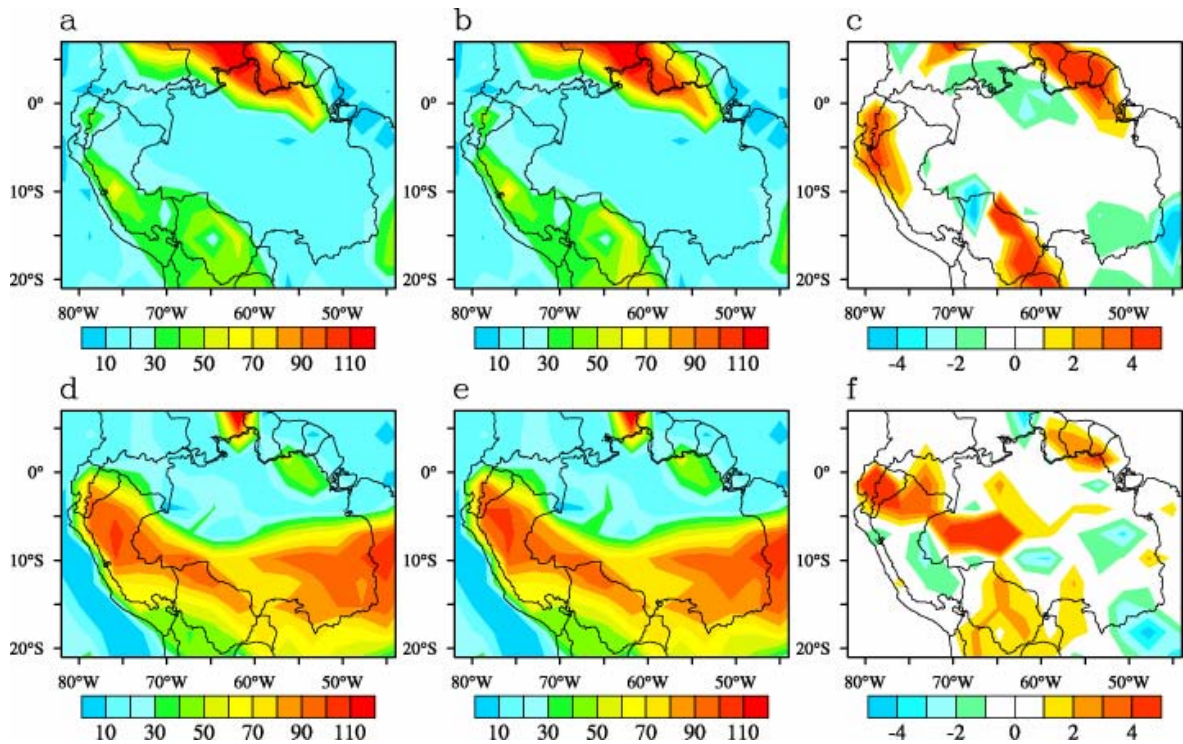


Figura 23: Variação média trimestral do fluxo do calor sensível (W.m^{-2}) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (FR) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FR – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (FR) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FR – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e FR são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

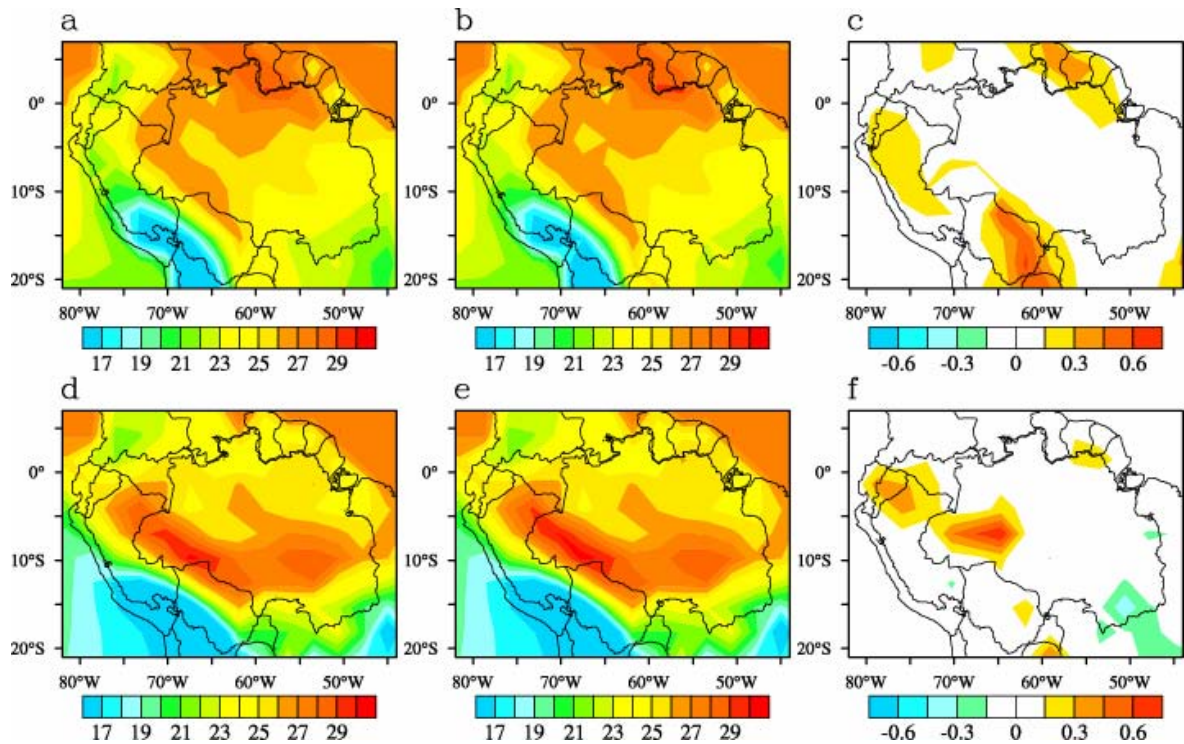


Figura 24: Variação média trimestral da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (FR) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FR – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (FR) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FR – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e D são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

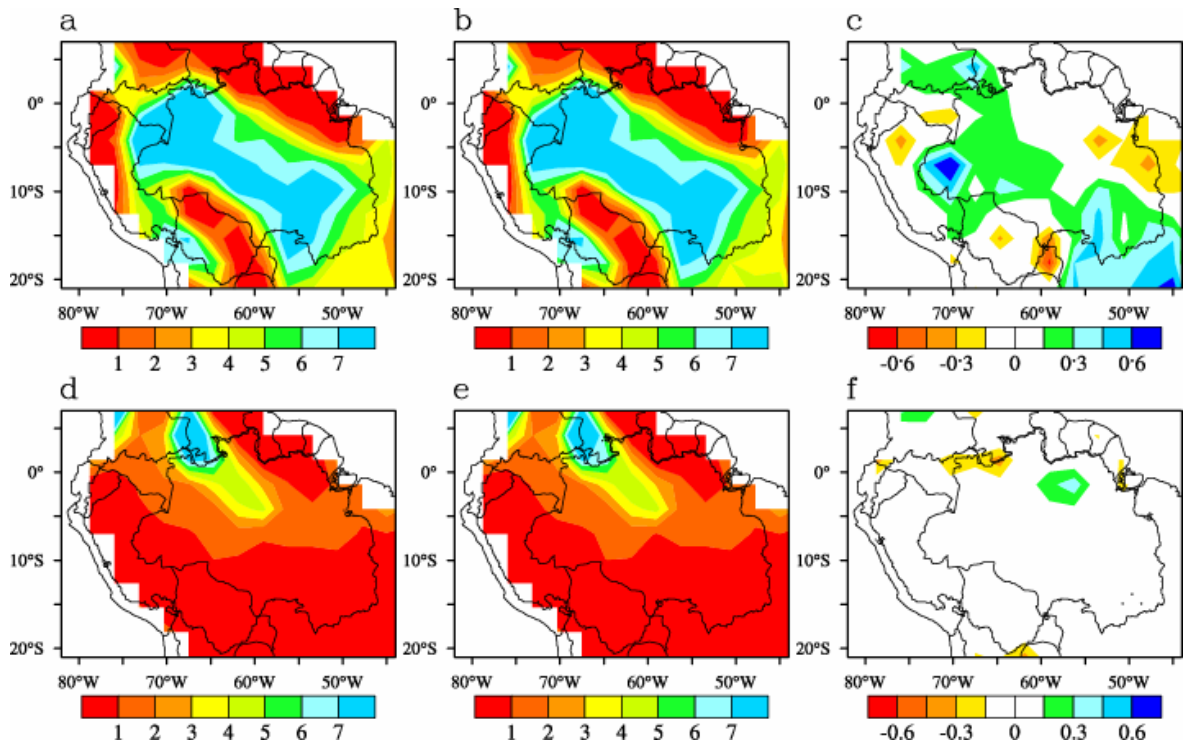


Figura 25: Variação média trimestral do escoamento total ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (FR) em FMA, (c) diferença entre as simulações ($\text{FR} - \text{F}$) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (FR) em JJA e (f) diferença entre as simulações ($\text{FR} - \text{F}$) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e FR são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

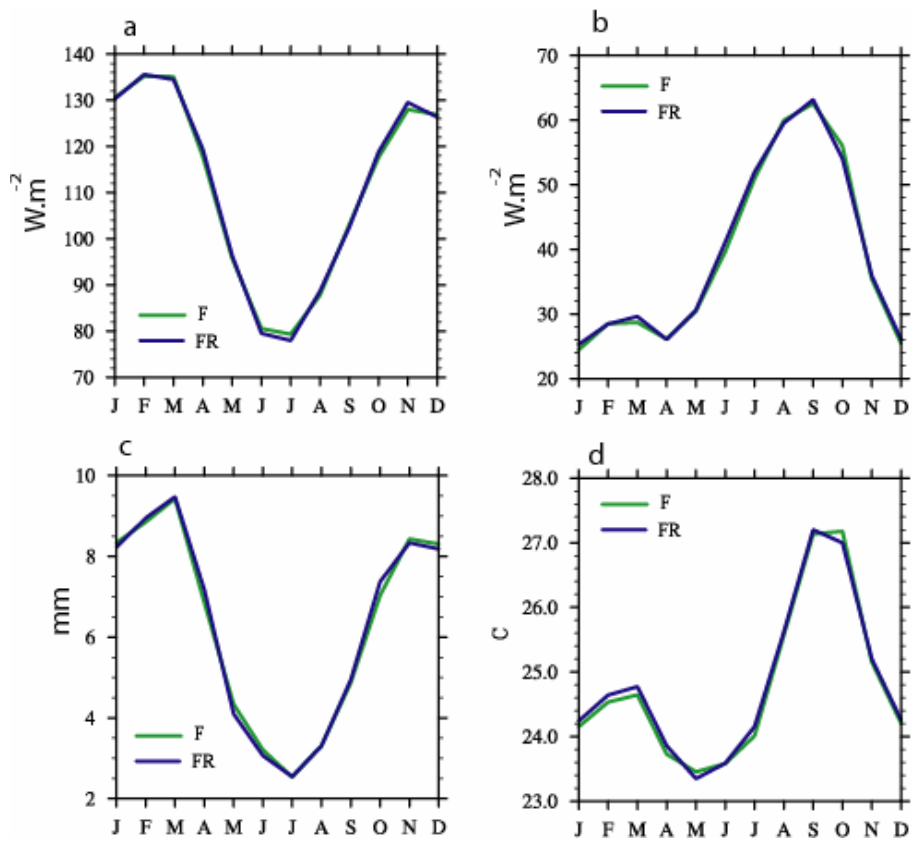


Figura 26: Variação sazonal do (a) fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$), (b) fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$), (c) precipitação ($mm.dia^{-1}$) e (d) temperatura ($^{\circ}C$) na bacia Amazônica.

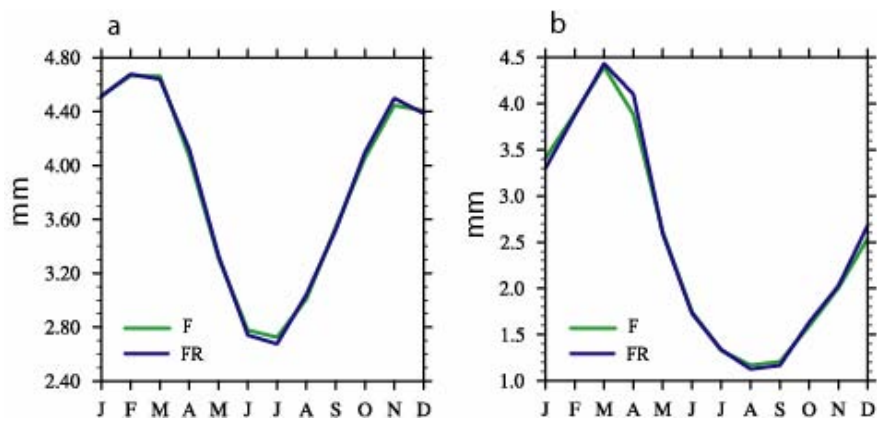


Figura 27: Variação sazonal da (a) evapotranspiração ($mm.dia^{-1}$), (b) escoamento total ($mm.dia^{-1}$) na bacia amazônica.

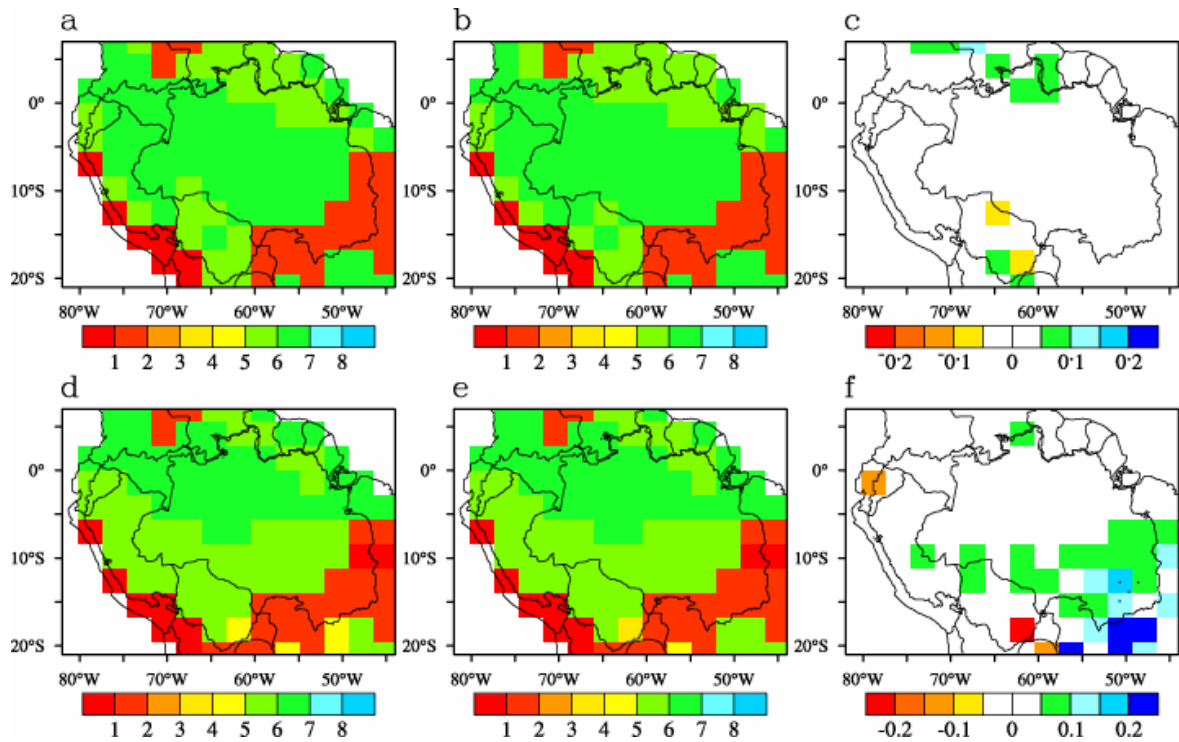


Figura 28: Variação média trimestral do índice da área foliar das árvores ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (FR) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FR – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (FR) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FR – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e FR são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

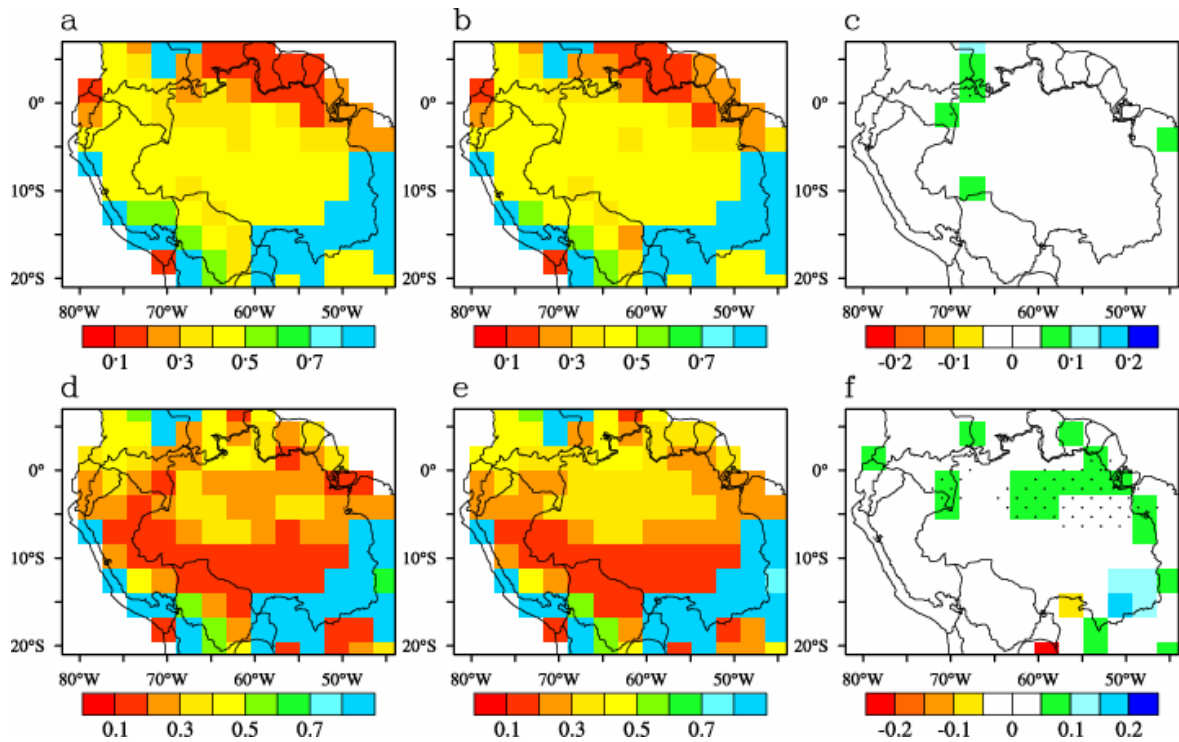


Figura 29: Variação média trimestral do índice da área foliar da vegetação rasteira ($m^2 \cdot m^{-2}$) para (a) valores da simulação (F) em FMA, (b) valores da simulação (FR) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FR – F) em FMA, (d) valores da simulação (F) em JJA, (e) valores da simulação (FR) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FR – F) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores F e FR são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

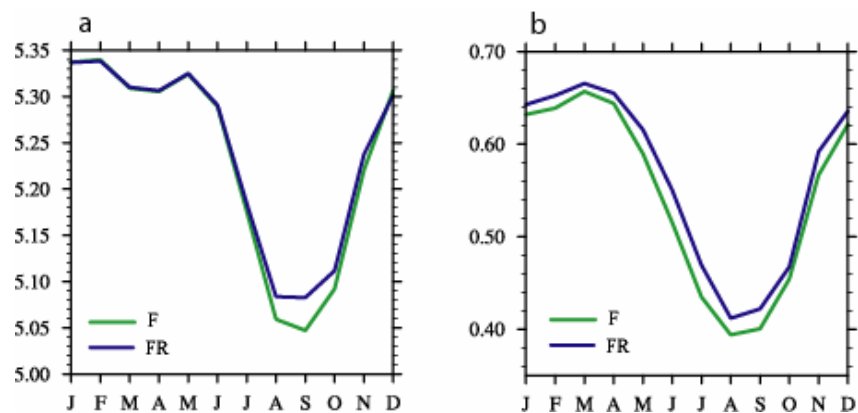


Figura 30: Variação sazonal do (a) índice da área foliar das árvores ($m^2 \cdot m^{-2}$), (b) índice da área foliar da vegetação rasteira ($m^2 \cdot m^{-2}$) na bacia amazônica.

3.5 EFEITO ECOLÓGICO DO AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE CO₂ NO CLIMA REGIONAL

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos com o tratamento do efeito ecológico do aumento da concentração do CO₂ (FRE-FR). Este efeito se manifesta através da mudança na fisiologia vegetal, reduzindo a condutância estomática e aumentando a eficiência fotossintética, conseqüentemente aumentando o índice de área foliar e a biomassa da vegetação. A redução na condutância estomática e a mudança no IAF causam uma mudança na partição do saldo de radiação entre o calor sensível e latente, causando modificações no aquecimento da atmosfera, na circulação atmosférica e no clima. Este efeito é determinado pela diferença do resultado dos experimentos FRE e FR. A significância estatística das anomalias foi avaliada utilizando-se o teste t de Student, usando o nível de confiança de 95%.

3.5.1- Efeito ecológico do aumento do CO₂ na precipitação

Pela Figura 35-c pode-se perceber que apenas os meses de janeiro, fevereiro e março apresentam reduções na precipitação, quando confrontados com os resultados do tratamento FR. Essas reduções são suficientes para diminuir a média anual da precipitação em apenas 0,13 mm.dia⁻¹ (2%) (Tabela 11). As mudanças mais significativas da precipitação estão na estação chuvosa (FMA), denotados por anomalias negativas abaixo de 2 mm.dia⁻¹, que se apresentam ao norte da bacia Amazônica. Na estação seca (JJA) a precipitação apresenta pequena redução, também sobre o norte da bacia (Figura 31). No experimento realizado por Bounoua et al. (1999) também foi observado uma diminuição na precipitação, gerada pelo modelo atmosfera-biosfera CSU GCM-SiB2. Levis et al. (2000) realizaram simulações numéricas a fim de avaliar a resposta do clima frente aos efeitos fisiológicos da duplicação da concentração de CO₂, quando mostraram aumento na

fotossíntese e redução na condutância estomática, na transpiração e na precipitação, enfraquecendo o ciclo hidrológico nos trópicos.

3.5.2 - Efeito ecológico do aumento do CO₂ nos fluxos de calor latente e calor sensível

O efeito ecológico fez o fluxo de calor latente diminuir na estação chuvosa, devido ao efeito fisiológico do CO₂. Observa-se no fluxo de calor latente (Figura 32) um acréscimo significativo ao sul da bacia Amazônica na estação seca. Reduções no comportamento do fluxo do calor latente na variação sazonal são observadas nos meses de novembro a maio, com um decréscimo de 1,47 W.m⁻² na média anual (Figura 35-a).

Para variação sazonal do fluxo de calor sensível, observam-se reduções durante todo ano, com reduções mais significativas nos meses de agosto e setembro, conforme mostrada na Figura 35-b. A média anual do fluxo de calor sensível diminuiu 8,6% com o efeito ecológico na bacia Amazônica. No período chuvoso, o fluxo de calor sensível apresenta em toda extensão da bacia Amazônica uma distribuição de anomalias positivas e negativas. Já no período seco observam-se mudanças mais significativas apenas nas anomalias negativas, em grande parte da bacia (Figura 33).

3.5.3 - Efeito ecológico do aumento do CO₂ na temperatura

A média anual da temperatura apresenta um acréscimo de 1,1°C (4,5%), fazendo com que a temperatura passe de 25,2°C, na simulação FR, para 26,3°C, no tratamento FRE. A influência do efeito ecológico nas projeções da mudança no clima para o século XXI na Amazônia apresentado por Cox et al. (2004), utilizando MCGA do ciclo carbono-clima (HadCM3LC), mostrou um acréscimo de 8,3°C para o ano de 2090. Na Figura 34, observa-se que a temperatura no período FMA apresenta um acréscimo significativo, cerca de 2°C sobre a bacia Amazônica. No período JJA a temperatura do efeito ecológico com o

aumento do CO₂ (FRE) também apresenta resultados maiores do que o efeito radiativo (FR), com anomalias positivas superiores a 2°C sobre o centro e noroeste da bacia Amazônica. A variação sazonal da temperatura, como era de se esperar, aumentou durante todo ano (Figura 35-d). O aumento da temperatura influencia nas trocas gasosas das plantas, aumentando diretamente as taxas de respiração e colaborando para redução da assimilação líquida do CO₂ (Tabela 11). Chambers et al. (2004) avaliaram a taxa respiratória das folhas na floresta Amazônica, e comprovaram que aumentos na respiração estão relacionados com aumentos da temperatura.

3.5.4 - Efeito ecológico do aumento do CO₂ na evapotranspiração

Na estação chuvosa, apresenta-se redução na evapotranspiração na maior parte da bacia Amazônica, enquanto que foi observado um aumento à oeste da bacia Amazônica na estação seca (Figura 36). Na variação sazonal da evapotranspiração observam-se reduções na estação chuvosa e aumentos na estação seca (Figura 38-a). Costa e Foley (2000) estudaram o efeito fisiológico da duplicação da concentração de CO₂ no clima da Amazônia e encontraram uma redução na evapotranspiração da ordem de 0,1 mm.dia⁻¹ (2,6%). Com o mesmo objetivos Sellers et al. (1996) usaram o acoplamento do modelo atmosfera-biosfera CSU GCM-SiB2, quando encontraram, para a região equatorial (14,4°S – 14,4°N), uma diminuição de 4% na evapotranspiração. Cox et al. (2004) encontraram também reduções ainda maiores na evapotranspiração, entorno 1,65 mm.dia⁻¹ para o ano de 2090.

3.5.5 - Efeito ecológico do aumento do CO₂ no escoamento total

Na Figura 37 observa-se na estação seca, uma pequena anomalia negativa no escoamento total, situada ao norte da bacia Amazônica, e com valores mais intensos na

estação chuvosa. Essas reduções estão relacionadas à diminuição da precipitação neste mesmo local da bacia. A Figura 38-b apresenta a variação sazonal do escoamento total. Reduções mais intensas no escoamento total são observadas durante o período de fevereiro a abril, não apresentando nenhuma mudanças significante no restante do ano. Por outro lado, quando Costa e Foley (2000) utilizaram o modelo global GENESIS acoplado ao Integrated Biosphere Simulator (IBIS), para simular a condutância estomática em função da taxa da fotossíntese, da duplicação da concentração do CO₂ na camada limite foliar, e da umidade atmosférica, encontraram na variação sazonal do escoamento total um aumento durante o ano, exceto nos meses de novembro e outubro.

3.5.6 - Efeito ecológico do aumento do CO₂ no índice da área foliar

A estrutura e distribuição de uma cobertura vegetal têm uma relação direta com as condições climáticas regionais. O IAF é um dos resultados destas condições, que tem importância pelo fato de influenciar nas trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera. Na Figura 39 observa-se que o índice da área foliar das árvores aumenta tanto na estação chuvosa como na estação seca, provocando reduções no índice da área foliar da vegetação rasteira (Figura 40) e aumentando em 0,61 kg C.m⁻² a biomassa da bacia Amazônica. Este aumento na concentração do CO₂ da atmosfera alterou a estrutura e a dinâmica do ecossistema Amazônica. Cox et al. (2001) realizaram simulações a fim de avaliar o aumento do CO₂ na dinâmica da vegetação na região tropical, prevista para 2100. Os resultados mostraram um início de perda da biomassa amazônica em 2030, e até 2100 a concentração atmosférica de CO₂ aumentará aceleradamente, enquanto o armazenamento do carbono terrestre diminuirá em aproximadamente, 170 Pg C.

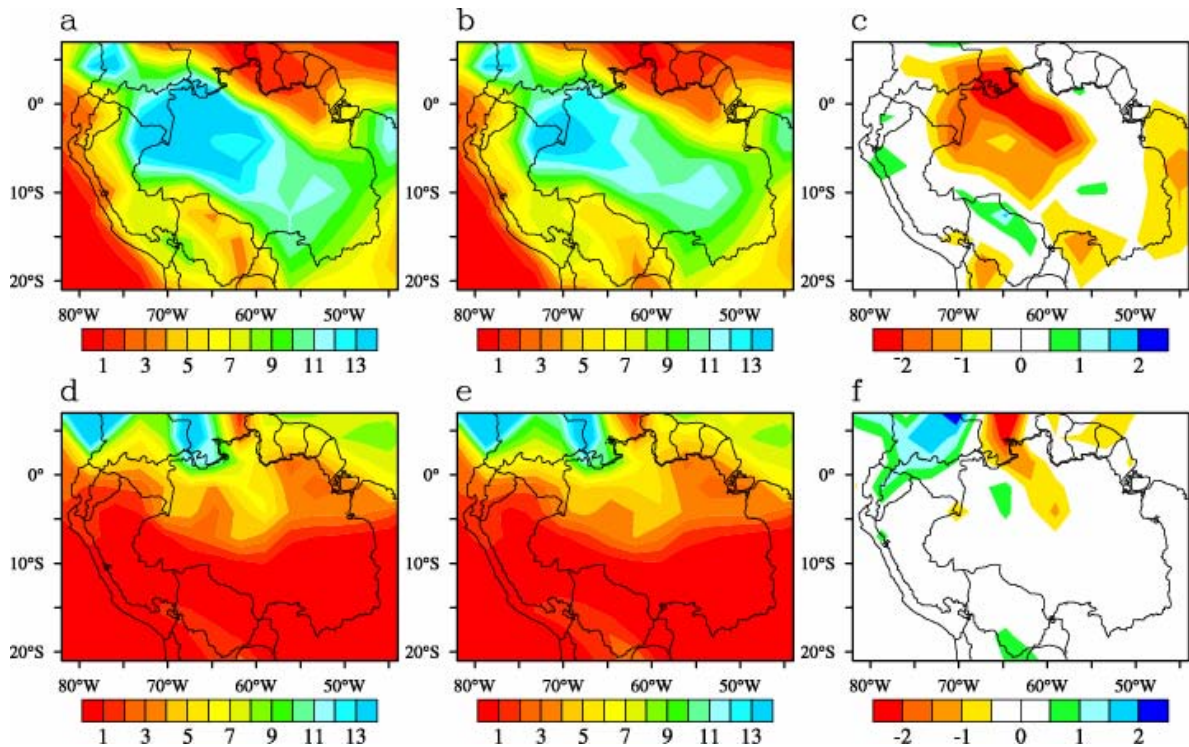


Figura 31: Variação média trimestral da precipitação ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) para (a) valores da simulação (FR) em FMA, (b) valores da simulação (FRE) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FRE - FR) em FMA, (d) valores da simulação (FR) em JJA, (e) valores da simulação (FRE) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FRE - FR) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FR e FRE são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

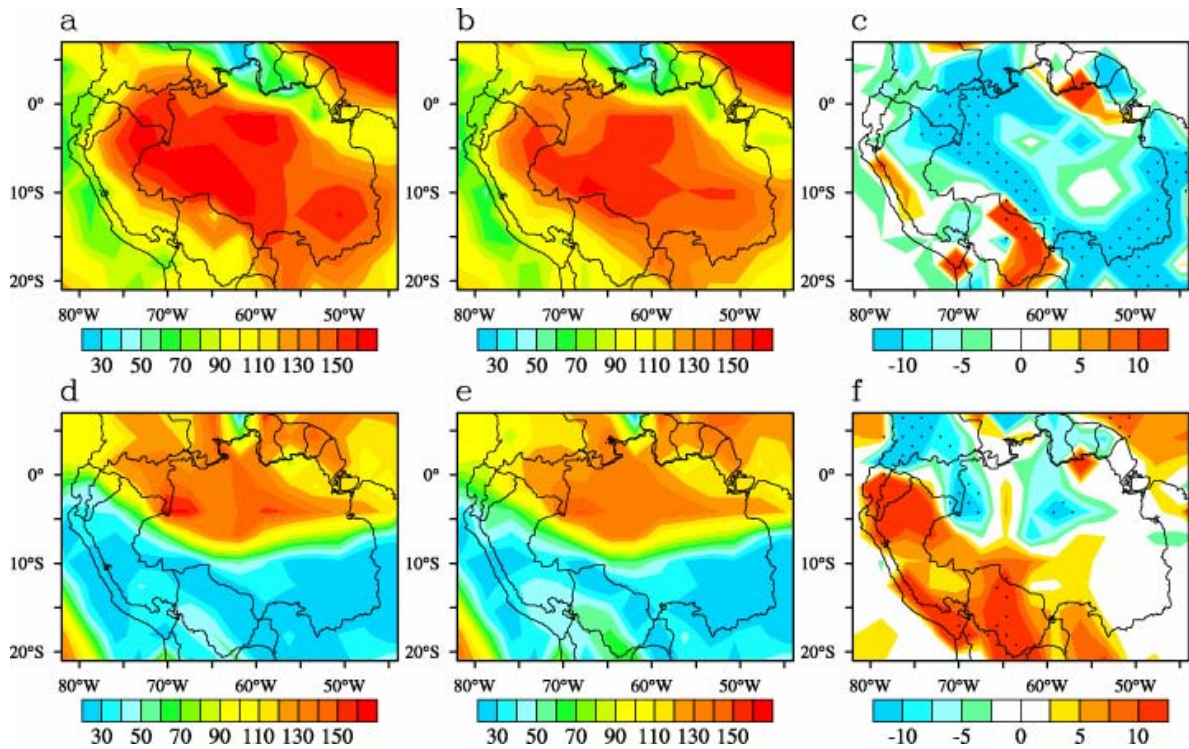


Figura 32: Variação média trimestral do fluxo de calor latente ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) para (a) valores da simulação (FR) em FMA, (b) valores da simulação (FRE) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FRE – FR) em FMA, (d) valores da simulação (FR) em JJA, (e) valores da simulação (FRE) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FRE – FR) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FR e FRE são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

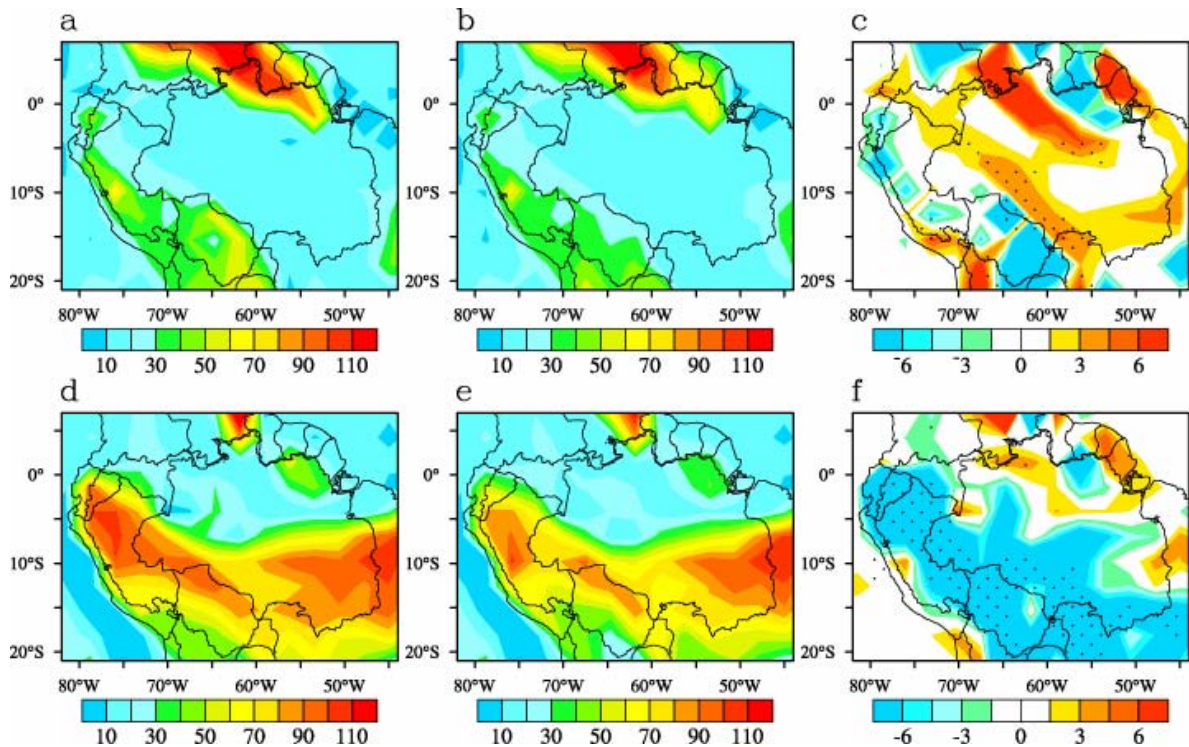


Figura 33: Variação média trimestral do fluxo de calor sensível ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) para (a) valores da simulação (FR) em FMA, (b) valores da simulação (FRE) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FRE – FR) em FMA, (d) valores da simulação (FR) em JJA, (e) valores da simulação (FRE) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FRE – FR) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FR e FRE são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

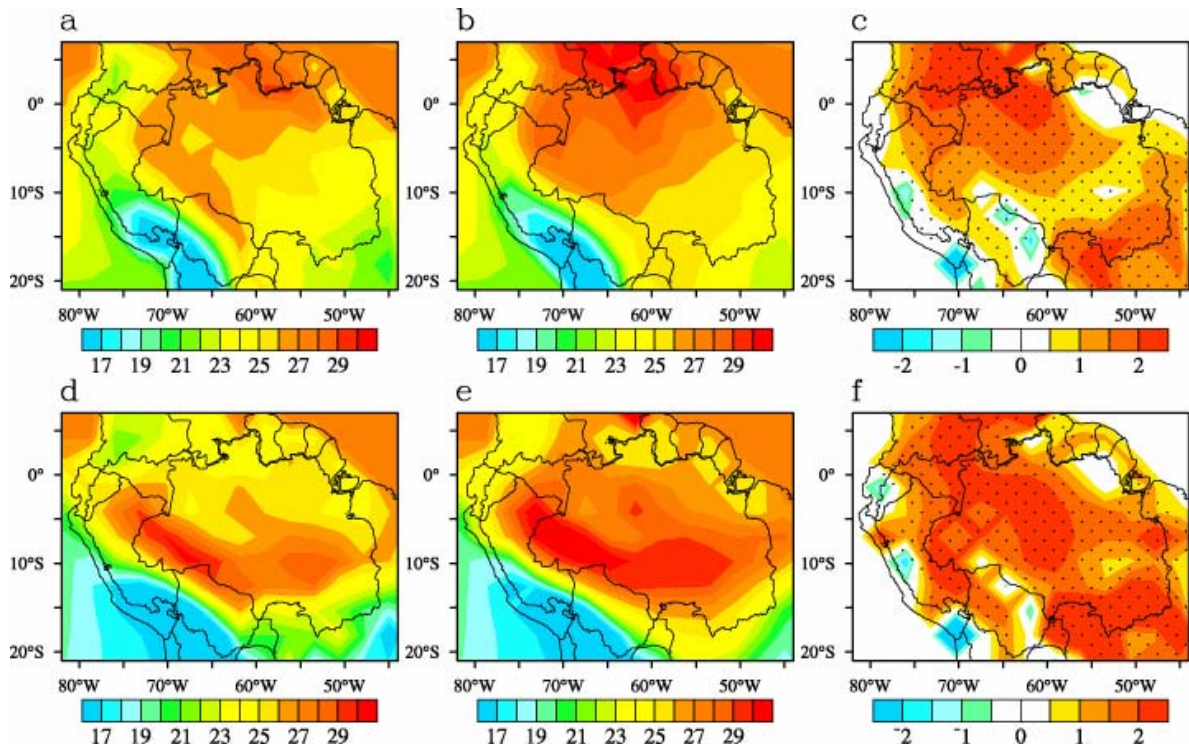


Figura 34: Variação média trimestral da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para (a) valores da simulação (FR) em FMA, (b) valores da simulação (FRE) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FRE – FR) em FMA, (d) valores da simulação (FR) em JJA, (e) valores da simulação (FRE) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FRE – FR) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FR e FRE são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

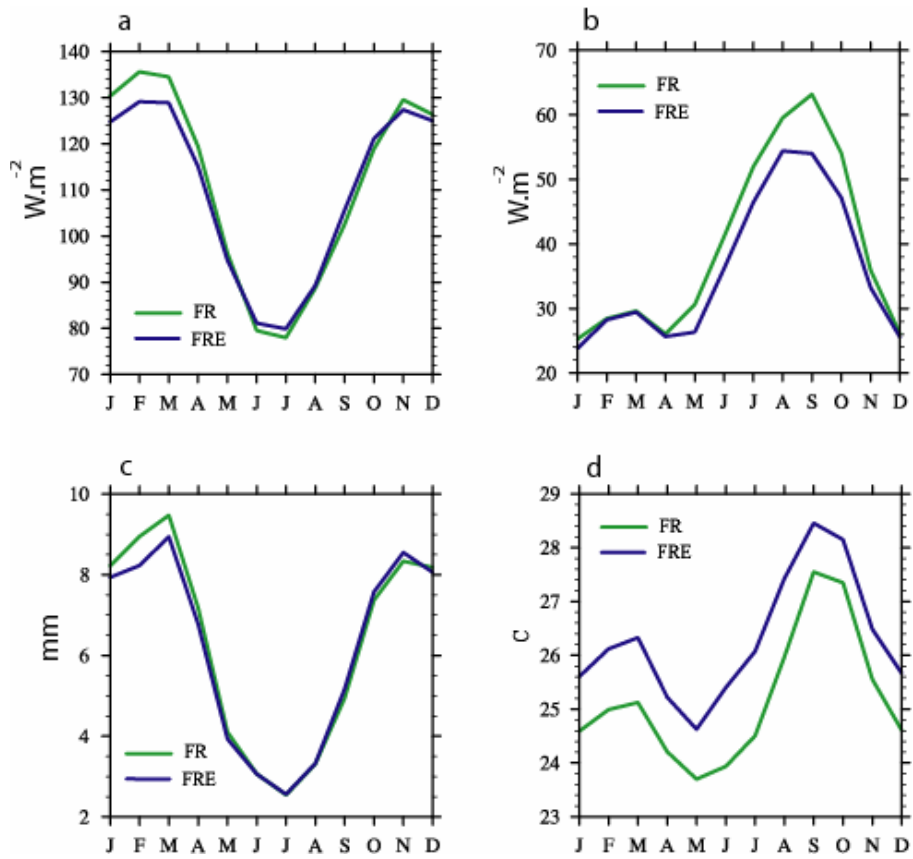


Figura 35: Variação sazonal do (a) fluxo do calor latente ($W.m^{-2}$), (b) fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$), (c) precipitação ($mm.dia^{-1}$) e (d) temperatura ($^{\circ}C$) na bacia Amazônica.

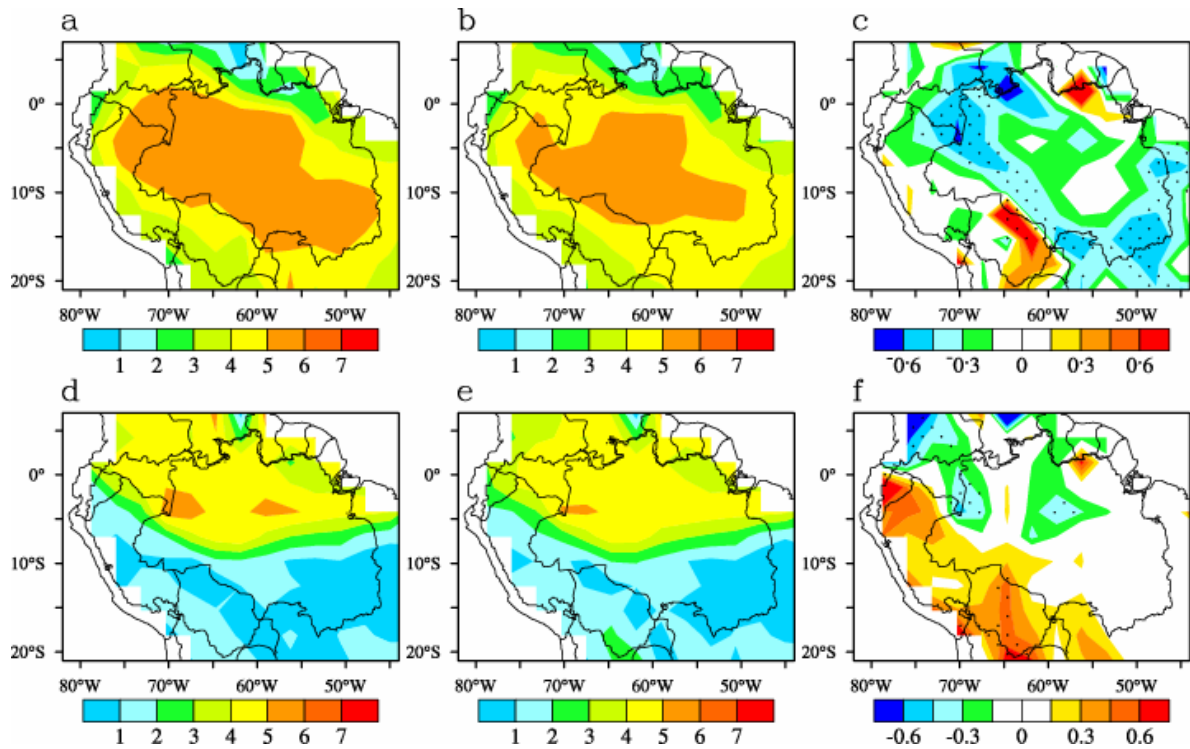


Figura 36: Variação média trimestral da evapotranspiração ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) para (a) valores da simulação (FR) em FMA, (b) valores da simulação (FRE) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FRE – FR) em FMA, (d) valores da simulação (FR) em JJA, (e) valores da simulação (FRE) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FRE – FR) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FR e FRE são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

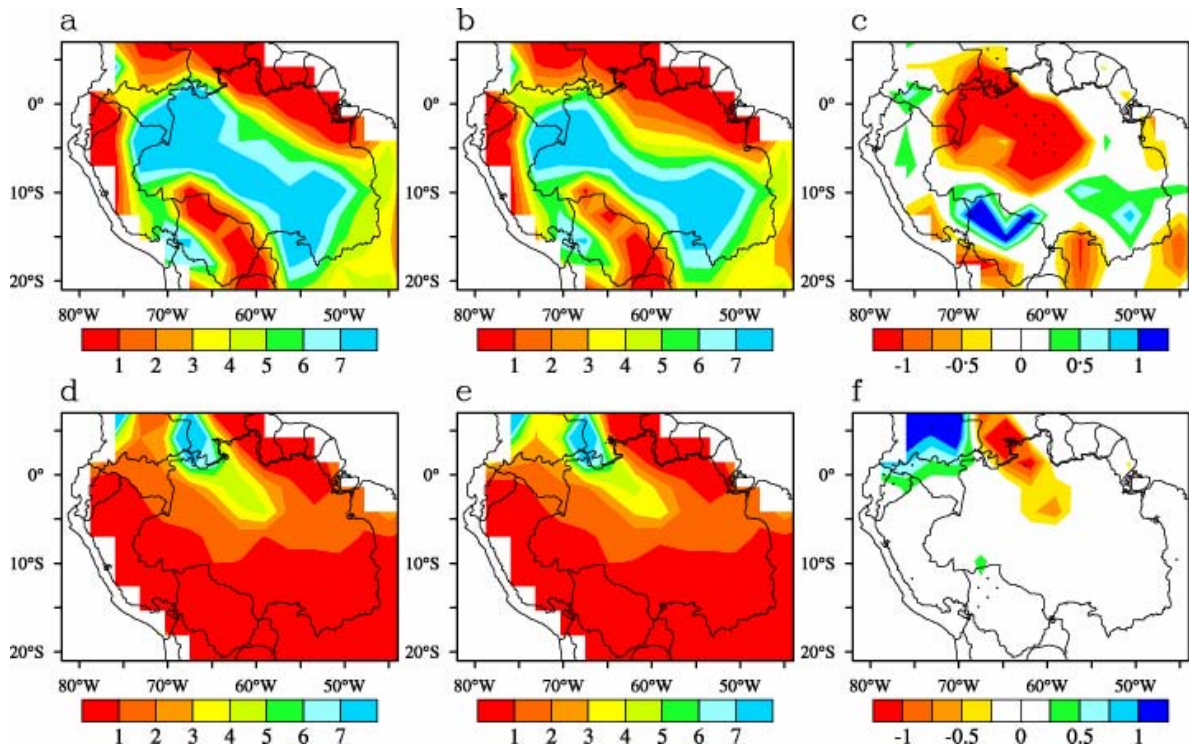


Figura 37: Variação média trimestral da escoamento total (mm.dia^{-1}) para (a) valores da simulação (FR) em FMA, (b) valores da simulação (FRE) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FRE – FR) em FMA, (d) valores da simulação (FR) em JJA, (e) valores da simulação (FRE) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FRE – FR) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FR e FRE são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

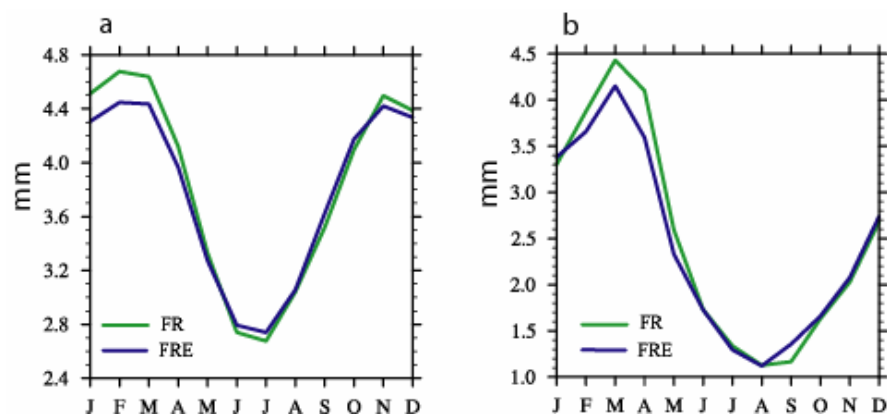


Figura 38: Variação sazonal da (a) evapotranspiração (mm.dia^{-1}), (b) escoamento total (mm.dia^{-1}) na bacia amazônica.

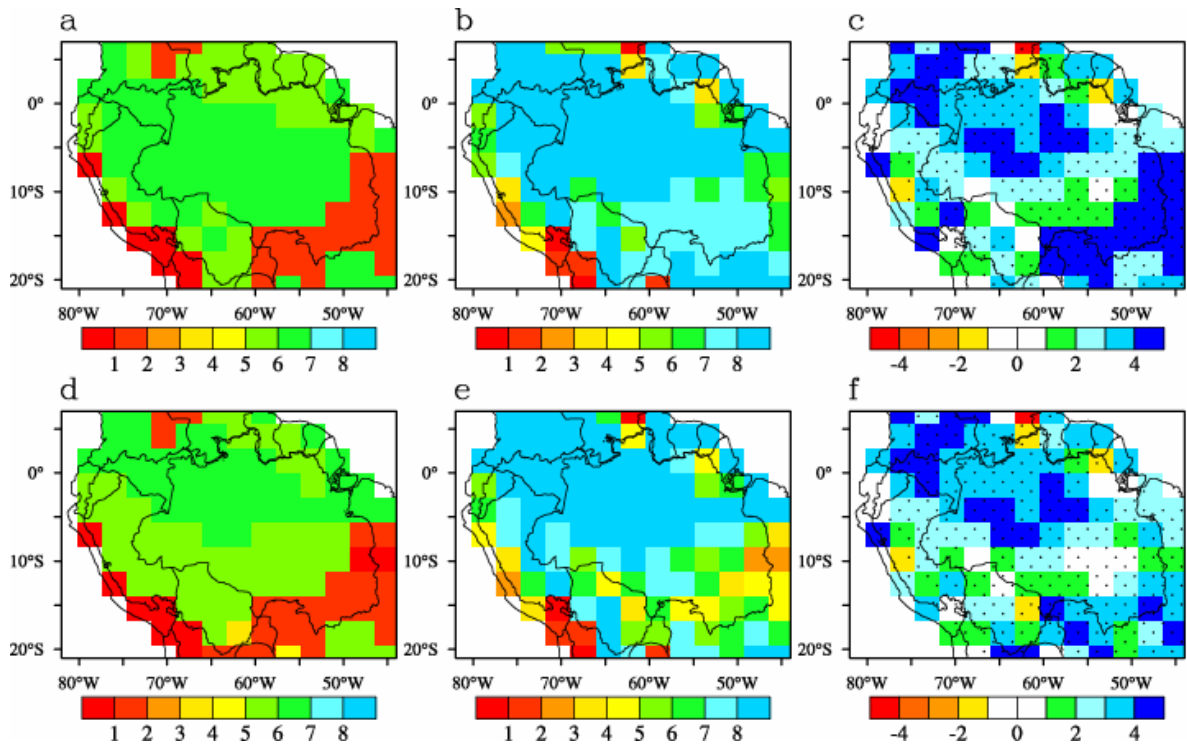


Figura 39: Variação média trimestral do índice da área foliar das árvores ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) para (a) valores da simulação (FR) em FMA, (b) valores da simulação (FRE) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FRE – FR) em FMA, (d) valores da simulação (FR) em JJA, (e) valores da simulação (FRE) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FRE – FR) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FR e FRE são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

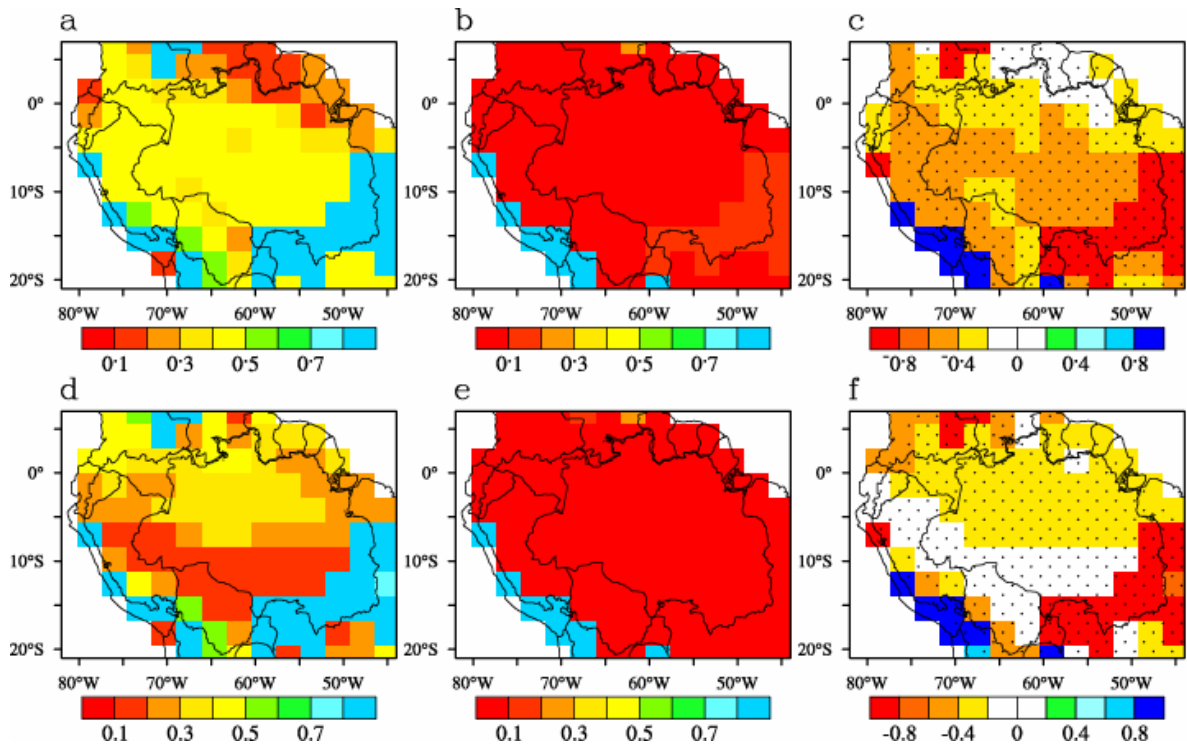


Figura 40: Variação média trimestral do índice da área foliar da vegetação rasteira ($m^2 \cdot m^{-2}$) para (a) valores da simulação (FR) em FMA, (b) valores da simulação (FRE) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FRE – FR) em FMA, (d) valores da simulação (FR) em JJA, (e) valores da simulação (FRE) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FRE – FR) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FR e FRE são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

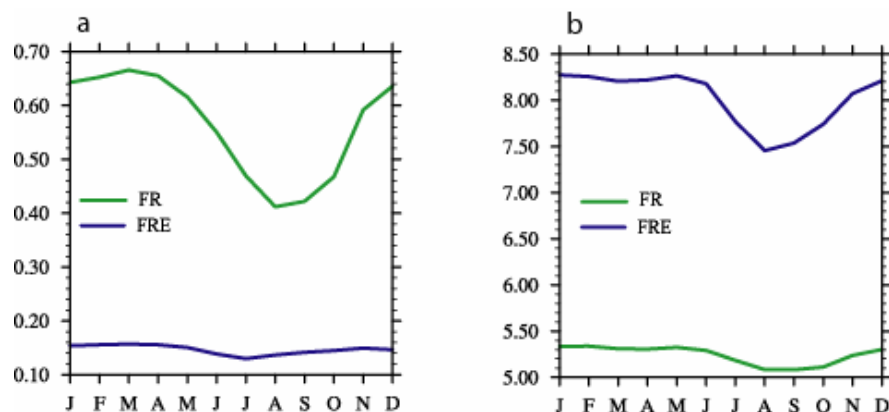


Figura 41: Variação sazonal do (a) índice da área foliar da vegetação rasteira ($m^2 \cdot m^{-2}$) e (b) índice da área foliar das árvores ($m^2 \cdot m^{-2}$), na bacia amazônica.

3.6 EFEITO BIOGEOQUÍMICO DO CRESCIMENTO DA VEGETAÇÃO NO CLIMA REGIONAL, SOB CONDIÇÕES DE FLORESTA E DESMATAMENTO.

Nesta seção apresentam-se os resultados do tratamento do efeito biogeoquímico do aumento da concentração atmosférica do CO₂ no clima, sob condições de floresta total e desmatamento parcial, respectivamente, determinados pela diferença dos resultados dos experimentos FREB-FRE e DREB-DRE. A significância estatística das anomalias foi avaliada utilizando-se o teste t de Student, usando o nível de confiança de 95%.

3.6.1 - Efeito biogeoquímico do crescimento da vegetação na precipitação

Observa-se na Figura 42, um excesso de precipitação superior a 1 mm.dia⁻¹ na estação chuvosa, no setor central da bacia Amazônica sob condições de floresta. Na estação seca a precipitação também aumenta em relação ao tratamento FRE, sendo com uma menor intensidade.

Na estação chuvosa em condições de desmatamento parcial a precipitação mostra tanto anomalias positivas quanto negativas sobre a bacia Amazônica. Já na estação seca observa-se uma redução na precipitação tanto na área parcialmente desmatada quanto na de floresta (Figura 43). Nas Figuras 50-c, 52-c e 52-d, apresentam a variação sazonal da precipitação sob condições de floresta e desmatamento parcial, as quais mostram que não houve mudanças significantes durante o ano.

Betts et al. (2004) realizaram diferentes simulações utilizando a 3^a versão do modelo climático do centro de Hadley acoplado ao esquema de ciclo carbono-clima (HadCM3LC) para avaliar o papel da interação ecossistema-atmosfera na diminuição da precipitação na Amazônia com o aquecimento global. Eles observaram que a redução da precipitação conduziu a um aumento de 20% com impactos dos efeitos biogeofísicos e 95% pela retroalimentação do ciclo do carbono na floresta.

3.6.2 - Efeito biogeoquímico do aumento do CO₂ no fluxo de calor latente

Na estação chuvosa, o fluxo de calor latente apresenta acréscimo no tratamento da floresta, enquanto observa-se, na estação seca, anomalias positiva e negativa, com maior intensidade no centro da Amazônia brasileira (Figura 44). Com o desmatamento parcial observa-se, na estação chuvosa, anomalias negativa do fluxo de calor latente na maior parte da bacia Amazônica. Já na estação seca, o fluxo de calor latente apresenta reduções com maior intensidade na área parcialmente desmatada (Figura 45). Observa-se nas Figuras 50-a e 52-b que a variação sazonal do fluxo de calor latente na bacia amazônica apresenta poucas mudanças durante todo ano, enquanto na área parcialmente desmatada (Figura 52-a) observam-se reduções mais intensas nos meses de julho e agosto (estação seca), afetando as condições termodinâmica e dinâmica da atmosfera sobre a região e conseqüentemente comprometendo a precipitação regional.

3.6.3 - Efeito biogeoquímico do aumento do CO₂ no fluxo de calor sensível

O fluxo de calor sensível sob condições de floresta na estação chuvosa apresenta-se com poucas mudanças. Na estação seca, observa-se a predominância de anomalias negativa do fluxo de calor sensível na maior parte da bacia Amazônica (Figura 46).

A Figura 47 apresenta o resultado do fluxo de calor sensível em condições de desmatamento parcial. Na estação chuvosa observam-se sobre o norte e sul da bacia Amazônica, tanto reduções como acréscimos nos resultados do fluxo de calor sensível, enquanto na área parcialmente desmatada na estação seca, observa-se um aumento de mais 4 W.m^{-2} .

As variações sazonais do fluxo de calor sensível são observadas nas Figuras 50-b, 51-c e 51-d. Em condições de floresta, o fluxo de calor sensível apenas apresenta mudanças durante os meses de agosto e setembro, diminuindo sua média anual. O fluxo de

calor sensível sob condições de desmatamento parcial aumenta consideravelmente de agosto a outubro, tanto na área parcialmente desmatada quanto na bacia Amazônica.

3.6.4 - Efeito biogeoquímico do aumento do CO₂ na temperatura

Os resultados da temperatura mostram reduções sobre a bacia Amazônica tanto sob condições de floresta quanto de desmatamento parcial, sendo a condição de desmatamento parcial com uma maior intensidade. A estação seca apresenta-se com anomalias negativas mais intensas, quando comparada com a estação chuvosa para os dois experimentos (FREB-FRE e DREB-DRE), conforme pode-se observar nas Figuras 48 e 49. O comportamento da temperatura na variação sazonal sob condições de floresta diminui durante todo ano (Figura 50-d). Já, em condições de desmatamento parcial, a temperatura mostra-se com acréscimos na área parcialmente desmatada no mês de outubro (Figura 52-a) e na bacia Amazônica nos meses de setembro e outubro. Nos demais meses do ano tem-se redução na temperatura (Figura 52-b).

3.6.5 - Efeito biogeoquímico do aumento do CO₂ na evapotranspiração

A variação sazonal da evapotranspiração sob condição de floresta não mostra mudanças significantes, apresentando apenas uma pequena redução na estação seca (Figura 57-a). Observa-se na Figura 53, que não tem significância estatística no nível de 95% na bacia Amazônica, apresentando, na maior parte da bacia pequenas, anomalias negativas nas estações chuvosa e seca.

Com o desmatamento parcial, a evapotranspiração mostra-se com anomalias negativas mas intensas na estação chuvosa, quando comparado com a floresta. Na estação seca a evapotranspiração apresenta uma anomalia negativa sobre a área parcialmente desmatada, caracterizando um fluxo de umidade sobre aquela região (Figura 54). As

variações sazonais da evapotranspiração sob condição de desmatamento parcial, referente à área parcialmente desmatada e na bacia Amazônica, são mostradas nas Figuras 58-a e 59-b, respectivamente. Assim como na condição de floresta, a evapotranspiração reduz na estação seca sobre a área parcialmente desmatada, mostrando maior intensidade. Sobre a bacia Amazônica, a evapotranspiração não apresenta mudança na estação seca, observando-se apenas pequenos acréscimos nos meses de dezembro e janeiro.

3.6.6 - Efeito biogeoquímico do aumento do CO₂ no escoamento total

Nas Figuras 55 e 56 observa-se que o escoamento total manteve-se inalterado, na estação seca, tanto em condições de floresta como no desmatamento parcial, em consequência do efeito biogeoquímico. Na estação chuvosa o escoamento total, apresenta-se com anomalia positiva mais intensa ao sul e anomalias negativas a leste da bacia Amazônica sob condições de floresta. Já com o desmatamento parcial, o escoamento total mostrou-se com um aumento também ao sul da bacia. Sobre o resto da bacia principalmente na área parcialmente desmatada observam-se anomalias negativas. Não houve diferenciação na variação sazonal do escoamento total, exceto no mês de janeiro sob condições de floresta (Figura 57) e nos meses de janeiro e fevereiro em condições de desmatamento parcial (Figura 58-c e 58-d).

3.6.7 - Efeito biogeoquímico do aumento do CO₂ no índice da área foliar (IAF)

Os resultados do IAF da vegetação rasteira obtida sob condições de floresta não apresentam mudanças sobre a bacia Amazônica (Figura 59). Com o desmatamento parcial, o IAF da vegetação rasteira aumenta sobre a região desmatada (Figura 60). Analisa-se nas Figuras 61 e 62 o IAF das árvores, que subestimam seus resultados sobre a bacia Amazônica, mostrando valores mais intensos sob condições de desmatamento parcial.

Tanto em condições de floresta como de desmatamento parcial a variação sazonal do IAF da vegetação rasteira superestima-se com o efeito biogeoquímico do aumento da concentração do CO₂, durante todo ano (Figuras 63-a,b e 64 a,b). Já nas Figuras 63-c, 63-d, 64-d e 64-e, observa-se que o IAF das árvores dos tratamentos FREB e DREB são subestimados em relação aos tratamentos FRE e DREB, no decorrer do ano.

As Figuras 63-b, 63-d, 64-c e 64-f apresentam os gráficos do IAF para vegetação rasteira e árvores, sob condições de floresta e desmatamento, durante um período de 15 anos de simulação. Aqui, o comportamento do IAF da vegetação rasteira decresce à medida que o IAF das árvores cresce.

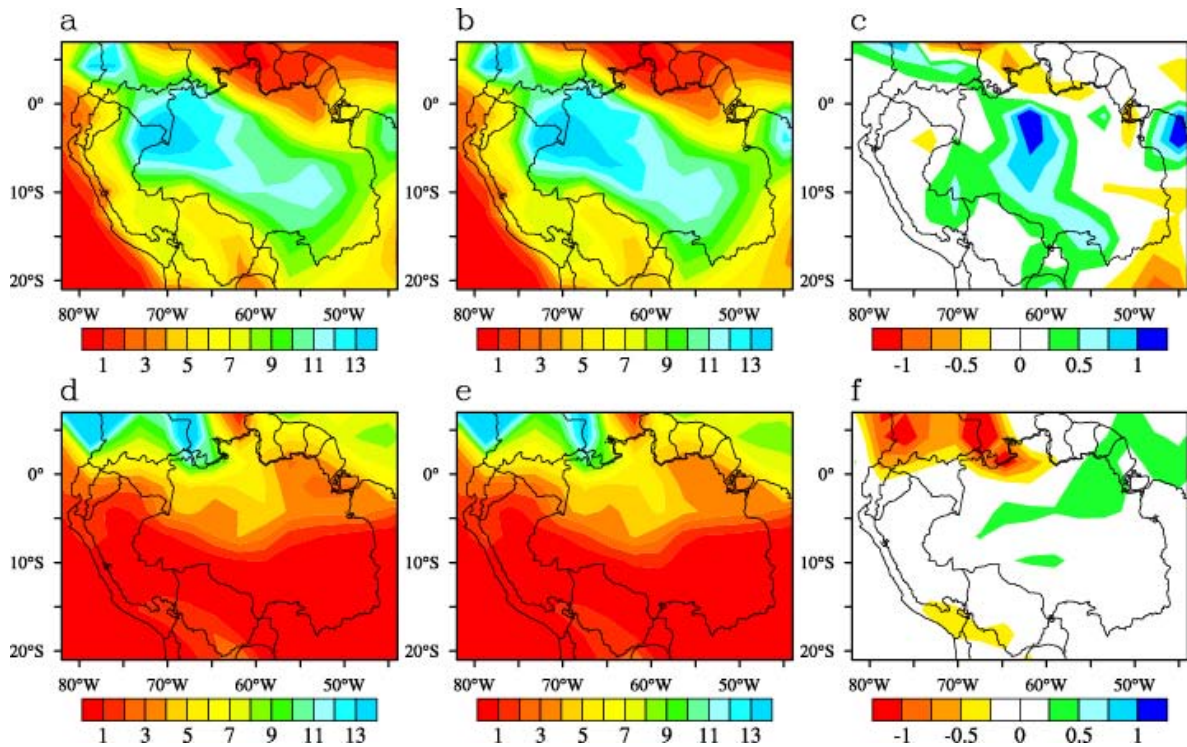


Figura 42: Variação média trimestral da precipitação ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) sob condições de floresta para (a) valores da simulação (FRE) em FMA, (b) valores da simulação (FREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em FMA, (d) valores da simulação (FRE) em JJA, (e) valores da simulação (FREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FRE e FREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

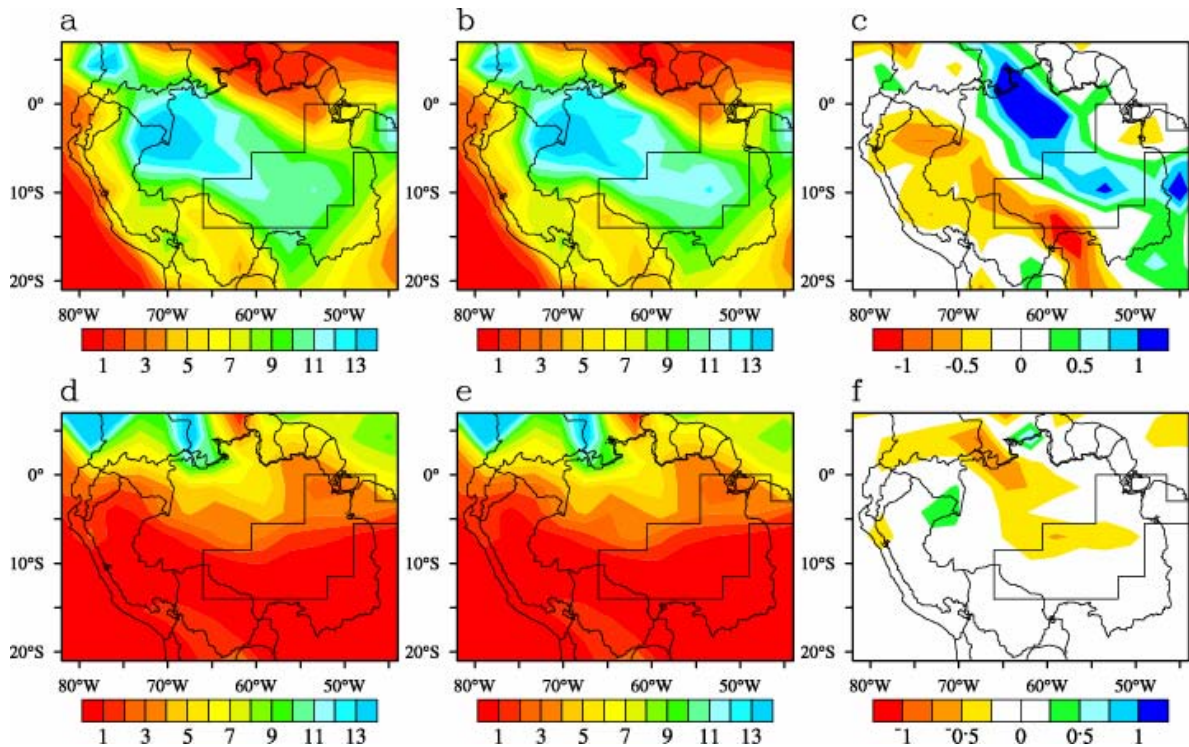


Figura 43: Variação média trimestral da precipitação (mm.dia^{-1}) sob condições de desmatamento parcial para (a) valores da simulação (DRE) em FMA, (b) valores da simulação (DREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em FMA, (d) valores da simulação (DRE) em JJA, (e) valores da simulação (DREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores DRE e DREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

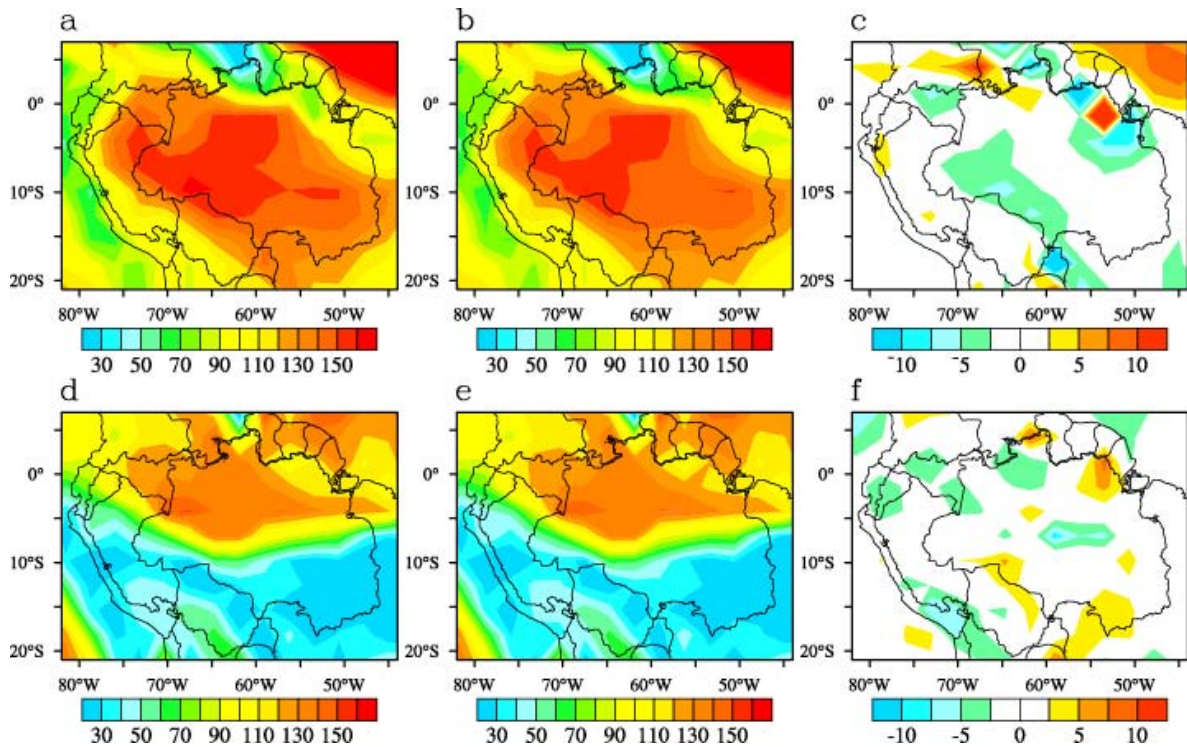


Figura 44: Variação média trimestral do fluxo de calor latente ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) sob condições de floresta para (a) valores da simulação (FRE) em FMA, (b) valores da simulação (FREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em FMA, (d) valores da simulação (FRE) em JJA, (e) valores da simulação (FREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FRE e FREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

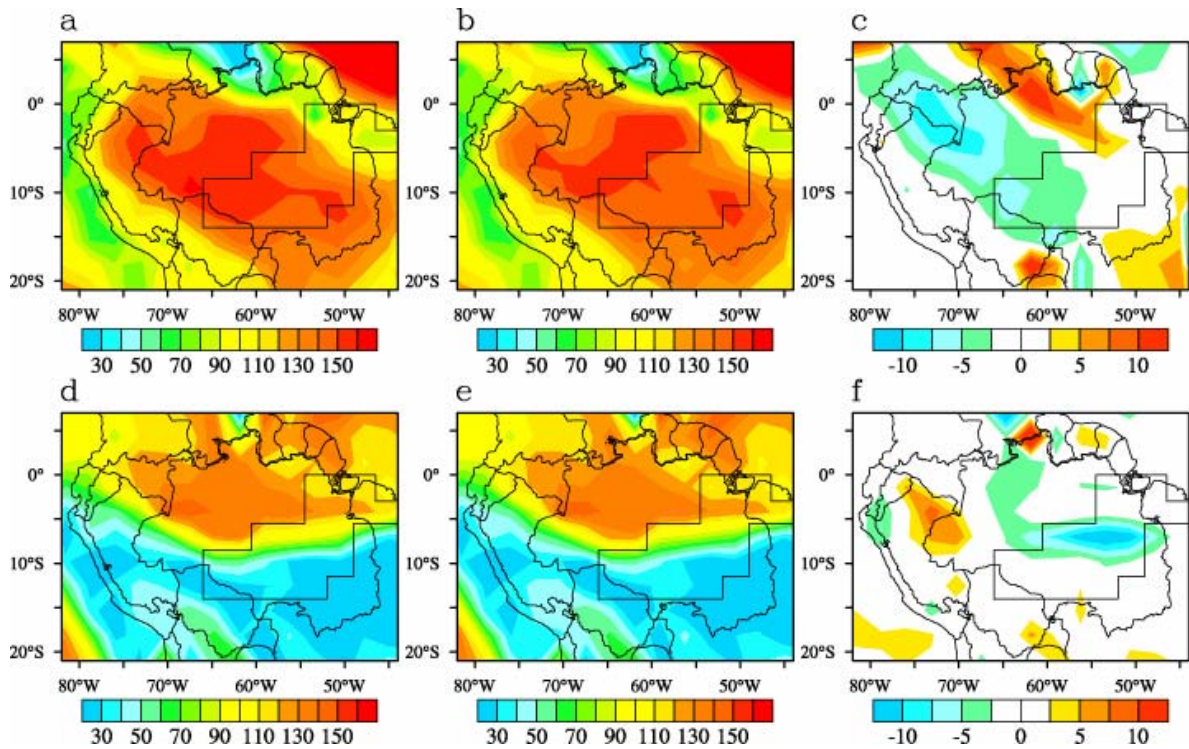


Figura 45: Variação média trimestral do fluxo de calor latente ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) sob condições de desmatamento parcial para (a) valores da simulação (DRE) em FMA, (b) valores da simulação (DREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em FMA, (d) valores da simulação (DRE) em JJA, (e) valores da simulação (DREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores DRE e DREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

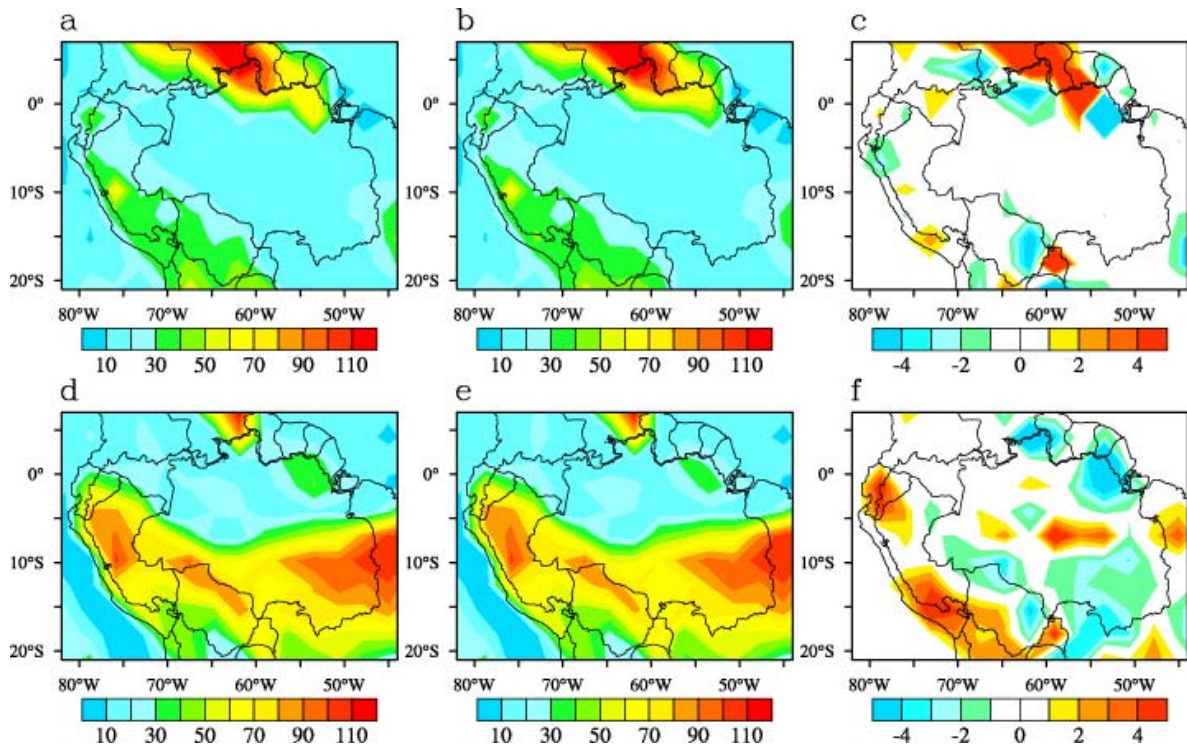


Figura 46: Variação média trimestral do fluxo de calor sensível ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) sob condições de floresta para (a) valores da simulação (FRE) em FMA, (b) valores da simulação (FREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em FMA, (d) valores da simulação (FRE) em JJA, (e) valores da simulação (FREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FRE e FREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

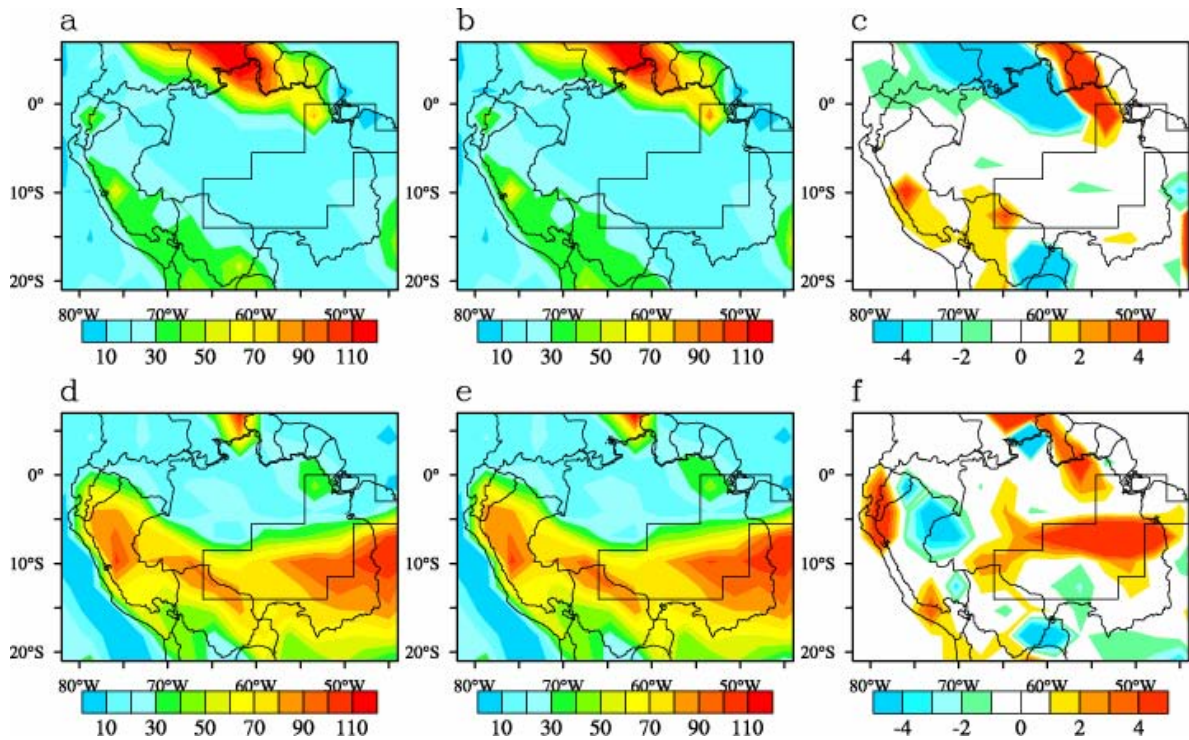


Figura 47: Variação média trimestral do fluxo de calor sensível (W.m^{-2}) sob condições de desmatamento parcial para (a) valores da simulação (DRE) em FMA, (b) valores da simulação (DREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em FMA, (d) valores da simulação (DRE) em JJA, (e) valores da simulação (DREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores DRE e DREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

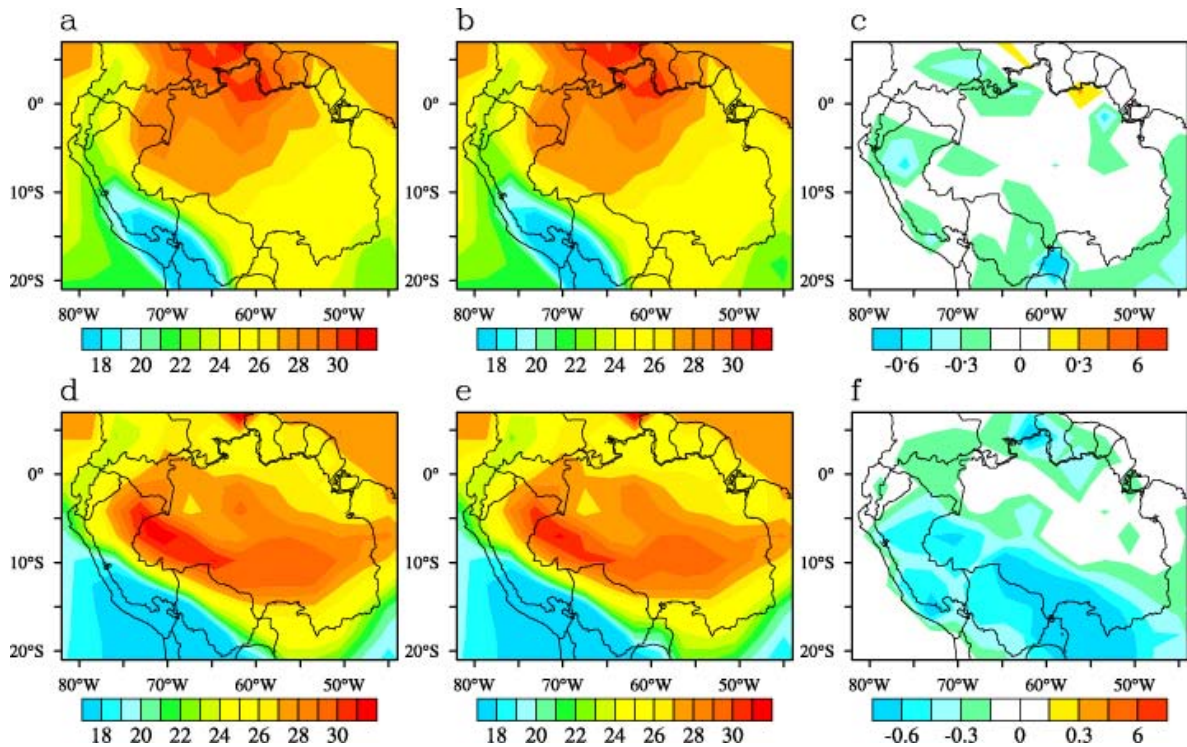


Figura 48: Variação média trimestral da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) sob condições de floresta para (a) valores da simulação (FRE) em FMA, (b) valores da simulação (FREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em FMA, (d) valores da simulação (FRE) em JJA, (e) valores da simulação (FREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FRE e FREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

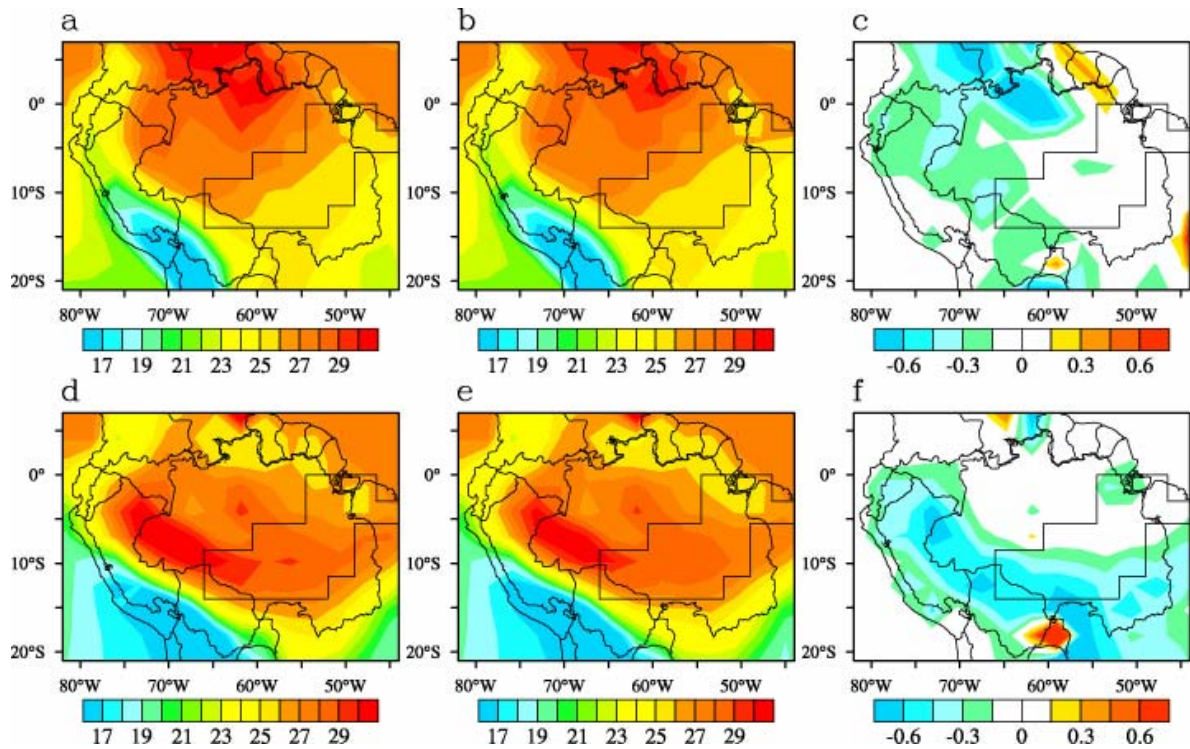


Figura 49: Variação média trimestral da temperatura (°C) sob condições de desmatamento parcial para (a) valores da simulação (DRE) em FMA, (b) valores da simulação (DREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em FMA, (d) valores da simulação (DRE) em JJA, (e) valores da simulação (DREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores DRE e DREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

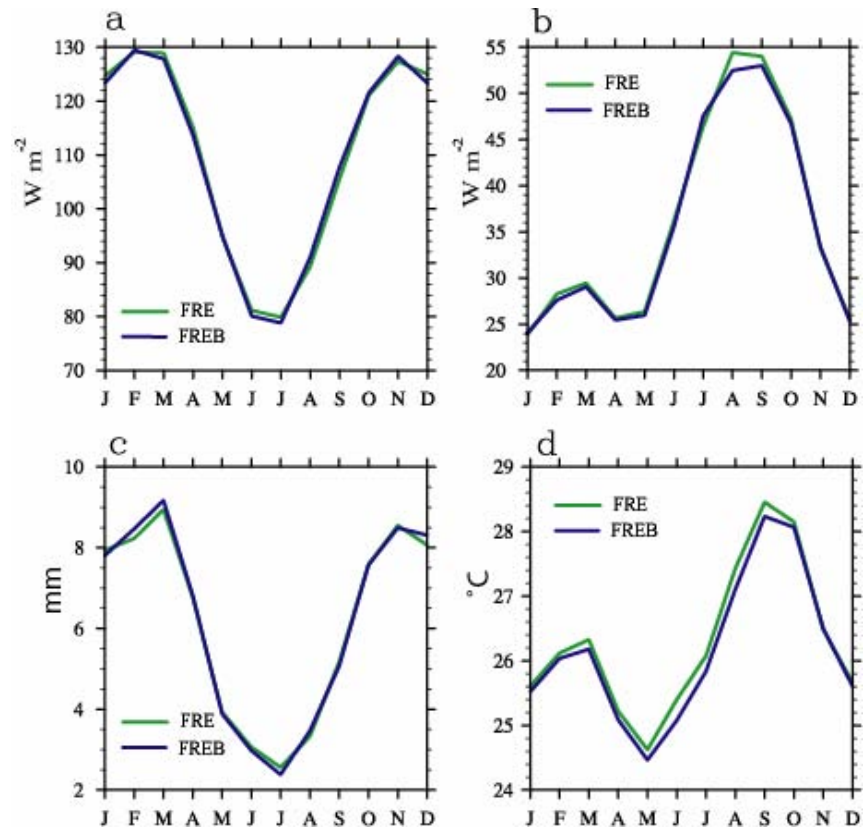


Figura 50: Variação sazonal do (a) fluxo do calor latente ($W.m^{-2}$), (b) fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$), (c) precipitação ($mm.dia^{-1}$) e (d) temperatura ($^{\circ}C$) sob condições de floresta na bacia Amazônica.

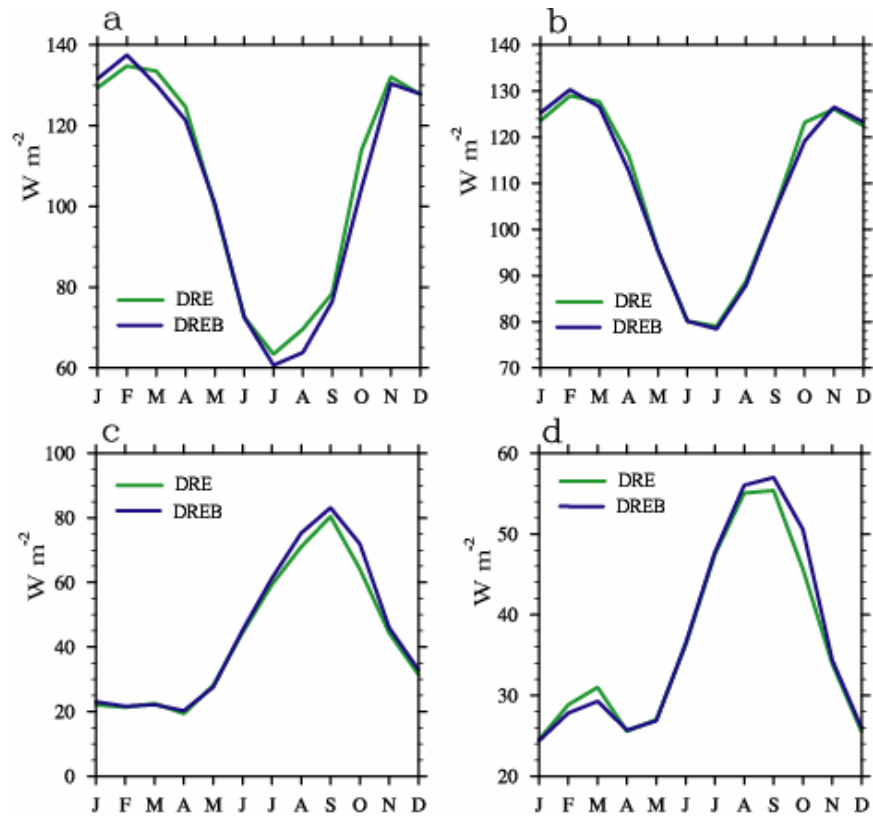


Figura 51: Variação sazonal do (a) fluxo do calor latente ($W.m^{-2}$) na área parcialmente desmatada, (b) fluxo do calor latente ($W.m^{-2}$) na bacia Amazônica, (c) fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$) na área parcialmente desmatada, (d) fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$) na bacia Amazônica, sob condições de desmatamento parcial.

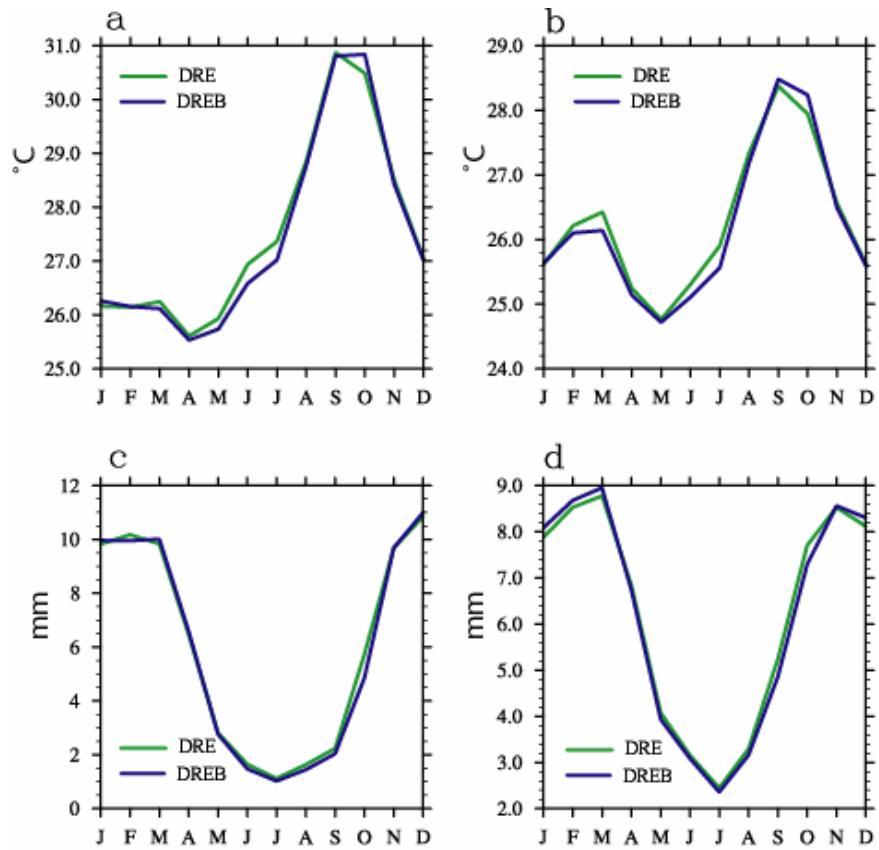


Figura 52: Variação sazonal do (a) temperatura (°C) na área parcialmente desmatada, (b) temperatura (°C) na bacia Amazônica, (c) precipitação (mm.dia⁻¹) na área parcialmente desmatada, (d) precipitação (mm.dia⁻¹) na bacia Amazônica, sob condições de desmatamento parcial.

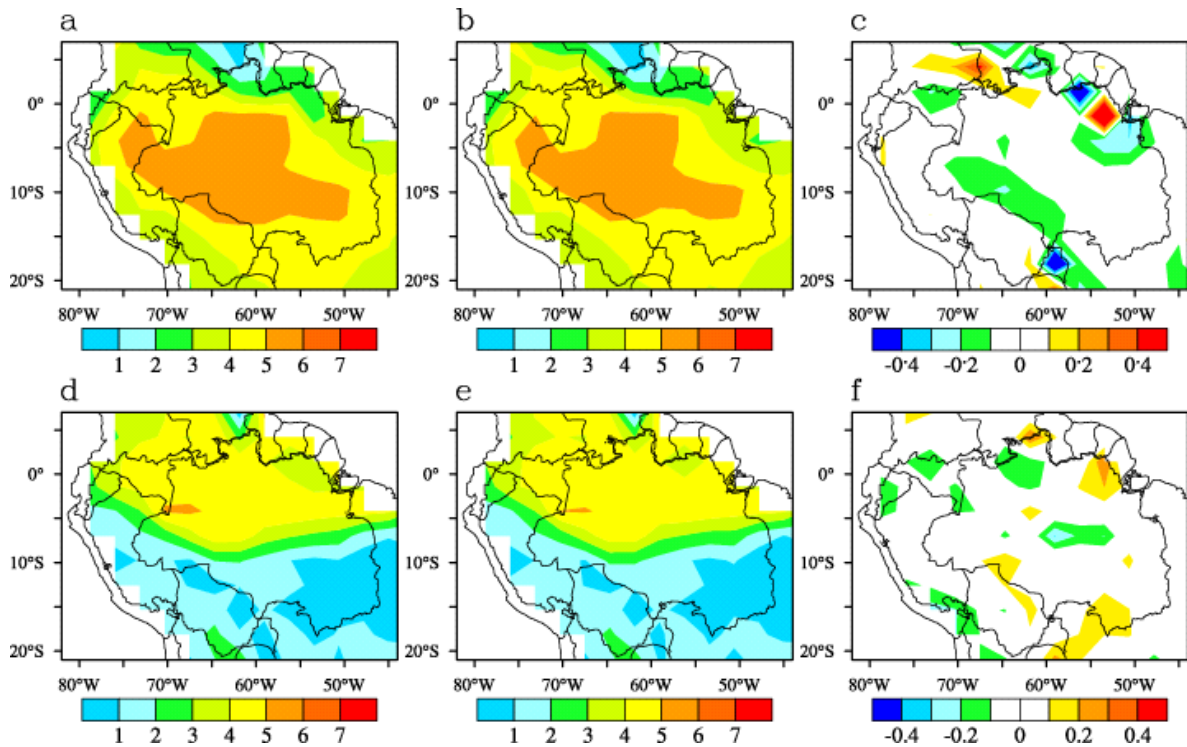


Figura 53: Variação média trimestral da evapotranspiração ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) sob condições de floresta para (a) valores da simulação (FRE) em FMA, (b) valores da simulação (FREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em FMA, (d) valores da simulação (FRE) em JJA, (e) valores da simulação (FREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FRE e FREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

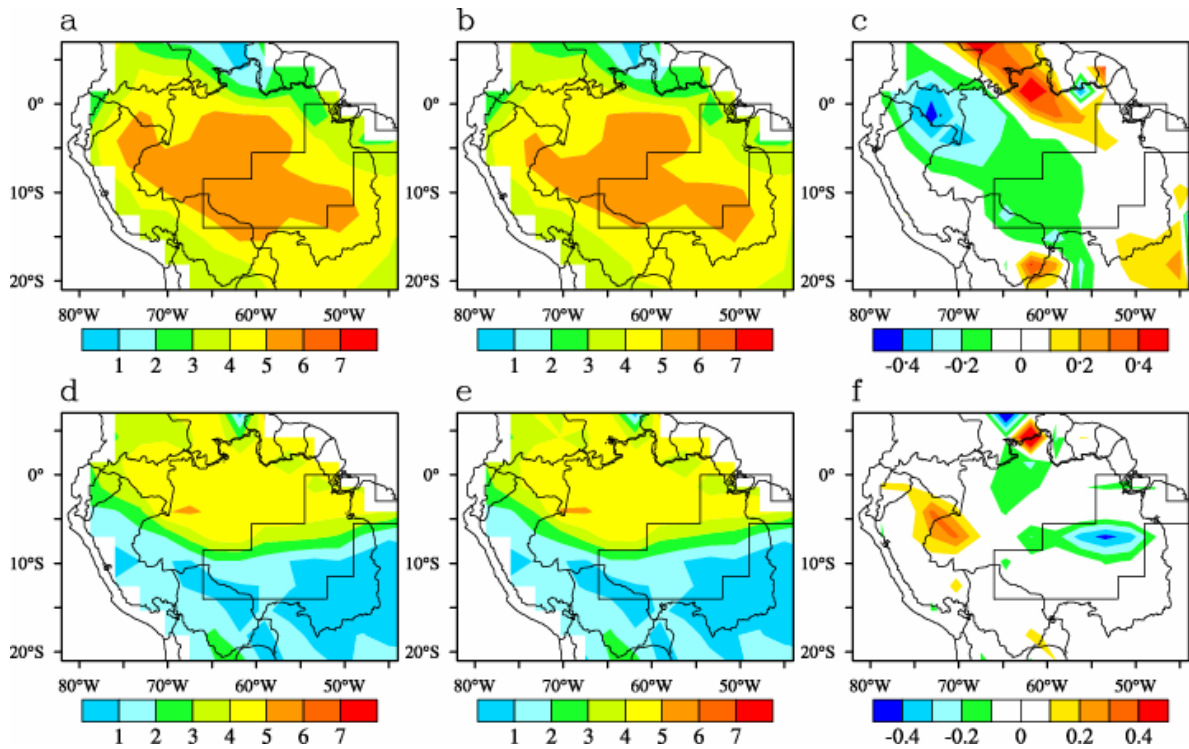


Figura 54: Variação média trimestral da evapotranspiração ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) sob condições de desmatamento parcial para (a) valores da simulação (DRE) em FMA, (b) valores da simulação (DREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em FMA, (d) valores da simulação (DRE) em JJA, (e) valores da simulação (DREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores DRE e DREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

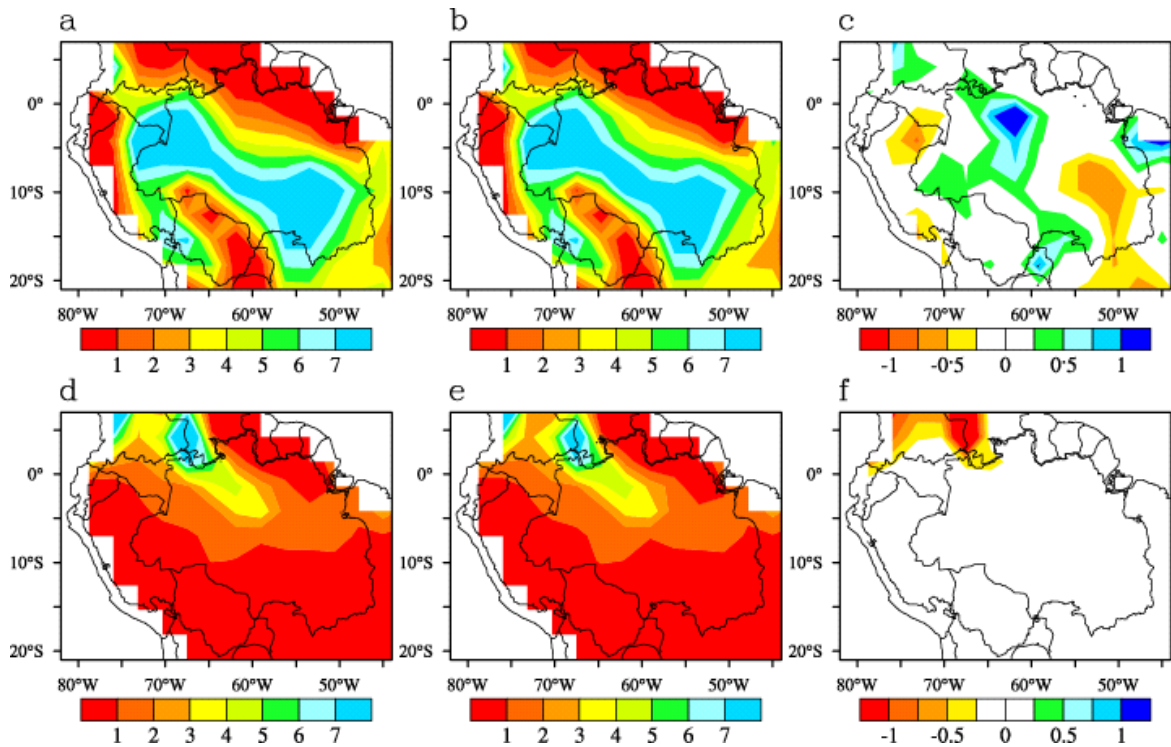


Figura 55: Variação média trimestral do escoamento total ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) sob condições de floresta para (a) valores da simulação (FRE) em FMA, (b) valores da simulação (FREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em FMA, (d) valores da simulação (FRE) em JJA, (e) valores da simulação (FREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FRE e FREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

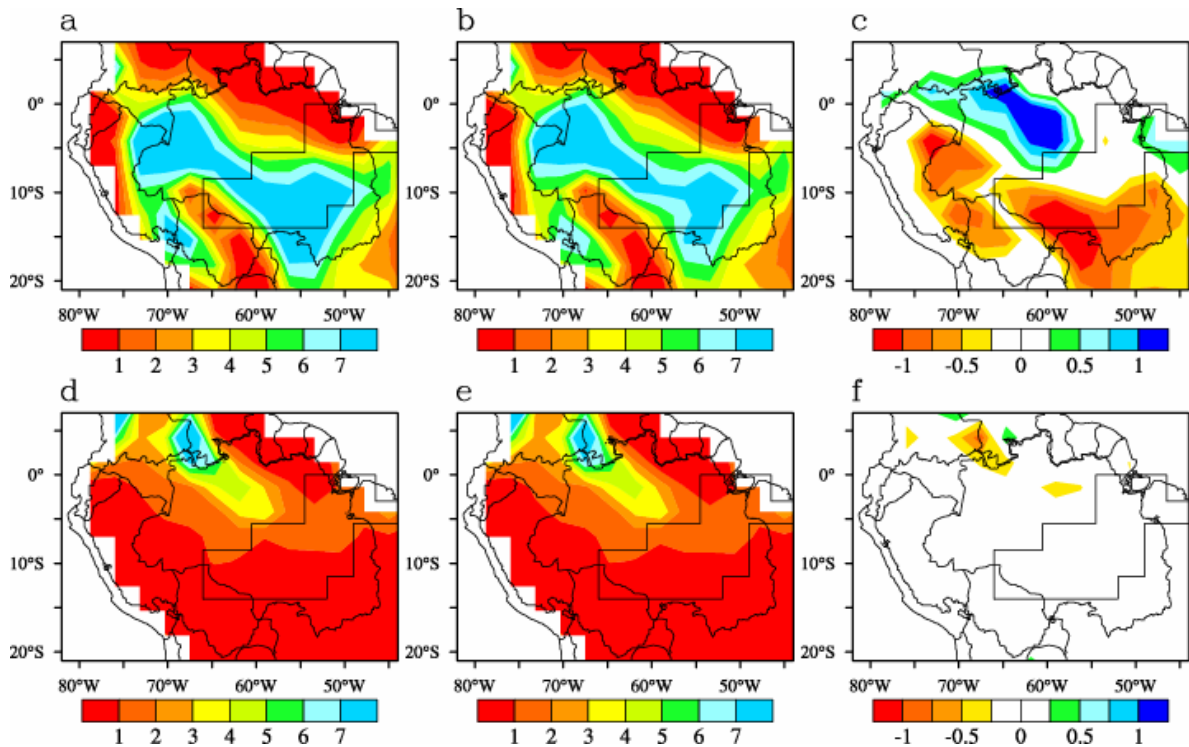


Figura 56: Variação média trimestral do escoamento total (mm.dia^{-1}) sob condições de desmatamento parcial para (a) valores da simulação (DRE) em FMA, (b) valores da simulação (DREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em FMA, (d) valores da simulação (DRE) em JJA, (e) valores da simulação (DREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores DRE e DREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

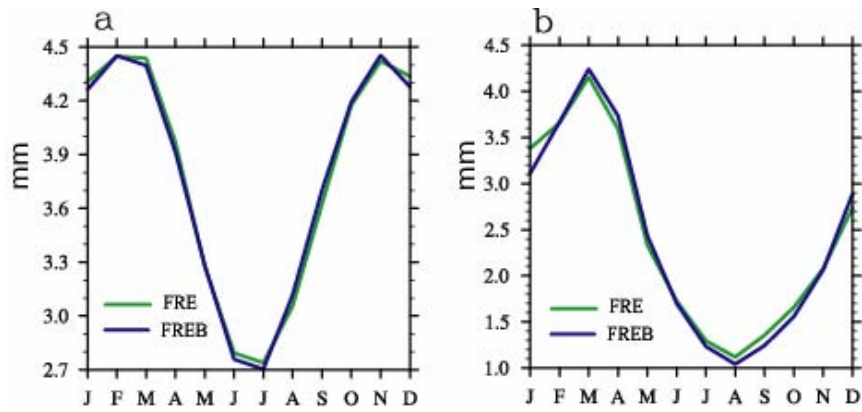


Figura 57: Variação sazonal do (a) evapotranspiração ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$), (b) escoamento total ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) sob condições de floresta na bacia Amazônica.

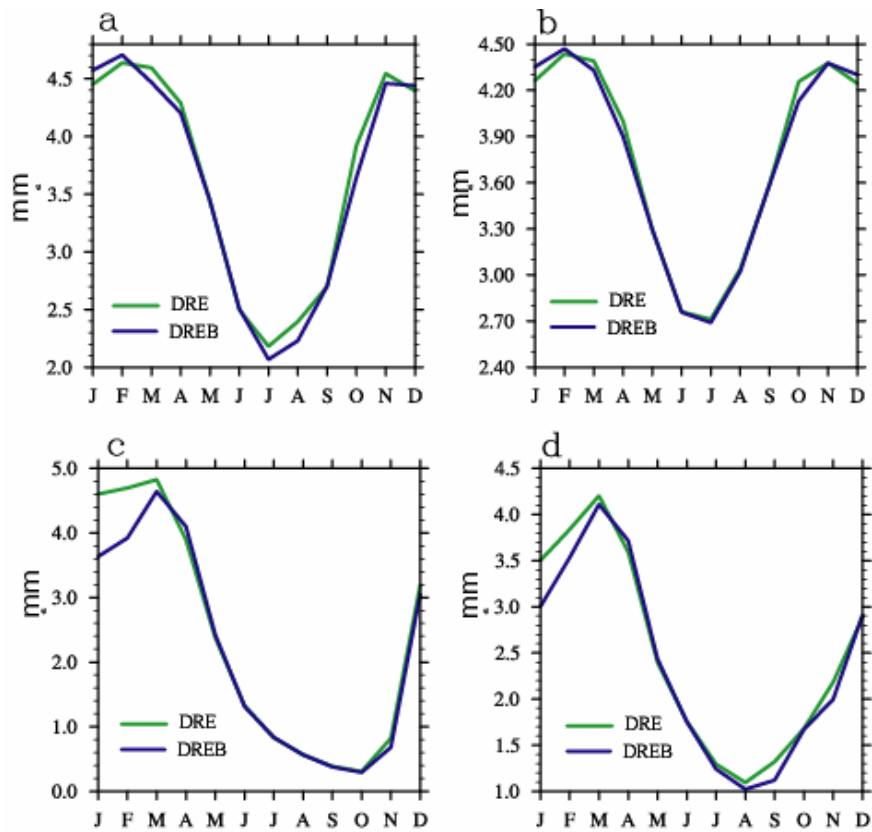


Figura 58: Variação sazonal do (a) evapotranspiração ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) na área parcialmente desmatada, (b) evapotranspiração ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) na bacia Amazônica, (c) escoamento total ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) na área parcialmente desmatada, (d) escoamento total ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) na bacia Amazônica, sob condições de desmatamento parcial

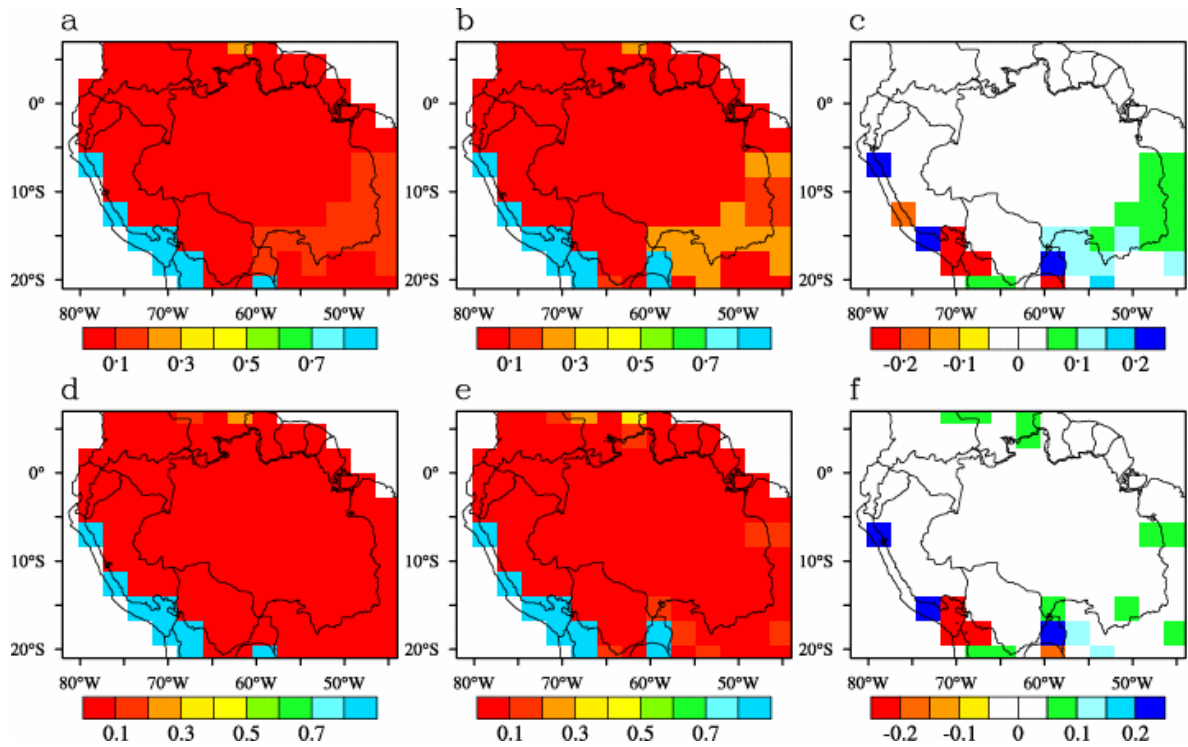


Figura 59: Variação média trimestral do índice da área foliar na vegetação rasteira ($m^2 \cdot m^{-2}$) sob condições de floresta para (a) valores da simulação (FRE) em FMA, (b) valores da simulação (FREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em FMA, (d) valores da simulação (FRE) em JJA, (e) valores da simulação (FREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FRE e FREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

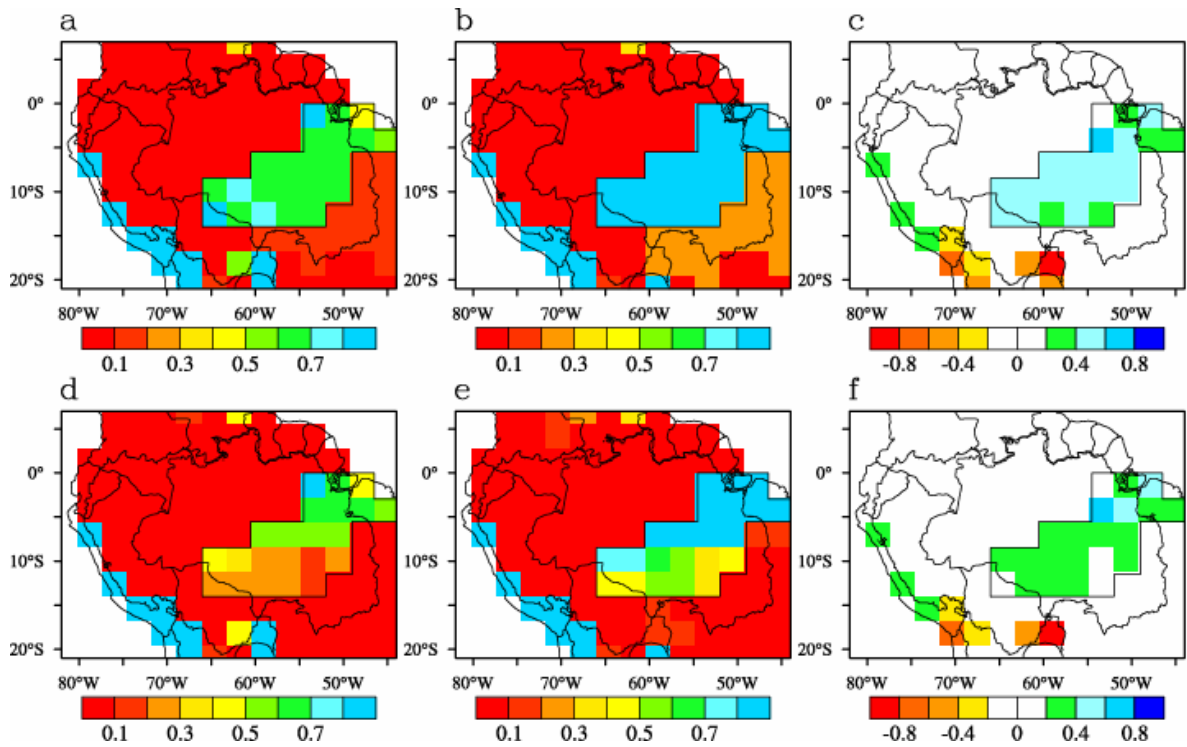


Figura 60: Variação média trimestral do índice da área foliar na vegetação rasteira ($m^2 \cdot m^{-2}$) sob condições de desmatamento parcial para (a) valores da simulação (DRE) em FMA, (b) valores da simulação (DREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em FMA, (d) valores da simulação (DRE) em JJA, (e) valores da simulação (DREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores DRE e DREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

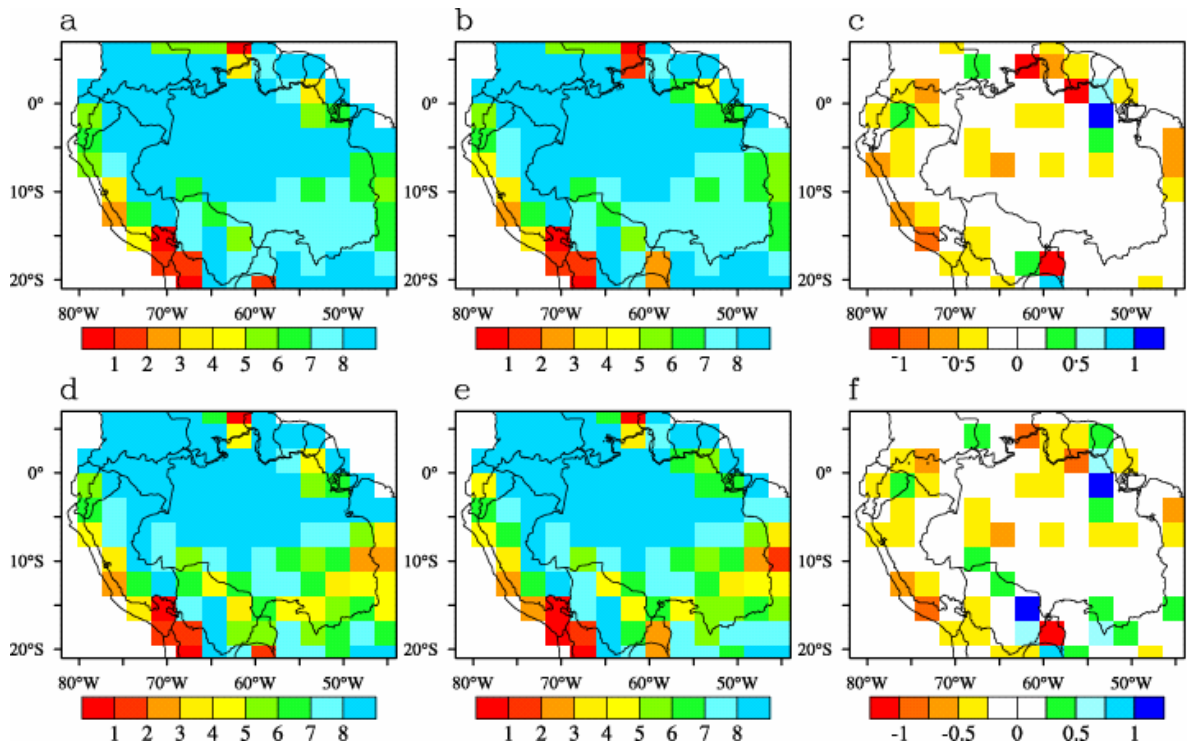


Figura 61: Variação média trimestral do índice da área foliar nas árvores ($m^2.m^{-2}$) sob condições de floresta para (a) valores da simulação (FRE) em FMA, (b) valores da simulação (FREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em FMA, (d) valores da simulação (FRE) em JJA, (e) valores da simulação (FREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (FREB – FRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores FRE e FREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

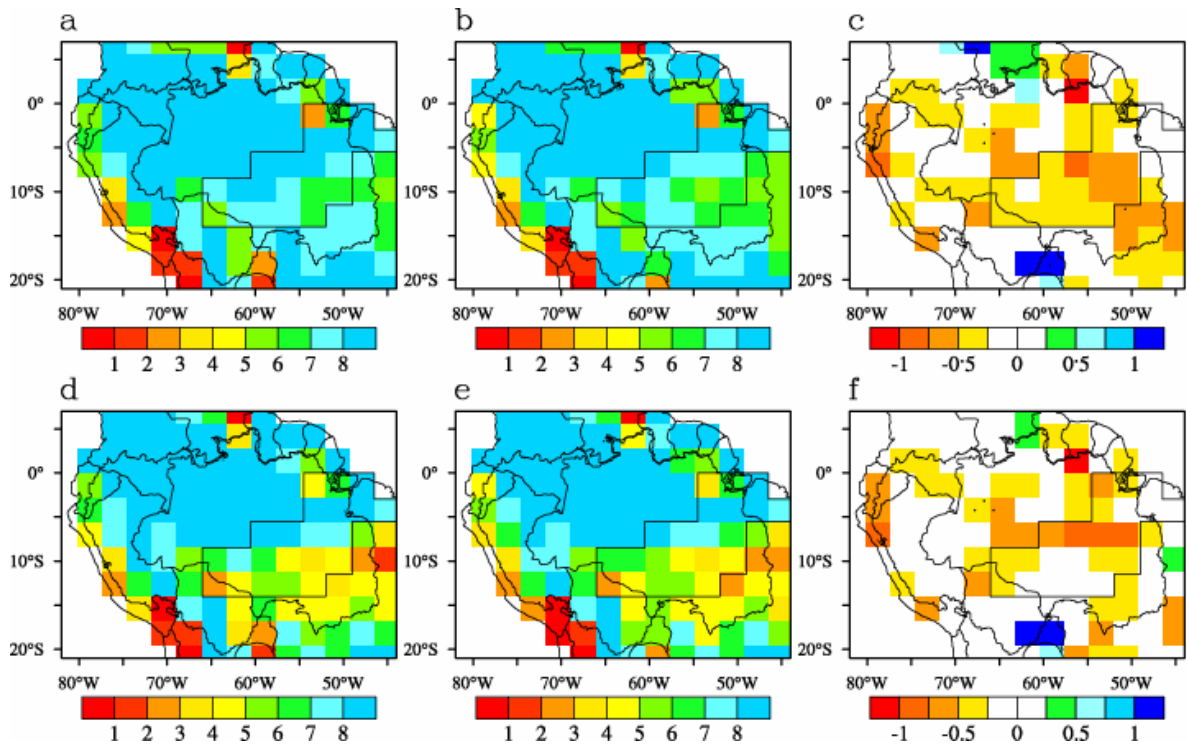


Figura 62: Variação média trimestral do índice da área foliar nas árvores ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) sob condições de desmatamento parcial para (a) valores da simulação (DRE) em FMA, (b) valores da simulação (DREB) em FMA, (c) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em FMA, (d) valores da simulação (DRE) em JJA, (e) valores da simulação (DREB) em JJA e (f) diferença entre as simulações (DREB – DRE) em JJA. As regiões pontilhadas indicam que os valores DRE e DREB são diferentes ao nível de 95% de significância, de acordo com o teste t.

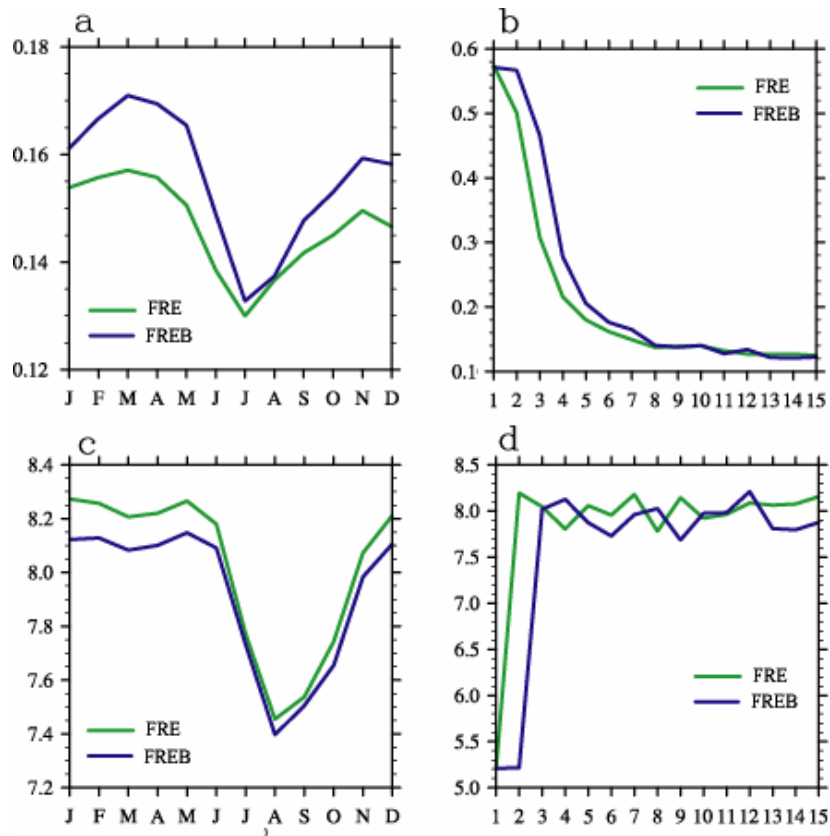


Figura 63: Variação sazonal do (a) índice da área foliar na vegetação rasteira ($m^2 \cdot m^{-2}$), (b) tendência do índice da área foliar na vegetação rasteira ($m^2 \cdot m^{-2}$), (c) índice da área foliar nas árvores ($m^2 \cdot m^{-2}$), (d) tendência índice da área foliar nas árvores ($m^2 \cdot m^{-2}$) sob condições de floresta na bacia Amazônica.

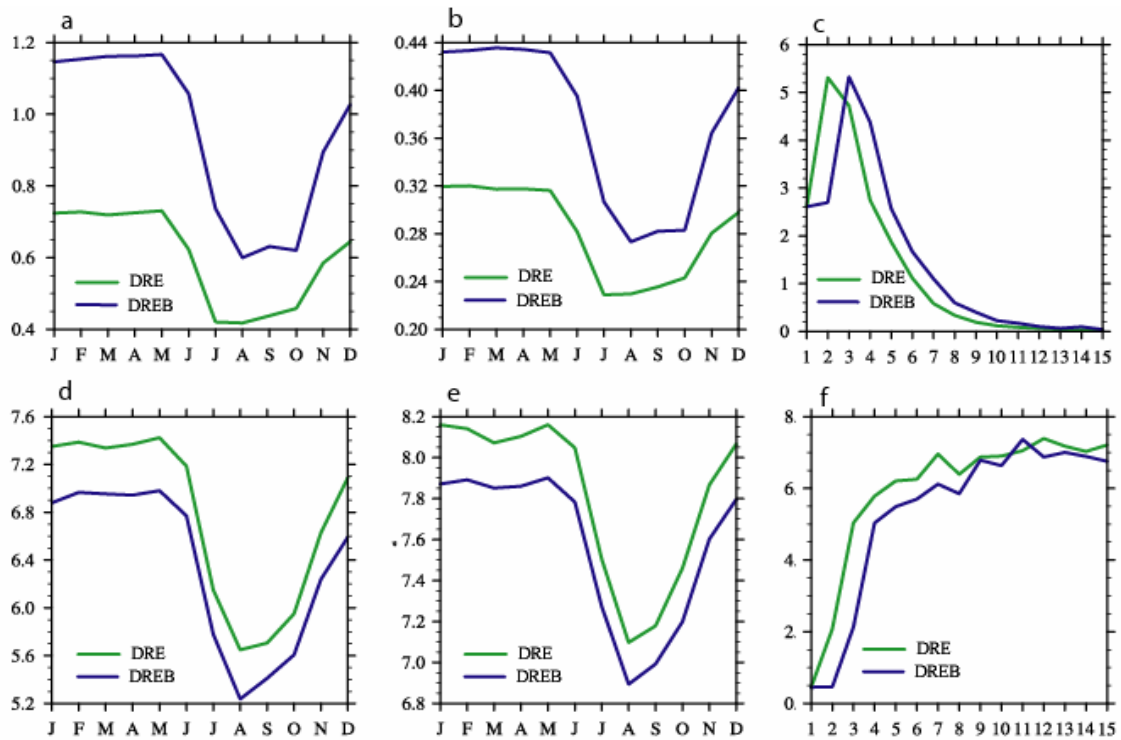


Figura 64: Variação sazonal do (a) índice da área foliar na vegetação rasteira (m².m⁻²) na área parcialmente desmatada, (b) índice da área foliar na vegetação rasteira (m².m⁻²) na bacia amazônica, (c) tendência do índice da área foliar na vegetação rasteira (m².m⁻²) na bacia Amazônica, (d) índice da área foliar nas árvores (m².m⁻²) na área parcialmente desmatada, (e) índice da área foliar nas árvores (m².m⁻²) na bacia Amazônica (f) tendência no índice da área foliar nas árvores (m².m⁻²) sob condições de desmatamento parcial.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi examinada a sensibilidade do clima na bacia Amazônica para aos efeitos biogeofísicos e biogeoquímicos, realizando um experimento climático utilizando o modelo de circulação geral da atmosfera CCM3 acoplado ao modelo de superfície IBIS. Foram realizadas sete simulações, isto é, simulação de controle (F), desmatamento parcial (D), efeitos radiativos do CO₂ (FR), efeitos radiativos e ecológicos do CO₂ (FRE), efeitos radiativos e ecológicos do CO₂ considerando a retroalimentação biogeoquímica da vegetação no ciclo do carbono (FREB), desmatamento parcial com os efeitos radiativos e ecológicos do CO₂ (DRE), e desmatamento parcial com os efeitos radiativos e ecológicos do CO₂ considerando a retroalimentação biogeoquímica da vegetação no ciclo do carbono (DREB). As análises das diferenças entre as simulações D e F, FR e F, e FRE e FR avaliaram, respectivamente, diferentes aspectos biogeofísicos da interação atmosfera-

biosfera: efeito do desmatamento, efeito radiativo do aumento da concentração do CO₂, e efeito ecológico do aumento da concentração do CO₂. Por outro lado, as análises de FREB-FRE e DREB-DRE permitiram determinar os aspectos biogeoquímicos da interação atmosfera-biosfera, sob condições de floresta total e desmatamento parcial. Após a análise destes resultados, conclui-se que:

- Com as mudanças na cobertura do solo sobre a bacia Amazônica, os balanços de energia e de água são modificados, com mudanças mais significativas na estação seca, mostrando um acréscimo no albedo na área parcialmente desmatada, onde o IAF das árvores é menor que $1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, causando um resfriamento sobre a região desmatada, devido a uma redução do saldo de radiação, o acréscimo no calor sensível e redução no calor latente, que levam a uma diminuição na evapotranspiração e na precipitação.
- O efeito radiativo, do aumento da concentração atmosférica do CO₂, afeta a precipitação que difere espacial e sazonalmente, quando se analisaram nas estações chuvosa e seca, apresentando um pequeno aumento de 0,02 na média anual sobre a bacia Amazônica, assim como também o escoamento total. Na evapotranspiração, o efeito radiativo não ocasiona mudanças na variação da sua média anual, conseqüentemente o fluxo de calor latente não apresenta muita significância. O aumento na concentração do CO₂ promove mais energia disponível na superfície aumentando o fluxo de calor sensível, logo aumentando também a temperatura. Essa mudança no CO₂ atmosférico afeta o funcionamento do ecossistema Amazônico, apresentando acréscimos no IAF na vegetação rasteira durante todo ano, enquanto que para árvores seus valores são mais intensos apenas durante os meses de agosto e setembro (estação seca).

- O efeito ecológico, do aumento da concentração do CO₂ altera a estrutura e dinâmica do ecossistema Amazônico, aumentando o IAF das árvores tanto na estação chuvosa como na estação seca, provocando reduções no índice da área foliar da vegetação rasteira e aumentando em 0,61 kg C.m⁻² a biomassa da bacia Amazônica. Provoca reduções nas taxas de precipitação, escoamento total, evapotranspiração, assim como o fluxo de calor latente e calor sensível.
- O efeito biogeoquímico do aumento da concentração atmosférica do CO₂, sob condições de floresta total e desmatamento parcial, respectivamente, apresenta pequenas mudanças no clima, mostrando uma diminuição do saldo de radiação (Tabela 10), e na temperatura. Outras mudanças verificadas foram um aumento na precipitação sob condições de floresta e redução da precipitação e o escoamento total sobre o bioma da Amazônica com o desmatamento.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berbet, M. L. C., Costa, M. H., 2003: Climate change after tropical deforestation: seasonal variability of surface albedo and its effects on precipitation change. *Journal of Climate*, v. 16, p. 2099-2104.
- Betts, R. A., Cox, P. M., Collins, M., Harris, P. P., Huntingford, C., Jones, C. D., 2004: The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global climate warming. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, p. 157-175.
- Biajoli, M. C., 2006: Relatório final de atividades referentes à Bolsa FUNCATE, Categoria Formação em C&T – Tipo II. *UFV*, p. 12.
- Bonan, G. B., Oleson, K. W., Vertenstein, M., Levis, S., 2002: The Land Surface Climatology of the Community Land Model Coupled to the NCAR Community Climate Model. *Journal of Climate*, v. 15, n. 22, p. 3123-3149.
- Bounoua, L., Collatz, G. J., Tucker, C. J., Sellers, P. J., Randall, D. A., Dazlich, D. A., Jensen, T. G., Los, S. O., Berry, J. A., Field, C. B., Fung, I., 1999: Interactions between

- Vegetation and Climate: Radiative and Physiological Effects of Doubled Atmospheric CO₂. *Journal of climate*, v. 12, n. 2, p. 309-324.
- Cardille, J., Foley, J. A., Costa, M. H., 2002: Characterizing patterns of land use and land cover across amazonia by merging satellite images and agricultural censuses. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 16, n. 3, doi: 10.1029/2000GB001386.
- Chambers, J. Q., Tribuzy, E. S., Toledo, L. C., Crispin, B. F., Higuchi, N., Santos J., Araújo, A. C., Kruijt, B., Nobre, A. D., Trumbore, S. E., 2004: Respiration from a tropical Forest ecosystem: partitioning of sources and low carbon use efficiency. *Ecological Application*, v.14, n.4 (supl.), p. s72-s88.
- Correia, F. W. S., 2005: Modelagem do impacto de modificações da cobertura vegetal Amazônica no clima regional e global. Tese (Doutorado em Meteorologia), INPE, 358p.
- Costa, M. H., Foley, J. A., 2000: Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. *Journal of Climate*, v. 13, p. 18-34.
- Costa, M. H., Yanagi, S. N. M., 2006: Effects of Amazon deforestation on the regional climate – Historical perspective, current and future research. Manuscrito submetido à revista Brasileira de Meteorologia Edição Especial do LBA, submetido.
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall, I. J. Totterdell, 2000: Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled carbon model. *Nature*, v. 408, p. 184-187.
- Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A., Totterdell, I. J., 2001: Modelling vegetation and the carbon cycle as interactive elements of the climate system. *Hadley Centre*, Technical Note 23, Met Office.
- Cox, P. M., Betts, R. A., Collins, M., Harris, P. P., Huntingford, C., Jones, C. D., 2004: Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, p. 137-156.
- Culf, A. D., Esteves, J. L., Filho, M. A. de O., Rocha, H. R., 1996: Radiation, temperature and humidity over forest and pasture in Amazonia. *Amazonian Deforestation and Climate*, J. H. C. Gash et al., Eds., John Wiley and Sons, p. 175–192.

- Delire, C., Foley, J. A., Thompson, S., 2003: Evaluating the carbon cycle of a coupled atmosphere-biosphere model. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 17, p. 1012, doi: 10.1029/2002GB001870.
- Dickinson, R. E., Kennedy, P., 1992: Impacts on regional climate of Amazon deforestation. *Geophysical Research Letters*. v. 19, p. 1947–1950.
- Dickinson, R. E., 1989: Modeling the effects of Amazonian deforestation on regional surface climate: a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 47, p. 339-347.
- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., 1988: Modelling tropical deforestation: A study of GCM land-surface parametrizations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 144, p. 439-462.
- Eltahir, E., R. L. Bras, 1994: Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 120, p. 861–880.
- Fearnside, P. M., 1993: Deforestation in Brazilian Amazonia: the effect of population and land tenure. *Ambio*, v. 22, p. 537-545.
- Foley, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., Levis, S., Pollard, D., Sitch, S., & Haxeltine, A., 1996: An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 10, p. 603-628.
- Gedney, N., Valdes, P. J., 2000: The effect of Amazonian deforestation on the northern hemisphere circulation and climate. *Geophysical Research Letters*, v. 27, p. 3053–3056
- Gibbard, S., Caldeira, K., Bala, G., Phillips, T. J., Wickett, M., 2005: Climate effects of global land cover change. *Geophysical Research Letters*, v.32, L23705, doi:10.1029/2005GL024550.
- Hahmann, A. N., Dickinson, R. E., 1997: RCM2-BATS model over tropical South America: Applications to tropical deforestation. *Journal of Climate*, v. 10, p. 1944–1964.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Projeção da População do Brasil: 1980-2020.
- Imbuzeiro, H. M. A., 2005: Calibração do modelo IBIS na floresta Amazônica usando múltiplos sítios. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), UFV, p. 67.

- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999: Desflorestamento da Amazônia: 1997-1998 (Amazonia Deforestation: 1997-1998). *INPE*, São José dos Campos, abril de 1999. (Relatório)
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004: Monitoring the Brazilian Amazon forest by satellite: 2002-2003. *INPE*, São José dos Campos, Brazil.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change - Draft report on Climate Change 2001.
- Kiehl, J., Hack, J., Bonan, G., Boville, B., Briegleb, B., Williamson, D., Rasch, P., 1996: Description of the NCAR Community Model (CCM3). *NCAR Technical Note*, Boulder, Colorado, p. 152.
- Kiehl, J. T., Hack, J. J., Bonan, G. B., Boville, B. A., Williamson, D. L., Rasch, P. J., 1998: The National Center for Atmospheric Research Community Climate Model: CCM3. *Journal of Climate*, v. 11, p. 1131–1150.
- Laurance, W. F., Cochrane, M. A., Bergen, S., Fearnside, P. M., Delamonica, P., Barber, C., D'Angelo, S., Fernandes, T., 2001: The future of the Brazilian Amazon. *Science*, v. 291, p. 438-439.
- Lean, J., Rowntree, P. R., 1993: A GCM simulation of the impact of Amazonian deforestation on climate using an improved canopy representation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 119, p. 509–530.
- Lean, J., Warrilow, D. A., 1989: Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation. *Nature*, v. 342, p. 411-413.
- Legates, D. R., Willmott, C. J., 1990: Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation. *International Journal of Climatology*, v. 10, p. 111–127.
- Lesack, L. F. W., 1993: Water balance and hydrologic characteristics of a Rain Forest Catchment in the central amazon basin. *Water Resources Research*, v. 29, n 3. P. 759-773.
- Levis, S., Foley, J. A., Pollard, D., 2000: Large-scale vegetation feedbacks on a doubled CO₂ climate. *Journal of Climate*, v. 13, p. 1313-1325.

- Li, W., Fu, R., Dickinson, R. E., 2006: Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4, *Journal of Geophysical Research*, v. 111, D02111, doi:10.1029/2005JD006355.
- McWilliam, A. L. C., Roberts, J. M., Cabral, O. M. R., Leitão, M. V. B. R., Costa, A. C. L., Maitelli, G. T., Zamparoni, C. A. G. P., 1993: Leaf area index and above ground biomass of terra firme rain forest and adjacent clearings in Amazonian. *Functional Ecology*, v. 7, p. 310-317.
- Neilson R. P., Drapek, R. J., 1998: Potentially complex biosphere responses to transient global warming. *Global Change Biology*. v. 4, p. 505-521.
- Nepstad, D. C., Verissimo, A., Alencar, A., Nobre, C., Lima E., Lefebvre, P., Schlesinger, P., Potter, C., Moutinho, P., Mendoza, E., Cochrane, M., Brooks, V., 1999: Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, v. 398, p. 505-508.
- New, M., Hulme, M., Jones, P. D., 1999: Representing twentieth century spacetime climate variability. part 1: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, v. 12, p. 829–856.
- Nobre, C. A., Sellers, P. J., Shukla, J., 1991: Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, v. 4, p. 957–988.
- Polcher, J., Laval, K., 1994: The impact of African and Amazonian deforestation on tropical climate. *Journal of Hydrology*, v. 155, p. 389–405.
- Roberts, J., Cabral, O. M. R., Costa, J. P., McWilliam, A. L. C., 1996: An overview of the leaf area index and physiological measurements during ABRACOS. In: *Amazonian deforestation and climate*. Gash, J. H. C., Nobre, C. A., Roberts, J. M., R. L. Victoria, John Wiley and Sons, 1st ed., p. 287-306.
- Sellers, P. J., Bounoua, L., Collatz, G. L., Randall, D. A., Dazlich, D. A., Los, S. O., Berry, J. A., Fung, I., Tucker, C. J., Field, C. B., Jensen, T. G., 1996: Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate. *Science*, v. 271, p. 1402–1406.
- Shukla, J. L., Nobre, C., Sellers, P. J., 1990: Amazon deforestation and climate change. *Science*. 247: 1322 – 1325.

- Shuttleworth, W. J., 1988: Evaporation from Amazonian rainforest. *Proceedings of the Royal Society of London*. v. 233, p. 321-346.
- Skole, D., Tucker, C., 1993: Tropical Deforestation and Habitat Fragmentation in the Amazon - Satellite data from 1978 to 1988. *Science*, 260, 1905-1910.
- Sud Y. C., Walker, G. K., Kim, J. H., Liston, G. E., Sellers, P. J., Lau, W. K. M., 1996: Biogeophysical consequences of a tropical deforestation scenario: a GCM simulation study. *Journal of Climate*, v. 9, p. 3225–3247
- Voldoire, A., Royer, J. F., 2004: Tropical deforestation and climate variability. *Climate Dynamics*, v. 22, p. 857-874.
- Zhang, H., Henderson-Sellers, A., McGuffie, K., 2001: The compounding effects of tropical deforestation and greenhouse warming on climate. *Climatic Change*, v. 49, p. 309–338.

APÊNDICE A

Inicialmente, a análise de sensibilidade é feita para alguns parâmetros de entrada da precipitação. Segundo Song e Yu (2005), a precipitação estratiforme simulada pelo NCAR CCM3 representa aproximadamente 1,5% da quantidade de chuva total entre 20°N e 20°S, longe dos 40% estimada por Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Informações mais detalhadas da parametrização da precipitação no modelo CCM3 são descritas no Apêndice B.

Nas Figuras 65 a 68 apresenta-se a sensibilidade da precipitação para diferentes coeficientes de autoconversão da precipitação (c_0) e a profundidade da atividade convectiva (δz), comparados com os dados observados do CRU. Análise destes valores indicam que a precipitação ajusta-se melhor aos dados observados para $c_0 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ e $\delta z = 0 \text{ m}$.

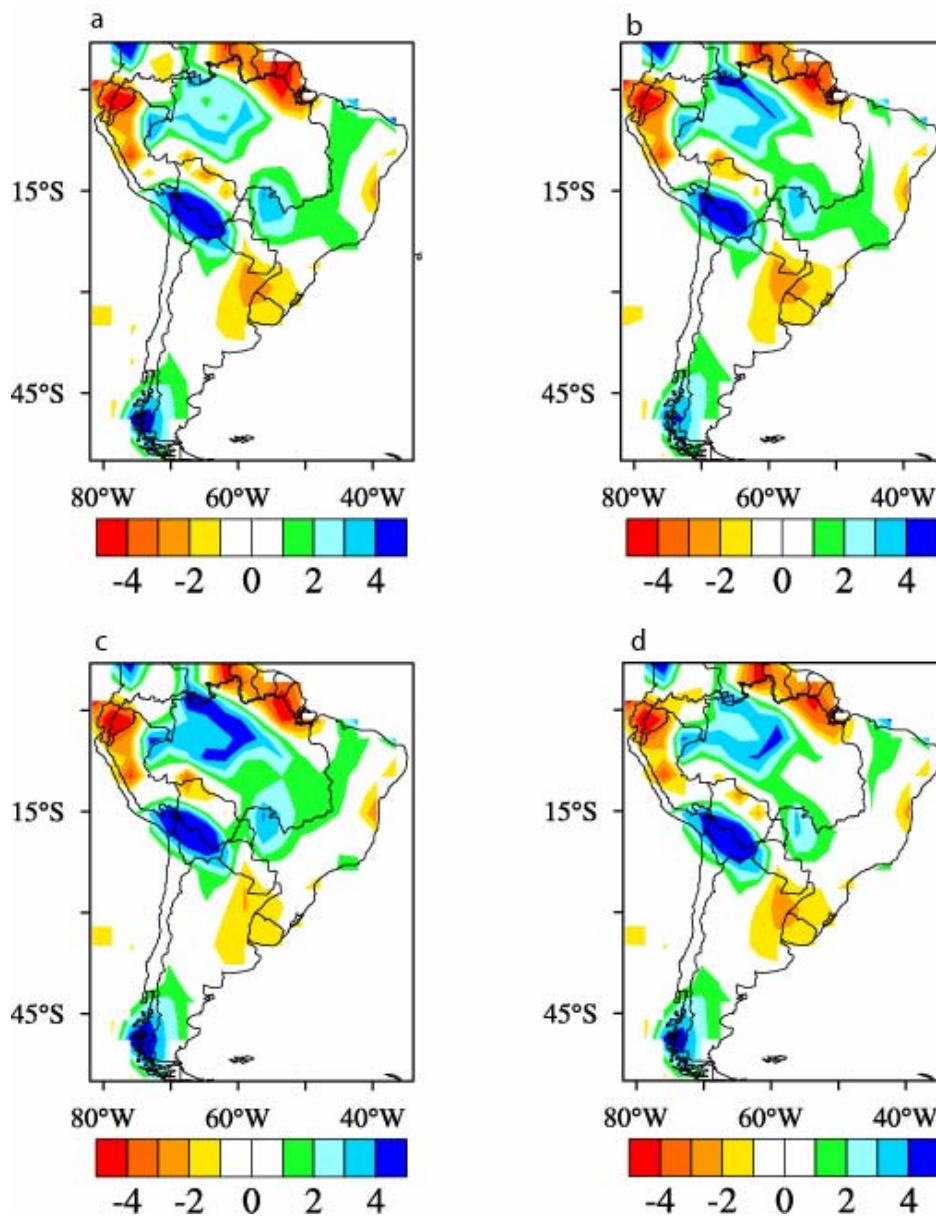


Figura 65: Diferença entre as médias anuais da precipitação ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) obtidas do banco de dados do CRU e dos valores das simulações do CCM3: (a) com $c_0 = 4 \cdot 10^{-4}$, (b) $c_0 = 2 \cdot 10^{-4}$, (c) $c_0 = 0,5 \cdot 10^{-4}$, (d) $c_0 = 0,25 \cdot 10^{-4}$.

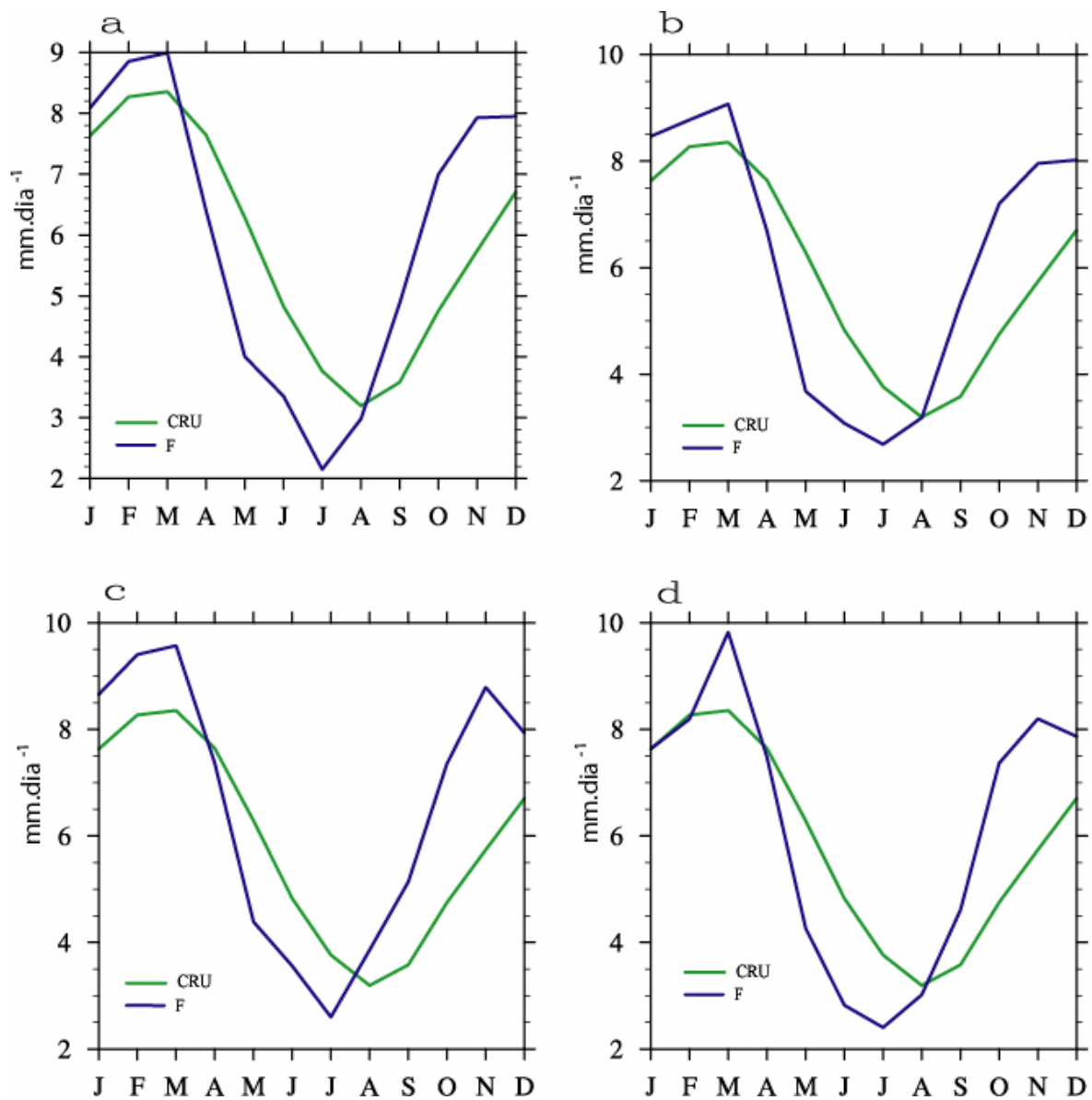


Figura 66: Variação sazonal da precipitação (mm.dia⁻¹) obtidas do banco de dados do CRU e dos valores das simulações do CCM3 (F): (a) com $c_0 = 4 \cdot 10^{-4}$, (b) $c_0 = 2 \cdot 10^{-4}$, (c) $c_0 = 0,5 \cdot 10^{-4}$, (d) $c_0 = 0,25 \cdot 10^{-4}$.

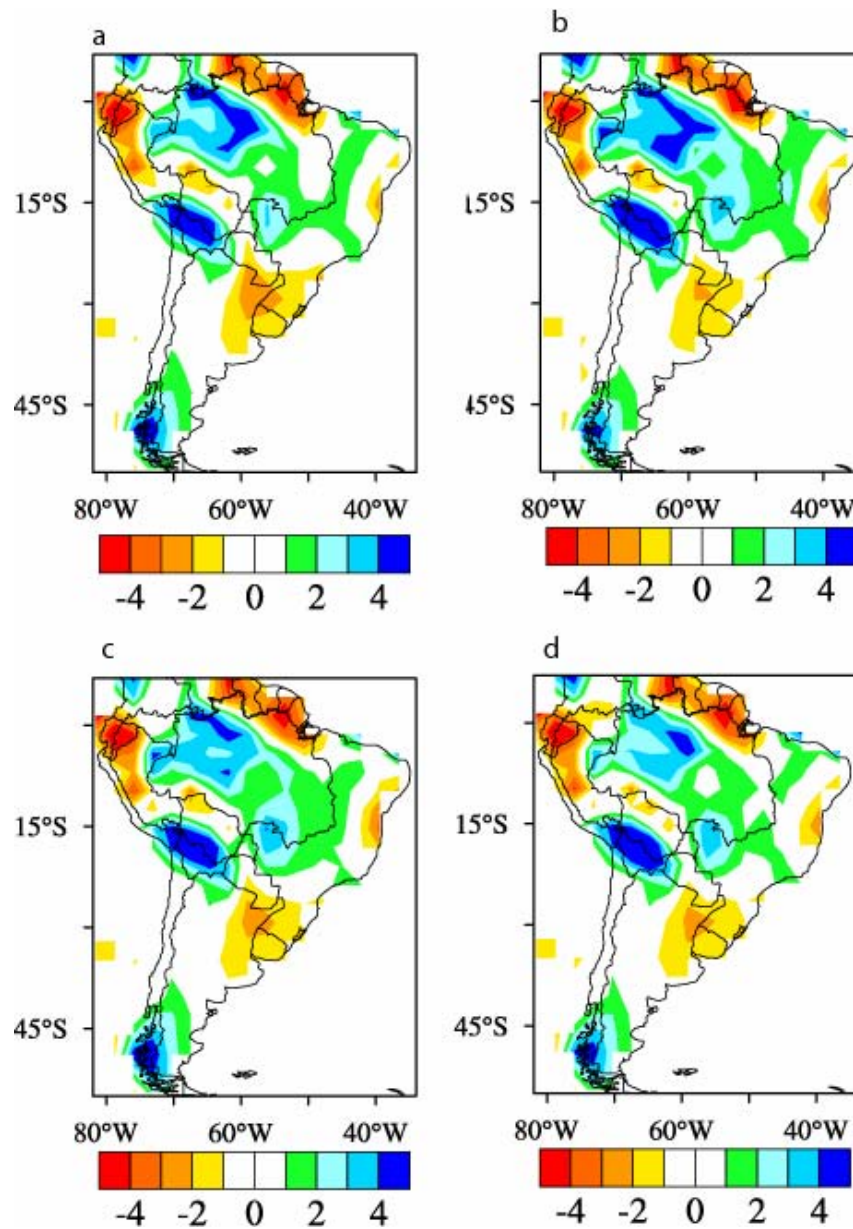


Figura 67: Diferença entre as médias anuais da precipitação ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) obtidas do banco de dados do CRU e dos valores das simulações do CCM3: (a) com $\delta z = 0$ (b) $\delta z = 0,5$ (c) $\delta z = 2,0$ e (d) $= 5,0$.

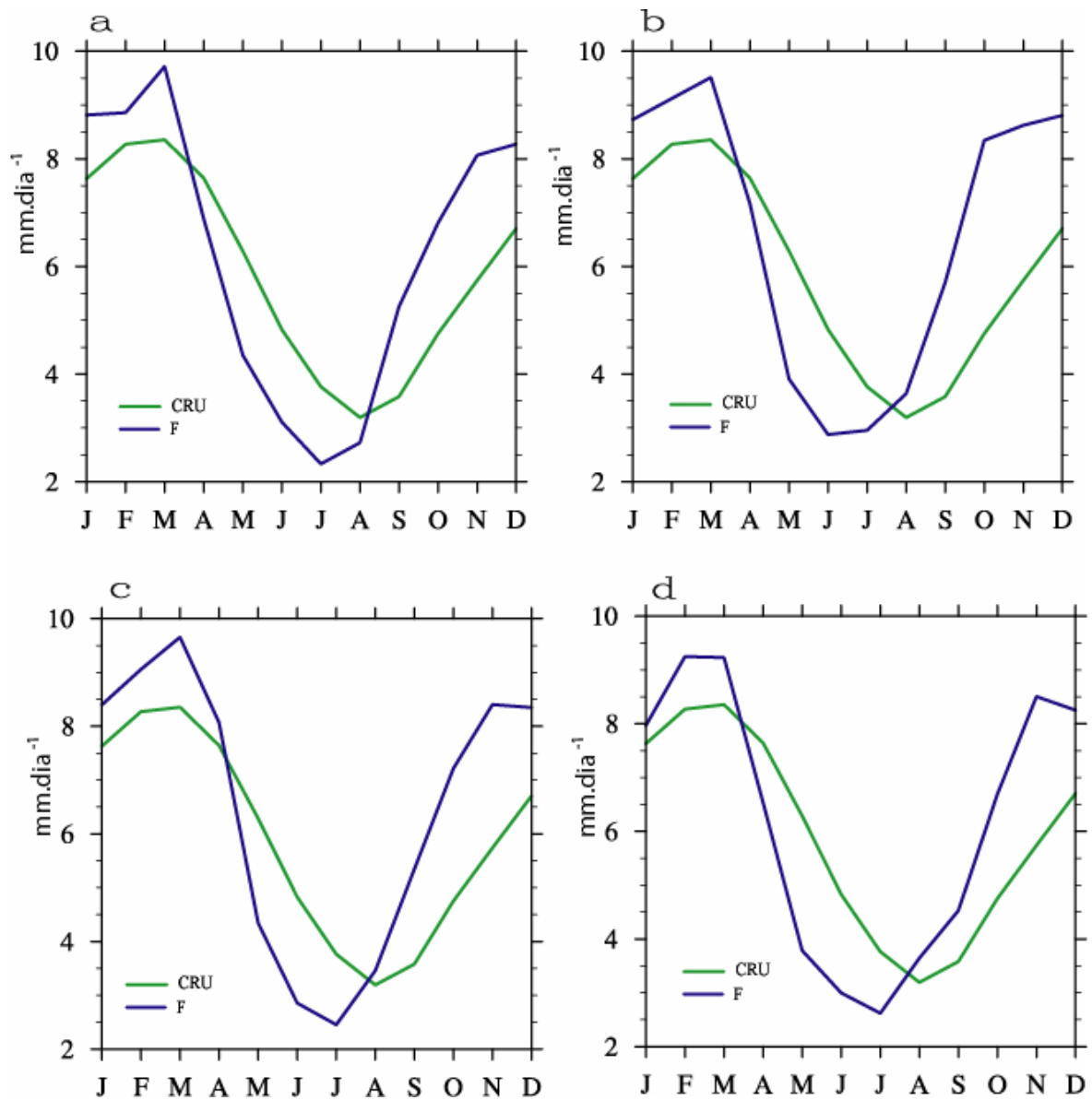


Figura 68: Variação sazonal da precipitação (mm.dia⁻¹) obtidas do banco de dados do CRU e dos valores das simulações do CCM3 (F): (a) com $\delta z = 0$ (b) $\delta z = 0,5$ (c) $\delta z = 2,0$ e (d) = 5,0.

APÊNDICE B

No modelo CCM3 a precipitação é gerada tanto por parametrização de convecção profunda como por rasa. A precipitação estratiforme é produzida pela parametrização de convecção rasa que depende do parâmetro β , na qual é uma função da umidade relativa onde:

$$\beta = \max \left\{ \begin{array}{l} \beta_{\min} \\ \min \left\{ \begin{array}{l} \beta_{\max} \\ 1 + \frac{(h_c - \bar{h}_{k-1}^*) \Delta p_{k-1}}{(h_c - \bar{h}_k^*) \Delta p_k} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

em que, o valor de β_{\min} é 0.10, h_c é energia estática úmida, h^* é energia úmida saturada, Δp , k e $k-1$ são os níveis das camadas verticais da atmosfera. Desde que β determina efetivamente a real auto-conversão a partir de água da nuvem para água pluvial, β_{\max} é determinado a partir de uma auto-conversão mínima requerida a qual é escrita matematicamente como:

$$\beta_{\max} = \max \left\{ \begin{array}{l} \beta_{\min} \\ 1 - c_0(\delta z - \delta z_{\min}) \end{array} \right.$$

em que, c_0 é um coeficiente de auto-conversão da precipitação, δz é a profundidade de atividade de convectividade contígua incluindo camada inferior k , e δz_{\min} é uma profundidade mínima para precipitar por convecção. As condições de contornos físicas no ajuste dos processos são aplicadas para determinar o valor real de B apropriado para a estabilização dos níveis k e $k+1$.