

LEYDIMERE JANNY COTA OLIVEIRA

**CENÁRIOS FUTUROS PARA A AMAZÔNIA: INTERAÇÕES ENTRE O
DESMATAMENTO, AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS, O ECOSISTEMA
NATURAL E OS SISTEMAS AGRÍCOLAS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

O48c
2012

Oliveira, Leydimere Janny Cota, 1981-
Cenários futuros para a Amazônia : interações entre o
desmatamento, as mudanças climáticas, o ecossistema natural
e os sistemas agrícolas / Leydimere Janny Cota Oliveira. –
Viçosa, MG, 2012.
xxx, 164f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Marcos Heil Costa.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 156-164

1. Climatologia agrícola - Modelos matemáticos. 2. Solo -
Uso - Amazônia. 3. Conservação da natureza. 4. Biomassa
florestal. 5. Mudanças climáticas. 6. Florestas tropicais -
Amazônia. 7. Produtividade agrícola. I. Universidade Federal
de Viçosa. II. Título.

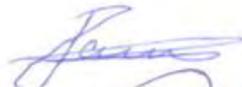
CDD 22. ed. 551.6

LEYDIMERE JANNY COTA OLIVEIRA

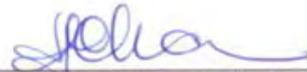
**CENÁRIOS FUTUROS PARA A AMAZÔNIA: INTERAÇÕES ENTRE O
DESMATAMENTO, AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS, O ECOSISTEMA
NATURAL E OS SISTEMAS AGRÍCOLAS**

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

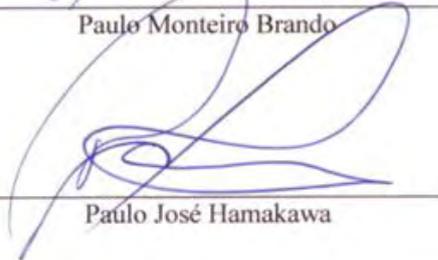
APROVADA: 26 de abril de 2012.



Paulo Monteiro Brando



Dênis Antônio da Cunha



Paulo José Hamakawa



Britaldo Silveira Soares Filho
(Coorientador)



Marcos Heil Costa
(Orientador)

À minha mãe (in memoriam)
Ao meu filho (in memoriam)
Aos meus avós (in memoriam)
DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo.

À Coordenação de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa do Programa de Doutorado no País com Estágio no Exterior – PDEE.

Aos pesquisadores e demais funcionários do Woods Hole Research Center, em especial, Michael Coe, Claudia Stickler, Andrea Castanho, Daniel Nepstad, Wendy Kingerlee e Allison White pelas contribuições e pela infraestrutura oferecida para a conclusão deste trabalho.

Ao professor Marcos Heil Costa, pela orientação, pela amizade e sobretudo por sempre instigar minha curiosidade.

Ao professor Britaldo Silveira Soares Filho e aos colegas do Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais, pela paciência durante o extensivo período de treinamento na plataforma DinamicaEgo.

Ao professor Dênis Antônio da Cunha e ao pesquisador Paulo Monteiro Brando pelas valiosas contribuições e amizade.

Ao professor Paulo José Hamakawa pelas sugestões e questionamentos.

Aos demais professores da pós-graduação em Meteorologia Agrícola, pelos ensinamentos proferidos.

Aos meus colegas do Grupo de Pesquisa em Interação Biosfera-Atmosfera pelo coleguismo e pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos na pós-graduação em Meteorologia Agrícola, em especial Roziane, Robson e Luciana, pelo apoio e incentivo. Não existe distância para a amizade verdadeira.

À Letícia Braidá e Graça Freitas, pelo carinho, pela dedicação e apoio.

Aos funcionários e técnicos do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo suporte.

À Catherine, Dick e Amanda por me permitirem fazer parte da família Fay.

Aos meus cunhados Arlinda e Toninho, aos meus primos Liviane, Adriano e Lívio, a minha tia Leísse, por todo o apoio e hospitalidade.

À minha amiga e madrinha Amélia, sempre presente dando-me forças em todas as questões da minha vida.

À minha sobrinha-afilhada recém chegada Rafaela e à minha sobrinha Ana Laura que está a caminho, pela esperança no milagre da vida.

Ao meu pai, Ledes, a minha madrastra, Rita, aos meus irmãos, Ledes Jr., Ledianá e Leandro, meu sobrinho Pedro Lucas, aos meus cunhados Remo Jr. e Juliana, por serem a minha maior escola, pelo apoio incondicional, pelo porto seguro, pelo estímulo, pelo amor e carinho.

Ao meu marido Marcelo, pelo apoio nas horas difíceis, pelo estímulo e pelo amor, carinho e atenção que me foram dedicados, o qual de forma grandiosa soube suportar as dificuldades e curtir os bons momentos.

A DEUS pela presença em todos os momentos de minha vida.

BIOGRAFIA

LEYDIMERE JANNY COTA OLIVEIRA, filha de Ledes Cota e Maria das Dores Mota Cota, nasceu em 17 de fevereiro de 1981, em Alvinópolis, no estado de Minas Gerais.

Em julho de 2005, concluiu o curso de graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais.

Em agosto de 2007, concluiu o curso de pós-graduação, em nível de mestrado em Meteorologia Agrícola na UFV.

Em março de 2008, iniciou o curso de pós-graduação, em nível de doutorado em Meteorologia Agrícola na UFV, com período sanduíche no Woods Hole Research Center, submetendo-se à defesa de tese em 26 de abril de 2012.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxv
RESUMO.....	xxvii
ABSTRACT.....	xxvix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. DINÂMICA DO SISTEMA ACOPLADO ATMOSFERA-BIOSFERA NA AMAZÔNIA.....	5
2.2. FORÇANTES EXTERNAS AO SISTEMA.....	8
2.2.1. Desmatamento.....	8
2.2.2. Aquecimento global	16
3. METODOLOGIA.....	23
3.1. ÁREA DE ESTUDO	23
3.2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO	24
3.2.1. Clima atual	25
3.2.2. Desmatamento.....	26
3.2.3. Mudanças climáticas devido à mudança na composição atmosférica	28
3.2.4. Mudanças climáticas devido à modificação no uso do solo	29
3.2.5. Clima futuro	31
3.2.6. Produtividade do ecossistema natural	32
3.2.7. Produtividade da soja	34
3.2.8. Produtividade da pastagem	36
3.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS.....	37
3.4. TESTE E AVALIAÇÃO DO MODELO.....	38
3.5. AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA DO ECOSISTEMA NATURAL E DA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA	40

3.6. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO	44
4.1.1. Módulo CARLUC.....	44
4.1.2. Módulo soja.....	46
4.1.3. Módulo pastagem.....	47
4.2. AVALIAÇÃO DO MODELO.....	48
4.2.1. Módulo CARLUC.....	48
4.2.2. Módulo soja.....	51
4.2.3. Módulo pastagem.....	56
4.3. SIMULAÇÃO CONTROLE.....	57
4.3.1. Módulo CARLUC.....	57
4.3.2. Módulo soja.....	60
4.3.3. Módulo pastagem.....	61
4.4. SIMULAÇÕES CONSIDERANDO OS CENÁRIOS FUTUROS.....	62
4.4.1. Efeitos dos cenários futuros no ecossistema natural para o ano de 2020. 63	
4.4.1.1. Efeito radiativo da elevação do CO ₂ (aquecimento global)	63
4.4.1.2. Efeito radiativo (aquecimento global) e fisiológico da elevação de CO ₂	67
4.4.1.3. Efeitos climáticos das mudanças no uso do solo.....	70
4.4.1.4. Efeito radiativo e fisiológico da elevação de CO ₂ e das mudanças no uso do solo	72
4.4.1.5. Síntese.....	83
4.4.2. Efeitos dos cenários futuros na produtividade da pastagem para o ano de 2020.....	84
4.4.2.1. Efeito radiativo da elevação do CO ₂ (aquecimento global)	84
4.4.2.2. Efeito radiativo (aquecimento global) e fisiológico da elevação de CO ₂	86
4.4.2.3. Efeitos climáticos das mudanças no uso do solo.....	88
4.4.2.4. Efeito radiativo e fisiológico da elevação de CO ₂ e das mudanças no uso do solo	90
4.4.2.5. Síntese.....	94

4.4.3. Efeitos dos cenários futuros na produtividade da soja para o ano de 2020.....	95
4.4.3.1. Efeito radiativo da elevação do CO ₂ (aquecimento global)	95
4.4.3.2. Efeito radiativo (aquecimento global) e fisiológico da elevação de CO ₂	97
4.4.3.3. Efeitos climáticos das mudanças no uso do solo	99
4.4.3.4. Efeito radiativo e fisiológico da elevação de CO ₂ e das mudanças no uso do solo	100
4.4.3.5. Síntese.....	105
4.4.4. Efeitos dos cenários futuros no ecossistema natural para o ano de 2050.....	105
4.4.4.1. Efeito radiativo da elevação do CO ₂ (aquecimento global)	105
4.4.4.2. Efeito radiativo (aquecimento global) e fisiológico da elevação de CO ₂	108
4.4.4.3. Efeitos climáticos das mudanças no uso do solo	111
4.4.4.4. Efeito radiativo e fisiológico da elevação de CO ₂ e das mudanças no uso do solo	113
4.4.4.5. Síntese.....	122
4.4.5. Efeitos dos cenários futuros na produtividade da pastagem para o ano de 2050.....	123
4.4.5.1. Efeito radiativo da elevação do CO ₂ (aquecimento global)	123
4.4.5.2. Efeito radiativo (aquecimento global) e fisiológico da elevação de CO ₂	125
4.4.5.3. Efeitos climáticos das mudanças no uso do solo	127
4.4.5.4. Efeito radiativo e fisiológico da elevação de CO ₂ e das mudanças no uso do solo	129
4.4.5.5. Síntese.....	133
4.4.6. Efeitos dos cenários futuros na produtividade da soja para o ano de 2050.....	133
4.4.6.1. Efeito radiativo da elevação do CO ₂ (aquecimento global)	133
4.4.6.2. Efeito radiativo (aquecimento global) e fisiológico da elevação de CO ₂	135
4.4.6.3. Efeitos das mudanças no uso do solo	137

4.4.6.4. Efeito radiativo e fisiológico da elevação de CO ₂ e das mudanças no uso do solo	139
4.4.6.5. Síntese.....	143
4.5. AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA DA FLORESTA E DAS CULTURAS AGRÍCOLAS	143
4.6. DISCUSSÃO DO EFEITO DA POLÍTICA PÚBLICA (GOVxBAU) NO ESTOQUE DE CARBONO, PRODUÇÃO DE SOJA E CARNE	146
4.7. QUAL AGENTE EXTERNO É MAIS IMPORTANTE (DESMATAMENTO OU AQUECIMENTO GLOBAL)? QUAL TIPO DE GOVERNANÇA É MAIS IMPORTANTE (GOVERNANÇA NO USO DO SOLO, MITIGAÇÃO DE CO ₂ OU ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS)?	149
4.8. AVALIAÇÃO SOCIOECONÔMICA DOS RESULTADOS	150
5. CONCLUSÕES	152
5.1. RESUMO	152
5.2. CONCLUSÕES	154
5.3. RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	155
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	156

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Diagrama dos processos e interações socioeconômicos e naturais que podem levar ao ponto de desequilíbrio da Amazônia. Esse diagrama foi baseado nos conceitos de Nepstad *et al.* (2008). Caixas pontilhadas representam as principais forçantes externas do sistema, as caixas brancas representam os principais processos socioeconômicos envolvidos, as caixas cinza-claras representam os principais problemas naturais envolvidos e a caixa cinza-escura representa o ponto de desequilíbrio do sistema, o qual muitos autores denominam savanização da Amazônia.....8
- Figura 2. Taxa anual de desmatamento ($\text{km}^2.\text{ano}^{-1}$). Disponível em: www.obt.inpe.br/prodes.....10
- Figura 3. Fluxograma conceitual dos efeitos climáticos do desmatamento tropical de grande escala no balanço hídrico, fluxos da camada limite e clima (Fonte: Snyder *et al.*, 2004).....14
- Figura 4. Esquema dos mecanismos de retroalimentações envolvidas na mudança climática e na degradação da floresta na Amazônia, considerando o aquecimento global e os impactos humanos diretos na floresta (Fonte: Betts *et al.*, 2007).....20
- Figura 5. Área correspondente à Amazônia Legal Brasileira.....23
- Figura 6. Fluxograma da inter-relação dos principais componentes do modelo..24
- Figura 7. Normal climatológica para a Amazônia Legal obtida a partir do banco de dados construído por Sheffield *et al.* (2006). Precipitação média anual (mm.a^{-1}) (a), radiação solar média (W.m^{-2}) (b), temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) (c), pressão atmosférica média (kPa) (d) e umidade específica média (kg.kg^{-1}) (e).....26
- Figura 8. Cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006): controle (a); BAU 2020 (b); BAU 2050 (c); GOV 2020 (d) e GOV 2050 (e).....27
- Figura 9. Anomalias trimestrais de precipitação como função de anomalias de albedo para os trimestres: janeiro a março (a), abril a junho (b), julho a setembro (c), outubro a dezembro (d) e todos os trimestres (e). Quadros brancos representam pastagem e quadros cinzas representam soja. Fonte: Yanagi (2006).....30

Figura 10.	Análise de sensibilidade da biomassa, relativa aos parâmetros <i>cue</i> (eficiência do uso do carbono), <i>qe</i> (eficiência quântica) e <i>sla</i> (área foliar específica); e às variáveis climáticas: <i>PAR</i> (radiação fotossinteticamente ativa), <i>prec</i> (precipitação) e <i>Temp</i> (temperatura do ar), para o modelo CARLUC.....	45
Figura 11.	Análise de sensibilidade do NPP, relativa aos parâmetros: <i>cue</i> (eficiência do uso do carbono), <i>qe</i> (eficiência quântica) e <i>sla</i> (área foliar específica); e às variáveis climáticas: <i>PAR</i> (radiação fotossinteticamente ativa), <i>prec</i> (precipitação) e <i>Temp</i> (temperatura do ar), para o modelo CARLUC.....	45
Figura 12.	Análise de sensibilidade da produtividade da soja, relativa aos parâmetros: <i>GDF</i> (graus-dias florescimento), <i>GDM</i> (graus-dias maturação) e <i>LUE</i> (eficiência do uso da luz) e às variáveis climáticas: <i>PAR</i> (radiação fotossinteticamente ativa), <i>prec</i> (precipitação) e <i>temp</i> (temperatura do ar), para o modelo Soja.....	47
Figura 13.	Análise de sensibilidade da matéria seca da pastagem, relativa aos parâmetros: <i>LUE</i> (eficiência do uso da luz), σ (taxa base de senescência) e às variáveis climáticas: <i>PAR</i> (radiação fotossinteticamente ativa), <i>prec</i> (precipitação) e <i>temp</i> (temperatura do ar), para o modelo Pastagem.....	48
Figura 14.	Gráfico de dispersão entre os dados observados e os resultados simulados pelo modelo após a calibração dos parâmetros.....	52
Figura 15.	Produtividade média da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) simulada pelo modelo e observada para o estado do Mato Grosso.....	53
Figura 16.	Produtividade média da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) simulada pelo modelo e observada para o estado de Rondônia.....	53
Figura 17.	Produtividade média da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) simulada pelo modelo e observada para o estado do Maranhão.....	54
Figura 18.	Produtividade média da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) simulada pelo modelo e observada para o estado do Pará.....	54
Figura 19.	Produtividade média da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) simulada pelo modelo e observada para o estado do Tocantins.....	55
Figura 20.	Produtividade média da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) simulada pelo modelo e observada para o estado do Amazonas.....	55
Figura 21.	Produtividade de matéria seca pela pastagem ($\text{tonMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) simulada pelo modelo para a região de estudo e a indicada pela Embrapa (1985).....	56

Figura 22.	Distribuição espacial do carbono total modelado (kgC.m^{-2}) para a Amazônia.....	57
Figura 23.	Distribuição espacial da biomassa viva modelada (kgC.m^{-2}) para a Amazônia.....	58
Figura 24.	Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo modelada (kgC.m^{-2}) para a Amazônia.....	58
Figura 25.	Distribuição espacial da produtividade primária líquida modelada ($\text{kgC.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$) para a Amazônia.....	59
Figura 26.	Distribuição espacial do índice de área foliar modelado ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) para a Amazônia.....	59
Figura 27.	Curva de resposta ao longo dos meses da biomassa viva acima do solo.....	60
Figura 28.	Distribuição espacial da produtividade da soja (kg.ha^{-1}) para a simulação controle.....	61
Figura 29.	Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) para a simulação controle.....	62
Figura 30.	Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2020: IPCC2-clima médio (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).....	65
Figura 31.	Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....	66
Figura 32.	Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2020: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).....	68
Figura 33.	Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....	69
Figura 34.	Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho <i>et al.</i> (2006) para o ano de 2020: GOV PAS (a), GOV SOJA (b), BAU PAS (c) e BAU SOJA.....	71

- Figura 35. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2020: controle (a), GOV PAS (b), GOV SOJA (c), BAU PAS (d) e BAU SOJA (e).....71
- Figura 36. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).....73
- Figura 37. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).....74
- Figura 38. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).....74
- Figura 39. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).....75
- Figura 40. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....77
- Figura 41. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....79

- Figura 42. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....81
- Figura 43. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....83
- Figura 44. Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....85
- Figura 45. Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....87
- Figura 46. Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2020: controle (a), GOV (b) e BAU (c).....89
- Figura 47. Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....91
- Figura 48. Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....92
- Figura 49. Distribuição espacial da produtividade da soja (kg.ha^{-1}), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....96

- Figura 50. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....98
- Figura 51. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2020: controle (a), GOV (b) e BAU (c).....100
- Figura 52. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....103
- Figura 53. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....104
- Figura 54. Anomalias de biomassa viva acima do solo ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2050: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).....106
- Figura 55. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....107
- Figura 56. Anomalias de biomassa viva acima do solo ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2050: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).....109
- Figura 57. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico da elevação do CO_2 para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....110
- Figura 58. Anomalias de biomassa viva acima do solo ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2050: GOV PAS (a), GOV SOJA (b), BAU PAS (c) e BAU SOJA (d).....112

- Figura 59. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2050: controle (a), GOV PAS (b), GOV SOJA (c), BAU PAS (d) e BAU SOJA (e).....112
- Figura 60. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050: : IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).....114
- Figura 61. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).....114
- Figura 62. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).....115
- Figura 63. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).....115
- Figura 64. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....116
- Figura 65. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....117

- Figura 66. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....118
- Figura 67. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....119
- Figura 68. Distribuição espacial da produtividade da pastagem (kgMS.ha^{-1}), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....124
- Figura 69. Distribuição espacial da produtividade da pastagem (kgMS.ha^{-1}), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....126
- Figura 70. Distribuição espacial da produtividade da pastagem (kgMS.ha^{-1}), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2050: controle (a), GOV (b) e BAU (c).....128
- Figura 71. Distribuição espacial da produtividade da pastagem (kgMS.ha^{-1}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....131
- Figura 72. Distribuição espacial da produtividade da pastagem (kgMS.ha^{-1}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....132
- Figura 73. Distribuição espacial da produtividade da soja (kg.ha^{-1}), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....134

- Figura 74. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....136
- Figura 75. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho et al. (2006) para o ano de 2050: controle (a), GOV (b) e BAU (c).....138
- Figura 76. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....141
- Figura 77. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).....142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Área desmatada total (km ²) para os diferentes cenários de desmatamento.....	28
Tabela 2.	Modelos utilizados nas simulações considerando as mudanças climáticas devido à mudança na composição atmosférica	28
Tabela 3.	Identificação dos sítios experimentais na Amazônia.....	40
Tabela 4.	NPP (kgC.m ⁻² .a ⁻¹) simulada pelo modelo CARLUC e NPP observada por Aragão <i>et al.</i> (2009) e erro relativo médio (ε, %)	49
Tabela 5.	LAI (m ² .m ⁻²) simulada pelo modelo CARLUC e LAI observada (projeto MOORE) e erro relativo médio (ε, %)	50
Tabela 6.	AGB (kgC.m ²) simulada pelo modelo CARLUC e AGB observada por Baker <i>et al.</i> (2004) e erro relativo médio (ε, %)	50
Tabela 7.	Anomalias de temperatura média anual (em °C) e precipitação média anual (em mm.a ⁻¹) simuladas pelos modelos para o período de 2011 a 2030 e respectivos fatores ambientais usados no CARLUC	64
Tabela 8.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m ⁻²), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m ⁻²) e % de redução para cada cenário climático para o ano de 2020.....	67
Tabela 9.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m ⁻²), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m ⁻²) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO ₂ para o ano de 2020.....	69
Tabela 10.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m ⁻²), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m ⁻²) e % de redução para cada cenário futuro de desmatamento obtidos por Soares-Filho <i>et al.</i> (2006), “BAU” e “GOV”, nos quais as células desmatadas foram substituídas pela pastagem e pela soja para o ano de 2020.....	72
Tabela 11.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m ⁻²), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m ⁻²) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO ₂ , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020	76

Tabela 12.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020	78
Tabela 13.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020	80
Tabela 14.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020	82
Tabela 15.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário testado para o ano de 2020	84
Tabela 16.	Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário climático futuro para o ano de 2020.....	86
Tabela 17.	Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 para o ano de 2020	88
Tabela 18.	Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário futuro de desmatamento obtidos por Soares-Filho <i>et al.</i> (2006) “BAU” e “GOV”, nos quais as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020	89
Tabela 19.	Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 e o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020.....	93
Tabela 20.	Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 e o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020.....	94

Tabela 21.	Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário testado para o ano de 2020	94
Tabela 22.	Produtividade média para o cenário controle (kg.ha^{-1}), anomalias de produtividade (kg.ha^{-1}) e % de redução para cada cenário climático futuro para o ano de 2020	95
Tabela 23.	Produtividade média para o cenário controle (kg.ha^{-1}), anomalias de produtividade (kg.ha^{-1}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 para o ano de 2020	97
Tabela 24.	Produtividade média para o cenário controle (kg.ha^{-1}), anomalias de produtividade (kg.ha^{-1}) e % de redução para cada cenário futuro de desmatamento obtidos por Soares-Filho <i>et al.</i> (2006) “BAU” e “GOV”, nos quais as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020	99
Tabela 25.	Produtividade média para o cenário controle (kg.ha^{-1}), anomalias de produtividade (kg.ha^{-1}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 e o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020	101
Tabela 26.	Produtividade média para o cenário controle (kg.ha^{-1}), anomalias de produtividade (kg.ha^{-1}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 e o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020	102
Tabela 27.	Produtividade média para o cenário controle (kg.ha^{-1}), anomalias de produtividade (kg.ha^{-1}) e % de redução para cada cenário testado para o ano de 2020	105
Tabela 28.	Anomalias de temperatura (em $^{\circ}\text{C}$) e precipitação (em mm.mês) simuladas pelos modelos para o período de 2045 a 2065 e fatores ambientais usados no CARLUC	106
Tabela 29.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático para o ano de 2050	108
Tabela 30.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro considerando o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2050.....	111

Tabela 31.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro considerando o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2050	113
Tabela 32.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050	120
Tabela 33.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050	121
Tabela 34.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050	121
Tabela 35.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050	122
Tabela 36.	Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário testado para o ano de 2020	123
Tabela 37.	Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário climático futuro para o ano de 2050	125
Tabela 38.	Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 para o ano de 2050	127
Tabela 39.	Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário futuro de desmatamento obtidos por Soares-Filho <i>et al.</i> (2006) “BAU” e “GOV”, nos quais as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050	128

Tabela 40.	Produtividade média para o cenário controle (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹), anomalias de produtividade (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO ₂ e o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050.....	129
Tabela 41.	Produtividade média para o cenário controle (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹), anomalias de produtividade (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO ₂ e o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050.....	130
Tabela 42.	Produtividade média para o cenário controle (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹), anomalias de produtividade (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹) e % de redução para cada cenário testado para o ano de 2050	133
Tabela 43.	Produtividade média para o cenário controle (kg.ha ⁻¹), anomalias de produtividade (kg.ha ⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro para o ano de 2050	135
Tabela 44.	Produtividade média para o cenário controle (kg.ha ⁻¹), anomalias de produtividade (kg.ha ⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO ₂ para o ano de 2050	137
Tabela 45.	Produtividade média para o cenário controle (kg.ha ⁻¹), anomalias de produtividade (kg.ha ⁻¹) e % de redução para cada cenário futuro de desmatamento obtidos por Soares-Filho <i>et al.</i> (2006) “BAU”e “GOV”, nos quais as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050	138
Tabela 46.	Produtividade média para o cenário controle (kg.ha ⁻¹), anomalias de produtividade (kg.ha ⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO ₂ e o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050.....	139
Tabela 47.	Produtividade média para o cenário controle (kg.ha ⁻¹), anomalias de produtividade (kg.ha ⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO ₂ e o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050.....	140
Tabela 48.	Produtividade média para o cenário controle (kg.ha ⁻¹), anomalias de produtividade (kg.ha ⁻¹) e % de redução para cada cenário testado para o ano de 2050	143

- Tabela 49. Valores médios de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), valores de t e de p para os anos de 2020 e de 2050. Valor médio de biomassa para o cenário controle é de $17,9 \text{ kgC.m}^{-2}$ 144
- Tabela 50. Valores médios de produtividade da pastagem ($\text{MgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) valores de t e de p para os anos de 2020 e de 2050. Valor médio de produtividade da pastagem para o cenário controle é de $16,2 \text{ MgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$ 145
- Tabela 51. Valores médios de produtividade da soja (Mg.ha^{-1}) valores de t e de p para os anos de 2020 e de 2050. Valor médio de produtividade da pastagem para o cenário controle é de $2,7 \text{ Mg.ha}^{-1}$ 146
- Tabela 52. Estoque de carbono na biomassa viva acima do solo (PgC) na Amazônia Legal Brasileira nos diferentes cenários avaliados e intervalo de confiança de 95%. O estoque de carbono na simulação controle é de $91,6 \pm 13,2 \text{ PgC}$147
- Tabela 53. Produção de carne em milhões de toneladas, considerando que toda a área desmatada seria ocupada pela pastagem nos diferentes cenários avaliados e intervalo de confiança de 95%148
- Tabela 54. Produção de soja em milhões de toneladas, considerando que toda a área desmatada seria ocupada pela soja nos diferentes cenários avaliados e intervalo de confiança de 95%. A produção de soja na simulação controle é de $404,6 \pm 24,0$ milhões de toneladas148

LISTA DE SÍMBOLOS

AGB	biomassa viva acima do solo
ARM	água armazenada no solo
a_{NSR}	coeficiente linear relacionado aos processos não radiativos e retroalimentações de radiação de onda longa
BAU	negócio como habitual
α_{ca}	albedo das culturas agrícolas
α_s	albedo do solo
b_{SR}	coeficiente angular relacionado apenas aos processos de radiação solar
β	Fator de sensibilidade
CA	conversão alimentar
CAD	capacidade de água disponível
ckm	fator de conversão
cue	eficiência do uso do carbono
DM	matéria seca
dswrf	radiação solar
ETP	evapotranspiração potencial
ETR	evapotranspiração real
ε	erro médio relativo
f_{APAR}	fração absorvida de PAR
f_{TEMP}	fator de temperatura
f_{SE}	taxa de senescência
f_{SW}	fator de água no solo
f_{VPD}	fator de déficit de pressão de vapor
GDF	graus-dias para florescimento
GDM	graus-dias para maturação
GEE	gases de efeito estufa
GOV	governança

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
k	coeficiente de extinção
k_{leaf}	taxa de decomposição das folhas
k_{stem}	taxa de decomposição de tronco
LAI	índice de área foliar
LUE	eficiência do uso da luz
n	número de observações
O_i	valores observados
P	pressão atmosférica
P'	anomalia de precipitação
PAR	radiação fotossinteticamente ativa
PAW_{max}	percentagem máxima de água disponível para a planta
p_{leaf}	partição de carbono para folhas
prec	precipitação
p_{root}	partição de carbono para raízes finas
p_{stem}	partição de carbono para tronco
P_i	valores simulados
q_e	eficiência quântica
r	coeficiente de correlação
REQM	raiz quadrada do erro médio
sla	área foliar específica
Sr'	radiação refletida à superfície
shum	umidade específica
SUDAM	Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia
σ	taxa base de senescência
temp	temperatura do ar
TSM	temperatura da superfície do mar

RESUMO

OLIVEIRA, Leydimere Janny Cota, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2012. **Cenários futuros para a Amazônia: interações entre o desmatamento, as mudanças climáticas, o ecossistema natural e os sistemas agrícolas.** Orientador: Marcos Heil Costa. Coorientadores: Britaldo Silveira Soares Filho e Aristides Ribeiro.

A Floresta Amazônica é um dos mais importantes ecossistemas do mundo, possuindo a maior biodiversidade do planeta. Apesar de toda sua relevância, ela vem sendo submetida a pressões antrópicas nas últimas décadas. A expansão da agricultura e da pecuária tem sido considerada a principal causa do desmatamento na região. Considerando-se a importância do entendimento dos processos de retroalimentação clima-biosfera na Amazônia, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a resiliência do ecossistema natural e da produtividade da soja e da pastagem em diferentes níveis de desmatamento e elevação de CO₂, por meio de um modelo simplificado que represente as interações entre o clima e o uso do solo na Amazônia. Foram realizadas cinco conjuntos de simulações: (1) controle, (2) efeito radiativo (aquecimento global) do CO₂, (3) efeito radiativo e fisiológico do CO₂, (4) efeito climático da mudança no uso do solo e (5) efeitos radiativo e fisiológico do CO₂ + mudanças no uso do solo. Em seguida, as produtividades simuladas, considerando todos os efeitos dos cenários futuros para os anos de 2020 e 2050, foram comparadas à simulação controle. Para a simulação controle, a biomassa viva acima do solo (AGB) modelada para o ecossistema natural, incluindo folhas e tronco, na Amazônia, variou de 5,1 a 20,7 kgC.m⁻², com valor médio 17,9 kgC.m⁻², geralmente decrescendo de norte para o sul. A produtividade primária líquida (NPP) mostrou o mesmo padrão geográfico, com valores variando de 1,04 a 1,29 kgC.m⁻².a⁻¹ e valor médio de 1,21 kgC.m⁻².a⁻¹. Enquanto a produtividade de grãos da soja variou de 1.610 a 3.665 kg.ha⁻¹, com valor médio 2.704,7 kg.ha⁻¹. Já a produtividade de matéria seca da pastagem variou de 6.852 a 23.766 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, com valor médio de 16.245,5 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹. Como resposta às mudanças climáticas para o ano de 2020, foram encontradas alterações médias na AGB de -16%, na produtividade da soja de -10% e na produtividade da pastagem de -2%. Com a introdução do efeito fisiológico

nas simulações, as alterações foram de -7% para a AGB, de -4% para a soja e de +1% para a pastagem. Como resposta à mudança no uso do solo, a AGB decresceu em relação à simulação controle até 37% quando a área desmatada foi substituída por soja, enquanto decresceu até 34% quando a área desmatada foi substituída por pastagem. Já a produtividade da soja e da pastagem decresceram até 18% e 29%, respectivamente. Quando foram analisados todos os efeitos conjuntamente, a AGB decaiu até 37%, a produtividade da soja -21% e da pastagem -29%. Para o ano de 2050, as alterações na AGB, na produtividade da soja e da pastagem também foram maiores nas simulações em que todos os efeitos foram considerados, com redução de até 63% na AGB, de até 31% para a produtividade da soja e de até 33% para a produtividade da pastagem no cenário mais pessimista. Os efeitos combinados das mudanças climáticas causadas pela mudança na composição atmosférica e pela mudança no uso do solo provocaram uma redução significativa na produtividade do ecossistema natural e das duas culturas agrícolas analisadas. De maneira geral, o efeito do desmatamento foi o mais importante para essa redução, portanto, a identificação de áreas estratégicas para a preservação do ecossistema natural associada ao desenvolvimento de novos cultivares adaptados às condições climáticas futuras poderiam fortalecer a agropecuária na Amazônia, propiciando um melhor proveito das áreas já desmatadas, sem a necessidade de avançar-se de modo tão acelerado sobre as florestas.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Leydimere Janny Cota, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2012. **Future scenarios for the Amazon: interactions between deforestation, climate change, natural ecosystem, and agricultural systems.** Adviser: Marcos Heil Costa. Co-advisers: Britaldo Silveira Soares Filho and Aristides Ribeiro.

The Amazon rainforest is one of the most important ecosystems in the world with the highest biodiversity on the planet. In spite of this reputation however, it has been subjected to anthropogenic pressures in recent decades. The expansion of agriculture and livestock has been considered the main cause of deforestation in the region. Because it is important to understand the biosphere-atmosphere feedbacks processes in the Amazon, this work was done to evaluate the resilience of the natural ecosystem and the productivity of soybean and pasture at different levels of deforestation and increased [CO₂]. A simplified model that represents the interactions between climate, forest and land use in Amazonia was used. We implemented five sets of simulations as follows: (1) control, (2) radiative effect (global warming) of CO₂, (3) radiative and physiological effects of CO₂, (4) effect of changes in land use and (5) radiative and physiological effects of CO₂ plus changes in land use. The productivity simulated which considered all the effects of future scenarios for the years 2020 and 2050 were compared to the control simulation. For the control simulation, we aboveground live biomass (AGB) modeled, including live leaf and wood pools, in Amazonia ranged from 5.1 to 20.7 kgC.m⁻², with a mean value of 17.9 kgC.m⁻², generally decreasing from north to south. Net primary productivity (NPP) showed the same geographic pattern, with values ranging from 1.04 to 1.29 kgC.m⁻².yr⁻¹, with a mean value of 1.21 kgC.m⁻².yr⁻¹. While the soybean yield ranged from 1610 to 3665 kg.ha⁻¹, with a mean value of 2704.7 kg ha⁻¹ the dry matter pasture yield ranged from 6,852 to 23,766 kgDM.ha⁻¹.yr⁻¹ with a mean value of 16,245.5 kgDM.ha⁻¹.yr⁻¹. In response to climate change for the year 2020, we found changes in AGB of -16%, in soybean yield of -10% and in pasture yield of -2%. With the introduction of physiological effects in simulations the changes were -7% for AGB, -4% for soybean and +1% for the pasture. In response to the change in

land use, AGB declined in relation to control simulation to 37% when the deforested area was replaced by soybeans, and it decreased to 34% when the deforested area was replaced by pasture. The soybean yield and pasture productivity decreased to 18% and 29%, respectively. When all the effects were analyzed jointly, AGB declined to 37%, soybean yield to 21% and pasture productivity to 29%. For the year 2050 changes in AGB, in soybean yield and in pasture productivity were also higher in the simulations in which all effects were considered, with a 63% reduction in the AGB, 31% for soybean yield and 33% for pasture productivity in a pessimistic scenario. The combined effects of climate change (due to changes in atmospheric composition) and change in land use caused a significant reduction in the productivity of the natural ecosystem and in the two crops analyzed. In general, the effect of deforestation was the most important factor for this reduction. The identification of strategic areas for the preservation of natural ecosystems associated with the development of new cultivars adapted to future climatic conditions would strengthen agriculture in the Amazon. This identification would make better use of areas already deforested without the need to move so rapidly in the remaining forests.

1. INTRODUÇÃO

A Floresta Amazônica é um dos mais importantes ecossistemas do mundo, possuindo a maior biodiversidade do planeta (Dirzo e Raven, 2003). Ela apresenta um papel crucial no sistema climático terrestre, especialmente na circulação atmosférica (Zeng e Neelin, 1999; Costa e Foley, 2000), e é um grande reservatório de carbono (Houghton *et al.*, 2000). Ademais, 15 a 20% da água doce do planeta escoam por sua bacia e deságuam no Oceano Atlântico, juntando-se aos demais oceanos que, por sua vez, são também importantes reguladores do sistema climático global (Davidson e Artaxo, 2004).

Apesar de toda a relevância da Floresta Amazônica para o sistema climático regional e global, ela vem sendo submetida a intensas pressões antrópicas nas últimas décadas. Demandas mundiais crescentes por proteína animal e vegetal estão criando novos e poderosos incentivos para a expansão agroindustrial em regiões da Floresta Amazônica. A ação do homem sobre o solo pode produzir alterações substanciais nos processos hidrológicos terrestres, como mudanças nas vazões médias, máximas e mínimas de uma bacia hidrológica e alteração da qualidade da água (Tucci, 2002). Por meio de análise estatística de dados de precipitação e vazão, Costa *et al.* (2003) verificaram que a vazão média anual do rio Tocantins em Porto Nacional aumentou 24% e o pico na estação chuvosa foi 28% superior após um aumento no uso agrícola na bacia. Tais variações foram atribuídas à redução na evapotranspiração e na infiltração durante a estação chuvosa. As mudanças na cobertura e no uso da terra também podem afetar o clima. Isto geralmente ocorre por meio de mudanças no saldo de radiação na superfície e na partição do saldo de radiação em fluxos de calor sensível e latente, causando modificações na circulação

atmosférica e no clima (Foley *et al.*, 2003). Butt *et al.* (2011) investigaram a possibilidade de o desmatamento afetar o início da estação chuvosa, no estado de Rondônia, região que tem sido continuamente desmatada desde 1970, e verificaram que, em 25% das estações analisadas, o início da estação chuvosa foi tardio. Tais estações estão localizadas dentro de áreas desmatadas, próximas à BR 364 que atravessa Rondônia.

O desmatamento baseado no corte e subsequente queimada intensificam o impacto das secas e, portanto, uma grande área de floresta estará sob maior risco de incêndio (Nepstad *et al.*, 2001). O carbono liberado fortalece o aquecimento global, que assim como a fumaça proveniente da queimada inibe a formação de precipitação. Em cenários de aumentos de secas, a exploração madeireira, a fragmentação da floresta e a queima repetida são um provável destino para muitas das florestas da Amazônia (Aragão *et al.*, 2007) e podem conduzi-la a um rápido processo de degradação (Nepstad *et al.*, 2006, Nepstad *et al.*, 2008). A velocidade e a magnitude das pressões humanas atuais sobre as florestas também podem afetar a sua resiliência (Laurance *et al.*, 1997). A derrubada de árvores e a utilização do fogo no preparo e manejo de áreas de pastagens e cultivos agrícolas provocam ainda perdas de nutrientes (Davidson *et al.*, 2007; McGrath *et al.*, 2001). Resultados obtidos por Senna *et al.* (2009) mostram que a redução da precipitação após um desmatamento não é suficiente para impedir o recrescimento da floresta. No entanto, quando a redução da precipitação é associada a um estresse de nutrientes do solo, também associado ao desmatamento, um processo de savanização poderia começar no norte do estado de Mato Grosso, não importando o quanto seja desmatado.

Revisão realizada por Nepstad *et al.* (2008) conclui que tendências sinérgicas da economia amazônica, florestas e clima poderiam levar à substituição ou grave degradação de mais de metade do dossel fechado das florestas da Amazônia no ano de 2030, mesmo

desconsiderando incêndios ou aquecimento global. Para reduzir a probabilidade da substituição da floresta em grande escala, os autores ressaltam a necessidade de alterações no comportamento dos proprietários de terras, estabelecimento de grandes blocos de áreas protegidas na fronteira agrícola e tecnologias para concentrar a produção pecuária em áreas menores de terra.

Soares-Filho *et al.* (2006) compararam o potencial de áreas de proteção e outras aproximações de conservação nas tendências futuras de desmatamento nas bacias Amazônicas, por meio de um modelo empírico baseado na sensibilidade de políticas para o desmatamento amazônico. Nas simulações verificou-se que tendências atuais na expansão agrícola poderiam eliminar um total de 40% da Floresta Amazônica até 2050, incluindo dois terços da cobertura florestal de seis das principais bacias e 12 ecorregiões, liberando 32 ± 8 Pg de carbono para a atmosfera.

Por outro lado, Walker *et al.* (2009) avaliaram a capacidade do sistema de áreas protegidas no Brasil de evitar a conversão das florestas em vegetação semiárida, especialmente ao longo das margens sul e sudeste da bacia amazônica. Este estudo constatou que a política ambiental brasileira criou um núcleo sustentável de áreas protegidas na Amazônia, protegendo os ecossistemas mais secos da bacia. Assim, todos os esforços devem ser feitos para gerenciá-los eficientemente.

Neste contexto, considerando-se a importância do entendimento dos processos de retroalimentação clima-biosfera na Amazônia, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a resiliência do ecossistema natural e da produtividade da soja e da pastagem em resposta aos cenários futuros.

Para tanto, foi desenvolvido um modelo simplificado a fim de representar as interações entre clima e uso do solo na Amazônia, buscando a resposta do ecossistema natural e dos

sistemas agrícolas a diferentes níveis de desmatamento e elevação do CO₂, o que permitirá a exploração de seus efeitos e o fornecimento de indicadores para orientar as diversas políticas públicas na região. A utilização de um modelo simples justifica-se pelo maior número de simulações que puderam ser testadas quando comparadas a um modelo complexo e, assim, possibilitando a análise dos impactos em um maior número de cenários.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Dinâmica do sistema acoplado atmosfera-biosfera na Amazônia

A Amazônia é a maior floresta tropical do planeta, com uma área de aproximadamente 6,4 milhões de quilômetros quadrados, dos quais 4 milhões estão localizados no Brasil e o restante está distribuído entre Peru, Colômbia, Venezuela, Bolívia, Suriname, Equador, Guiana e Guiana Francesa.

Em uma área com a extensão territorial da Amazônia, não é surpreendente encontrar grandes diferenças. A precipitação varia espacialmente de 1700 mm até mais de 6000 mm anualmente e temperaturas podem variar mais de 20°C entre dia e noite. Solos variam entre ácidos, arenosos e pobres, como os podzólicos, os bem estruturados e bem drenados, mas com baixa capacidade de troca de cátions, como os latossolos, e os solos de terra roxa em áreas circunscritas do Pará e de Rondônia. Os tipos de florestas na região também variam significativamente em composição florística, biomassa, altura e estrutura. A Amazônia Legal inclui áreas de cerrado, cerradão e campos onde a biomassa, a precipitação e grande parte das condições naturais variam significativamente em relação às áreas de floresta úmida tropical (Moran, 1993).

Uma das manifestações mais óbvias das interações da atmosfera com os ecossistemas é a relação entre o padrão global da cobertura vegetal e o clima. Tais interações são bidirecionais: se por um lado, a distribuição da vegetação global é determinada por fatores climáticos locais,

especialmente, precipitação e radiação, por outro, mudanças na distribuição e na estrutura da vegetação também influenciam o clima, pois as características físicas da vegetação e dos solos têm grande influência nas trocas de energia, de água e de carbono entre a superfície terrestre e a atmosfera (Shukla *et al.*, 1990; Moorcroft, 2003; Costa e Foley, 2000). A estrutura da vegetação, por exemplo, pode alterar a refletância da superfície da Terra (albedo), modificando assim o balanço de radiação da superfície (Silva e Avissar, 2006, Snyder *et al.*, 2004). A fisiologia do dossel (estômatos) influencia a partição do saldo de radiação entre calor sensível e latente (Roberts, 2007). Os estômatos também são críticos para a troca de carbono entre a biosfera e a atmosfera e são influenciados, tanto por forçantes externas, como o microclima, quanto por fatores internos, como o estresse de células das plantas (Cowling *et al.*, 2008).

Neste contexto, a Floresta Amazônica é reconhecida como o principal componente do balanço global de energia, de carbono, de nutrientes e de água (Cramer *et al.*, 2004; Malhi e Grace 2000; Shukla *et al.*, 1990; Dickinson, 1989). Ela tem um importante papel no sistema climático regional e global, pois é uma grande fonte de calor e vapor d'água para a atmosfera global, localizada nos trópicos, onde as trocas de energia entre a superfície continental e a atmosfera são bastante intensas (Correia *et al.*, 2006). A Amazônia influencia o clima, agindo como um gigante consumidor de calor que atinge sua superfície, já que quase metade da energia solar absorvida por suas folhas é liberada para a atmosfera, formando nuvens e chuvas (Salati e Vose, 1984). Além disso, ela é um grande reservatório de carbono (Houghton *et al.*, 2000) que vem sendo emitido para a atmosfera por meio de desmatamento, seca, e fogo.

Apesar de toda a relevância da Floresta Amazônica para o sistema climático regional e global, ela vem sendo submetida a vigorosas pressões ambientais de origem antrópica, as quais vêm se tornando crescentes nas últimas décadas - tanto pressões diretas, advindas dos

desmatamentos e dos incêndios florestais, como aquelas decorrentes do aquecimento global, resultando em alterações nos balanços de água, de energia solar, de carbono, de nitrogênio e de outros nutrientes. Tais alterações podem acarretar consequências ambientais em escala local, regional e global por meio de retroalimentações, as quais podem levar ao ponto de desequilíbrio do sistema.

Demandas mundiais crescentes por biocombustíveis e proteínas estão criando novos e poderosos incentivos para a expansão agroindustrial em regiões da Floresta Amazônica. Essa expansão gera retroalimentações positivas na Amazônia por meio da conversão da floresta em pastagem e usos agrícolas. O desmatamento baseado em corte e queimadas intensifica o impacto das secas e, portanto, uma grande área de floresta estará sob maior risco de incêndio. Essa transformação também poderá diminuir a qualidade de vida na Amazônia, devido à poluição do ar decorrente da fumaça durante a estação seca e às grandes quantidades de carbono que seriam liberadas para a atmosfera (Nepstad *et al.*, 2001). O carbono liberado fortalece o aquecimento global, que, assim como a fumaça proveniente da queimada, inibe a formação de precipitação. Em cenários de aumentos de secas, é possível que a exploração madeireira, a fragmentação, a dessecação e a queima repetidas sejam um provável destino para muitas das florestas da Amazônia (Aragão *et al.*, 2007), e poderiam conduzi-la a um rápido processo de degradação (Figura 1) (Nepstad *et al.*, 2006, 2008).

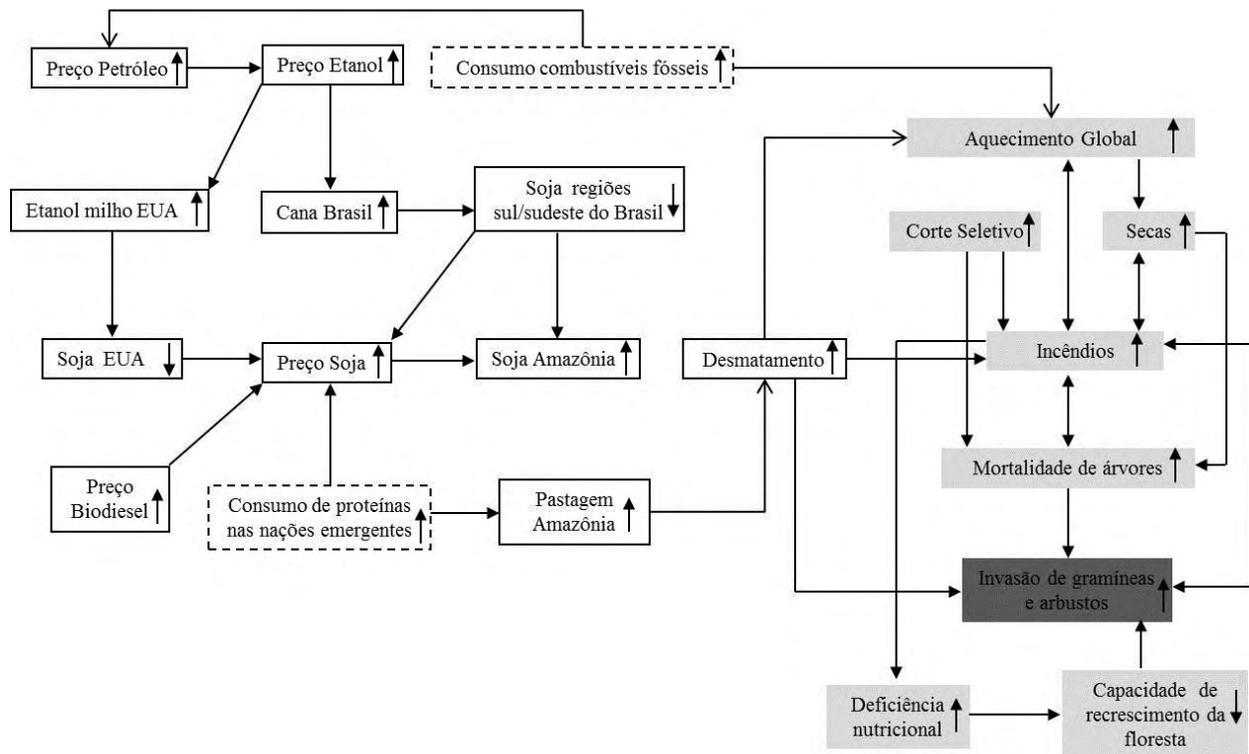


Figura 1. Diagrama dos processos e interações socioeconômicas e naturais que podem levar ao ponto de desequilíbrio da Amazônia. Esse diagrama foi baseado nos conceitos de Nepstad *et al.* (2008). Caixas pontilhadas representam as principais forçantes externas do sistema, as caixas brancas representam os principais processos socioeconômicos envolvidos, as caixas cinza-claras representam os principais problemas naturais envolvidos e a caixa cinza-escura representa o ponto de desequilíbrio do sistema, o qual muitos autores denominam savanização da Amazônia.

2.2. Forçantes externas ao sistema

2.2.1. Desmatamento

A evolução do desmatamento na Amazônia está vinculada a fatores políticos e socioeconômicos. Nas décadas de 1960 e 1970, os Planos de Desenvolvimento da Amazônia foram direcionados para o favorecimento da implantação de grandes projetos agrícolas e pecuários (Fearnside, 1997). Nesse período, começaram a ser criados também os projetos de colonização, desencadeando uma forte migração para a Amazônia como válvula de escape para os problemas de outras regiões (Skole *et al.*, 1994). Já o panorama recente, mostra uma forte

conexão da dinâmica do desmatamento com os cenários macroeconômicos nacional e global (Nepstad *et al.*, 2006). Essa intrincada conjuntura envolve, portanto, o avanço da exploração madeireira (Nepstad *et al.*, 2001), da expansão da agricultura e da pecuária (Cattaneo, 2002). A sistemática consiste em eliminar a cobertura florestal primária e substituí-la por sistemas agrícolas ou pecuária no solo descoberto. O processo predominante de desmatamento para preparo da área para plantio é a derrubada manual e a queima de biomassa. Investimentos em infraestrutura, sobretudo a abertura de estradas e pavimentação (Nepstad *et al.*, 2001), completam esse quadro, posto que promovem a viabilidade econômica da agricultura e da exploração madeireira na Amazônia central, com conseqüente valorização de suas terras.

A evolução das taxas anuais de desmatamento, nas diversas regiões amazônicas, apresenta consideráveis oscilações relacionadas a fatores socioeconômicos (Figura 2). Em função da hiperinflação, as taxas de desmatamento foram significativamente reduzidas na segunda parte dos anos 1980. Com a estabilização oferecida pela nova moeda desde 1994, as taxas voltaram a crescer progressivamente e - é importante ressaltar - elas só começaram a ser diminuídas a partir de 2005, como resultado de taxas de câmbio desfavoráveis para exportações, combinado com a “operação Curupira” para reprimir a exploração madeireira ilegal em Mato Grosso (Fearnside, 2005; 2006).

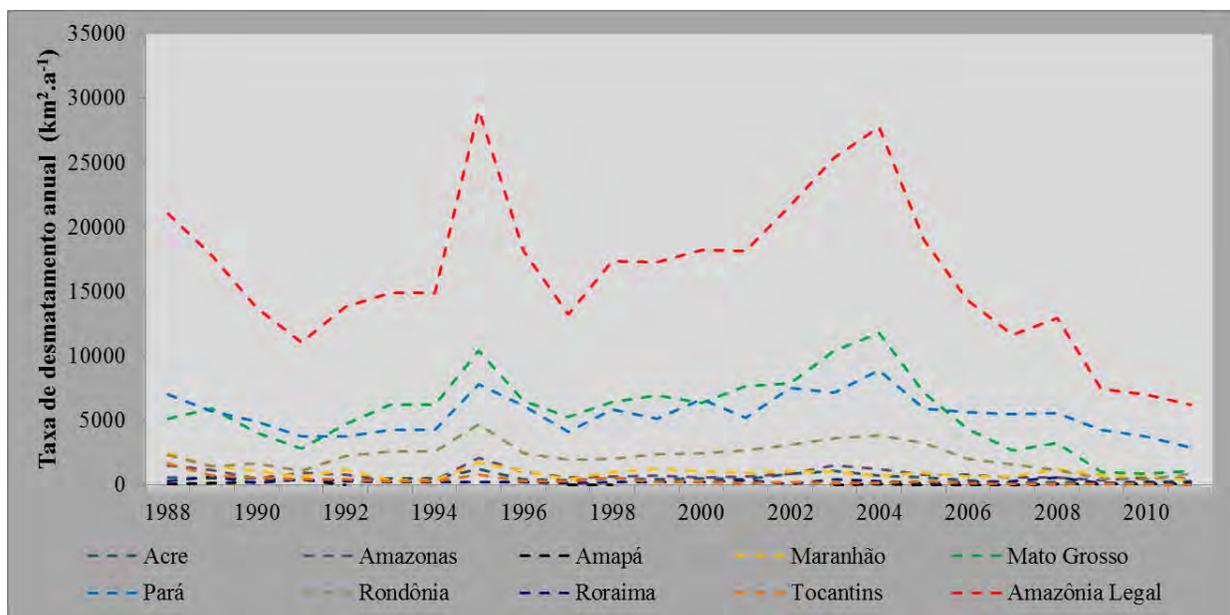


Figura 2. Taxa anual de desmatamento ($\text{km}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$). Disponível em: www.obt.inpe.br/prodes.

Padrões regionais de desmatamento são resultados de várias atividades locais, pois as paisagens amazônicas são muito dinâmicas e complexas: experimentam ciclos de derrubada, cultivo, pastagem, abandono e recrescimento de floresta secundária, resultando no complexo mosaico de floresta tropical intacta, terras sobre regimes de manejo variados e recuperação de florestas secundárias (Cardille e Foley, 2003; Nepstad *et al.*, 1999; Fearnside, 1993). No entanto, a compreensão completa da dinâmica da paisagem na Amazônia não é totalmente conhecida, uma vez que reflete diferentes taxas de desmatamento (conversão de floresta primária para pastagem e cultivos agrícolas), regimes de manejo variados de lavoura e pastagem, abandono de campos que conduzem a recrescimento de florestas secundárias (provavelmente seguido de novo desmatamento), resultando, assim, na mudança líquida da área de floresta (área desmatada menos recrescimento) (Foley *et al.*, 2007).

As atividades econômicas na Amazônia envolvem quase exclusivamente bens de consumo, como madeira, minerais, produtos agrícolas, criação de gado e produtos não-

madeireiros, como a borracha natural e a castanha. Encontrar maneiras de explorar os serviços ambientais da floresta, tanto para mantê-la, quanto para sustentar a população humana tem um grande potencial em longo prazo. A floresta Amazônica fornece, no mínimo, três classes de serviços ambientais: a manutenção da biodiversidade, o estoque de carbono e a ciclagem da água (Fearnside, 2005).

Em geral, práticas de uso da terra permitem que alguns serviços ambientais possam ser mais prontamente destinados às sociedades humanas, como chave para benefícios econômicos e sociais, no curto prazo. Entretanto, no longo prazo, o uso da terra pode degradar outros serviços ambientais, especialmente os que estão ligados ao funcionamento do ecossistema. Por exemplo, a perda de florestas tropicais pode reduzir criticamente vários serviços ambientais, como o suprimento de produtos florestais, a disponibilidade de polinização de insetos, a regulação do clima e do estoque de carbono e a regulação e a purificação de fluxos de água doce (Foley *et al.*, 2007).

A interação entre a biosfera e a atmosfera envolve uma complexidade de processos físicos, químicos e biológicos, uma vez que o ciclo de crescimento das plantas depende das variações sazonais da radiação solar, da temperatura e da precipitação. A vegetação, por sua vez, modifica a troca dinâmica de energia, massa e momentum entre a superfície e a atmosfera e desempenha um papel importante nas variações da hidrologia local. Ademais, variações nas características da superfície continental têm significantes impactos no clima, pois a atmosfera é sensível ao albedo da superfície, à umidade do solo, à rugosidade e a outras características da vegetação e do solo em diferentes escalas de tempo (Costa e Foley, 2000).

Mudanças no uso dos solos e na cobertura podem afetar os fluxos biofísicos de várias maneiras. Primeiramente, eles podem modificar o albedo da superfície (fração da radiação solar

que é refletida), alterando, assim, o balanço de radiação e a temperatura da superfície. As características da superfície, por sua vez, afetam a maneira como ela esfria, por alterar a perda de calor sensível e de calor latente. Finalmente, altura e densidade da vegetação afetam a rugosidade da superfície terrestre, que por sua vez influencia na mistura de ar próximo do solo. Em superfícies rugosas, a mistura de ar é mais eficiente, o que favorece o processo de arrefecimento. Mudanças no albedo, rugosidade superficial e na razão de perda entre calor latente e sensível podem afetar todos os fluxos da superfície e, conseqüentemente, modificar o clima (Foley *et al.*, 2003).

Simulações de Werth e Avissar (2002), Costa e Foley (2000) e Shukla *et al.* (1990) revelam que o desmatamento em larga escala da Amazônia pode alterar significativamente o clima regional. Geralmente, a substituição da floresta por pastagem reduz a evapotranspiração e aumenta a temperatura superficial e, conseqüentemente, o fluxo de calor sensível. Especificamente, a conversão de florestas aumenta o albedo da superfície, reduz a rugosidade da superfície, o índice de área foliar (associado com a interceptação do dossel) e a disponibilidade de água no solo (principalmente porque plantas de pastagem muitas vezes têm raízes menos profundas que árvores de florestas) (Gash e Nobre, 1997). Tais alterações são resultantes de modificações no balanço de energia, água e momentum que acompanham o desmatamento (Foley *et al.*, 2003).

Na Figura 3, estão representados os efeitos climáticos do desmatamento tropical no balanço hídrico, fluxos da camada limite e clima. Snyder *et al.* (2004) avaliaram a participação de diferentes tipos de vegetação na física do sistema climático, usando o modelo acoplado atmosfera-biosfera, CCM3-IBIS. Foram analisados os efeitos de diferentes biomas (florestas tropicais, boreais, temperadas, savana, gramíneas e tundra) no clima, através das trocas biofísicas

de energia, água e momentum entre a superfície e a atmosfera. Com relação ao bioma floresta tropical, os autores constataram que a completa remoção da vegetação leva a uma redução na evapotranspiração, apesar do aumento da evaporação do solo, pois, a taxa de aumento da evaporação é muito menor que a transpiração que a vegetação poderia realizar num dado período de tempo. As baixas taxas de evapotranspiração conduzem a uma camada limite planetária (CLP) mais seca, uma vez que menos água é transportada para a atmosfera a partir da superfície, assim, menos precipitação ocorre e a reciclagem de água é reduzida. As regiões desmatadas não só apresentam redução na precipitação, mas também na redistribuição das regiões de convecção, bem como mudanças na intensidade da convecção profunda e rasa. Estas mudanças na atividade convectiva podem ter um significativo impacto sobre o clima extratropical, modificando os fluxos de saída através de ondas de Rossby anômalas. Foi verificado ainda que, embora o aumento do albedo superficial, decorrente da remoção da floresta, provoque uma redução no balanço de ondas curtas, a temperatura superficial aumenta, à medida que a redução no balanço de ondas curtas é mais que compensada pelo aumento da energia resultante da redução do fluxo de calor latente. Logo, esse processo resulta no aumento dos valores médios anuais do fluxo de calor sensível.

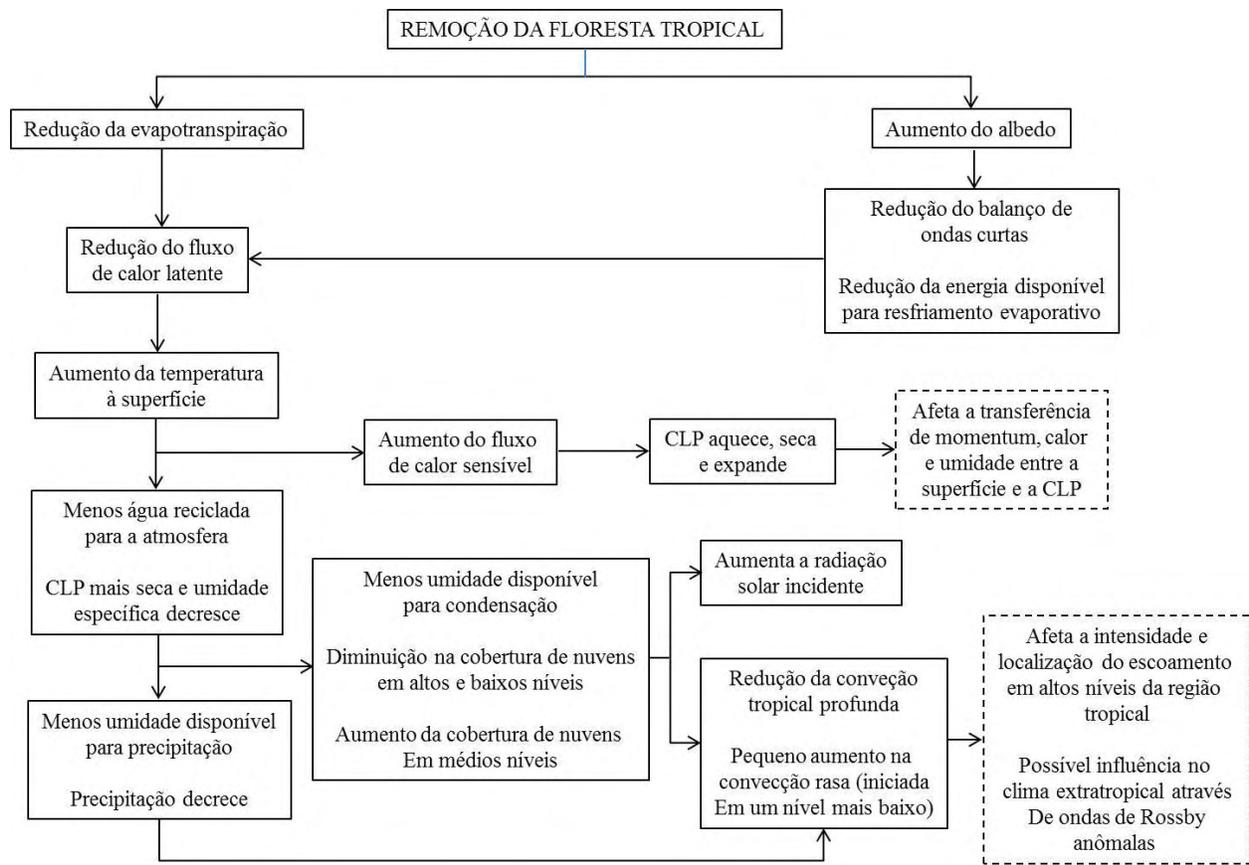


Figura 3. Fluxograma conceitual dos efeitos climáticos do desmatamento tropical de grande escala no balanço hídrico, fluxos da camada limite e clima (Fonte: Snyder *et al.*, 2004).

Simulações de Sampaio *et al.* (2007) para a Amazônia oriental mostraram aumento da temperatura superficial e diminuição da precipitação e da evapotranspiração. Mudanças na precipitação após o desmatamento estavam relacionadas a um aumento do albedo e uma redução da evapotranspiração, associada à menor rugosidade da superfície aerodinâmica, à diminuição de área foliar e ao menor enraizamento profundo da pastagem e da soja em comparação com a floresta. A relação entre a precipitação simulada e o desmatamento revelou uma diminuição acelerada da precipitação com o aumento do desmatamento para ambas as classes de conversão de uso do solo. A redução na precipitação foi mais evidente quando o desmatamento ultrapassa 40% da cobertura florestal original e esta redução ocorre principalmente durante a estação seca.

A redução na precipitação pode criar condições potencialmente favoráveis para alterar a estrutura da floresta e conduzir a um processo de savanização (Oyama e Nobre, 2003).

Silva *et al.* (2006) realizaram simulações climáticas utilizando um modelo regional para avaliar os impactos do desmatamento na hidroclimatologia da bacia amazônica. Os resultados indicaram que a precipitação é reduzida gradualmente à medida que o desmatamento aumenta. Entretanto, os impactos do desmatamento dependeram do regime climático prevalecente, e foi observada também muita variabilidade espacial na resposta. Os impactos foram mais fortes sob condições de El Niño e mais intensos nas regiões oeste e sul, à jusante dos ventos alísios leste (que se tornaram mais fortes após desmatamento). Condições de La Niña conduziram a uma tendência de precipitação linear com o aumento do desmatamento, mas sob condições secas, uma diminuição íngreme pode ocorrer até mesmo para menores níveis de desmatamento.

O desmatamento em larga escala pode causar uma queda estimada da ordem de 20% na precipitação na região Amazônica, levando a menor umidade, temperatura superficial mais alta e seca severa (Lean e Warrilow, 1989; Shukla *et al.* 1990), pois o vapor d'água injetado pelas florestas através da evapotranspiração contribui substancialmente para as chuvas amazônicas (Salati e Vose, 1984).

A Floresta Amazônica tem seus limites no que se refere à tolerância à seca. Um experimento “in situ” de sete anos foi conduzido, a fim de identificar o nível de estresse hídrico para além do qual a floresta amazônica começaria a sucumbir, avaliada pela mortalidade de árvores. A precipitação foi reduzida para um terço em cinco anos consecutivos numa parcela de um hectare na qual foram colocados painéis de plástico sobre o solo (Nepstad *et al.*, 2002). Durante o terceiro ano do experimento, o limiar de seca foi atingido. Árvores do dossel da gigante floresta começaram a morrer. Árvores que representam 10 por cento da massa total de

todas as árvores da floresta morreram no decurso de um único ano. Afigura-se que mesmo as árvores gigantes com raízes profundas sucumbem à seca e morrem, pois não conseguem absorver a água do solo em quantidade suficiente para substituir aquela perdida através da transpiração de suas folhas (Nepstad *et al.*, 2007).

2.2.2. Aquecimento global

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007a) declarou que as evidências sobre o aquecimento global já são inequívocas e a ação humana é, sem dúvida, a força principal do aceleração desse processo nos últimos 50 anos.

Segundo o IPCC (2007a), dos doze anos, entre 1995 e 2006, onze estão entre os mais quentes desde os primeiros registros instrumentais da temperatura da superfície global (1850). A tendência de aquecimento linear dos últimos cem anos é de $0,74 \pm 0,18$ °C (a incerteza refere-se ao intervalo de confiança de 90%).

Mudanças na concentração de gases de efeito estufa (GEE) e aerossóis, cobertura do solo, e radiação solar alteram o balanço de energia do sistema e são apontadas como as causas do aquecimento global (IPCC, 2007b).

Emissões globais de GEE por atividades antropogênicas vêm crescendo desde o período pré-industrial, com acréscimo de 70% entre 1970 e 2004. O dióxido de carbono (CO₂) é apontado como o principal GEE. Sua emissão anual cresceu 80% entre 1970 e 2004 (IPCC, 2007a).

De acordo com o IPCC (2007a), o aquecimento global pode levar a mudanças nos padrões de variabilidade de grande escala oceânica e atmosférica, pois projeções de diversos modelos indicam eventos de El Niño mais intensos. Ademais, simulações de Timmermann *et al.*

(1999) sugerem que, com o aumento da temperatura global, devido ao aumento dos gases do efeito estufa, o clima do Pacífico tenderá a ficar parecido com uma situação de El Niño permanente. Para a Amazônia, estudos de Malhi e Wright (2004), Marengo (2004), Ronchail *et al.* (2002) e Uvo *et al.* (1998) identificaram que anomalias negativas de precipitação no centro, norte e leste da Amazônia são em geral associadas a eventos de El Niño e anomalias de TSM (temperatura da superfície do mar) no Atlântico Tropical.

Simulações de Foley *et al.* (2002) examinaram as conexões entre eventos de El Niño e de La Niña e o clima, o balanço de carbono e o balanço hídrico nas bacias dos rios Amazonas e Tocantins. Os autores constataram que durante eventos de El Niño ocorre uma considerável anomalia negativa de CO₂ no ecossistema terrestre devido principalmente à diminuição do NPP ao norte da bacia. Também verificaram uma diminuição na vazão ao longo de muitos rios da bacia, o que conseqüentemente diminui a área inundada ao longo do tronco principal do Amazonas. Já durante eventos de La Niña, foram observadas anomalias positivas de CO₂ no ecossistema terrestre devido principalmente ao aumento do NPP ao norte da bacia, além de aumento na vazão da bacia do Amazonas, especialmente a partir dos afluentes do norte e oeste.

Os modelos climáticos usados no 4º relatório do IPCC apresentam tendências de estação seca menos chuvosa no leste e uma estação chuvosa no oeste com mais precipitação para a Bacia Amazônica (IPCC, 2007c). Como a maioria desses modelos não incorpora as retroalimentações climáticas da perda de floresta, uma avaliação mais cuidadosa da capacidade do modelo de capturar elementos-chave da variabilidade do clima amazônico é necessária. Quando os efeitos de aumento de temperatura são incluídos na evapotranspiração, quase todos os modelos indicam aumento sazonal do déficit hídrico na região oriental da Amazônia (Salazar *et al.*, 2007). Esta secagem é agravada pelas retroalimentações do ecossistema, tais como: a

mortalidade da floresta e a redução da transpiração nas florestas remanescentes (Betts *et al.*, 2004). As áreas de maior risco de seca (sudeste e leste) são também as áreas onde o desmatamento é mais intenso. Mudanças na precipitação oriundas do desmatamento podem ser mais fortes no corredor oriental seco, onde correntes de ventos geradas no oceano passam pela região durante a noite e não têm condições para ocasionar muita chuva (Garstang *et al.*, 1994). Esta área inclui importante fronteira agrícola que está experimentando níveis elevados de desmatamento. Em contrapartida, a região noroeste do Amazonas é menos propensa a secas severas, já que a alta precipitação ali é controlada pela convergência úmida forçada pela Cordilheira dos Andes. Essa região hospeda a maior biodiversidade e tem sido menos afetada pela variabilidade climática e por históricos usos de solo (Malhi *et al.*, 2008).

O aumento na temperatura pode induzir maior evapotranspiração potencial em regiões tropicais, o que poderia resultar na redução da quantidade de água disponível no solo, mesmo se não ocorrerem mudanças significativas na precipitação. Esse fator pode, por si só, ativar a substituição do bioma atual por outro mais adaptado a uma menor quantidade de água no solo. Isto acarretaria a substituição da floresta tropical na Amazônia por savanas. Se secas severas forem mais intensas, o que os modelos têm projetado em um clima mais quente, o processo de savanização da Amazônia oriental pode ser acelerado (Salazar *et al.*, 2007).

Provavelmente, os efeitos de aumento de temperatura induzidos pelas mudanças globais e por aqueles advindos dos desmatamentos somar-se-iam, aumentando o risco de incêndios florestais, uma vez que o secamento da vegetação na estação seca e sua inflamabilidade são maiores em temperaturas mais altas (Nepstad *et al.*, 1999). As queimadas podem destruir centenas de milhares de hectares de floresta e injetar na atmosfera grandes quantidades de fumaça e aerossóis que poluem o ar em extensas áreas, afetando a população e com potencial de

afetar o início da estação chuvosa e a quantidade de chuva na região (Andreae *et al.*, 2004). Cenários de mudanças climáticas geradas pelo modelo UKMO-HadCM3 para o IPCC/AR4 indicam aumento na duração da estação seca maior que dois meses na maior parte da Amazônia. Esse aumento da estação seca implicaria num aumento do risco da ocorrência de queimadas e em mudança na climatologia da precipitação, o que favoreceria a substituição da floresta por savana (Li *et al.*, 2006).

Betts *et al.* (2007) apresentaram um fluxograma das múltiplas retroalimentações envolvendo mudanças climáticas e degradação da floresta na Amazônia (Figura 4) , utilizando, para tanto, o modelo HadCM3LC do Hadley Centre . Nesse modelo, a seca é iniciada através de respostas a padrões particulares de TSM, associados principalmente a forçantes radiativas das mudanças climáticas e a forçantes fisiológicas do clima via resposta da vegetação.

A fertilização por CO₂, o aquecimento do clima e a seca mostram duas retroalimentações positivas na redução da precipitação: a redução da cobertura vegetal causa supressão local da reciclagem de água evaporada; e a liberação de carbono contribui para uma retroalimentação positiva no enriquecimento de CO₂, que acelera o efeito estufa e aumenta os padrões associados à mudança na precipitação. Isso explica por que a redução de precipitação simulada pelo HadCM3LC é mais extrema que a simulada por outros modelos de circulação geral. Por outro lado, a degradação da floresta pelo homem pode dar início a múltiplos mecanismos de retroalimentação por meio da emissão de CO₂ e da redução da evaporação (Betts *et al.*, 2007).

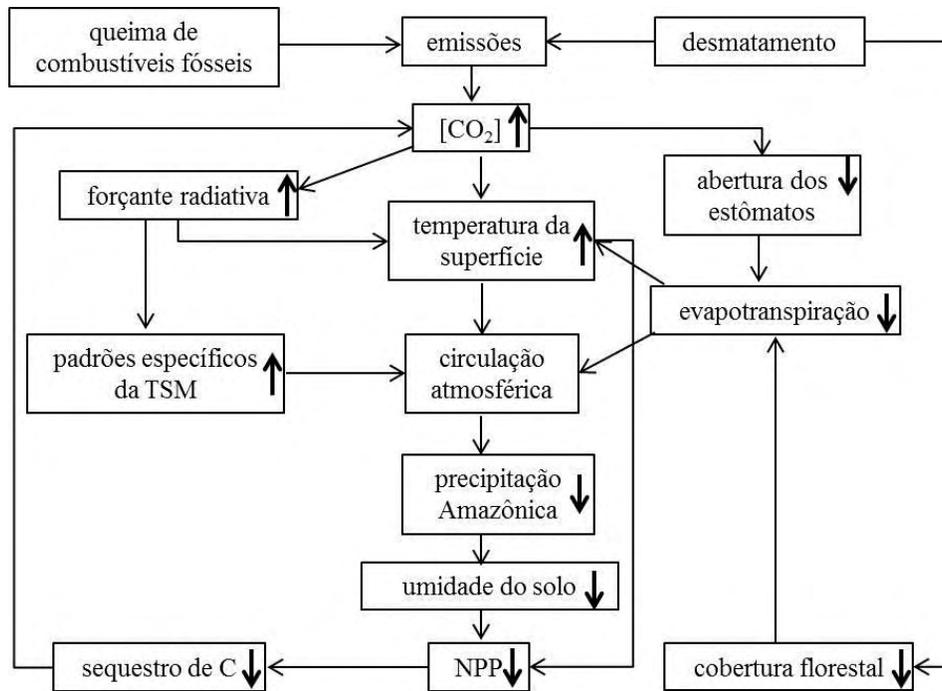


Figura 4. Esquema dos mecanismos de retroalimentações envolvidas na mudança climática e na degradação da floresta na Amazônia, considerando o aquecimento global e os impactos humanos diretos na floresta (Fonte: Betts *et al.*, 2007).

A dinâmica do carbono numa floresta é dominada pela assimilação de CO₂ através da fotossíntese, pela liberação de carbono através da respiração autotrófica, pela transferência de carbono para o solo sob a forma de serapilheira (folhas, galhos, e raiz), pela exudação de compostos orgânicos na rizosfera e pela eventual liberação desse carbono do solo através da decomposição e da respiração de micróbios e de outros heterótrofos (Malhi e Grace, 2000).

Os ecossistemas terrestres podem influenciar o clima, alterando a quantidade de CO₂ na atmosfera por meio de retroalimentações biogeoquímicas que ocorrem como resultado das interações entre o clima e os ecossistemas terrestres. O aquecimento global pode afetar a habilidade dos ecossistemas terrestres de processarem carbono através da fotossíntese e da respiração. As mudanças no reservatório de carbono terrestre induzidas pelo clima podem afetar

a quantidade de CO₂ na atmosfera e, como resultado, criar uma retroalimentação sobre o clima (Foley *et al.*, 2003).

A floresta amazônica desempenha um papel singular no ciclo do carbono terrestre, uma vez que estoca aproximadamente 100 bilhões de toneladas de carbono (Malhi *et al.*, 2006), o que é equivalente a mais de 10 anos das emissões globais de combustíveis fósseis (Davidson *et al.*, 2012). Deste modo, a Amazônia oferece um importante serviço ambiental para o planeta, armazenando carbono orgânico na biomassa e no solo e retirando gases de efeito estufa da atmosfera. A redução ou a degradação da cobertura florestal pode afetar diretamente o armazenamento de carbono, através de perdas de biomassa da vegetação e de carbono do solo (Foley *et al.*, 2007).

Estudos de Chambers e Silver (2004), Clark (2004) e Wright (2005), com o objetivo de avaliar as respostas de florestas tropicais às mudanças climáticas, concluíram que é pouco provável que o CO₂ tenha qualquer efeito positivo sobre a produtividade florestal. Contudo, quando se avaliam outras mudanças no sistema climático global, especialmente temperatura crescente, prevê-se de alguma forma o declínio das florestas tropicais. Clark (2004) argumenta que o aumento da concentração atmosférica de CO₂ deverá resultar em pouco ou nenhum aumento das taxas de produção de biomassa, indicando que o crescimento das florestas tropicais não é atualmente limitado pelo carbono. Por outro lado, Wright (2005) sugere que os atuais níveis de fotossíntese, ou mesmo superiores, requerem carbono para a manutenção e o crescimento, mas conclui que, na verdade é a radiação solar disponível que limita a produção primária líquida do dossel fechado das florestas - as sombras limitam a absorção de carbono pelas folhas. Para esclarecer as inconsistências relativas aos prováveis efeitos de altas temperaturas e ao aumento da concentração de CO₂ sobre a fisiologia e o crescimento de árvores

florestais, Lloyd e Farquhar (2008) utilizaram saídas de modelos climáticos e dados observados e uma parametrização simples de fotossíntese foliar, incorporando conhecidas sensibilidades à temperatura. Em suas simulações, não foi encontrada nenhuma evidência de que as florestas tropicais estejam perigosamente próximas de sua temperatura ótima, embora reduções na taxa de fotossíntese possam ocorrer para temperaturas foliares acima de 30°C, as quais são resultantes da redução na condutância estomática em resposta ao alto déficit de pressão de vapor d'água foliar. Os autores chamam atenção para o fato de que esse resultado é oposto ao efeito direto da temperatura foliar no metabolismo fotossintético. Eles também encontraram que o aumento nas taxas de fotossíntese associado ao aumento de CO₂ no ambiente nas próximas décadas deverá mais que compensar qualquer diminuição na produtividade fotossintética em resposta ao déficit de pressão de vapor d'água, à temperatura foliar e ao aumento das taxas de respiração autotrófica, como consequência das altas temperaturas do tecido foliar.

Impactos das mudanças no clima da Amazônia são incertos. Ações necessárias para que se gerenciem os riscos associados às incertezas trazem benefícios adicionais para a conservação, resguardando a direção, a magnitude ou a excentricidade regional dessas mudanças. A maioria das ações necessárias deve ser considerada imediatamente, pois a globalização e a integração regional de planos de desenvolvimento estão acelerando as mudanças na Amazônia. As espécies podem se adaptar às mudanças no clima, pois já fizeram assim no passado e provavelmente o farão no futuro, mas precisam ser providas com as condições e o tempo que lhes permitam adaptarem-se (Killeen e Solórzano, 2007).

3. METODOLOGIA

3.1. Área de estudo

A área de abrangência desse estudo é a Amazônia Legal Brasileira (Figura 5) que corresponde à totalidade dos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins, além de parte do estado do Maranhão (oeste do meridiano 44°), perfazendo uma superfície de aproximadamente 5.217.423 km², o que correspondente a praticamente 61% do território brasileiro (SUDAM, 2010).

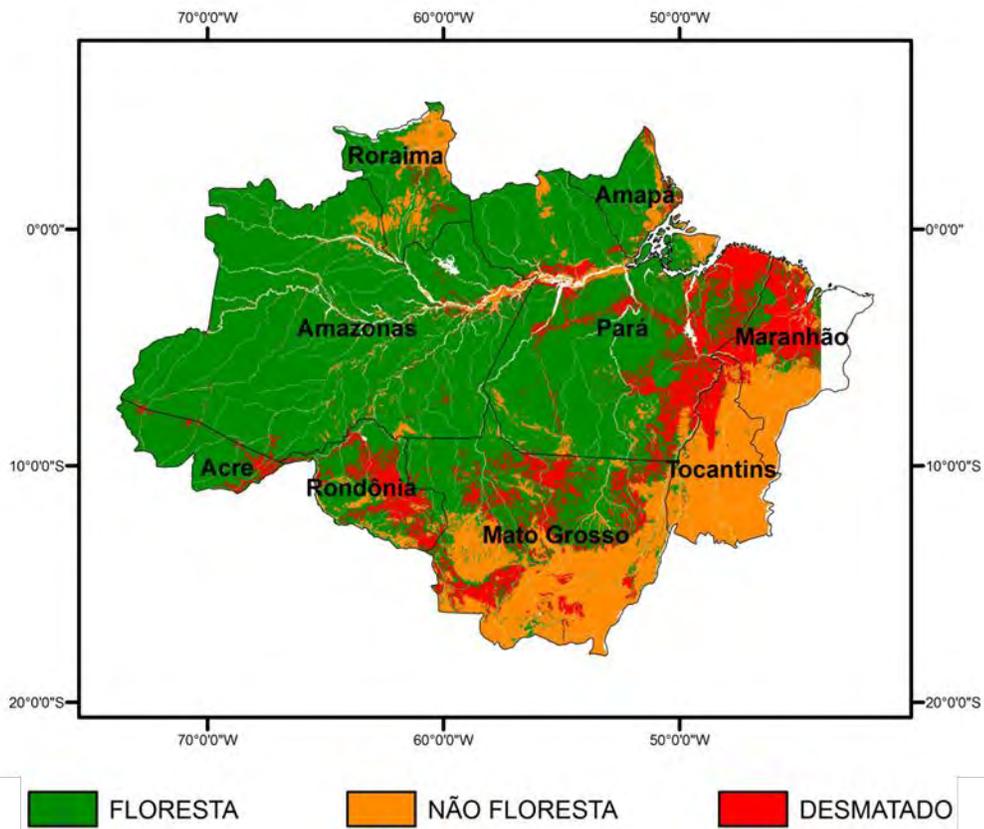


Figura 5. Área correspondente à Amazônia Legal Brasileira.

3.2. Desenvolvimento do modelo

Foi desenvolvido um modelo modular simplificado, utilizando a plataforma Dinamica EGO. Esta plataforma permite a construção de modelos espaciais, por meio de análises dinâmicas complexas, que podem envolver interações aninhadas, retroalimentações dinâmicas, abordagem multi-regional, manipulação e combinação algébrica de dados em vários formatos, tais como: mapas, tabelas, matrizes e constantes, e uma série de complexos algoritmos para a análise e simulação de fenômenos espaço-temporais (Rodrigues *et al.*, 2007).

A Figura 6 ilustra o fluxograma da estrutura básica do modelo que foi desenvolvido. As caixas brancas representam os processos envolvidos, as caixas cinza-claras representam cenários e as caixas cinza-escuras representam as forças externas, fornecidas na forma de banco de dados. Setas pontilhadas representam retroalimentações que serão estudadas em trabalhos futuros.

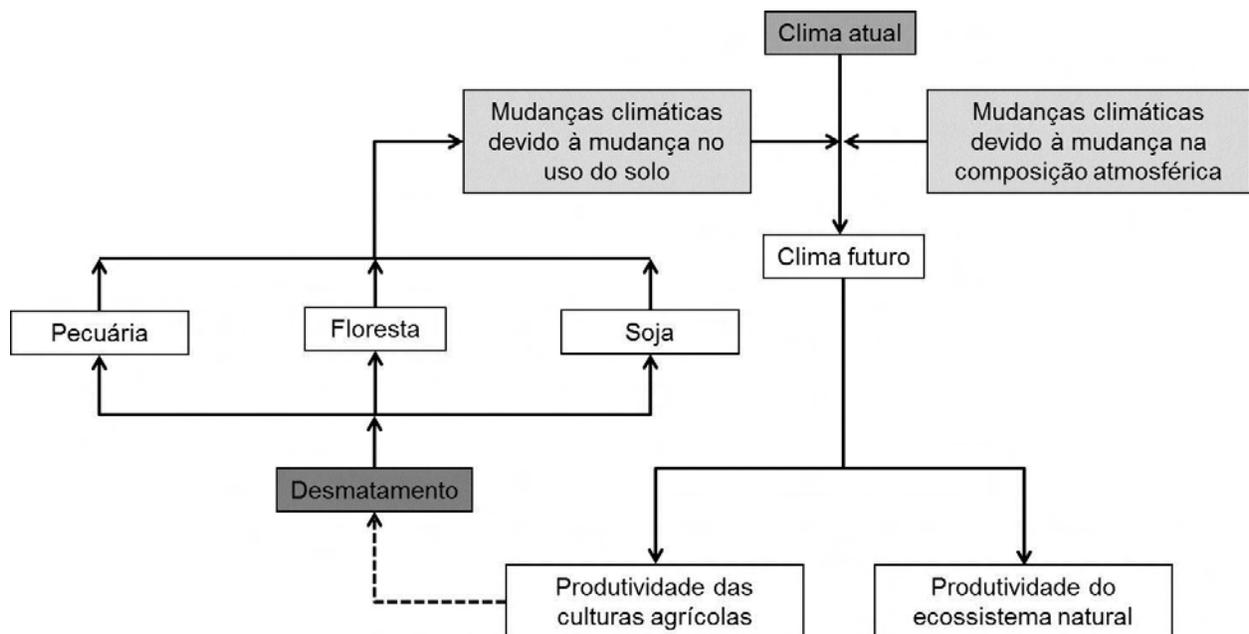


Figura 6. Fluxograma da inter-relação dos principais componentes do modelo.

3.2.1. Clima atual

O banco de dados do clima atual utilizado foi desenvolvido por Sheffield *et al* (2006) e possui resolução espacial de 1°. Estes autores utilizaram os mais recentes conjuntos de dados meteorológicos globais disponíveis combinados com dados de reanálise para formar um consistente conjunto de dados de alta qualidade. As variáveis utilizadas foram precipitação, temperatura do ar, radiação solar incidente, pressão atmosférica e umidade específica. Este conjunto de dados fornece uma melhoria significativa nos dados de reanálise original e pode ser usado para uma ampla variedade de aplicações e estudos de diagnóstico nas ciências climatológicas, hidrológicas e ecológicas (Sheffield *et al.*, 2006).

Para o cálculo da produtividade do ecossistema natural, foi utilizada a climatologia de precipitação, de temperatura do ar, de radiação solar incidente, de pressão atmosférica e de umidade específica para o período de 1971 a 2000, a partir dos dados mensais do banco de dados construído por Sheffield *et al.* (2006). Para o cálculo das produtividades das culturas agrícolas, foram utilizados dados diários deste mesmo banco de dados para o período de 1970 a 2006 de precipitação, de temperatura do ar e de radiação solar incidente.

A Figura 7 ilustra a precipitação média anual (mm.a^{-1}), a radiação solar média (W.m^{-2}), a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), a pressão atmosférica média (kPa) e a umidade específica média (kg.kg^{-1}) para o período de 1970 e 2001, calculadas a partir dos dados mensais do banco de dados de Sheffield *et al.* (2006).

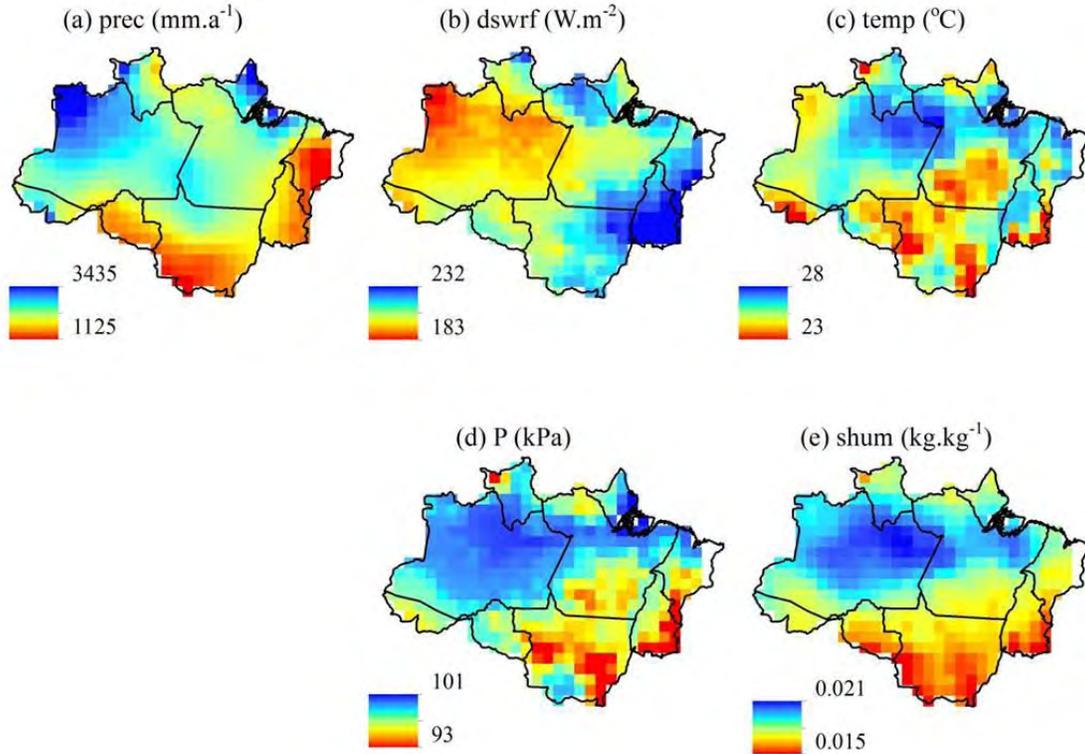


Figura 7. Normal climatológica para a Amazônia Legal obtida a partir do banco de dados construído por Sheffield *et al.* (2006). Precipitação média anual (mm.a^{-1}) (a), radiação solar média (W.m^{-2}) (b), temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) (c), pressão atmosférica média (kPa) (d) e umidade específica média (kg.kg^{-1}) (e).

3.2.2. Desmatamento

Foram utilizados cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) (Figura 8), que compararam o potencial de áreas de proteção e outras aproximações de conservação nas tendências futuras de desmatamento nas bacias Amazônicas, por meio de um modelo empírico baseado na sensibilidade de políticas para o desmatamento amazônico. Foram realizadas simulações em diferentes cenários que cobrem uma plausível gama de trajetórias futuras do desmatamento. Num extremo, foi considerado o cenário “negócio-como-habitual” (BAU, na sigla em inglês) no qual é assumido que: as tendências recentes de desmatamento continuarão; rodovias programadas serão pavimentadas; complacência com legislação que requer

baixas reservas florestais em áreas privadas será mantida e novas áreas de preservação não serão criadas. No outro extremo, foi considerado o cenário de “governança” (GOV), que assume que a legislação ambiental brasileira será implementada na bacia amazônica através do refinamento e da multiplicação de experiências correntes na fronteira de governança. Estas experiências incluem: a obrigatoriedade de reservas florestais em propriedades privadas por meio de um sistema de licenciamento monitorado por satélites, o zoneamento agroecológico de uso da terra e a expansão da rede de áreas de proteção. O cenário controle é o cenário atual de desmatamento.

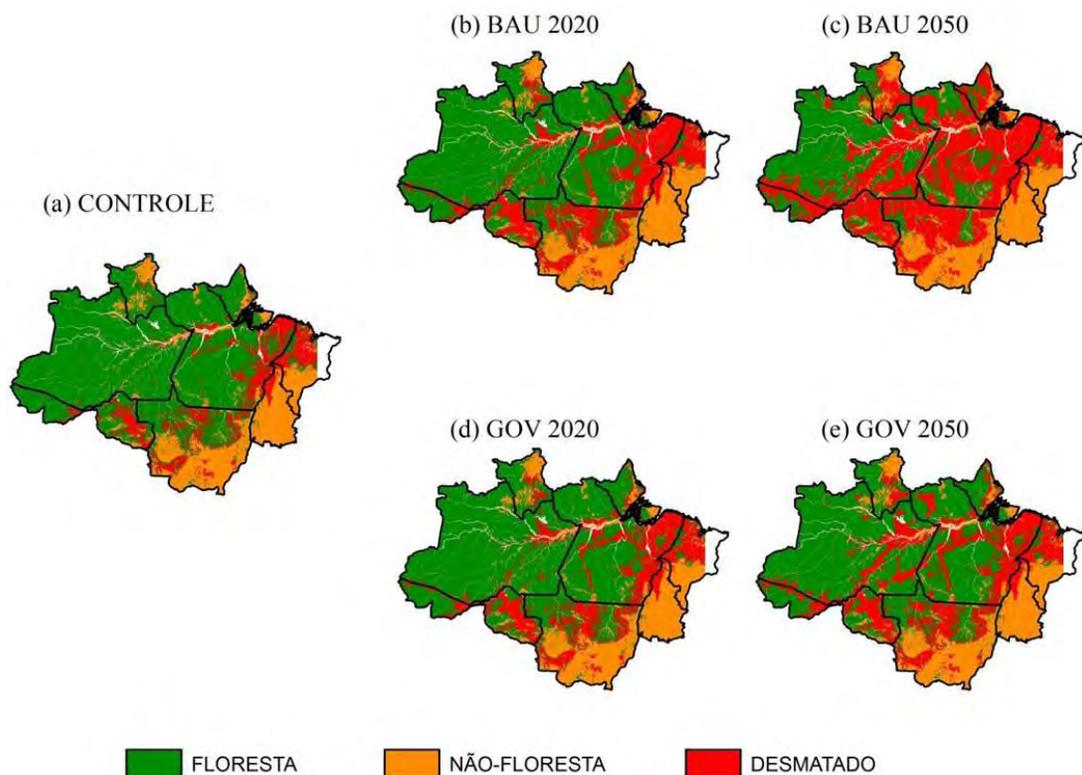


Figura 8. Cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006): controle (a); BAU 2020 (b); BAU 2050 (c); GOV 2020 (d) e GOV 2050 (e).

Nas simulações, considerou-se como área desmatada total a soma das áreas de não-floresta (em laranja) e das áreas desmatadas (em vermelho), cujos valores para cada cenário estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Área desmatada total (km²) para os diferentes cenários de desmatamento

	CONTROLE	BAU 2020	BAU 2050	GOV 2020	GOV 2050
ÁREA DESMATADA (km ²)	1.496.082	2.151.390	3.622.743	1.879.375	2.200.847

3.2.3. Mudanças climáticas devido à mudança na composição atmosférica

Nas simulações foram utilizadas anomalias das variáveis climáticas, projetadas pelos modelos listados na Tabela 2, para o cenário A2 de aquecimento global proposto pelo IPCC. Foram usadas as médias mensais de vinte anos para os períodos de 2011 a 2030 e de 2041 a 2060 - a partir daqui, tais períodos serão mencionados como anos de 2020 e de 2050, respectivamente.

O cenário A2 pressupõe uma condição futura mundial com grande discrepância entre países ricos e pobres, prevendo um crescimento populacional rápido e um desenvolvimento econômico lento, com as necessidades energéticas largamente satisfeitas com combustíveis fósseis (IPCC, 2007b).

Tabela 2. Modelos utilizados nas simulações considerando as mudanças climáticas devido à mudança na composição atmosférica

MODELO	AGÊNCIA	PAÍS
CCSM3	National Center for Atmospheric Research	EUA
CNRM-CM3	Centre National de Recherches Météorologiques	França
GISS-ER	NASA/Goddard Institute for Space Studies	EUA
INM-CM3.0	Institute for Numerical Mathematics	Rússia
IPSL-CM4	Institut Pierre Simon Laplace	França
MRI-CGCM2.3.2	Meteorological Research Institute	Japão
MIROC3.2	Center for Climate System Research, National Institute for Env. Studies, and Frontier Research Center for Global Change	Japão

3.2.4. Mudanças climáticas devido à modificação no uso do solo

Zeng e Neelin (1999) usaram pressupostos lineares para descrever os processos radiativos, de energia, de balanço hídrico e de mecanismos de retroalimentação de nuvens na coluna atmosférica associados ao desmatamento. Sua formulação final propõe uma relação linear entre a anomalia de precipitação e a anomalia de albedo. Nesse estudo, as mudanças climáticas provocadas pelo desmatamento foram representadas por meio das equações lineares obtidas por Yanagi (2006), compatíveis com a teoria de Zeng e Neelin (1999). Tais equações apresentam anomalias de precipitação trimestral como função de anomalias de albedo. Yanagi (2006) avaliou os processos de mudança da precipitação radioativa após desmatamento, através da análise dos campos de anomalia de precipitação (P) e de radiação refletida pela superfície, entre condições de desmatamento (pastagem e soja) e de florestas, considerando os níveis de desmatamento de 25%, 50% e 75% para pastagens e soja. Para representar a variabilidade sazonal na radiação incidente e no albedo da superfície, Yanagi (2006) estudou as mudanças na precipitação contra as mudanças na radiação refletida após o desmatamento na escala de tempo trimestral (Figura 9).

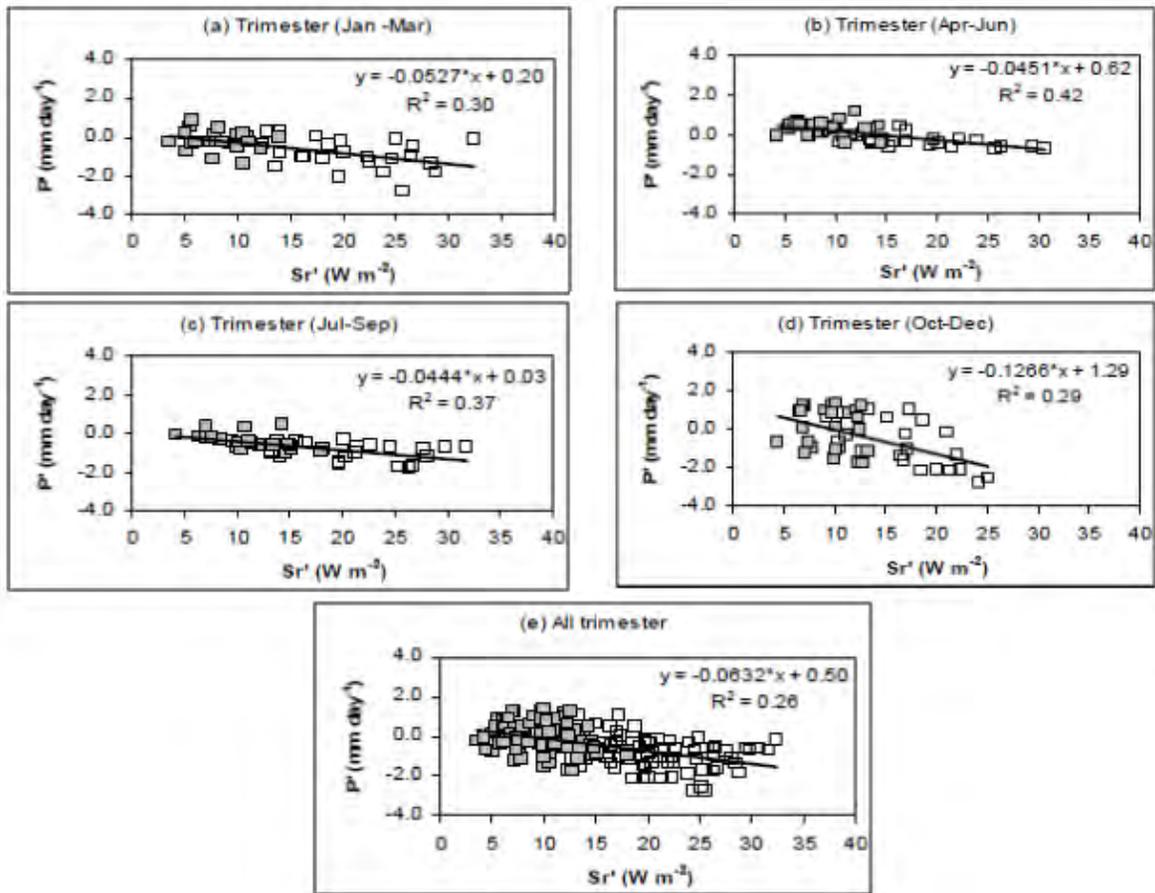


Figura 9. Anomalias trimestrais de precipitação como função de anomalias de albedo para os trimestres: janeiro a março (a), abril a junho (b), julho a setembro (c), outubro a dezembro (d) e todos os trimestres (e). Quadros brancos representam pastagem e quadros cinzas representam soja. Fonte: Yanagi (2006).

As anomalias na precipitação obtidas por Yanagi (2006) são explicadas por processos radiativos e não radiativos. As mudanças na precipitação podem ser descritas pela Equação 1:

$$P' = a_{NSR} + b_{SR}Sr' \quad (\text{equação 1})$$

P' : anomalia de precipitação (mm.dia^{-1})

a_{NSR} : coeficiente linear relacionado aos processos não radiativos e retroalimentações de radiação de onda longa;

b_{SR} : coeficiente angular relacionado apenas aos processos de radiação solar;

Sr' : radiação refletida pela superfície (W.m^{-2}).

A S_r' é igual ao produto da radiação incidente (S_{in}) e da anomalia do albedo da superfície (α'). Assim, para estimar-se a redução na precipitação após desmatamento, consideraram-se os cenários realistas para definirem-se os padrões de desmatamento, derivados do trabalho de Soares-Filho *et al.* (2006). As células desmatadas nos cenários “BAU” e “GOV” para os anos de 2020 e 2050 obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) foram substituídas pela soja e pela pastagem.

Utilizaram-se respectivamente, para floresta e solo nu, os seguintes valores de albedo: 0,13 e 0,11. Os albedos das culturas agrícolas, soja e pastagem, foram estimados a partir da média ponderada entre o albedo do solo (α_s) e das culturas (α_{CA}), em função do índice de área foliar (LAI), conforme Porter *et al.* (1999):

$$\alpha_{CA} = \alpha_s \times \exp(-k \times LAI) + \alpha_{CA} \times \exp(-k \times LAI) \quad (\text{equação 2})$$

α_{CA} : albedo das culturas agrícolas (0,26 para a soja e 0,2 para a pastagem);

α_s : albedo do solo nu;

k: coeficiente de extinção (adimensional);

LAI: índice de área foliar (m^2 -folha. m^{-2} -solo).

Para a soja, cultura que apresenta um ciclo sazonal, plantada geralmente na segunda metade de outubro, com colheita em fevereiro, os valores de albedo da superfície variaram de 0,11 a 0,255 para um LAI de 5 m^2 folha. m^{-2} solo. Em relação à pastagem, os valores estiveram na faixa de 0,11 a 0,199 para um LAI de 6 m^2 folha. m^{-2} solo.

3.2.5. Clima futuro

O clima futuro foi resultante da soma entre as mudanças climáticas causadas pelas alterações na composição atmosférica e as mudanças climáticas provocadas pelo desmatamento. Neste estudo não foram consideradas as interações entre as mudanças climáticas provocadas pelo

desmatamento e pela alteração da composição atmosférica, uma vez que Costa e Foley (2000) constataram que esse tipo de interação é desprezível. Por exemplo, as alterações na precipitação média anual devido ao desmatamento e ao aumento da concentração de CO₂ foram de -0,73 mm.dia⁻¹ e 0,28 mm.dia⁻¹, respectivamente. Quando foram considerados os efeitos combinados, incluindo interações, a alteração na precipitação foi de -0,45 mm.dia⁻¹, o que difere menos que 10% dos efeitos isoladamente (-0,73 + 0,28 = -0,45 mm.dia⁻¹).

3.2.6. Produtividade do ecossistema natural

A produtividade do ecossistema natural foi simulada por meio do modelo CARLUC 2 versão aprimorada por Litle (2007) do CARLUC (CARbon and Land-Use Change) desenvolvido por Hirsh *et al.* (2004), o qual utiliza seis novas relações dependentes da umidade do solo. Nesta versão, o fator de água no solo (f_{SW}) e as taxas de decomposição do tronco e das folhas (k_{stem} e k_{leaf} , respectivamente), bem como os três fatores de partição da produtividade primária líquida (NPP) entre tronco, folhas e raízes finas (p_{stem} , p_{leaf} e p_{root}) são calculados mensalmente a partir da quantidade de umidade disponível no solo. Para isso, é utilizada a percentagem máxima de água disponível para a planta ($PAW_{max\%}$), que foi calculada pela razão entre a quantidade de água armazenada no solo (ARM) e a capacidade de água disponível (CAD) por meio do balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Matther (1955).

A fim de determinar os valores das variáveis que são dependentes da umidade do solo, Adam Hirsch, Ray David, Paulo Brando e Britaldo Soares-Filho (resultados não publicados) usaram dados experimentais do sítio Flona Tapajós e determinaram as seguintes equações:

$$k_{stem} = (1/6) \times (0,01 + 0,49548 \times e^{-0,10935 \times PAW_{max\%}}) \quad (\text{equação 3})$$

$$k_{leaf} = (1/12) \times (1/(0,0045 \times PAW_{max\%} + 0,416)) \quad (\text{equação 4})$$

$$f_{sw} = 1 - e^{-0,06 \times PAW_{max\%}} \quad (\text{equação 5})$$

$$p_{stem} = 0,4 \times (1 - e^{-0,09 \times PAW_{max\%}})^{3,1} \quad (\text{equação 6})$$

$$p_{root} = 0,28 + 0,72 \times e^{-0,1 \times PAW_{max\%}} \quad (\text{equação 7})$$

$$p_{leaf} = 1 - p_{stem} - p_{root} \quad (\text{equação 8})$$

k_{stem} : taxa de decomposição de tronco (kgC.mês^{-1});

$PAW_{max\%}$: percentagem máxima de água disponível para a planta (%);

k_{leaf} : taxa de decomposição de folhas (kgC.mês^{-1});

f_{sw} : fator de água no solo (0-1) (adimensional);

p_{stem} : partição de carbono para tronco (adimensional);

p_{root} : partição de carbono para raízes finas (adimensional);

p_{leaf} : partição de carbono para folhas (adimensional);

A cada mês, no modelo CARLUC 2, carbono no tronco, folha e raízes finas aumentam em um montante igual à produtividade primária líquida (NPP). O cálculo de NPP é baseado no modelo 3-PG de Landsberg e Waring (1997), o qual contém quatro fatores ambientais, sendo que, destes um fator representa a fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa (f_{APAR}), e três fatores são funções de ponderação que representam o déficit de pressão de vapor d'água (f_{VPD}), a temperatura (f_{TEMP}) e a água do solo (f_{SW}) (Little, 2007), conforme a equação a seguir:

$$NPP = ckm \times cue \times PAR \times qe \times f_{APAR} \times f_{Temp} \times \min(f_{sw}, f_{VPD}) \quad (\text{equação 9})$$

ckm : fator de conversão (kgC.mole^{-1});

cue : eficiência de uso de carbono (adimensional);

qe : eficiência quântica ($\text{mol-C.mol-PAR}^{-1}$);

PAR : radiação fotossinteticamente ativa ($\text{molsfotons.m}^{-2}.\text{mês}^{-1}$);

f_{APAR} : fração absorvida de PAR, calculada pela equação proposta por Monsi e Saeki (1953) (adimensional):

$$f_{APAR} = 1 - e^{(-k \times LAI)} \quad (\text{equação 10})$$

k : coeficiente de extinção (adimensional);

LAI: índice de área foliar ($m^2 \cdot m^{-2}$);

f_{SW} : fator de água no solo (0-1) (adimensional);

f_{Temp} : fator de temperatura (0-1) (adimensional), calculado pela equação:

$$f_{Temp} = (T/27) \times ((40 - T)/13)^{0.481} \quad (\text{equação 11})$$

T : temperatura do ar ($^{\circ}C$);

f_{VPD} : fator de deficit de pressão de vapor (0-1) (adimensional), calculado pela equação:

$$f_{VPD} = e^{(-0.25 \times VPD)} \quad (\text{equação 12})$$

VPD: deficit de pressão de vapor de água (kPa).

No decorrer do tempo, a solução para o conjunto de equações diferenciais tende a alcançar um estado de equilíbrio, quando cada reservatório de carbono tem um valor estável. Nesta condição, a taxa de crescimento de cada reservatório coincide exatamente com a taxa de decaimento desse reservatório (Litle, 2007).

3.2.7. Produtividade da soja

O acúmulo de matéria seca da soja foi calculado por meio da eficiência do uso da radiação, proposto por Monteith (1977). Este método permite estimar a produtividade de uma cultura, considerando-se um único parâmetro: a eficiência do uso da radiação. O modelo baseia-

se na existência de uma relação linear entre o acúmulo de matéria seca total e a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura.

O processo fisiológico foi caracterizado baseando-se em dois parâmetros específicos: tempo térmico para o florescimento (GDF) e para a maturação (GDM). O total assimilado foi alocado às diferentes partes da planta, dependendo da fase de desenvolvimento. A estimativa da produtividade de grãos baseou-se na percentagem de matéria seca alocada para os órgãos reprodutivos em função da fase fenológica. A simulação foi concluída quando a cultura atingiu a maturidade fisiológica.

$$\frac{dDM}{dt} = PAR \times LUE \times f_{APAR} \times f_{Temp} \times f_{SW} \quad (\text{equação 13})$$

DM: quantidade de matéria seca produzida pelas plantas (gMS.m⁻²);

LUE: eficiência de conversão de PAR em matéria seca (gMS.MJ⁻¹);

PAR: radiação fotossinteticamente ativa incidente (MJ.m⁻².dia⁻¹);

f_{APAR}: fração absorvida de PAR (adimensional), calculada pela Equação 10;

f_{Temp}: fator de temperatura (0-1) (adimensional), calculado pela equação:

$$f_{Temp} = \begin{cases} 0, & \text{se } T < 10 \text{ ou } T > 40 \\ 0,0555 \times T - 0,555, & \text{se } 10 \leq T < 28 \\ 1, & \text{se } 28 \leq T \leq 32 \\ -0,125 \times T + 5, & \text{se } 32 < T \leq 40 \end{cases} \quad (\text{equação 14})$$

T: temperatura média do ar (°C);

f_{SW}: fator de água no solo (0-1) (adimensional), calculado pela equação:

$$f_{SW} = \frac{ETR}{ETP} \quad (\text{equação 15})$$

ETR: evapotranspiração real (mm.dia⁻¹), calculada a partir do balanço hídrico sequencial (10 dias) de Thornthwaite e Matther (1955);

ETP: evapotranspiração potencial (mm.dia⁻¹), calculada a partir do balanço hídrico sequencial (10 dias) de Thornthwaite e Matther (1955).

3.2.8. Produtividade da pastagem

O acúmulo de matéria seca na pastagem, adaptado do modelo desenvolvido por McCall e Bishop-Hurley (2003), foi calculado como um sistema dinâmico consistindo em dois termos: um representando a matéria seca viva e outro representando a senescência. A variável de estado usada para descrever a dinâmica de acúmulo de matéria seca (equação 15) descreve o acúmulo de tecidos novos impulsionado pela PAR com a eficiência de conversão de PAR em matéria seca determinada pelo parâmetro (LUE). A taxa de desenvolvimento de novos tecidos verdes é modificada pelas funções relacionadas com os efeitos da temperatura do ar (f_{Temp}), da água do solo (f_{SW}) e da fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa (f_{APAR}). O termo de senescência no modelo é proporcional à quantidade de matéria seca presente (DM). A taxa de senescência base (σ_t) depende da época do ano, sendo maior no período pós-reprodutivo de gramíneas. A taxa de senescência também é determinada em função do teor de água disponível (f_{Se}).

$$\frac{dDM}{dt} = PAR \times LUE \times f_{APAR} \times f_{Temp} \times f_{SW} - \sigma_t \times f_{SE} \times DM \quad (\text{equação 16})$$

DM: quantidade de matéria seca produzida pelas plantas (gMS.m^{-2});

LUE: eficiência de conversão de PAR em matéria seca (gMS.MJ^{-1});

PAR: radiação fotossinteticamente ativa ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

f_{APAR} : fração absorvida de PAR (adimensional), calculada pela Equação 10;

f_{Temp} : fator de temperatura (0-1) (adimensional), calculado pela Equação 17. Esta equação

foi desenvolvida a partir dos dados de Santos *et al.* (2008):

$$f_{Temp} = \begin{cases} 0, & \text{se } T < 10 \text{ ou } T > 50 \\ 0,05 \times T - 0,5, & \text{se } 10 \leq T < 30 \\ 1, & \text{se } 30 \leq T \leq 35 \\ -0,0667 \times T + 3,333, & \text{se } 35 < T \leq 50 \end{cases} \quad (\text{equação 17})$$

f_{SW} : fator de água no solo (0-1) (adimensional); calculado pela equação 15;

σ_t : taxa base de senescência (adimensional), calculada pela equação:

$$\sigma_t = \begin{cases} 0,0065, & \text{se } t < 125 \text{ ou } t \geq 160 \\ 0,0131, & \text{se } 125 \leq t < 160 \end{cases} \quad (\text{equação 18})$$

t: dia após emergência;

f_{se} : taxa de senescência (adimensional) em função da disponibilidade de água no solo, calculada pela equação:

$$f_{se} = \begin{cases} 3 - 10 \times f_{sw}, & \text{se } 0 \leq f_{sw} < 0,2 \\ 1, & \text{se } 0,2 \leq f_{sw} \leq 1 \end{cases} \quad (\text{equação 19})$$

3.3. Análise de sensibilidade dos parâmetros

A análise de sensibilidade é o estudo da relação entre as informações de entrada e de saída de um modelo. Através da análise de sensibilidade, pode-se verificar como a variação na saída de um modelo pode ser dividida e/ou atribuída a diferentes fontes de variação na entrada e como um dado modelo depende dos dados fornecidos a ele. No contexto de calibração de modelos, a análise de sensibilidade investiga como certo modelo computacional responde às variações nos seus parâmetros, determinando: (1) os parâmetros (ou partes do próprio modelo) que são insignificantes para determinado tipo de saída e podem ser desconsiderados no processo de calibração; (2) a região ótima no espaço de parâmetros para ser usada no estudo subsequente de calibração; e (3) se e quais parâmetros interagem uns com os outros (Varejão Jr, 2009).

A influência dos parâmetros sobre a simulação final foi verificada por meio da análise de sensibilidade dos mesmos. Os valores, obtidos na literatura e utilizados nos modelos, foram acrescidos e reduzidos em 10% individualmente, exceto para a temperatura, cuja alteração foi de +2,5°C e -2,5°C, enquanto os demais parâmetros foram mantidos inalterados. Desta maneira, foi

possível avaliar a influência desses parâmetros nos modelos através do fator de sensibilidade (β) calculado pela equação a seguir:

$$\beta = \frac{(C_{+10\%} - C_{-10\%})}{C_{\text{controle}}} \quad (\text{equação 20})$$

β : fator de sensibilidade;

$C_{+10\%}$: carbono simulado com aumento de 10% no parâmetro;

$C_{-10\%}$: carbono simulado com diminuição de 10% no parâmetro;

C_{controle} : carbono simulado sem alteração no parâmetro.

Para o modelo de ecossistema natural, quando se avaliou a sensibilidade da biomassa, o carbono simulado foi o estoque de carbono na biomassa viva acima do solo. No entanto, quando foi avaliada a sensibilidade da produtividade primária líquida, o carbono simulado foi o fluxo de carbono. Já para as culturas agrícolas, considerou-se como carbono simulado para a análise de sensibilidade o valor de $\frac{dDM}{dt}$.

3.4. Teste e avaliação do modelo

Os dados de produtividade para a soja foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), disponíveis no Levantamento Sistemático da Produção Agrícola que obtém informações mensais sobre previsão e acompanhamento de safras agrícolas, com estimativas de produção, rendimento médio e áreas plantadas e colhidas, tendo como unidade de coleta os municípios.

Para avaliar o modelo de produtividade do ecossistema natural, foram utilizadas a compilação de medidas de diferentes estudos para as seguintes variáveis: a produtividade primária líquida (NPP), o índice de área foliar (LAI) e a biomassa viva acima do solo (AGB).

Para a *NPP* foram utilizados os dados observados por Aragão *et al.* (2009) em seis sítios na Amazônia: Amacayacu (AGP) e Zafire (ZAR) na Colômbia; Tambopata (TAM) no Peru; Caxiuanã (CAX), Manaus (MAN) e Tapajós (TAP) no Brasil; conforme Tabela 3. Valores observados para o *LAI* foram obtidos em nove sítios na Amazônia do projeto MOORE (disponível em: <http://www.oeb.harvard.edu/faculty/moorcroft/andes-amazon/>): Kenia (KEN) na Bolívia; Allpahuayo (ALP) e Tambopata (TAM) no Peru; Guyaflux Tower (GUY) na Guiana Francesa, Amacayacu (AGP) na Colômbia; Caxiuanã (CAX), Manaus (MAN), Tapajós (TAP) e Reserva Jaru (RJA) no Brasil (Tabela 3). Já para a *AGB* foram utilizados os dados observados por Baker *et al.*(2004) em 16 sítios identificados na Tabela 3: Huanchaca (HCC) e Los Fierros (LFB) na Bolívia; Bogi (BOG), Jatun Sacha (JAS) e Tiputini (TIP) no Equador; Allpahuayo (ALP), Cuzco Amazonico (CUZ), Sucusari (SUC), Tambopata, (TAM) e Yanamono (YAN) no Peru; BDFFP (BDF), Bionte (BNT), Caxiuanã (CAX), Jacarandá (JAC), Jari (JRI) e Tapajós (TAP) no Brasil.

Foi realizada calibração dos parâmetros aos quais o modelo demonstrou maior sensibilidade. Valores aleatórios para esses parâmetros, dentro de uma faixa preestabelecida, foram utilizados. Em seguida, o modelo calibrado foi aquele cujo conjunto de parâmetros maximizou o coeficiente de correlação (*r*). Para testar o modelo, também foram estimados os seguintes erros estatísticos: o erro médio relativo (ϵ) e a raiz quadrada do erro quadrado médio (REQM). A REQM é uma medida dimensional, isto é, expressa o erro do modelo nas unidades da variável em questão. A equação para a REQM é dada por:

$$REQM = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{equação 21})$$

n: número de observações;

P_i: valores simulados pelo modelo;

O_i: valores observados.

Tabela 3. Identificação dos sítios experimentais na Amazônia

CÓDIGO	LAT (°)	LONG (°)	NPP	LAI	AGB
AGP	-3,73	-70,35	x	X	-
ALP	-3,95	-73,44	-	X	x
BDF	-2,40	-59,93	-	-	x
BNT	-2,38	-60,10	-	-	x
BOG	-0,70	-76,48	-	-	x
CAX	-1,72	-51,50	x	X	x
CUZ	-12,50	-69,03	-	-	x
GYF	5,28	-52,93	-	X	-
HCC	-14,57	-60,75	-	-	x
JAC	-2,38	-60,10	-	-	x
JAS	-1,07	-77,65	-	-	x
JRI	-1,00	-52,05	-	-	x
KEN	-16,01	-62,74	-	X	-
LFB	-14,61	-60,86	-	-	x
MAN	-2,50	-60,00	x	X	-
RJA	-10,08	-61,93	-	X	-
SUC	-3,23	-72,90	-	-	x
TAM	-12,85	-69,75	x	X	x
TAP	-2,50	-55,00	x	X	x
TIP	-0,64	-76,15	-	-	x
YAN	-3,43	-72,85	-	-	x
ZAR	-4,00	-69,90	x	-	-

3.5. Avaliação da resiliência do ecossistema natural e da produtividade agrícola

Resiliência é a capacidade intrínseca de um sistema em manter sua integridade no decorrer do tempo, sobretudo em relação a pressões externas. A principal característica de um sistema resiliente são sua flexibilidade e sua capacidade de perceber – ou eventualmente criar – opções para enfrentarem-se situações imprevistas e pressões externas (Holling, 1996).

Assim, para avaliar-se a resiliência do ecossistema natural e dos sistemas agrícolas foram realizadas comparações entre as simulações das produtividades do ecossistema natural e das culturas agrícolas, considerando os cenários futuros de clima e desmatamento, e as produtividades simuladas utilizando os cenários atuais. A significância estatística das diferenças foi avaliada com o uso do teste *t* de Student. Quando a média do tratamento não foi diferente da média do controle (clima atual) ao nível de 5% de probabilidade, o sistema foi considerado resiliente. As simulações de tratamento e de controle estão descritas a seguir.

3.6. Descrição dos experimentos

Foram realizados cinco conjuntos de simulações conforme descrito a seguir:

- A. Controle:** para estimar as produtividades atuais das culturas agrícolas e do ecossistema natural foi utilizado o banco de dados climático desenvolvido por Sheffield *et al.* (2006). Para calibrar a simulação controle, inicialmente foi feita análise de sensibilidade dos modelos aos parâmetros e às variáveis climáticas. Em seguida, valores observados de produtividade foram comparados aos valores simulados.
- B. Efeito radiativo do CO₂ (aquecimento global):** foram realizadas simulações considerando-se apenas as projeções climáticas futuras para o cenário A2 do IPCC para os anos de 2020 e 2050. A fim de se verificar o efeito das condições climáticas futuras nas produtividades do ecossistema natural e das culturas agrícolas, as simulações para os anos de 2020 e 2050 foram comparadas à simulação controle.

C. Efeito radiativo (aquecimento global) do CO₂ + efeito fisiológico do CO₂:

neste conjunto de simulações, além das condições climáticas futuras, também foi considerado o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO₂ na assimilação de carbono pelo ecossistema natural e pelas culturas agrícolas. Para o ecossistema natural, Lloyd e Farquhar (2008) constataram que, para um aumento de 170 ppm na concentração de CO₂, houve um incremento de 30% na assimilação de carbono pelas florestas tropicais. Assumindo-se que esse incremento seria linear, foi utilizado o valor de 0,18%.ppm⁻¹. Para culturas agrícolas, Tubiello *et al.* (2000) encontraram que, para um aumento de 350 ppm na concentração de CO₂, haveria um incremento na produtividade das culturas C3 e C4 de 25% e 10%, respectivamente. Assumindo-se também que esse incremento seria linear, foram utilizados os valores de 0,0714%.ppm⁻¹ para a cultura C3 (soja) e 0,029%.ppm⁻¹ para a cultura C4 (pastagem). Para o cenário A2, o IPCC (2007a) estabelece as seguintes concentrações de CO₂: 440 ppm e 559 ppm para os anos de 2020 e 2050, respectivamente. Para a simulação controle, utilizou-se a concentração de 380 ppm. Posteriormente, as simulações para os anos de 2020 e 2050 foram comparadas à simulação controle.

D. Mudanças no uso do solo: para as simulações, considerando as mudanças no uso do solo, foram utilizados os cenários de desmatamento projetados por Soares-Filho *et al.* (2006) para os anos de 2020 e de 2050. As células desmatadas nos cenários “BAU” e “GOV” para os anos de 2020 e 2050 obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) foram substituídas pela soja e pela pastagem. Em seguida, o albedo da superfície foi calculado pela média ponderada entre os diferentes usos do solo.

A partir do albedo da superfície, foram estimadas as mudanças climáticas causadas pelo desmatamento por meio das equações lineares obtidas por Yanagi (2006). Finalmente, a produtividade do ecossistema natural e dos sistemas agrícolas foi calculada. As simulações para os anos de 2020 e 2050 foram comparadas à simulação controle.

E. Efeito radiativo (aquecimento global) do CO₂ + efeito fisiológico do CO₂ + Mudanças no uso do solo: para avaliar-se o efeito combinado de todos os fatores nas produtividades do ecossistema natural e das culturas agrícolas, simulações considerando as projeções de aquecimento projetadas por diferentes modelos do IPCC e o efeito fisiológico do CO₂ (item C) e as mudanças climáticas causadas pela mudança no uso do solo (item D) foram somadas. Em seguida, as produtividades simuladas considerando todos os fatores para os anos de 2020 e 2050 foram comparadas à simulação controle.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise de sensibilidade do modelo

4.1.1. Módulo CARLUC

Na análise de sensibilidade para o modelo CARLUC foram testados os parâmetros: *cue*, *qe*, e *sla*. Também foi avaliada a sensibilidade do modelo à temperatura média do ar, à radiação fotossinteticamente ativa e à precipitação. A sensibilidade do modelo CARLUC aos parâmetros e às variáveis climáticas foram realizadas com relação à biomassa (Figura 10) e ao NPP (Figura 11).

Nas Figuras 10 e 11, observa-se que variações percentuais de 20% nos parâmetros *cue* e *qe* e na *PAR* resultaram na mesma variação percentual ($\beta=0,2$), tanto na biomassa, quanto no NPP, o que pode ser explicado pelo fato de esses elementos serem diretamente proporcionais à assimilação de carbono (Equação 8).

O modelo CARLUC não apresentou sensibilidade significativa ao parâmetro *sla*, com $\beta=0,0073$ para a biomassa e $\beta=0,0077$ para o NPP, para uma variação percentual de 20% no parâmetro.

A biomassa apresentou sensibilidade maior à precipitação, com $\beta=0,057$ para uma variação percentual de 20% na precipitação. Já para o NPP, o fator de sensibilidade β foi de 0,0043 para a mesma variação na precipitação.

Para variações de 5 °C na temperatura média do ar, o fator de sensibilidade β foi -0,17, tanto para a biomassa, quanto para o NPP.

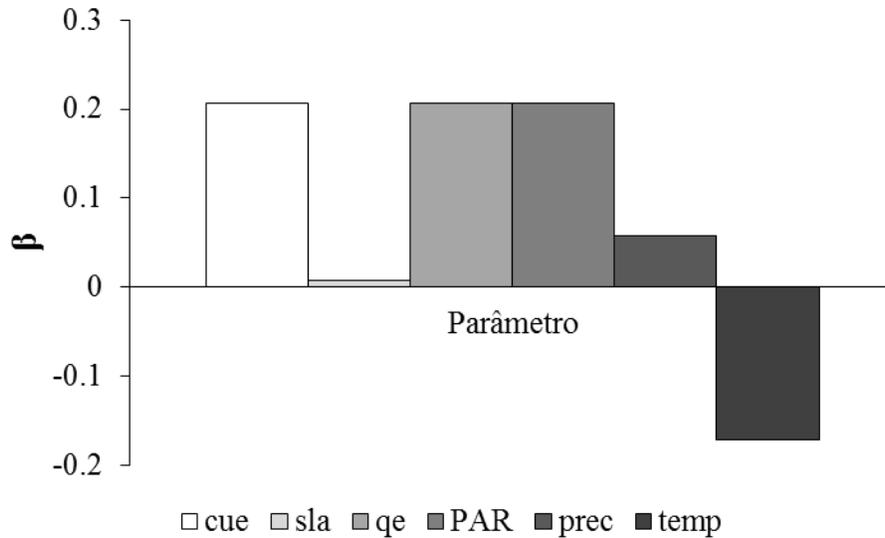


Figura 10. Análise de sensibilidade da biomassa, relativa aos parâmetros *cue* (eficiência do uso do carbono), *qe* (eficiência quântica) e *sla* (área foliar específica); e às variáveis climáticas: *PAR* (radiação fotossinteticamente ativa), *prec* (precipitação) e *Temp* (temperatura do ar), para o modelo CARLUC.

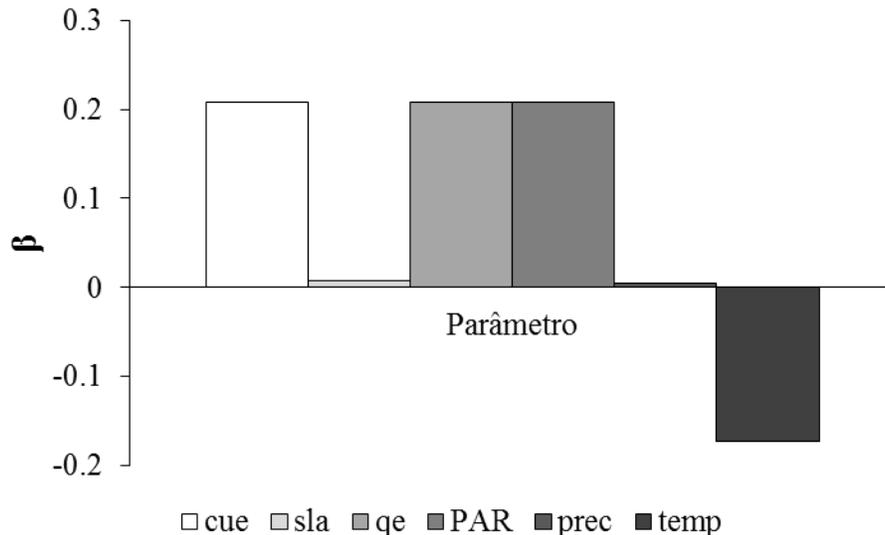


Figura 11. Análise de sensibilidade do NPP, relativa aos parâmetros: *cue* (eficiência do uso do carbono), *qe* (eficiência quântica) e *sla* (área foliar específica); e às variáveis climáticas: *PAR* (radiação fotossinteticamente ativa), *prec* (precipitação) e *Temp* (temperatura do ar), para o modelo CARLUC.

4.1.2. Módulo soja

Na Figura 12, observa-se que o modelo para a cultura da soja apresentou sensibilidade a todos os parâmetros e variáveis climáticas testadas. É importante ressaltar a necessidade de verificação de valores específicos para os parâmetros, por meio de experimentos, uma vez que a produtividade foi alterada, significativamente, com a mudança nos valores dos mesmos.

Na Figura 12, observa-se ainda que variações percentuais de 20% no parâmetro *LUE* e na *PAR* resultaram na mesma variação percentual na produtividade. Tais resultados já eram esperados, pois, a matéria seca acumulada no modelo é resultado da multiplicação destes dois elementos pelos fatores ambientais (Equação 13).

O modelo apresentou fator de sensibilidade β de 0,13, de 0,24 e de 0,11 aos parâmetros *GDF* e *GDM* e à precipitação, respectivamente, para aumentos de 20% nos valores dos parâmetros. A alta sensibilidade ao parâmetro *GDM* pode ser explicada pelo aumento do ciclo da cultura quando este parâmetro é elevado.

O fator de sensibilidade β para variações de 5 °C na temperatura média do ar foi -0,15, indicando assim que a produtividade é inversamente relacionada à temperatura.

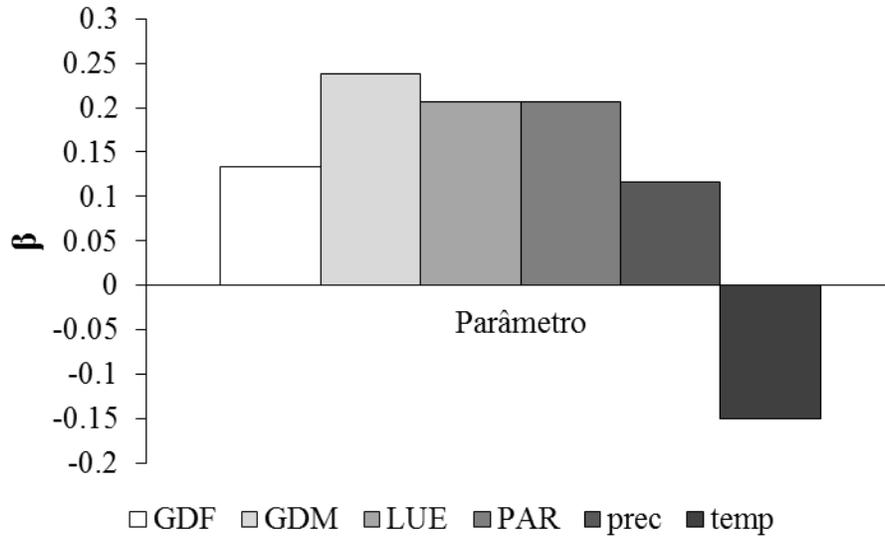


Figura 12. Análise de sensibilidade da produtividade da soja, relativa aos parâmetros: *GDF* (graus-dias florescimento), *GDM* (graus-dias maturação) e *LUE* (eficiência do uso da luz) e às variáveis climáticas: *PAR* (radiação fotossinteticamente ativa), *prec* (precipitação) e *temp* (temperatura do ar), para o modelo Soja.

4.1.3. Módulo pastagem

Na Figura 13, observa-se que variações percentuais de 20% no parâmetro *LUE* e na *PAR* resultaram na mesma variação na matéria seca acumulada de 21% ($\beta=0,21$). Valores próximos de 20% eram esperados, pois o acúmulo de matéria seca no modelo é impulsionado pela *PAR* com a eficiência de conversão de *PAR* em matéria seca determinada pelo parâmetro (*LUE*).

O modelo apresentou fator de sensibilidade β de -0,11 e de 0,12 ao parâmetro σ_t e à precipitação, respectivamente, para aumentos de 20% nos valores dos parâmetros. Valores absolutos próximos de sensibilidade a esses dois elementos podem ser explicados pelo fato de a senescência do modelo ser determinada em função da disponibilidade de água no solo.

O fator de sensibilidade β para variações de 5 °C na temperatura média do ar foi 0,38, indicando que o modelo é bastante sensível à temperatura. No modelo de pastagem, o aumento da temperatura favorece o acúmulo de matéria seca, uma vez que no clima atual a temperatura

média do ar para a Amazônia situa-se entre 23 e 28 °C, valores abaixo da temperatura ótima para as gramíneas tropicais C4. Estas gramíneas apresentam temperatura ótima na faixa de 30 a 35 °C (Santos *et al.*, 2008).

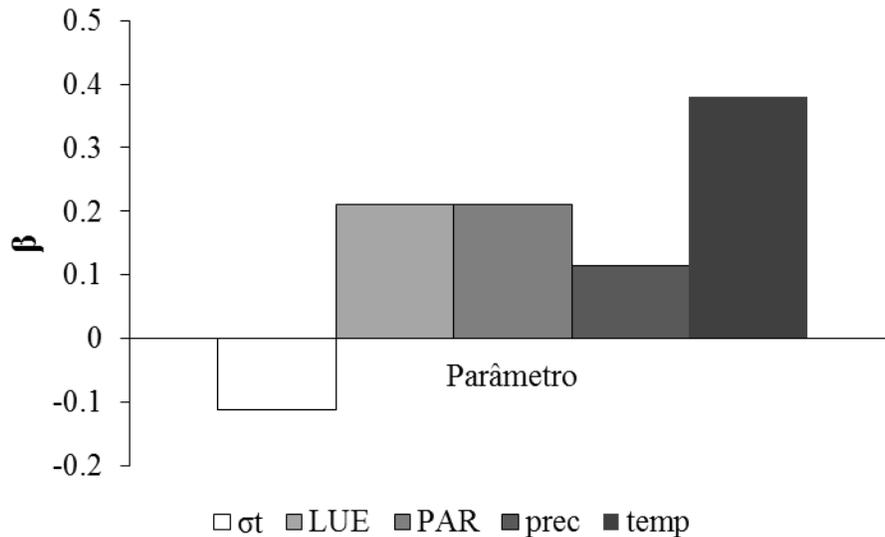


Figura 13. Análise de sensibilidade da matéria seca da pastagem, relativa aos parâmetros: *LUE* (eficiência do uso da luz), σ_t (taxa base de senescência) e às variáveis climáticas: *PAR* (radiação fotossinteticamente ativa), *prec* (precipitação) e *temp* (temperatura do ar), para o modelo Pastagem.

4.2. Avaliação do modelo

4.2.1. Módulo CARLUC

Os valores para os parâmetros mais importantes no modelo de produtividade do ecossistema natural, *cue* e *qe*, que maximizaram o coeficiente de correlação (r) foram: 0,45 e 0,035 molC.molPAR⁻¹, respectivamente. Malhi *et al.* (2009) registraram valores de *cue* para a floresta amazônica variando entre 0,32 e 0,49. A eficiência quântica média segundo dados da literatura (Landsberg e Waring, 1997) para florestas tropicais é 0,035 mol-C.mol-PAR⁻¹.

O r , o $REQM$ e o ε encontrados para a NPP foram: -0,52; 0,10 $\text{kgC.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ e -5,16%, respectivamente. Já para o LAI , o r , o $REQM$ e o ε foram: 0,54; 1,02 $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$ e 17,77%, respectivamente. Quanto à AGB , o r , o $REQM$ e o ε foram: 0,56; 1,34 kgC.m^{-2} e -1,35%, respectivamente.

Nas Tabelas 4 a 6, estão representados os valores simulados pelo CARLUC, os valores observados nos sítios experimentais e os valores dos erros relativos médio (ε , %), para NPP ($\text{kgC.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$), LAI ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) e AGB (kgC.m^{-2}).

A NPP simulada variou entre 1,01 $\text{kgC.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ para Tambopata e 1,26 $\text{kgC.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ para Caxiuanã. O erro relativo médio para toda a amostra foi de -5,16%. Entretanto, a NPP simulada para Tambopata foi subestimada em 34,18% e superestimada em 30,20% para Zafire (Tabela 4).

Tabela 4. NPP ($\text{kgC.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$) simulada pelo modelo CARLUC e NPP observada por Aragão *et al.* (2009) e erro relativo médio (ε , %)

SÍTIOS	NPP OBS ($\text{kgC.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$)	NPP SIM ($\text{kgC.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$)	ε (%)
AGP	1,15	1,21	5,29
CAX	1,32	1,26	-4,58
MAN	1,14	1,21	6,26
TAM	1,54	1,01	-34,18
TAP	1,44	1,22	-14,98
ZAR	0,93	1,21	30,20
MÉDIA	1,25	1,19	-5,16

O LAI simulado apresentou erro relativo médio para toda a amostra de 17,77%. No entanto, o LAI simulado foi superestimado em 62,21% e 44,78% para Kenia e Allpahuayo, respectivamente. Para os sítios localizados no Brasil, o modelo apresentou bons ajustes, com erros menores que 20%, conforme Tabela 5.

Tabela 5. LAI ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) simulada pelo modelo CARLUC e LAI observada (projeto MOORE) e erro relativo médio (ϵ , %)

SÍTIOS	LAI OBS ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	LAI SIM ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	ϵ (%)
KEN	3,60	5,84	62,21
MAN	5,15	6,12	18,94
CAX	5,25	6,03	14,94
TAP	5,56	5,95	7,14
RJA	5,50	5,75	4,46
AGP	5,99	6,71	12,01
GYF	6,95	6,86	-1,25
ALP	4,59	6,65	44,78
TAM	5,00	6,13	22,57
MÉDIA	5,29	6,23	17,77

Para todos os pontos amostrais, a AGB simulada apresentou erro relativo médio menor que 25%. A AGB média simulada pelo CARLUC foi apenas 1,35% inferior à média dos dados observados (Tabela 6).

Tabela 6. AGB ($\text{kgC} \cdot \text{m}^2$) simulada pelo modelo CARLUC e AGB observada por Baker *et al.* (2004) e erro relativo médio (ϵ , %)

SÍTIOS	AGB OBS ($\text{kgC} \cdot \text{m}^2$)	AGB SIM ($\text{kgC} \cdot \text{m}^2$)	ϵ (%)
HCC	12,86	12,88	0,11
LFB	12,72	12,88	1,23
BDF	16,43	15,36	-6,53
BNT	17,38	15,36	-11,65
CAX	18,51	14,92	-19,37
JAC	15,78	15,36	-2,66
JRI	19,49	14,63	-24,92
TAP	16,56	14,96	-9,65
BOG	12,32	14,53	17,96
JAS	13,42	10,69	-20,36
TIP	12,79	14,53	13,62
ALP	13,23	15,56	17,63
CUZ	12,67	15,87	25,27
SUC	14,37	15,63	8,74
TAM	12,93	14,22	10,03
YAN	14,73	15,63	6,07
MÉDIA	14,76	14,56	-1,35

4.2.2. Módulo soja

A produtividade da soja foi comparada aos dados de produtividade obtidos junto ao IBGE em nível estadual. Foram analisados os seguintes estados: Rondônia, Mato Grosso, Tocantins, Maranhão, Pará e Amazonas, pois apenas esses estados possuem uma série de dados superior a cinco anos.

Os valores para os parâmetros *GDF*, *GDM* e *LUE*, que maximizaram o coeficiente de correlação (r), considerando todos os estados produtores de soja na Amazônia Legal, foram: 700 °C.d, 940 °C.d, 1,3 gMS.MJ⁻¹, respectivamente. Valores relatados na literatura para o parâmetros *GDF* variam de 700°C.d (Boons-Prins *et al.*, 1993) a 790°C.d (Corrêa, 2008), e para o parâmetro *GDM* variam entre 935 °C.d (Corrêa, 2008) a 1000 °C.d (Boons-Prins *et al.*, 1993). Para a cultura da soja, Sinclair *et al.* (1992) apontam o valor de 1,3 gMS.MJ⁻¹ para o parâmetro *LUE*, enquanto Santos *et al.* (2003) encontraram para baixas latitudes o valor de 2,15 gMS.MJ⁻¹.

Para a cultura da soja, foram encontrados os seguintes valores para o r , o *REQM* e o ε : 0,83, 305,58 kg.ha⁻¹ e 6,72%, respectivamente, quando considerados todos os estados conjuntamente. Na Figura 14, está apresentado o gráfico de dispersão entre os dados observados e os resultados simulados pelo modelo após a calibração dos parâmetros.

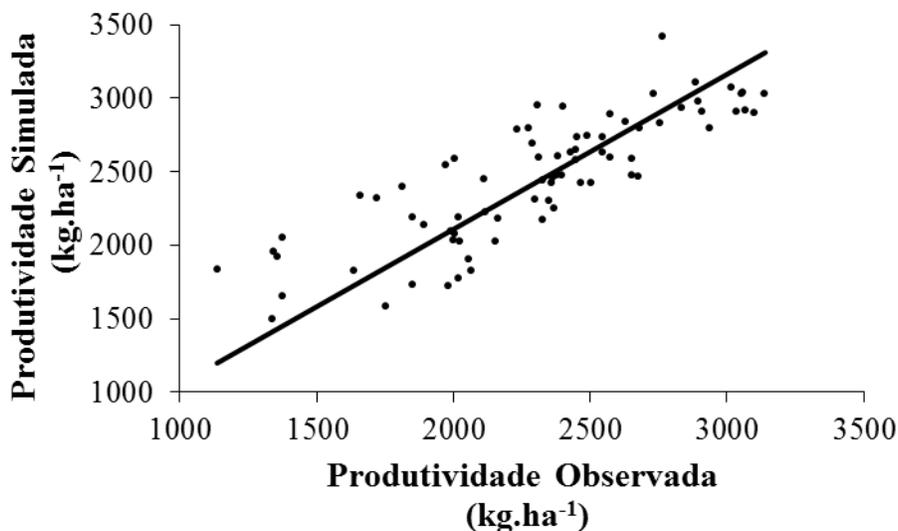


Figura 14. Gráfico de dispersão entre os dados observados e os resultados simulados pelo modelo após a calibração dos parâmetros.

As estimativas da produtividade para a cultura da soja simulada pelo modelo, para cada estado estudado, são apresentadas nas Figuras 15 a 20. Para fins de comparação, também foram plotados os dados observados obtidos junto ao IBGE. Constam ainda nas figuras citadas as estatísticas calculadas após a calibração do modelo.

As Figuras 15 a 20 mostram a variabilidade anual na produtividade estimada, influenciada pelas diferentes condições climáticas ocorridas a cada ano. O modelo simulou bem a tendência de aumento na produtividade ao longo dos anos para todos os estados analisados.

A produtividade média da soja estimada pelo modelo variou de 1500 kg.ha^{-1} (Figura 19) para o ano de 1990 no estado do Tocantins a 3416 kg.ha^{-1} para o ano de 1997 no estado do Mato Grosso (Figura 15). Maiores diferenças entre os valores estimados e os observados foram encontradas para os estados do Pará, do Tocantins e do Amazonas.

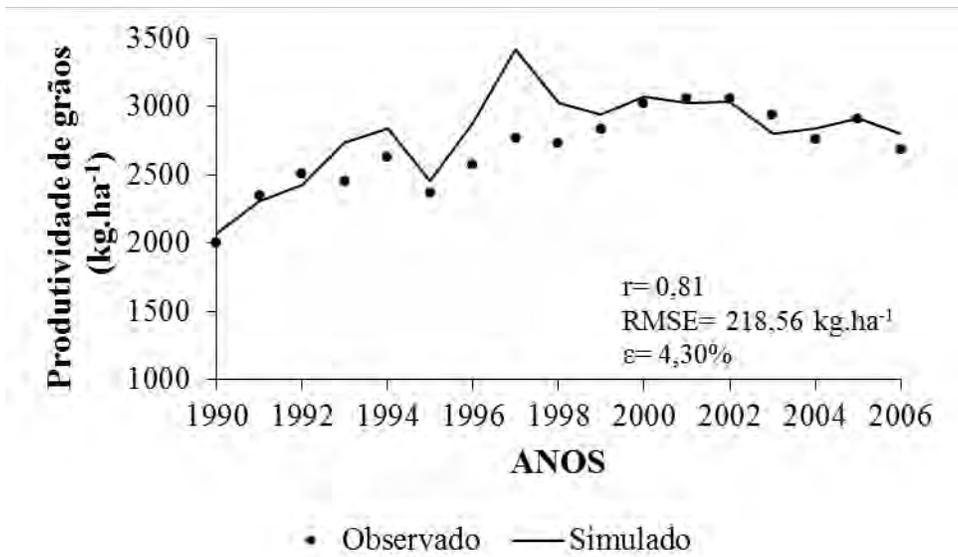


Figura 15. Produtividade média da soja (kg.ha^{-1}) simulada pelo modelo e observada para o estado do Mato Grosso.

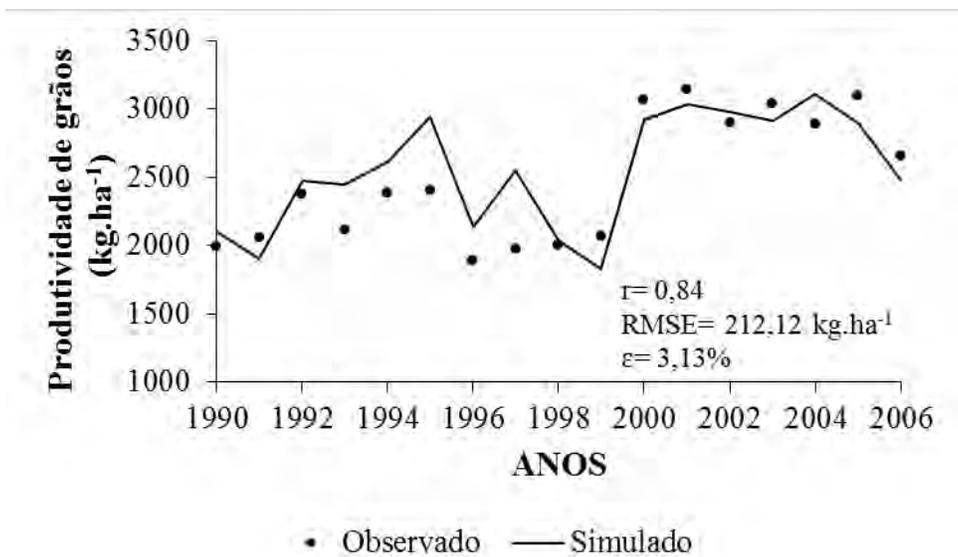


Figura 16. Produtividade média da soja (kg.ha^{-1}) simulada pelo modelo e observada para o estado de Rondônia.

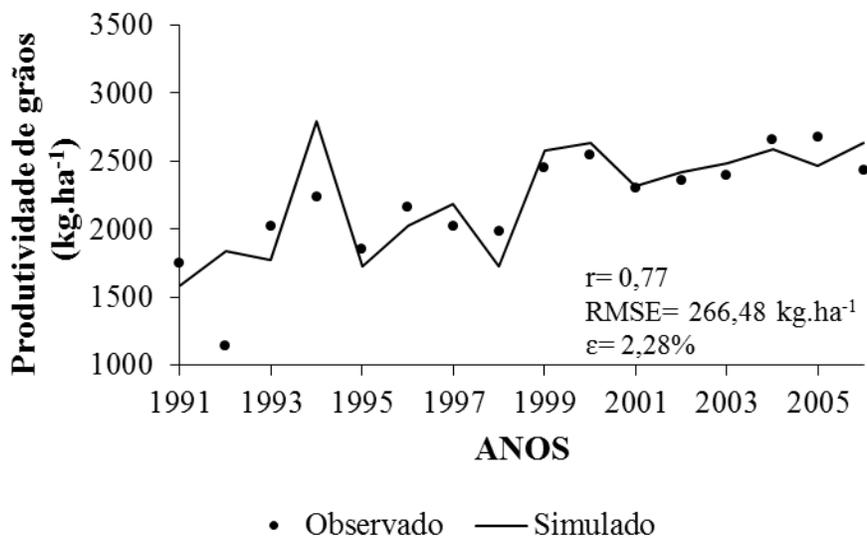


Figura 17. Produtividade média da soja (kg.ha⁻¹) simulada pelo modelo e observada para o estado do Maranhão.

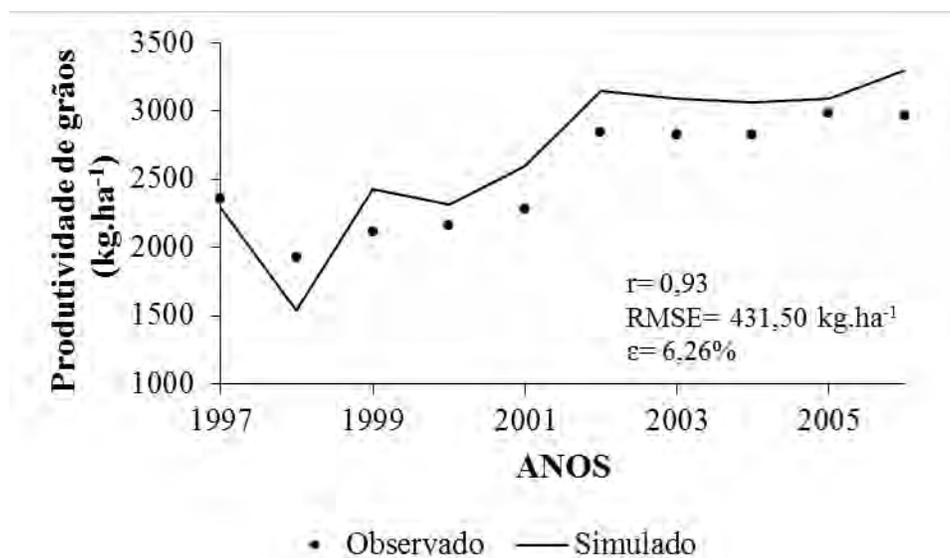


Figura 18. Produtividade média da soja (kg.ha⁻¹) simulada pelo modelo e observada para o estado do Pará.

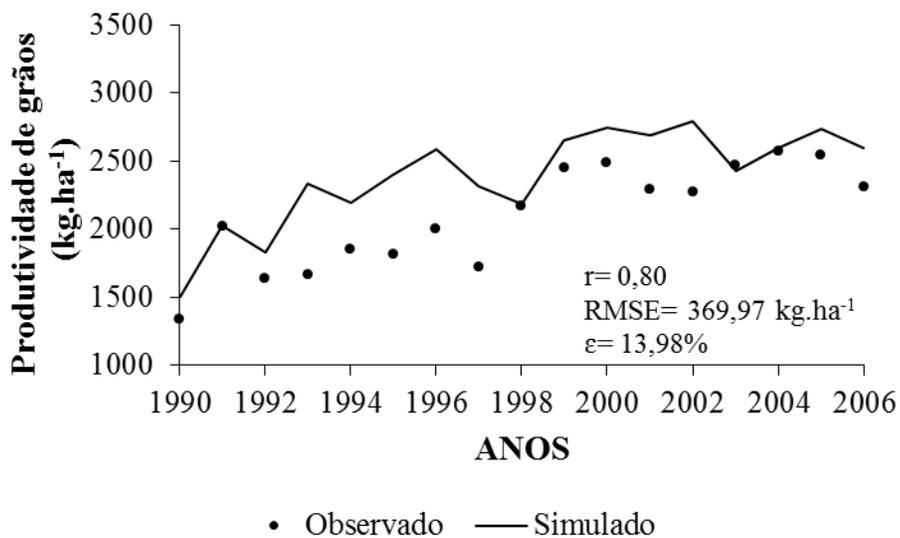


Figura 19. Produtividade média da soja (kg.ha⁻¹) simulada pelo modelo e observada para o estado do Tocantins.

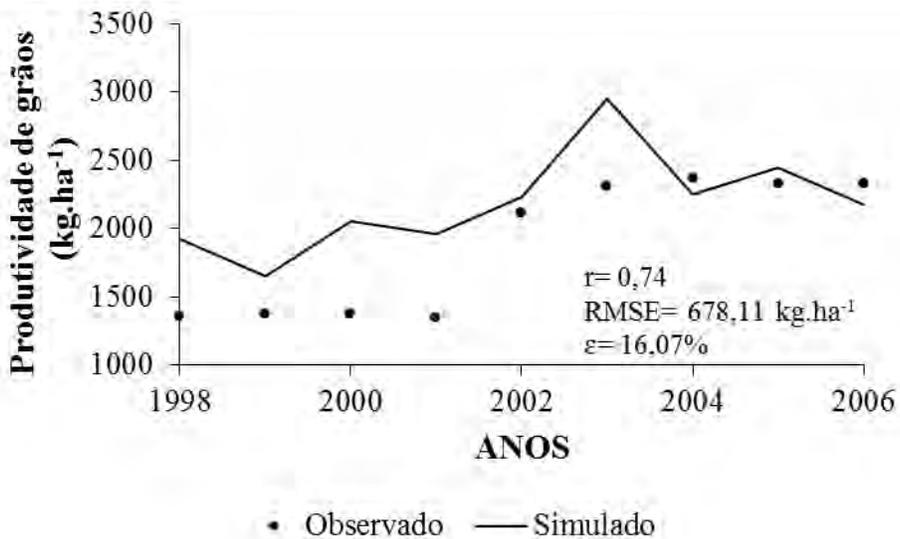


Figura 20. Produtividade média da soja (kg.ha⁻¹) simulada pelo modelo e observada para o estado do Amazonas.

4.2.3. Módulo pastagem

Com base no trabalho de Oliveira *et al.* (2007), foi adotado o valor médio de $1,77 \text{ g.MJ}^{-1}$ para o parâmetro *LUE*, nas simulações do acúmulo de matéria seca da pastagem. Os autores relataram os valores de $0,516 \text{ g.MJ}^{-1}$ na estação de transição seca-chuvosa e de $3,022 \text{ g.MJ}^{-1}$ na estação chuvosa.

As estimativas da produtividade da matéria seca pela pastagem simulada pelo modelo para a região de estudo são apresentadas na Figura 21. Para fins de comparação, também foi plotada a produtividade da matéria seca para o capim-Marandu (*Brachiaria brizantha cv. Marandu*) de acordo com a Embrapa (1985), produtividade esta igual a $14 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$. A produtividade média de matéria seca simulada para o período de 1990 a 2006 foi de $14,01 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, variando de 12,8 a $15,7 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, com erro realtivo de apenas 0,58% em relação ao valor observado. Nota-se ainda, pela Figura 21, que a produtividade de matéria seca média de acordo com a Embrapa (1985) está entre os valores simulados pelo modelo. Apenas, para os anos de 1992 e de 1997 a diferença entre os valores simulados pelo modelo e a média observada foram maiores que 10%.

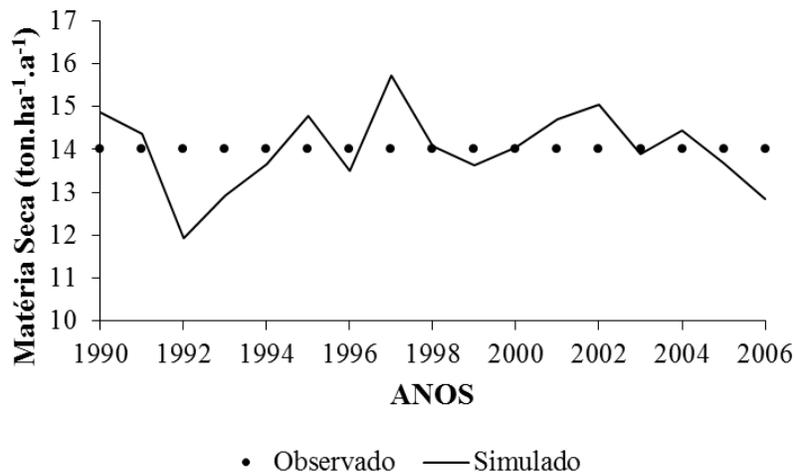


Figura 21. Produtividade de matéria seca pela pastagem ($\text{tonMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) simulada pelo modelo para a região de estudo e a indicada pela Embrapa (1985).

4.3. Simulação controle

4.3.1. Módulo CARLUC

A quantidade de carbono total modelada para a Amazônia Legal, incluindo todos os estoques de carbono (biomassa viva e morta, acima e abaixo do solo), variou de 13,01 a 31,83 kgC.m⁻², com valor médio de 25,36 kgC.m⁻² geralmente decrescendo de norte para o sul (Figura 22). A biomassa viva total, incluindo folhas, madeira e raízes finas, mostrou o mesmo padrão geográfico, variando entre: 6,58 e 26,08 kgC.m⁻², com valor médio de 22,28 kgC.m⁻² (Figura 23), enquanto a biomassa viva acima do solo, assumindo que 80% da madeira está acima do solo, variou de: 5,06 a 20,65 kgC.m⁻², com valor médio de 17,88 kgC.m⁻² (Figura 24). Já a produtividade primária líquida (NPP) apresentou valores variando de 1,07 a 1,29 kgC.m⁻².a⁻¹, com valor médio de 1,21 kgC.m⁻².a⁻¹ (Figura 25). Enquanto o índice de área foliar variou de 3,85 a 6,92 m².m⁻², com valor médio de 5,99 m².m⁻² (Figura 26).

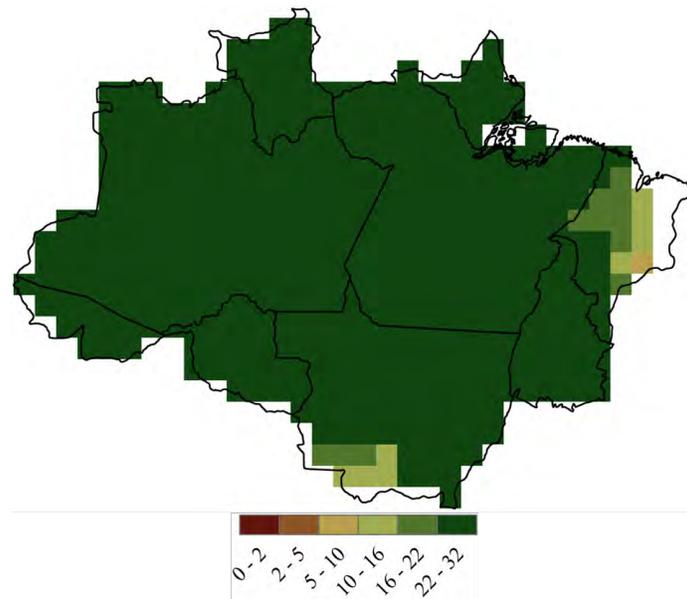


Figura 22. Distribuição espacial do carbono total modelado (kgC.m⁻²) para a Amazônia.

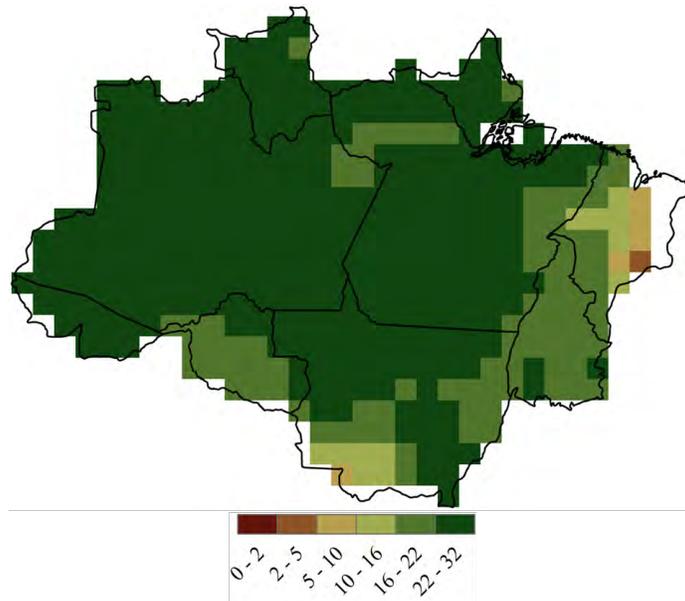


Figura 23. Distribuição espacial da biomassa viva modelada (kgC.m^{-2}) para a Amazônia.

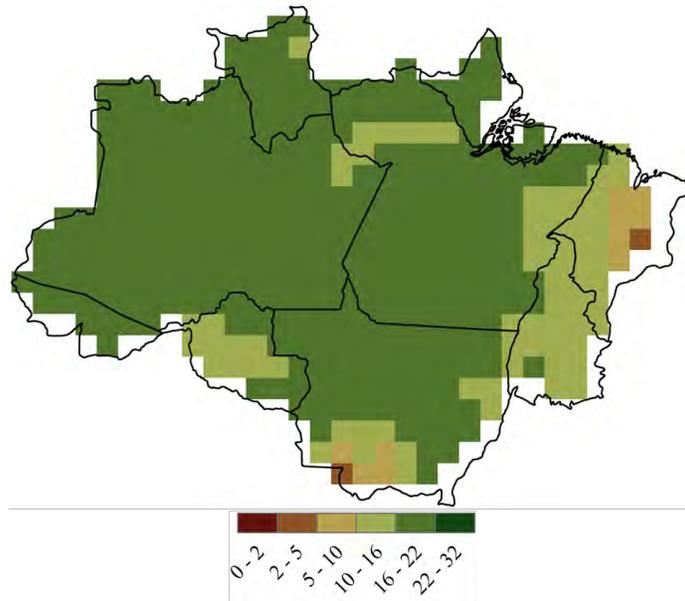


Figura 24. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo modelada (kgC.m^{-2}) para a Amazônia.

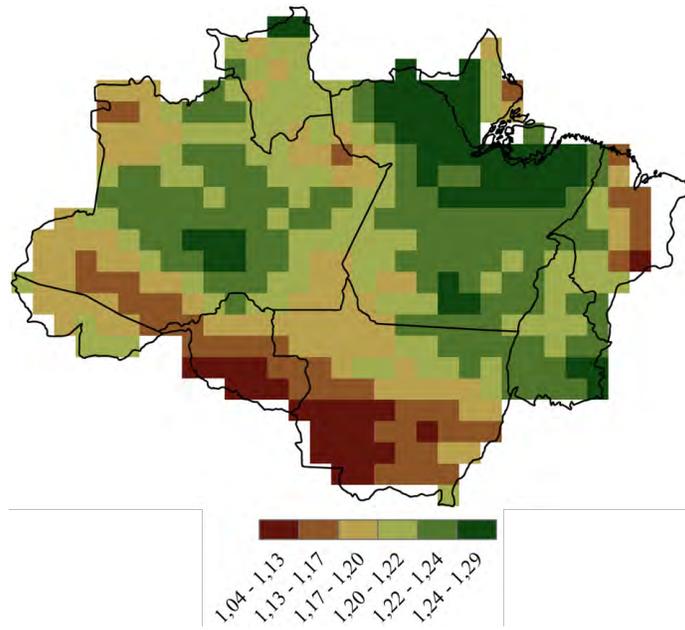


Figura 25. Distribuição espacial da produtividade primária líquida modelada ($\text{kgC.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$) para a Amazônia.

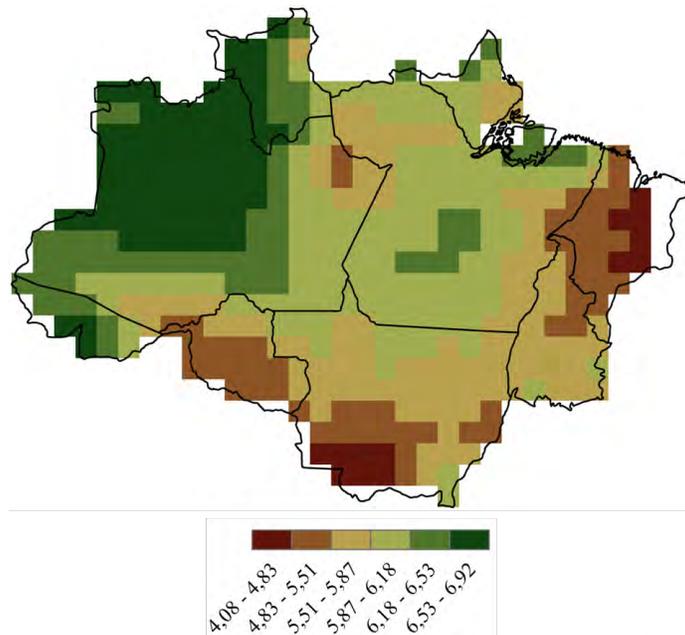


Figura 26. Distribuição espacial do índice de área foliar modelado ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) para a Amazônia.

A Figura 27 ilustra o comportamento da curva de resposta da biomassa viva acima do solo ao longo dos meses. Valores iniciais utilizados no modelo não foram valores próximos aos valores de equilíbrio, portanto, as condições de equilíbrio só foram atingidas após 2000 meses (~167 anos) de simulação (Figura 27).

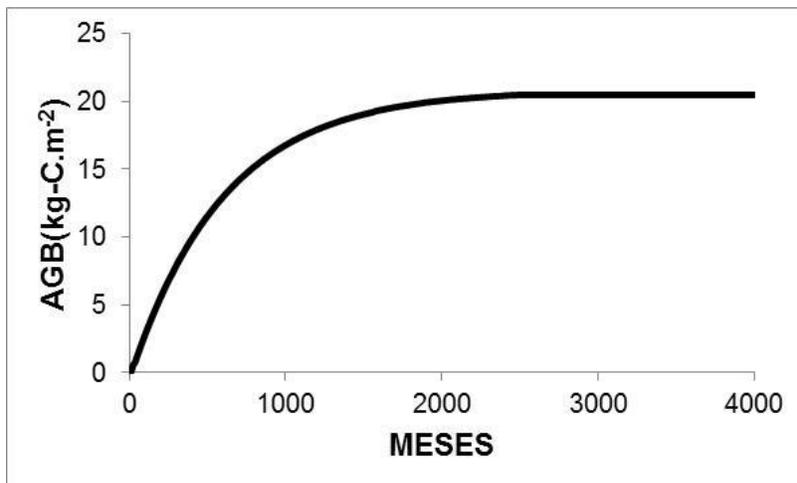


Figura 27. Curva de resposta ao longo dos meses da biomassa viva acima do solo.

4.3.2. Módulo soja

Para a simulação controle da produtividade da soja, foi utilizada a climatologia de precipitação, de temperatura do ar e de radiação solar incidente para o período de 1971 a 2000 a partir dos dados diários do banco de dados construído por Sheffield *et al.* (2006).

Considerou-se que toda a área desmatada e toda a área de não floresta para o cenário controle de uso do solo seria ocupada pela soja. A produtividade da soja neste cenário apresentou valores entre $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (norte do estado do Maranhão) e $3.600 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (sul do estado do Mato Grosso), com valor médio de $2.704,7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Figura 28). A grande variabilidade nos valores de produtividade foi influenciada pelas diferentes condições climáticas ocorridas para cada localidade, principalmente pela precipitação.

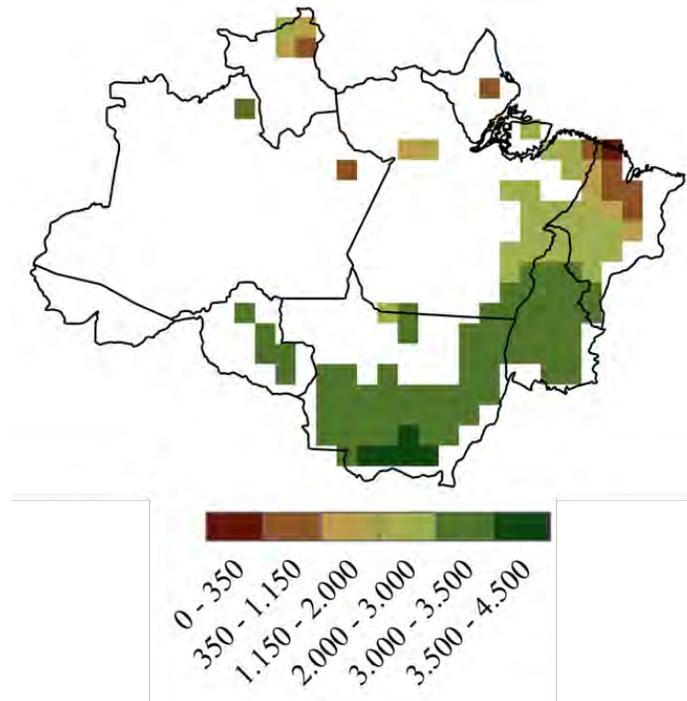


Figura 28. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) para a simulação controle.

4.3.3. Módulo pastagem

Assim como para a simulação controle da produtividade da soja, a simulação controle da pastagem foi obtida utilizando-se a climatologia de precipitação, de temperatura do ar e de radiação solar incidente para o período de 1971 a 2000 a partir dos dados diários do banco de dados construído por Sheffield *et al.* (2006). A Figura 29 mostra a distribuição espacial da produtividade da pastagem para a simulação controle, à semelhança da simulação da soja, considerou-se que toda a área desmatada e toda a área de não floresta seria ocupada pela pecuária. A produtividade da pastagem variou de $6.855 \text{ kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ no nordeste do estado de Maranhão a $23.767 \text{ kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ no estado do Amazonas, com valor médio de $16.224 \text{ kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (Figura 29). Em grande parte da região ocupada pela pastagem, cerca de

69,5%, apresentou produtividade na faixa de 15.000 a 20.000 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, como pode ser visualizado na Figura 29.

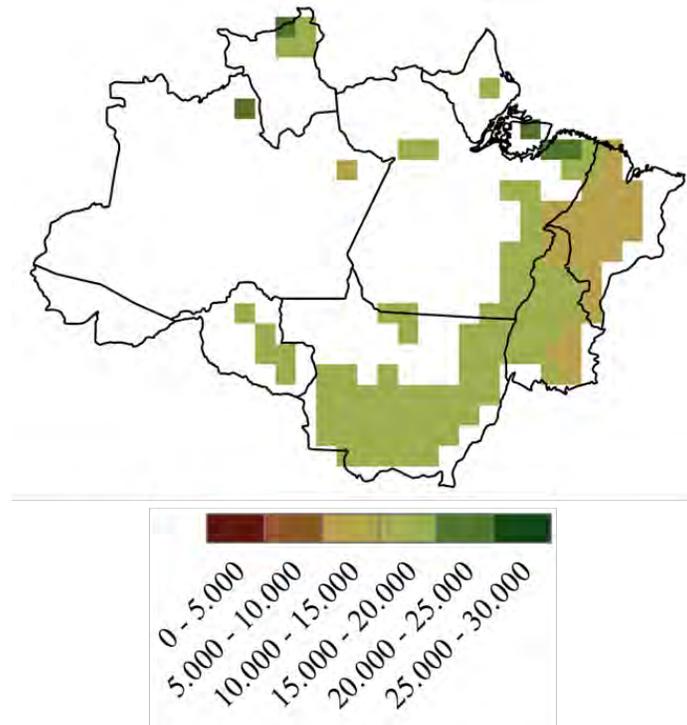


Figura 29. Distribuição espacial da produtividade da pastagem (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹) para a simulação controle.

4.4. Simulações considerando os cenários futuros

Com a finalidade de avaliar o impacto dos cenários futuros de desmatamento e de clima na resiliência do ecossistema natural e dos sistemas agrícolas no curto e no longo prazo, foram testados 52 cenários para os anos de 2020 e de 2050, conforme descrição a seguir:

1. Clima: 8 cenários - anomalias climáticas de 7 modelos do IPCC para o cenário A2 (CCSM3, CNRM3, GISSER, INMCM3, IPSLCM4, MIROC e MRICGCM) e o

clima médio calculado a partir da média das anomalias climáticas destes 7 modelos.

2. Clima + CO₂: 8 cenários de clima futuro listados acima acrescidos do efeito fisiológico do aumento da concentração de CO₂ na assimilação do carbono.
3. Uso do solo: 4 cenários – foram utilizados os cenários de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006), “BAU” e “GOV”, substituindo as células desmatadas por soja e pastagem.
4. Clima + CO₂ + uso do solo: 32 cenários, combinação entre os 8 cenários de clima futuro, considerando o efeito fisiológico do CO₂ e os 4 cenários de desmatamento.

Para o ecossistema natural, todas as simulações foram realizadas a partir das mesmas condições iniciais, adotando o valor de 0,001 kgC.m⁻² para o reservatório de carbono das folhas e iniciando os demais reservatórios de carbono com o valor zero. Deste modo, todas as comparações foram efetuadas apenas quando os modelos atingiram o estado de equilíbrio.

Para as simulações dos efeitos dos cenários futuros nas culturas agrícolas, considerou-se que toda a área desmatada da Amazônia Legal seria 100% ocupada pela soja e pela pastagem.

4.4.1. Efeitos dos cenários futuros no ecossistema natural para o ano de 2020

4.4.1.1. Efeito radiativo da elevação do CO₂ (aquecimento global)

As anomalias da temperatura média anual (°C) e da precipitação média anual (mm.a⁻¹) calculadas a partir da média de 20 anos (2011 a 2030) pelos diferentes modelos e para o clima médio para a região da Amazônia Legal estão apresentados na Tabela 7. Também estão representados os fatores ambientais relativos à temperatura e à água disponível no solo usados no

modelo de produtividade do ecossistema natural. Todos os modelos simulam um clima mais quente com valor médio de 1,13 °C. No caso da precipitação, quando analisada toda a região da Amazônia Legal, apenas os modelos CCSM3, MIROC e MRICGCM indicam um clima mais seco.

Tabela 7. Anomalias de temperatura média anual (em °C) e precipitação média anual (em mm.a⁻¹) simuladas pelos modelos para o período de 2011 a 2030 e respectivos fatores ambientais usados no CARLUC

MODELOS	Anomalias de Temp (°C)	fTemp	Anomalias de Prec (mm.a ⁻¹)	fSW
Clima Médio	1,13	0,975	8,88	0,880
CCSM3	1,30	0,975	-15,84	0,869
CNRM3	1,01	0,975	56,52	0,887
GISSER	0,99	0,975	33,72	0,886
INMCM3	1,08	0,975	8,04	0,878
IPSLCM4	0,96	0,975	110,88	0,891
MIROC	1,83	0,974	-127,20	0,861
MRICGCM	0,75	0,974	-4,32	0,890

As anomalias da biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²), considerando as condições climáticas futuras para o ano de 2020 no ecossistema natural estão representadas na Figura 30.

Em todos os cenários climáticos analisados para o ano de 2020, as simulações apresentaram queda na biomassa viva acima do solo, sendo que as maiores quedas são observadas ao sul do estado do Mato Grosso e a leste e norte do estado do Pará (Figura 30). As anomalias do modelo japonês MIROC resultaram nas quedas mais acentuadas na biomassa viva acima do solo. Isso ocorre devido ao fato de tal modelo dentre todos analisados projetar um clima com temperaturas mais altas e menores totais pluviométricos para a região amazônica, conforme Tabela 7.

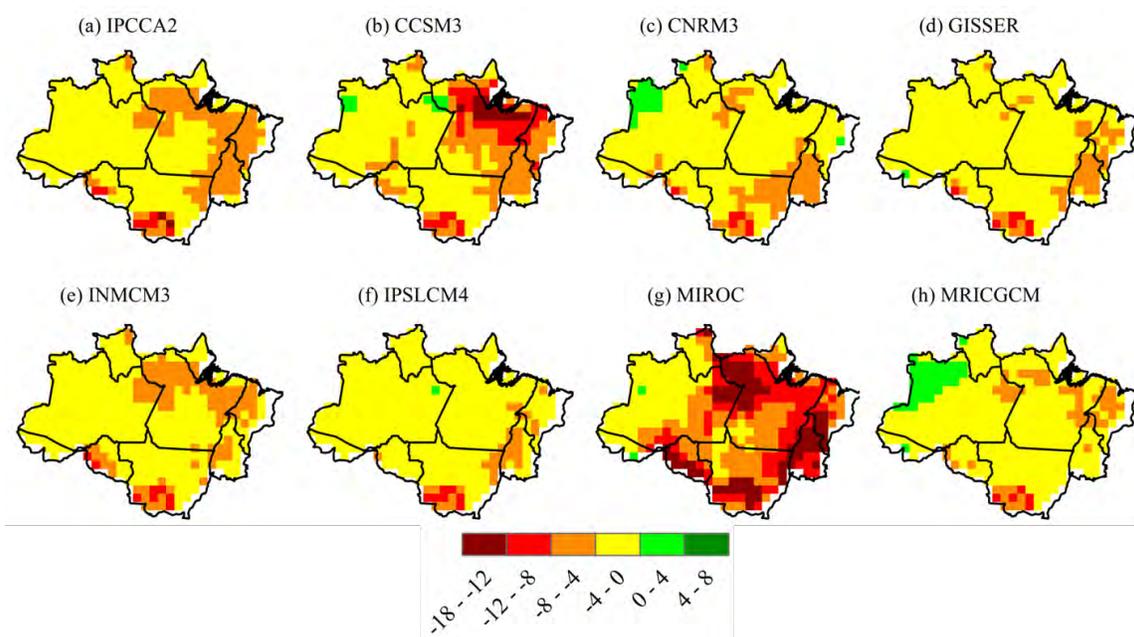


Figura 30. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2020: IPCC2-clima médio (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).

A Figura 31 mostra a distribuição espacial da biomassa viva acima do solo simulada para as condições climáticas atuais e para os diferentes modelos do IPCC, considerando apenas o efeito radiativo do CO_2 . Observa-se na Figura 31 que para todos os modelos a área com biomassa viva acima do solo maior que 22 kgC.m^{-2} diminuiu quando comparada à simulação controle. Nota-se ainda que, a sudoeste do estado do Mato Grosso e a leste do estado do Maranhão, locais onde a biomassa na simulação controle já eram baixos ($<10 \text{ kgC.m}^{-2}$) ficam ainda menores com valores atípicos para floresta tropical.

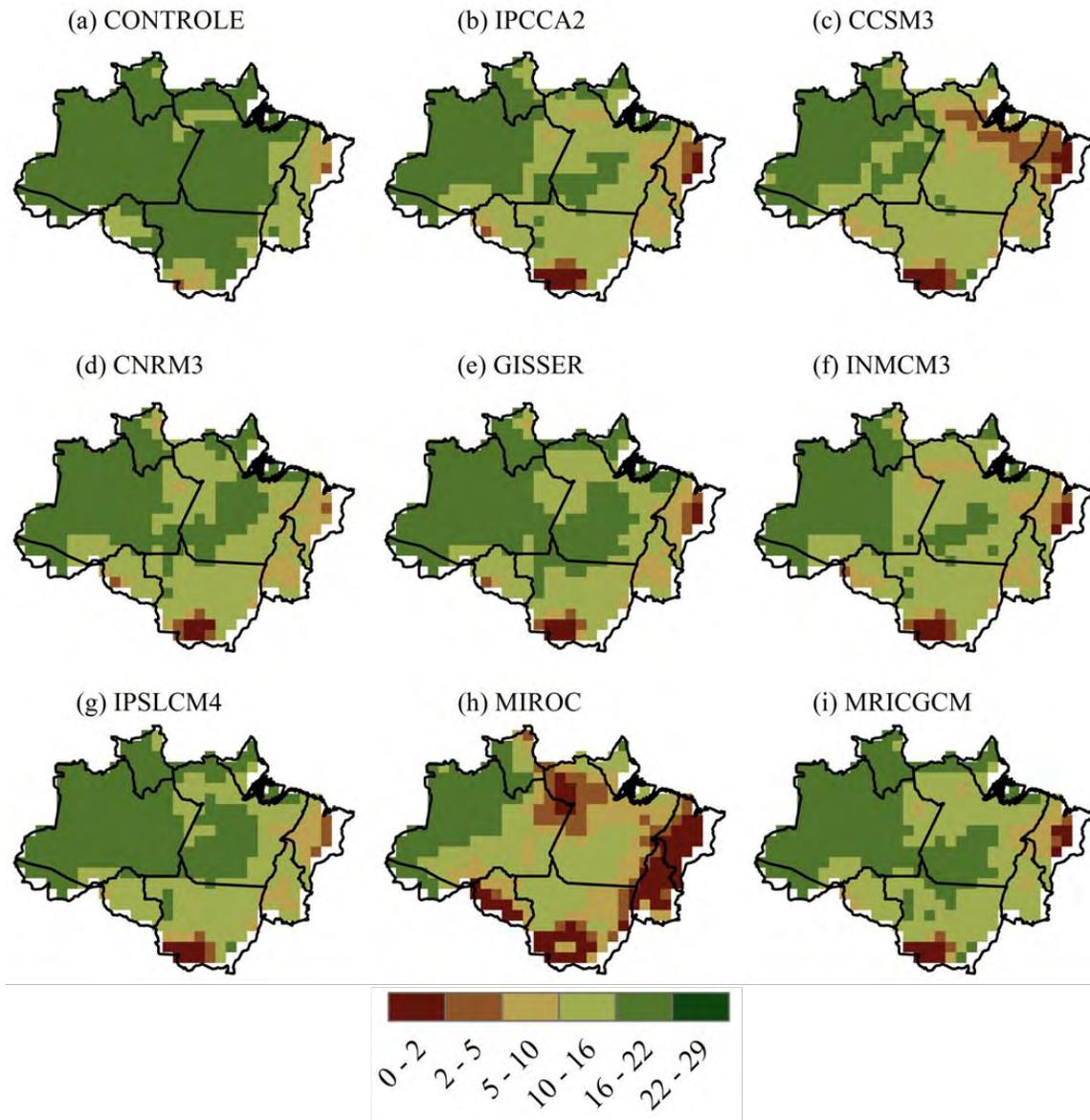


Figura 31. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

As anomalias médias de biomassa viva acima do solo variaram entre $-1,9 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-10,5\%$ para os cenários climáticos propostos pelos modelos IPSLCM4 e GISSER e $-6,9 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de -39% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de

clima médio, a anomalia média de biomassa viva acima do solo foi de $-2,9 \text{ kgC.m}^{-2}$, equivalente a uma redução de $-16,1\%$ quando comparada à simulação controle (Tabela 8).

Tabela 8. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m^{-2})	% de redução
Clima Médio	17,9	-2,9	-16,1
CCSM3	17,9	-3,9	-22,1
CNRM3	17,9	-2,3	-12,8
GISSER	17,9	-1,9	-10,5
INMCM3	17,9	-2,9	-16,1
IPSLCM4	17,9	-1,9	-10,5
MIROC	17,9	-6,9	-39,0
MRICGCM	17,9	-2,0	-11,3

4.4.1.2. Efeito radiativo (aquecimento global) e fisiológico da elevação de CO_2

As anomalias da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando as condições climáticas futuras e o efeito fisiológico do CO_2 , estão representadas na Figura 32.

Observa-se que, ao introduzir o efeito fisiológico do aumento da concentração de CO_2 nas simulações, houve incremento na biomassa viva acima do solo na região nordeste da Amazônia Legal (Figura 32). Para esta região, os efeitos negativos das condições climáticas futuras foram menores que o efeito fisiológico da crescente concentração de CO_2 . Para as demais regiões, o aumento da concentração de CO_2 não foi suficiente para atenuar o efeito das condições climáticas futuras.

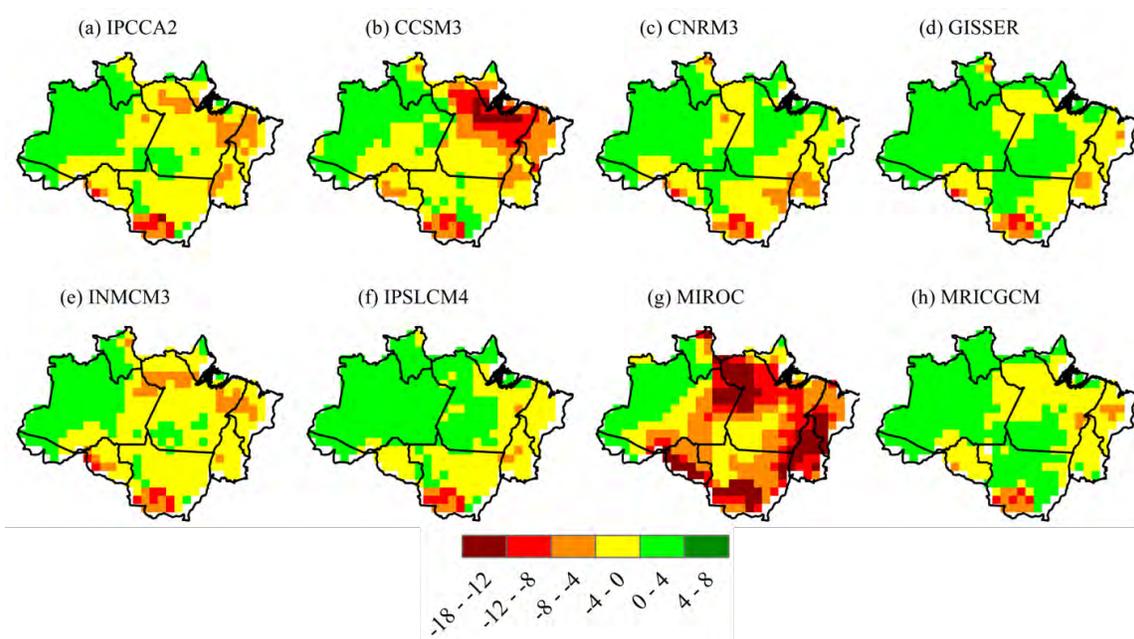


Figura 32. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2020: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).

O efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 não foi suficiente para atenuar os efeitos das condições climáticas futuras na biomassa viva acima do solo, com destaque para as regiões sudoeste do estado do Mato Grosso e leste do estado do Maranhão (Figura 33). Por outro lado, houve diminuição de apenas 25% da área com biomassa viva acima do solo maior que 22 kgC.m^{-2} quando comparamos os resultados da simulação do clima médio à simulação controle.

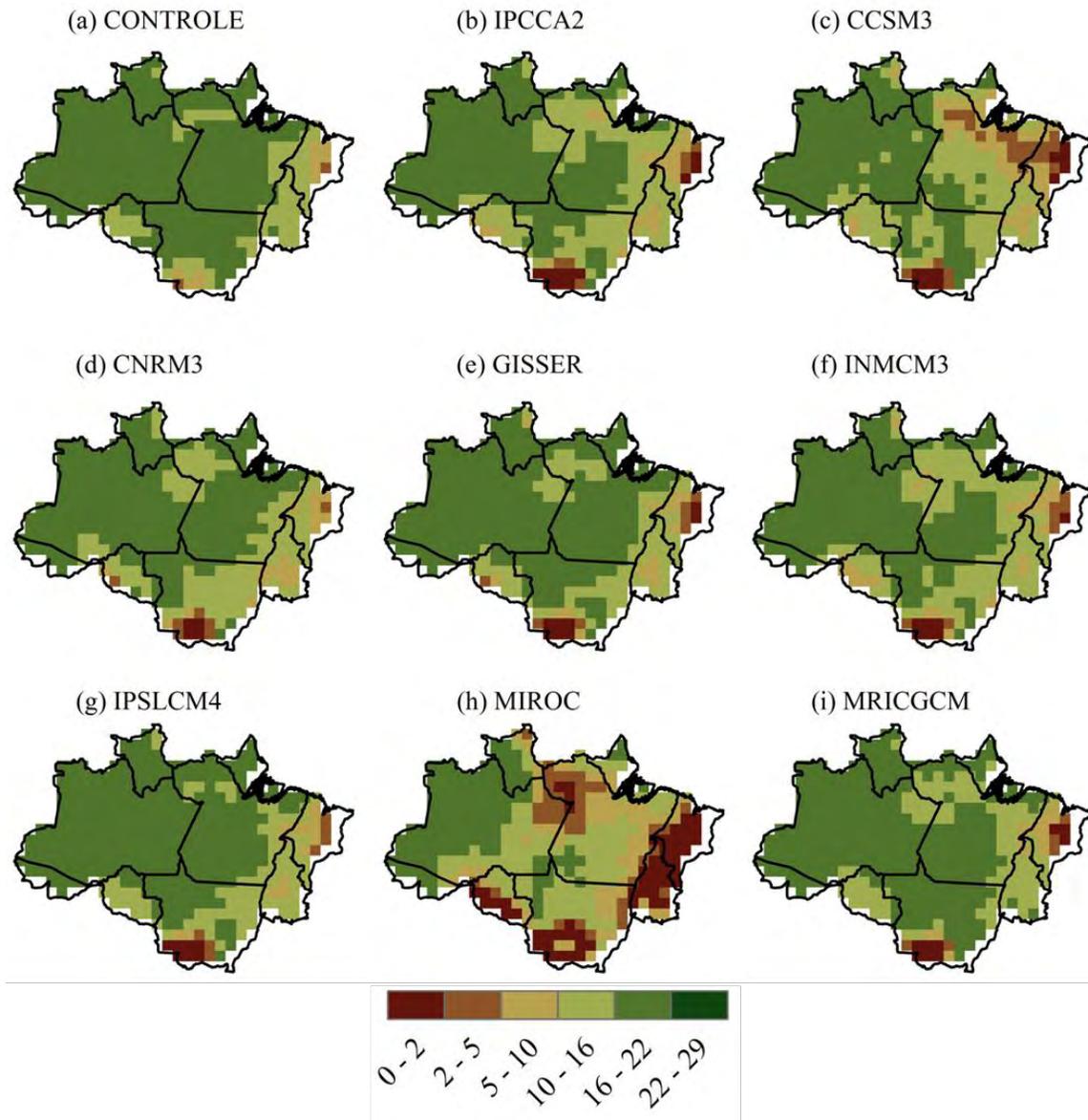


Figura 33. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

As anomalias médias de biomassa viva acima do solo variaram entre $-0,1 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-0,5\%$ para os cenários climáticos propostos pelos modelos IPSLCM4 e GISSER e $-5,7 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-32,1\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima

médio, a anomalia média de biomassa viva acima do solo foi de $-1,2 \text{ kgC.m}^{-2}$, equivalente a uma redução de $-6,7\%$, quando comparada à simulação controle (Tabela 9). A diferença entre a simulação considerando apenas o efeito radiativo do CO_2 e a simulação considerando os efeitos radiativo e fisiológico de CO_2 foi de $-9,4\%$, valor bem próximo do usado para quantificar o efeito fisiológico da concentração de CO_2 na assimilação de carbono do ecossistema natural para o ano de 2020, que foi de $10,8\%$. A diferença de $1,4\%$ deve-se ao fato de o modelo não ser linear.

Tabela 9. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m^{-2})	% de redução
Clima Médio	17,9	-1,2	-6,7
CCSM3	17,9	-2,4	-13,3
CNRM3	17,9	-0,6	-3,1
GISSER	17,9	-0,1	-0,5
INMCM3	17,9	-1,2	-6,7
IPSLCM4	17,9	-0,1	-0,5
MIROC	17,9	-5,7	-32,1
MRICGCM	17,9	-0,2	-1,4

4.4.1.3. Efeitos climáticos das mudanças no uso do solo

As anomalias da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando apenas os cenários de desmatamento proposto por Soares-Filho *et al.* (2006), estão representadas na Figuras 34. Observa-se que, as anomalias da biomassa viva acima do solo apresentaram valores muito próximos para os diferentes cenários de desmatamento avaliados, uma vez que para o ano de 2020, o cenário “GOV” difere pouco do cenário “BAU”.

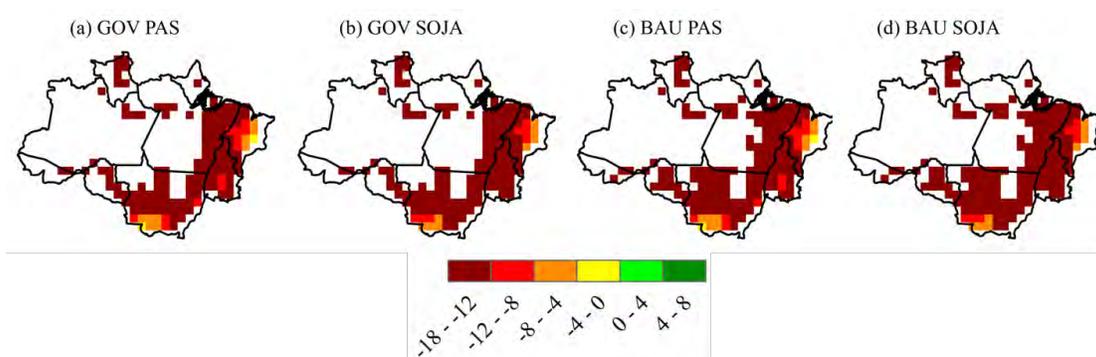


Figura 34. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2020: GOV PAS (a), GOV SOJA (b), BAU PAS (c) e BAU SOJA.

A distribuição espacial da biomassa viva acima do solo quando considerados os cenários de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) está ilustrada na Figura 35. Pode-se perceber pela Figura 35 que os efeitos do desmatamento na biomassa viva acima do solo foram mais expressivos quando as células desmatadas foram substituídas pela soja, pois, a pastagem possui valores mais altos de biomassa viva acima do solo quando comparada à cultura da soja.

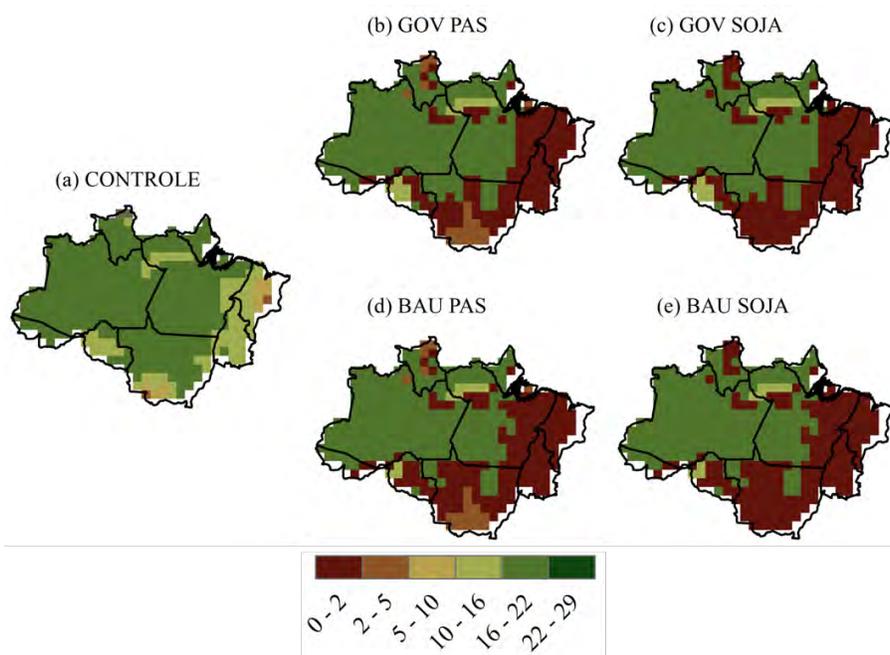


Figura 35. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2020: controle (a), GOV PAS (b), GOV SOJA (c), BAU PAS (d) e BAU SOJA (e).

As anomalias médias de biomassa viva acima do solo variaram de $-5,1 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-28,6\%$ para o cenário de uso do solo “GOV”, quando as células desmatadas foram substituídas pela pastagem a $-6,7 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-37,2\%$ para o cenário de uso do solo “BAU”, quando as células desmatadas foram substituídas pela soja (Tabela 10). O efeito climático do uso do solo foi maior quando as células desmatadas foram substituídas pela soja em todos os cenários de uso do solo avaliados para o ano de 2020, conforme Tabela 10.

Tabela 10. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário futuro de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006), “BAU” e “GOV”, nos quais as células desmatadas foram substituídas pela pastagem e pela soja para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m^{-2})	% de redução
GOV_PAS	17,9	-5,1	-28,6
GOV_SOY	17,9	-5,7	-31,9
BAU_PAS	17,9	-6,0	-33,6
BAU_SOY	17,9	-6,7	-37,2

4.4.1.4. Efeito radiativo e fisiológico da elevação de CO_2 e das mudanças no uso do solo

Nas Figuras 36 a 39, encontram-se representadas as anomalias da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), obtidas considerando as condições climáticas futuras, o efeito fisiológico do CO_2 e os cenários de desmatamento proposto por Soares-Filho *et al.* (2006).

Quando combinados todos os cenários futuros, observa-se incremento na biomassa viva acima do solo na amazônia ocidental, com destaque para o estado do Amazonas e para o leste do Pará. Já para a parte oriental da Amazônia, área sujeita a novos desmatamentos, devido à proximidade da fronteira agrícola, os efeitos negativos das condições climáticas futuras e do desmatamento se somam, levando a uma forte degradação da floresta (Figuras 36 a 39). De

maneira geral, as maiores quedas ocorrem para o cenário de desmatamento mais pessimista, “BAU”, e quando a área desmatada é substituída pela soja.

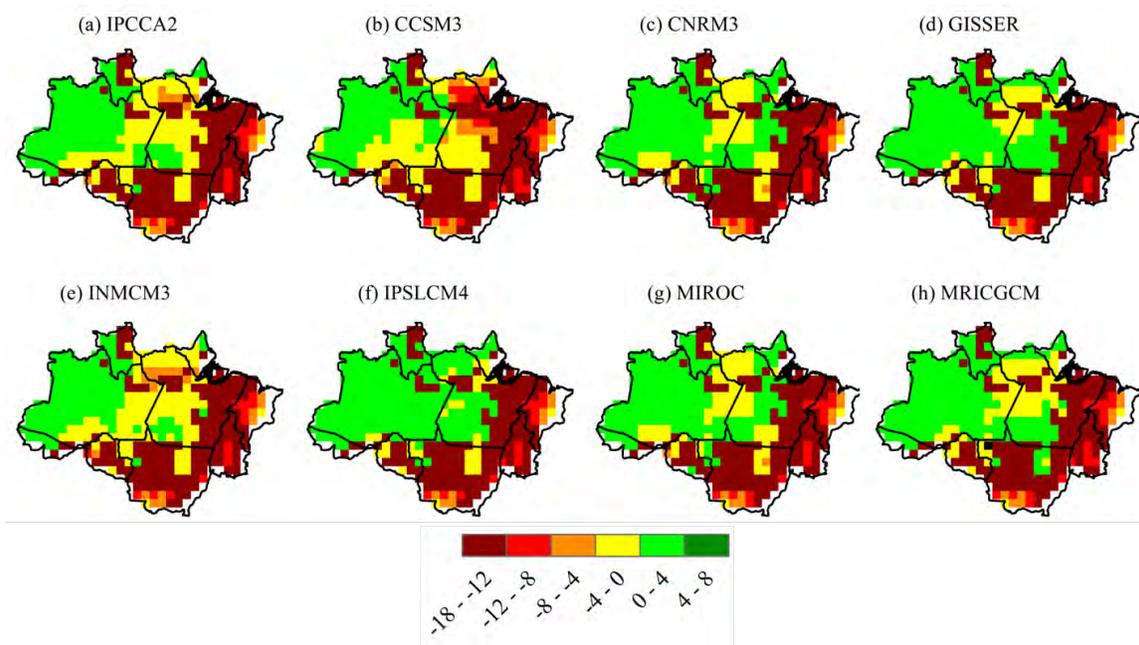


Figura 36. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).

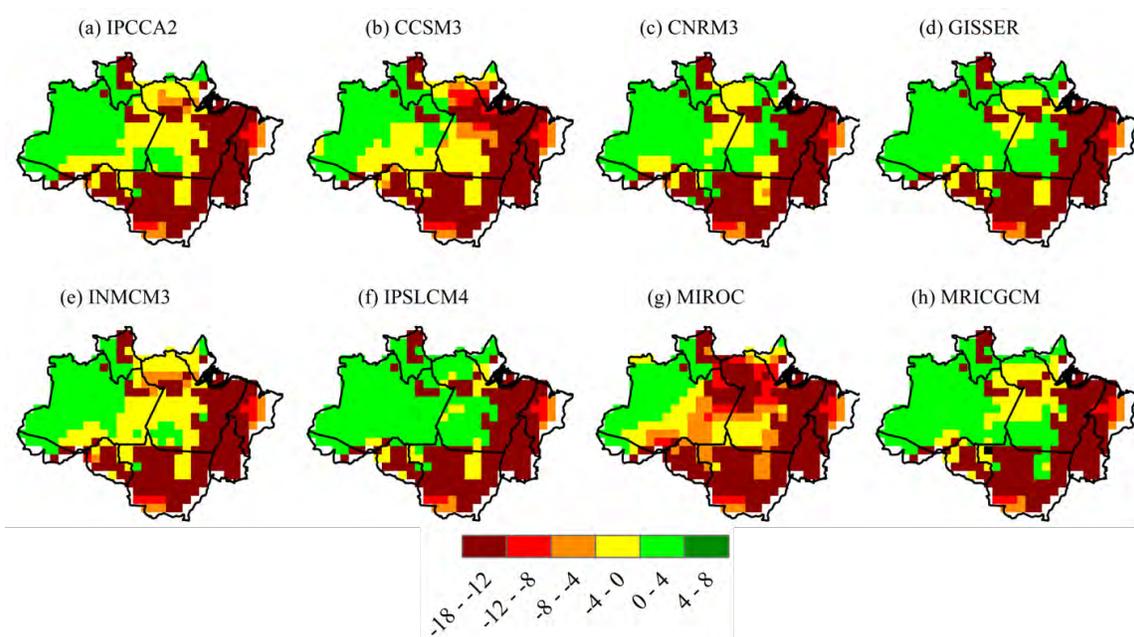


Figura 37. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h)

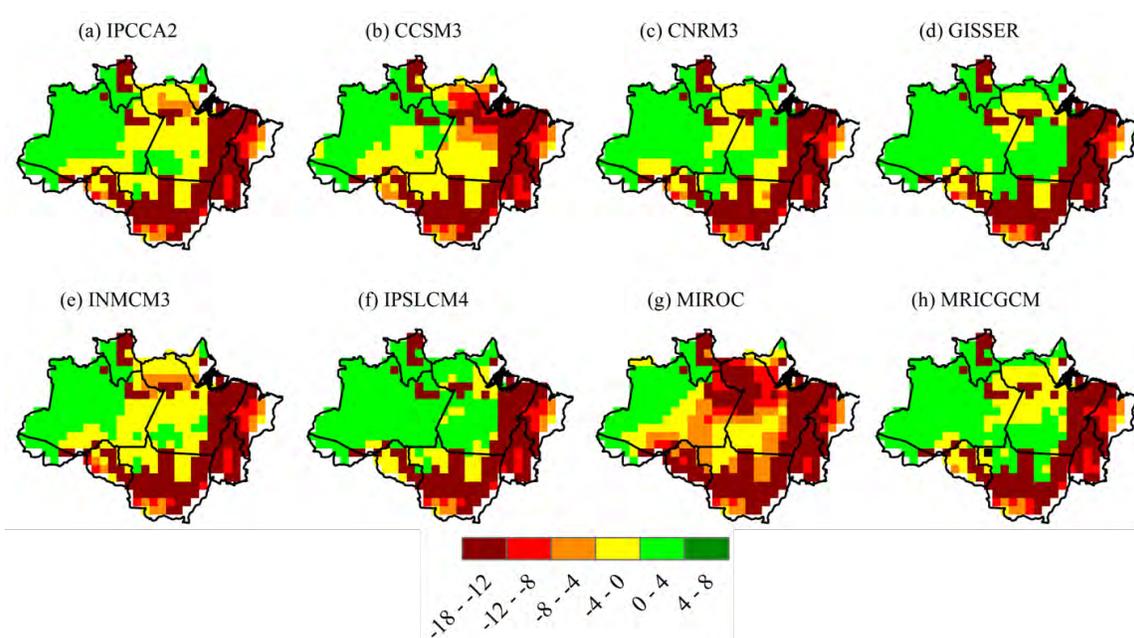


Figura 38. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).

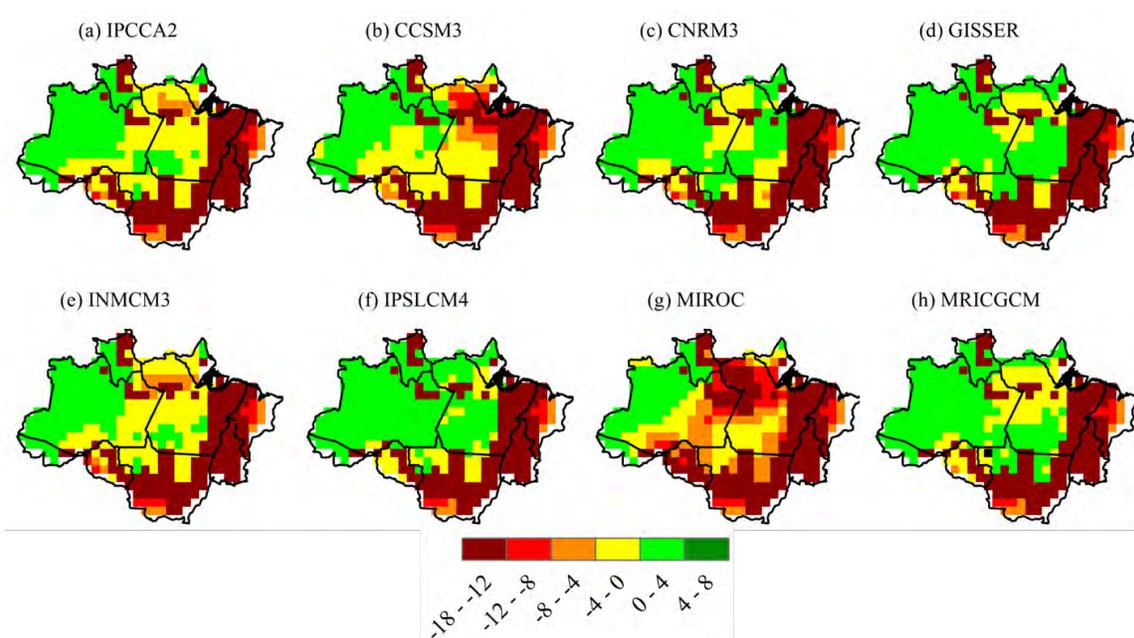


Figura 39. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).

As anomalias médias de biomassa viva acima do solo, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO_2 e o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020, variaram entre $-5,3 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-29,9\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo IPSLCM4 e $-8,3 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-46,3\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de biomassa viva acima do solo foi de $-6,0 \text{ kgC.m}^{-2}$, equivalente a uma redução de $-33,4\%$, quando comparada à simulação controle (Tabela 11).

Tabela 11. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m^{-2})	% de redução
Clima Médio	17,9	-6,0	-33,4
CCSM3	17,9	-6,6	-36,8
CNRM3	17,9	-5,7	-31,7
GISSER	17,9	-5,4	-30,3
INMCM3	17,9	-6,1	-34,3
IPSLCM4	17,9	-5,3	-29,9
MIROC	17,9	-8,3	-46,3
MRICGCM	17,9	-5,6	-31,1

A Figura 40 ilustra a distribuição espacial da biomassa viva acima do solo ao longo da área de estudo, considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020.

Para a região não desmatada da Amazônia Legal, a biomassa viva acima do solo simulada em todos os cenários continuam apresentando valores altos. O contrário pode ser observado para o estado do Pará e no sul do estado de Rondônia (Figura 40).

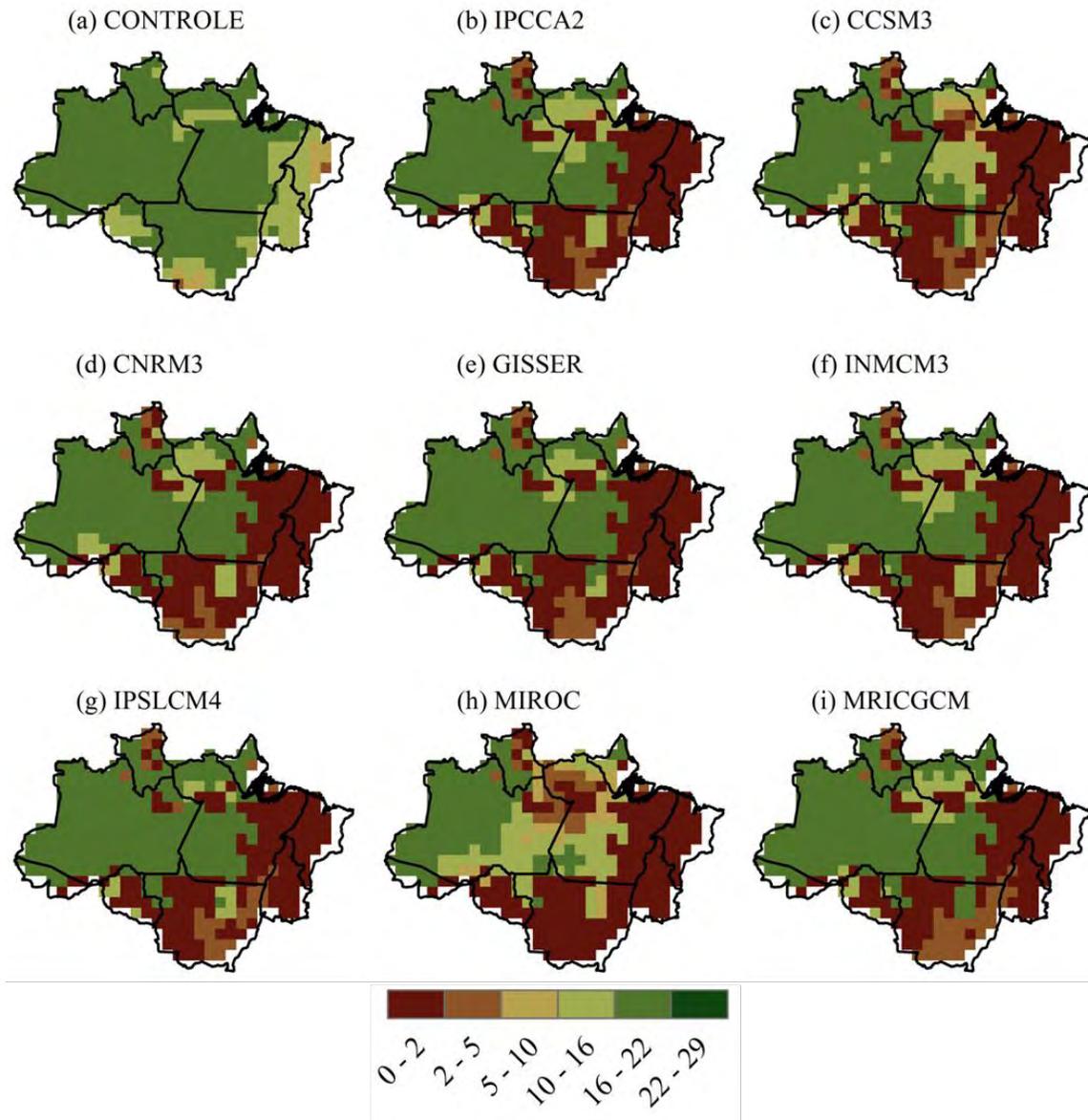


Figura 40. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

As anomalias médias de biomassa viva acima do solo, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO_2 e o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020, variaram entre $-6,0 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-33,8\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo IPSLCM4 e $-8,8 \text{ kgC.m}^{-2}$, que

equivale a uma redução de -49,2% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de biomassa viva acima do solo foi de -6,6 kgC.m⁻², equivalente a uma redução de -37,1%, quando comparada à simulação controle (Tabela 12).

Tabela 12. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m⁻²), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO₂, o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m ⁻²)	% de redução
Clima Médio	17,9	-6,6	-37,1
CCSM3	17,9	-7,2	-40,4
CNRM3	17,9	-6,4	-35,7
GISSER	17,9	-6,1	-34,1
INMCM3	17,9	-6,8	-37,9
IPSLCM4	17,9	-6,0	-33,8
MIROC	17,9	-8,8	-49,2
MRICGCM	17,9	-6,2	-34,9

Para a região não desmatada da Amazônia Legal, a biomassa viva acima do solo simulada em todos os cenários continua apresentando valores altos. O contrário pode ser observado para a região norte do estado do Pará e para o sul do estado de Rondônia (Figura 41). Já para a região desmatada da Amazônia Legal, são observados valores baixos de biomassa típicos da cultura da soja (Figura 41).

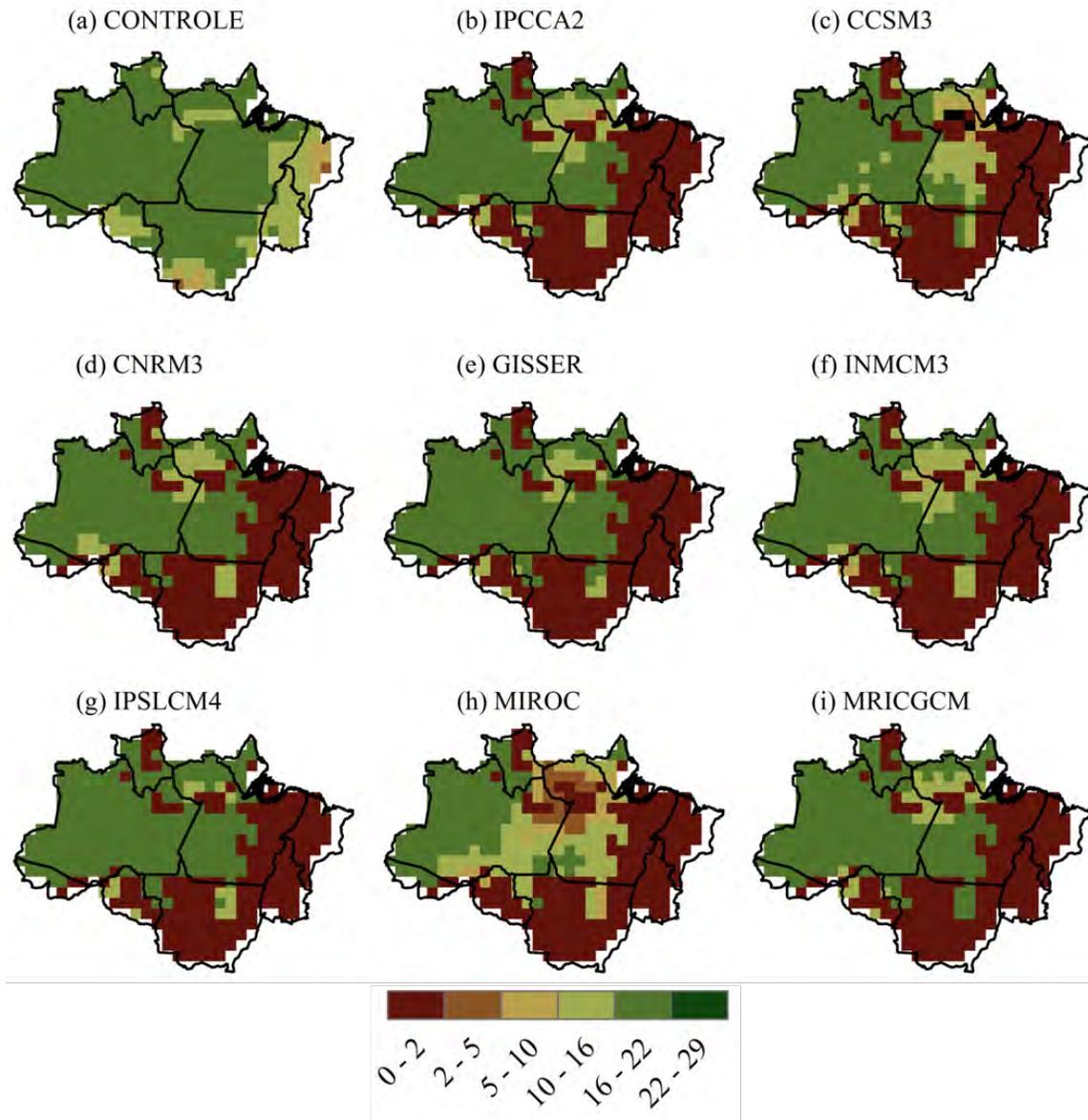


Figura 41. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

As anomalias médias de biomassa viva acima do solo, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO_2 e o cenário de desmatamento “GOV” no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020, variaram entre $-4,5 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de -25% para o cenário climático proposto pelo modelo IPSLCM4 e $-7,7 \text{ kgC.m}^{-2}$, que

equivale a uma redução de -43,1% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de biomassa viva acima do solo foi de -5,2 kgC.m⁻², equivalente a uma redução de -29,1%, quando comparada à simulação controle (Tabela 13).

Tabela 13. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m⁻²), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO₂, o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m ⁻²)	% de redução
Clima Médio	17,9	-5,2	-29,1
CCSM3	17,9	-5,9	-33,0
CNRM3	17,9	-4,8	-27,1
GISSER	17,9	-4,6	-25,4
INMCM3	17,9	-5,3	-29,9
IPSLCM4	17,9	-4,5	-25,0
MIROC	17,9	-7,7	-43,1
MRICGCM	17,9	-4,7	-26,3

Assim como os demais cenários avaliados, quando se avaliaram todos os efeitos conjuntamente, a biomassa viva acima do solo simulada para a região não desmatada da Amazônia Legal continua apresentando valores altos. O contrário pode ser observado para a região norte do estado do Pará e o sul do estado de Rondônia (Figura 42). Já para a região desmatada da Amazônia Legal, os valores simulados de biomassa quando a área desmatada é ocupada pela pastagem são maiores que os simulados para a cultura da soja, como pode ser visto nas Figuras 40 e 42, pois a biomassa da pastagem é maior que a biomassa da soja.

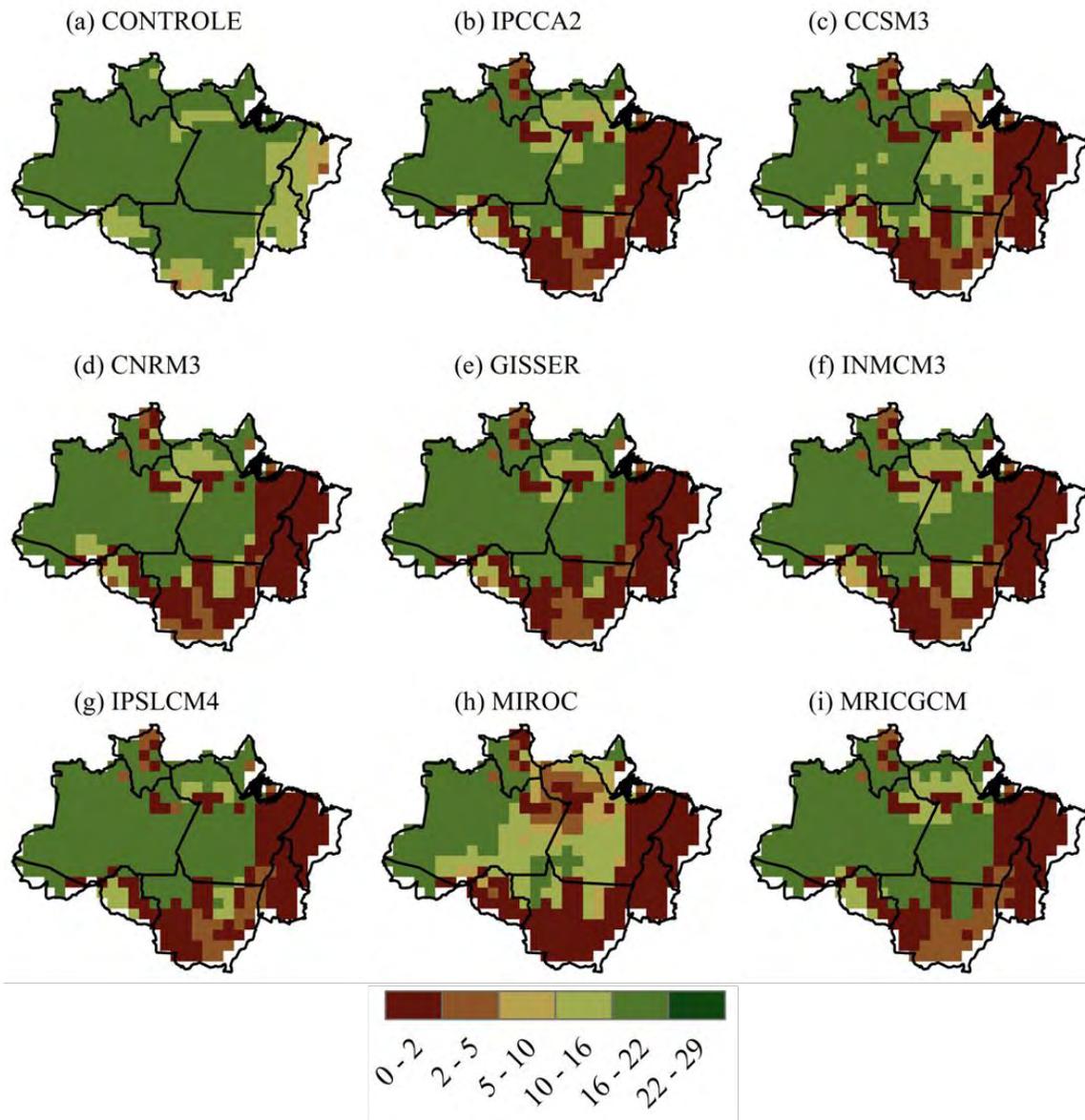


Figura 42. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

As anomalias médias de biomassa viva acima do solo, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO_2 e o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020, variaram entre $-5,1 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-28,6\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo IPSLCM4 e $-8,2 \text{ kgC.m}^{-2}$, que

equivale a uma redução de -45,7% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de biomassa viva acima do solo foi de -5,8 kgC.m⁻², equivalente a uma redução de -32,4%, quando comparada à simulação controle (Tabela 14).

Tabela 14. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m⁻²), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO₂, o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m ⁻²)	% de redução
Clima Médio	17,9	-5,8	-32,4
CCSM3	17,9	-6,5	-36,3
CNRM3	17,9	-5,5	-30,6
GISSER	17,9	-5,2	-28,8
INMCM3	17,9	-5,9	-33,1
IPSLCM4	17,9	-5,1	-28,6
MIROC	17,9	-8,2	-45,7
MRICGCM	17,9	-5,3	-29,7

Assim como os demais cenários avaliados, quando se avaliaram todos os efeitos conjuntamente, a biomassa viva acima do solo simulada para a região não desmatada da Amazônia Legal continua apresentando valores altos. O contrário pode ser observado para a região norte do estado do Pará e o sul do estado de Rondônia (Figura 43). As diferenças encontradas nessas regiões devem-se às condições climáticas futuras. Já para região desmatada da Amazônia Legal, na qual as células desmatadas foram substituídas pela soja, os valores simulados são muito baixos (Figura 43).

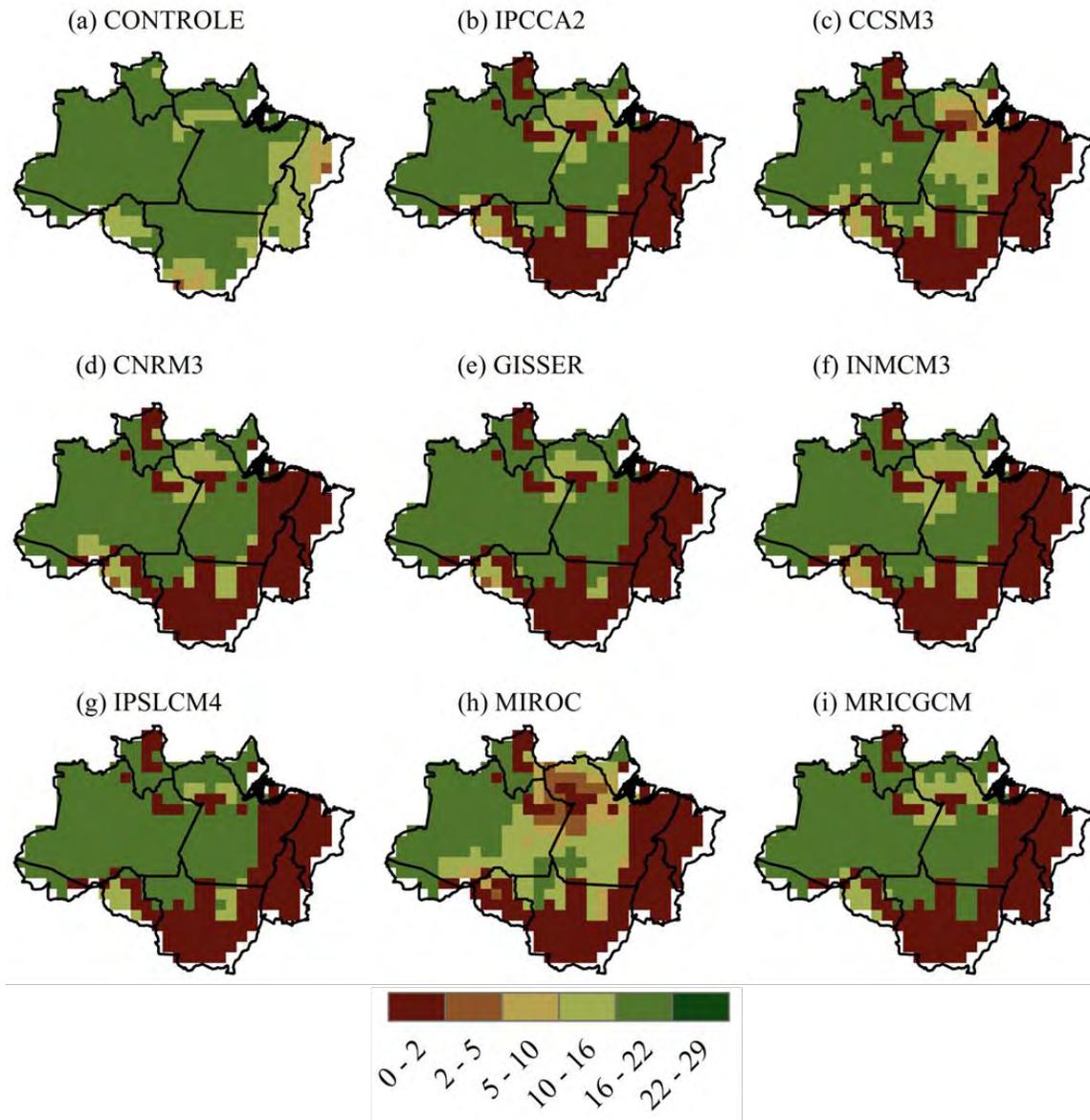


Figura 43. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

4.4.1.5. Síntese

A Tabela 15 sintetiza os principais valores dos efeitos dos cenários futuros no ecossistema natural para o ano de 2020. Reduções na biomassa viva acima do solo, quando

considerados os efeitos radiativo e fisiológico da concentração de CO₂ foram de -6,7%. No entanto, nos cenários que consideraram o efeito climático da mudança no uso do solo indicam reduções de até -37,2% (Tabela 15).

Tabela 15. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m⁻²), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²) e % de redução para cada cenário testado para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m ⁻²)	% de redução
IPCC A2*	17,9	-2,9	-16,1
IPCC A2+CO ₂	17,9	-1,2	-6,7
GOV_PAS	17,9	-5,1	-28,6
GOV_SOY	17,9	-5,7	-31,9
BAU_PAS	17,9	-6,0	-33,6
BAU_SOY	17,9	-6,7	-37,2
IPCC A2+CO ₂ +GOV_PAS	17,9	-5,2	-29,1
IPCC A2+CO ₂ +GOV_SOJ	17,9	-5,8	-32,4
IPCC A2+CO ₂ +BAU_PAS	17,9	-6,0	-33,6
IPCC A2+CO ₂ +BAU_SOJ	17,9	-6,6	-37,1

* O cenário IPCC A2 refere-se ao cenário de clima médio

4.4.2. Efeitos dos cenários futuros na produtividade da pastagem para o ano de 2020

4.4.2.1. Efeito radiativo da elevação do CO₂ (aquecimento global)

A Figura 44 ilustra o efeito radiativo da elevação da concentração de CO₂ na produtividade da pastagem. Em todos os modelos avaliados, a produtividade da pastagem continua no patamar de 15.000 a 20.000 (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹), exceto para os estados do Tocantins e do Maranhão, que apresentam uma queda na produtividade em resposta às condições climáticas futuras. Isso ocorre porque a pastagem considerada na simulação é uma gramínea tropical do tipo C4, cujos valores ótimos de temperatura situam-se na faixa de 30 a 35 °C. Atualmente, a temperatura média da Amazônia encontra-se em torno de 25 °C, ou seja, bem abaixo da temperatura ótima da pastagem. A queda na produtividade apresentada nos estados do

Tocantins e do Maranhão deve-se, principalmente, à diminuição na precipitação nessa região projetada pelos modelos climáticos.

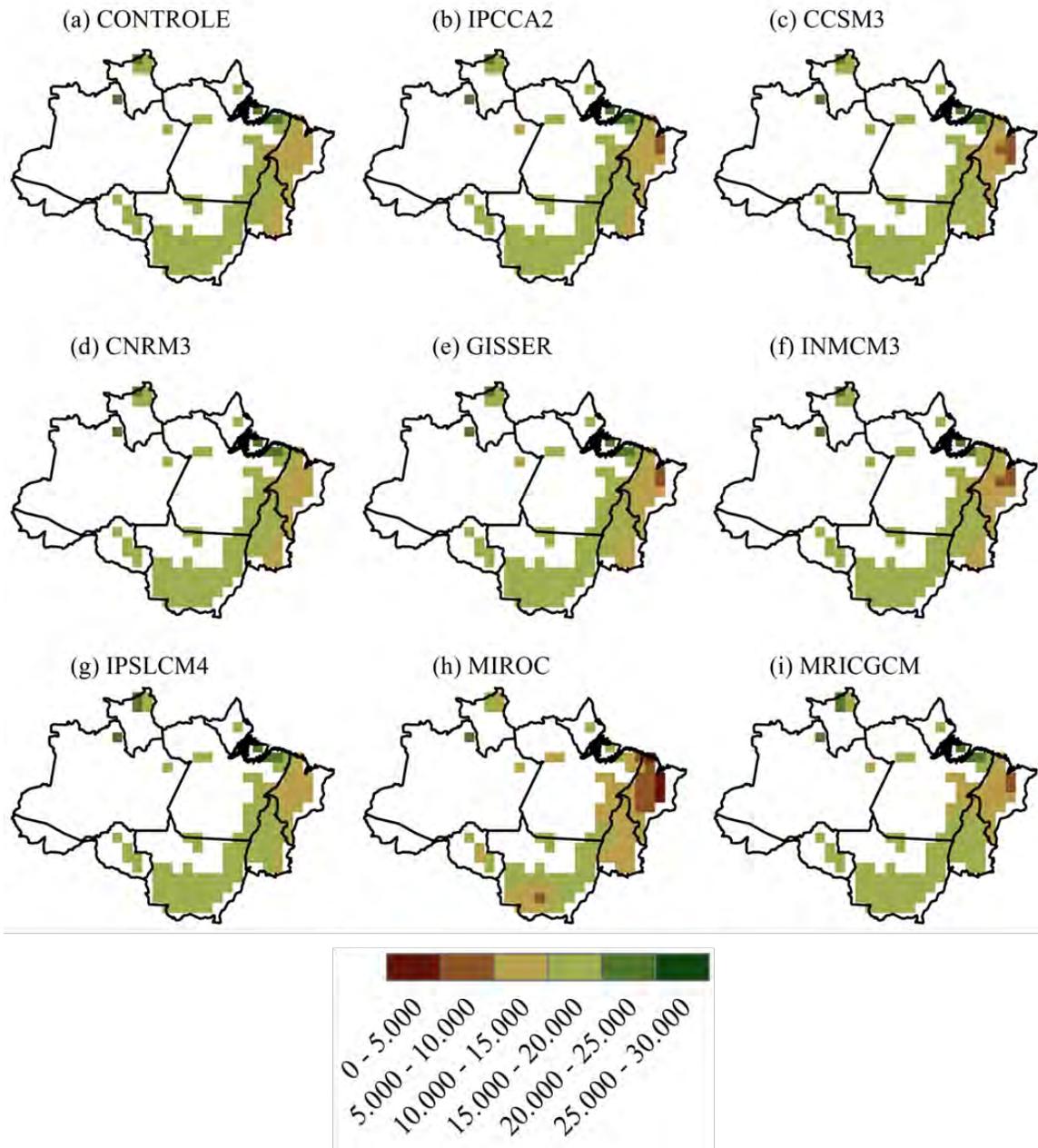


Figura 44. Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

Anomalias médias de produtividade da pastagem variaram entre 267,7 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, que equivale a um incremento de 1,6% para o cenário climático proposto pelo modelo IPSLCM4 e -3.075,3 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, que equivale a uma redução de -18,9% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da pastagem foi de -187,7 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, equivalente a uma redução de -1,2%, quando comparada à simulação controle (Tabela 16).

Tabela 16. Produtividade média para o cenário controle (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹), anomalias de produtividade (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	Anomalias (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	% de redução
Clima Médio	16.245,4	-187,7	-1,2
CCSM3	16.245,4	-125,1	-0,8
CNRM3	16.245,4	261,6	1,6
GISSER	16.245,4	106,9	0,7
INMCM3	16.245,4	-461,3	-2,8
IPSLCM4	16.245,4	267,7	1,6
MIROC	16.245,4	-3.075,3	-18,9
MRICGCM	16.245,4	188,8	1,2

4.4.2.2. Efeito radiativo (aquecimento global) e fisiológico da elevação de CO₂

Na Figura 45, estão representadas as estimativas da produtividade da pastagem simuladas a partir das anomalias dos modelos climáticos para o cenário A2, considerando o efeito fisiológico do CO₂.

Ao introduzir-se o efeito fisiológico do CO₂ nas simulações, não houve diferenças significativas na estimativa da produtividade da pastagem, pois o fator multiplicativo de 1,74% só foi suficiente para mitigar os efeitos das condições climáticas futuras no estado do Tocantins.

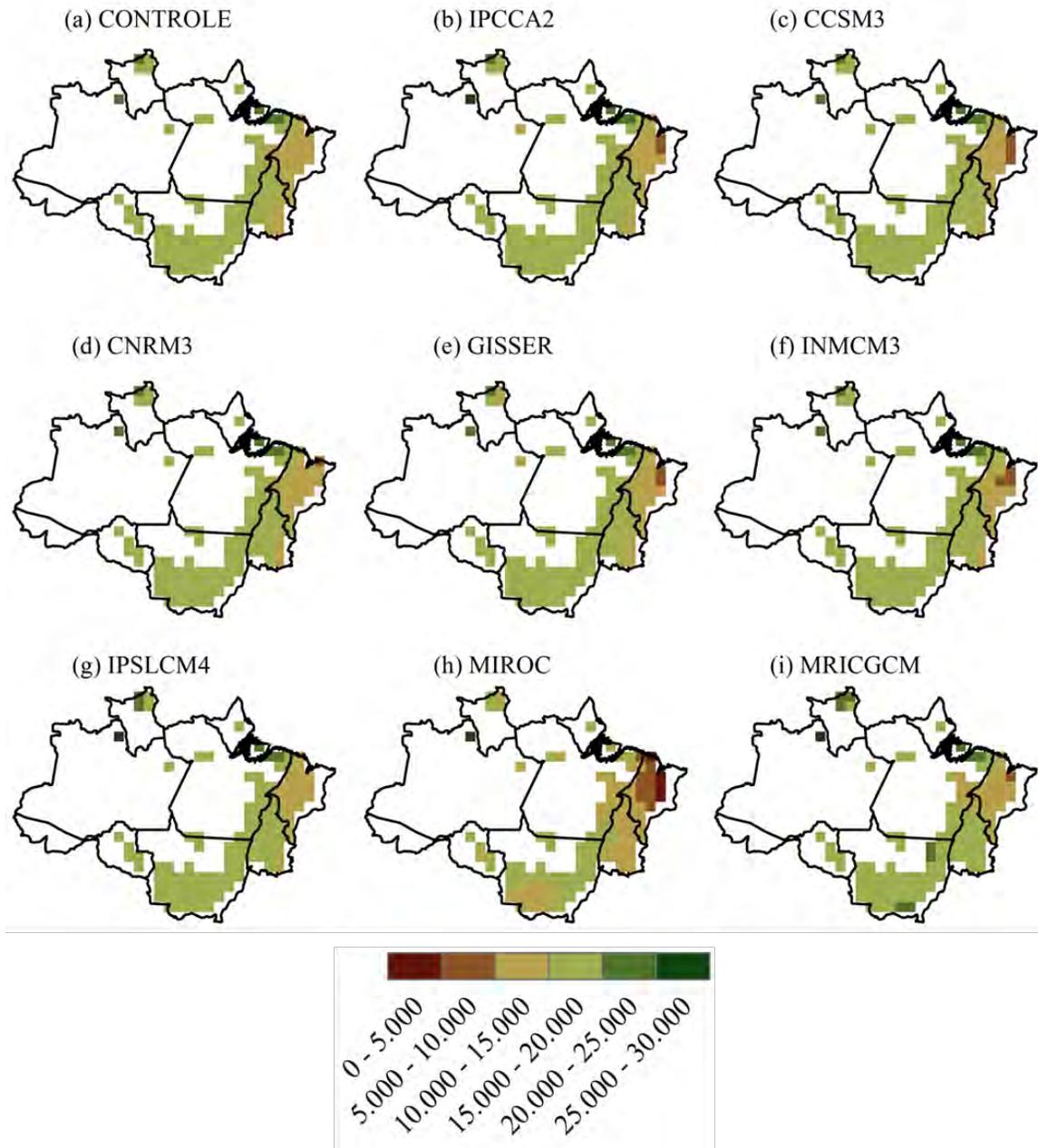


Figura 45. Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

Anomalias médias de produtividade da pastagem variaram entre $692,0 \text{ kgMS} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, que equivale a um incremento de 4,1% para o cenário climático proposto pelo modelo CNRM3 e $-2.711,8 \text{ kgMS} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, que equivale a uma redução de -16,7% para o cenário climático proposto

pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da pastagem foi de 203,1 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, equivalente a um incremento de 1,2%, quando comparada à simulação controle (Tabela 17). A diferença entre a simulação, considerando apenas o efeito radiativo do CO₂ e a simulação, considerando os efeitos radiativo e fisiológico de CO₂ foi de -2,4%, valor bem próximo do usado para quantificar o efeito fisiológico da concentração de CO₂ na assimilação de carbono da pastagem para o ano de 2020, que foi de 1,74%. A diferença de 0,66% deve-se à não linearidade do modelo.

Tabela 17. Produtividade média para o cenário controle (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹), anomalias de produtividade (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO₂ para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	Anomalias (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	% de redução
Clima Médio	16.245,4	203,1	1,2
CCSM3	16.245,4	262,5	1,6
CNRM3	16.245,4	665,6	4,1
GISSER	16.245,4	501,9	3,1
INMCM3	16.245,4	-75,2	-0,5
IPSLCM4	16.245,4	664,7	4,1
MIROC	16.245,4	-2.711,8	-16,7
MRICGCM	16.245,4	587,8	3,6

4.4.2.3. Efeitos climáticos das mudanças no uso do solo

Os efeitos das mudanças no uso do solo na produtividade da pastagem estão representados na Figura 46. Estes resultados mostram que os efeitos climáticos da substituição da floresta pela pastagem são mais acentuados no norte do Maranhão e no leste do Pará, apresentando quedas de até 70% na produtividade.

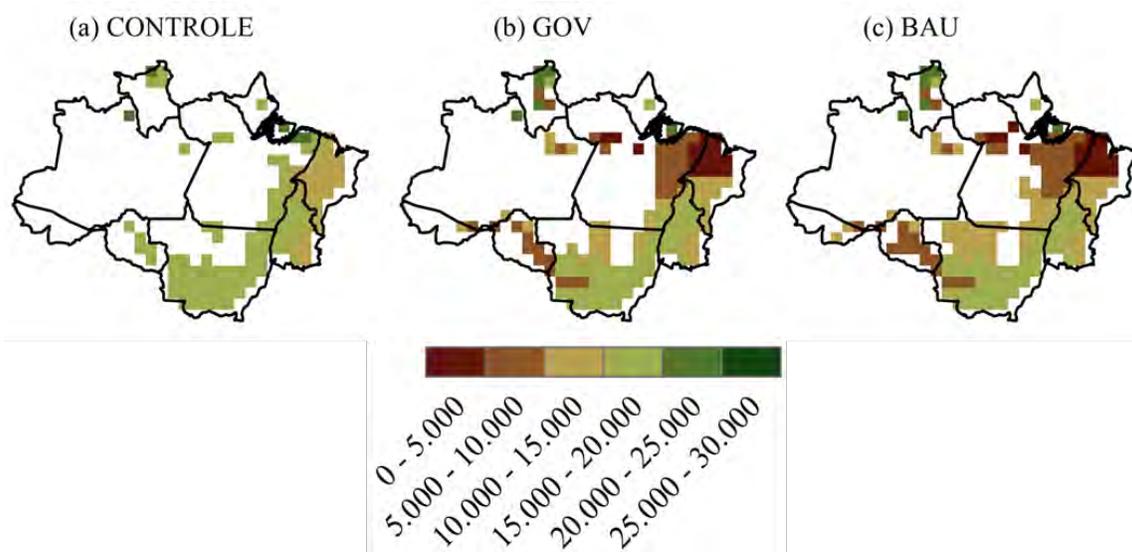


Figura 46. Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2020: controle (a), GOV (b) e BAU (c).

As anomalias médias de produtividade da pastagem variaram de $-4.349,8 \text{ kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-26,8\%$ para o cenário de uso do solo “GOV” a $-4.678,4 \text{ kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-28,8\%$ para o cenário climático de uso do solo “BAU”(Tabela 18). A diferença entre os dois cenários deve-se ao maior número de células desmatadas no cenário de uso do solo “BAU”.

Tabela 18. Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário futuro de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) “BAU” e “GOV”, nos quais as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$)	Anomalias ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$)	% de redução
GOV	16.245,4	-4.349,8	-26,8
BAU	16.245,4	-4.678,4	-28,8

4.4.2.4. Efeito radiativo e fisiológico da elevação de CO₂ e das mudanças no uso do solo

Nas Figuras 47 e 48, encontram-se representadas as produtividades da pastagem, obtidas considerando as condições climáticas futuras, o efeito fisiológico do CO₂ e os cenários de desmatamento propostos por Soares-Filho *et al.* (2006).

O padrão geográfico da produtividade da pastagem foi similar nos dois cenários de desmatamento avaliados. As diferenças ocorrem apenas por causa da extensão da área desmatada, que é maior no cenário “BAU”. Para as condições de clima médio, valores de produtividade altos, maiores que 15.000 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, apresentam distribuição espacial idêntica nos dois cenários de desmatamento. Pode-se notar ainda que a maior parte das áreas desmatadas apenas no cenário “BAU” apresenta valor de produtividade nas classes de 5.000 a 10.000 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹ e de 10.000 a 15.000 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, compreendendo aproximadamente 50% da área desmatada nesse cenário. Já para o cenário “GOV”, 38% da área desmatada apresenta produtividade entre 15.000 e 20.000 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹ (Figuras 47 e 48).

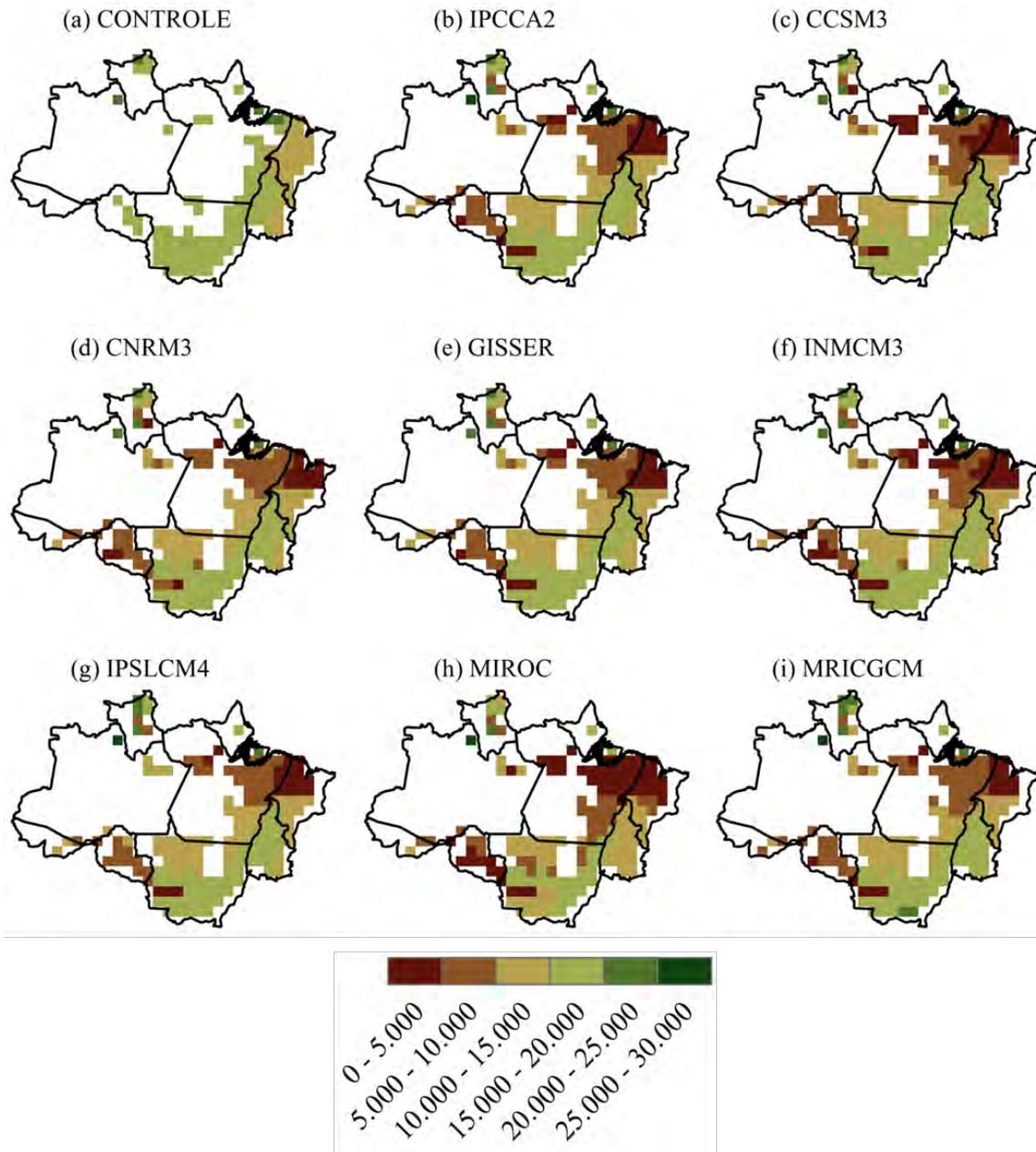


Figura 47. Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

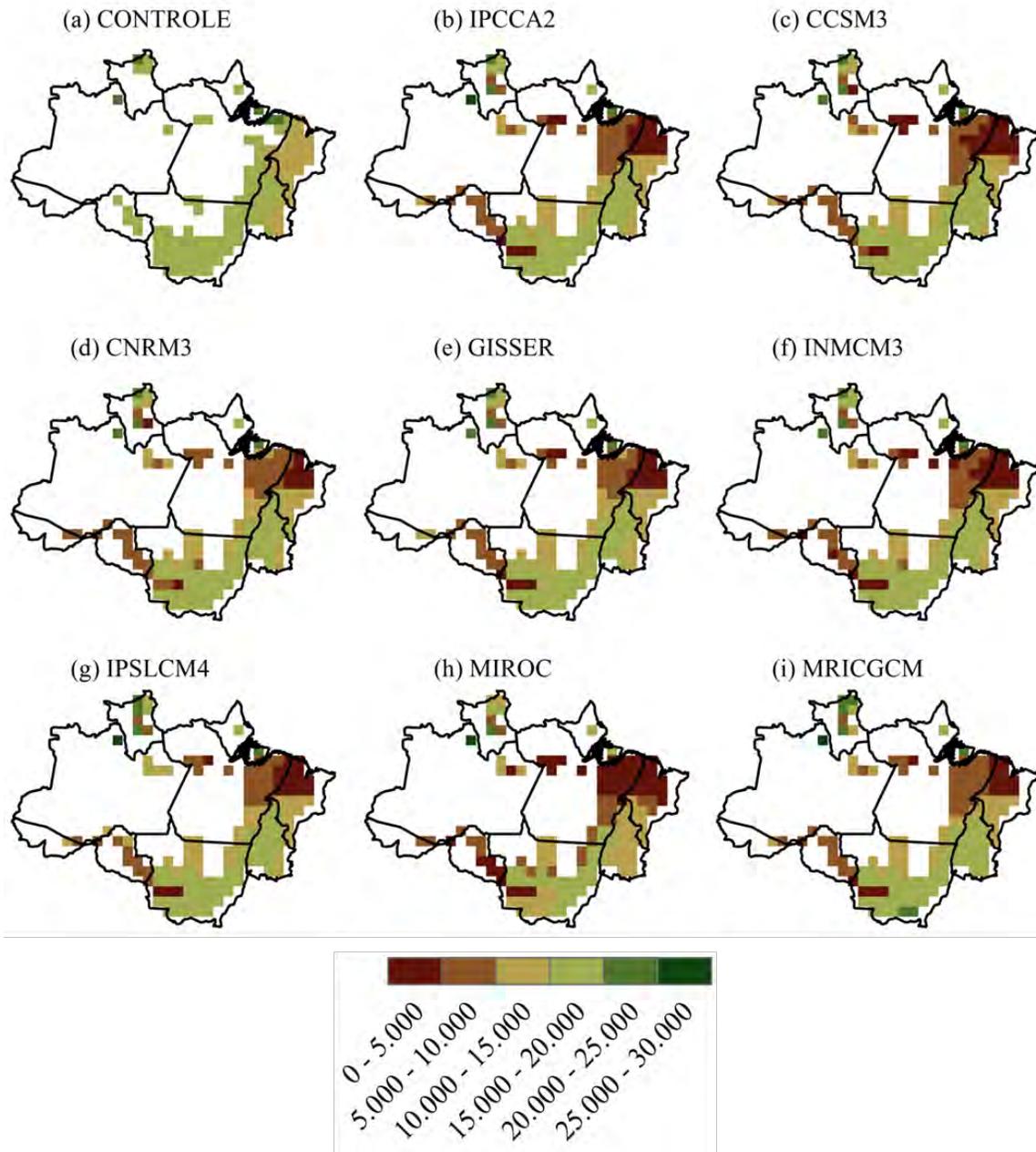


Figura 48. Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

As anomalias médias de produtividade da pastagem, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO_2 e o cenário de desmatamento “BAU” para o ano de 2020 variaram entre $-4.129 \text{ kgMS} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-25,4\%$ para o cenário climático proposto

pelo modelo CNRM3 e $-7.177 \text{ kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, que equivale a uma redução de -44,2% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da pastagem foi de $-4.788 \text{ kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, equivalente a uma redução de -29,5%, quando comparada à simulação controle (Tabela 19).

Tabela 19. Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 e o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$)	Anomalias ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$)	% de redução
Clima Médio	16.245,4	-4.788,0	-29,5
CCSM3	16.245,4	-4.964,2	-30,6
CNRM3	16.245,4	-4.129,4	-25,4
GISSER	16.245,4	-4.461,4	-27,5
INMCM3	16.245,4	-5.108,0	-31,4
IPSLCM4	16.245,4	-4.150,0	-25,5
MIROC	16.245,4	-7.177,0	-44,2
MRICGCM	16.245,4	-4.367,8	-26,9

Anomalias médias de produtividade da pastagem, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO_2 e o cenário de desmatamento “GOV” para o ano de 2020 variaram entre $-3.758,5 \text{ kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, que equivale a uma redução de -23,1% para o cenário climático proposto pelo modelo CNRM3 e $-6.827 \text{ kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, que equivale a uma redução de -42% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da pastagem foi de $-4.412 \text{ kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, equivalente a uma redução de -27,2%, quando comparada à simulação controle (Tabela 20). Reduções menores na produtividade média da pastagem para o cenário

“GOV” foram ocasionadas pelo menor número de células desmatadas para este cenário quando comparado ao cenário “BAU”.

Tabela 20. Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 e o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)	Anomalias ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)	% de redução
Clima Médio	16.245,4	-4.412,4	-27,2
CCSM3	16.245,4	-4.545,9	-28,0
CNRM3	16.245,4	-3.758,5	-23,1
GISSER	16.245,4	-4.120,2	-25,4
INMCM3	16.245,4	-4.686,9	-28,9
IPSLCM4	16.245,4	-3.799,2	-23,4
MIROC	16.245,4	-6.827,0	-42,0
MRICGCM	16.245,4	-3.897,7	-24,0

4.4.2.5. Síntese

A Tabela 21 sintetiza os principais valores dos efeitos dos cenários futuros na produtividade da pastagem para o ano de 2020. Quando considerados os efeitos radiativo e fisiológico da concentração de CO_2 , houve um incremento de 1,2% na produtividade da pastagem. No entanto, os cenários que consideraram o efeito climático da mudança no uso do solo indicaram reduções de até -29,5% (Tabela 21).

Tabela 21. Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário testado para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle	Anomalias ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$)	% de redução
IPCC A2	16.245,4	-187,7	-1,2
IPCC A2+ CO_2	16.245,4	203,1	1,2
GOV	16.245,4	-4.349,8	-26,8
BAU	16.245,4	-4.678,4	-28,8
IPCC A2+ CO_2 +GOV	16.245,4	-4.412,4	-27,2
IPCC A2+ CO_2 +BAU	16.245,4	-4.788,0	-29,5

4.4.3. Efeitos dos cenários futuros na produtividade da soja para o ano de 2020

4.4.3.1. Efeito radiativo da elevação do CO₂ (aquecimento global)

Anomalias médias de produtividade da soja variaram entre -45,8 kg.ha⁻¹, que equivale a uma redução de -1,7% para o cenário climático proposto pelo modelo MRICGCM e -596,2 kg.ha⁻¹, que equivale a uma redução de -22% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da soja foi de -266,4 kg.ha⁻¹, equivalente a uma redução de -9,8%, quando comparada à simulação controle (Tabela 22).

Tabela 22. Produtividade média para o cenário controle (kg.ha⁻¹), anomalias de produtividade (kg.ha⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle (kg.ha ⁻¹)	Anomalias (kg.ha ⁻¹)	% de redução
Clima Médio	2.704,7	-266,4	-9,8
CCSM3	2.704,7	-224,1	-8,3
CNRM3	2.704,7	-377,1	-13,9
GISSER	2.704,7	-191,5	-7,1
INMCM3	2.704,7	-392,1	-14,5
IPSLCM4	2.704,7	-351,1	-13,0
MIROC	2.704,7	-596,2	-22,0
MRICGCM	2.704,7	-45,8	-1,7

A produtividade da soja simulada, considerando apenas os cenários climáticos futuros para o ano de 2020, está representada na Figura 49. Em todos os cenários avaliados houve queda da produtividade, no entanto, valores baixos de produtividade apenas são observados no estado do Maranhão.

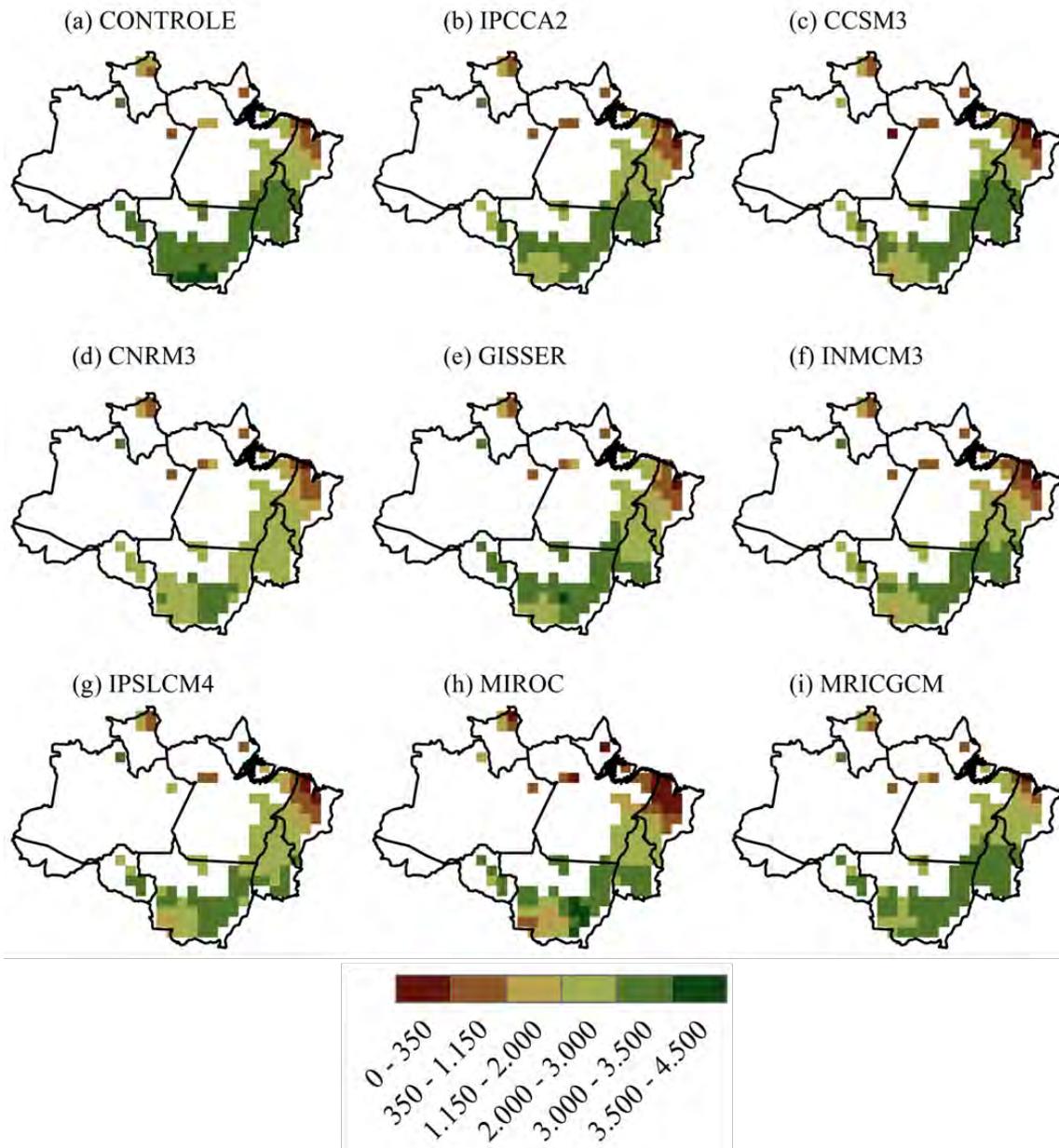


Figura 49. Distribuição espacial da produtividade da soja (kg.ha^{-1}), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

4.4.3.2. Efeito radiativo (aquecimento global) e fisiológico da elevação de CO₂

Anomalias médias de produtividade da soja variaram entre 137,9 kg.ha⁻¹, que equivale a um incremento de 5,1% para o cenário climático proposto pelo modelo MRICGCM a -430,5 kg.ha⁻¹, que equivale a uma redução de -16,7% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da soja foi de -90,3 kg.ha⁻¹, equivalente a uma redução de -3,3%, quando comparada à simulação controle (Tabela 23). A diferença entre a simulação considerando apenas o efeito radiativo do CO₂ e a simulação considerando os efeitos radiativo e fisiológico de CO₂ foi de -6,5%, valor muito alto comparado ao valor usado para quantificar o efeito fisiológico da concentração de CO₂ na assimilação de carbono da soja para o ano de 2020, que foi de 4,3%. Estes resultados indicam que o efeito fisiológico do CO₂ foi mais que suficiente para atenuar os efeitos das condições climáticas futuras na produtividade da soja.

Tabela 23. Produtividade média para o cenário controle (kg.ha⁻¹), anomalias de produtividade (kg.ha⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO₂ para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle (kg.ha ⁻¹)	Anomalias (kg.ha ⁻¹)	% de redução
Clima Médio	2.704,7	-90,3	-3,3
CCSM3	2.704,7	-46,2	-1,7
CNRM3	2.704,7	-208,6	-7,7
GISSER	2.704,7	-10,6	-0,4
INMCM3	2.704,7	-227,0	-8,4
IPSLCM4	2.704,7	-178,5	-6,6
MIROC	2.704,7	-430,5	-15,9
MRICGCM	2.704,7	137,9	5,1

Para a cultura da soja, o efeito fisiológico do CO₂ foi suficiente para atenuar os efeitos das condições climáticas futuras na sua produtividade, exceto para a região sul do estado do Mato Grosso (Figura 50).

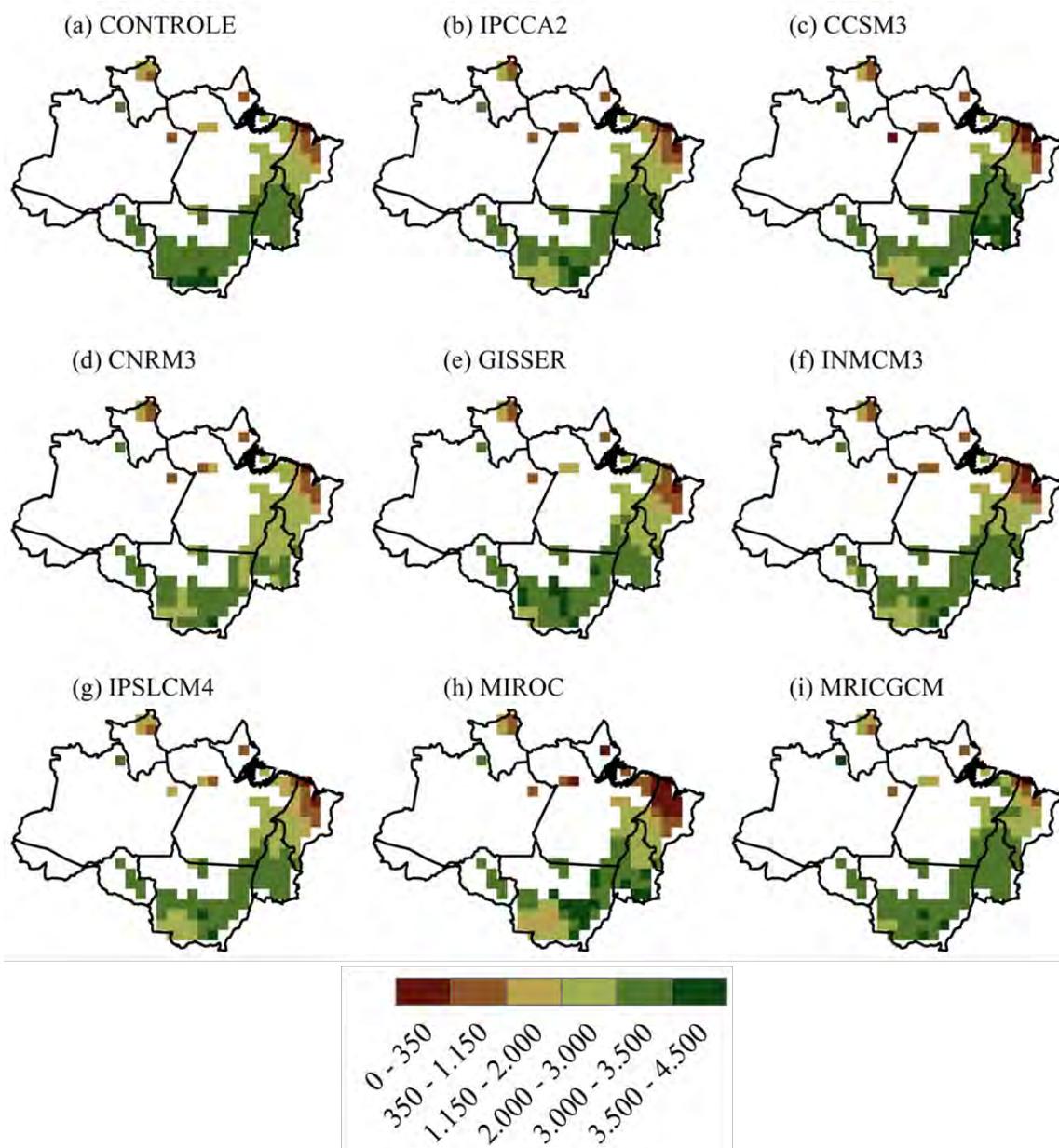


Figura 50. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

4.4.3.3. Efeitos climáticos das mudanças no uso do solo

Anomalias médias de produtividade da soja variaram de $-454,3 \text{ kg.ha}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-16,8\%$ para o cenário de uso do solo “GOV” a -462 kg.ha^{-1} , que equivale a uma redução de $-17,1\%$ para o cenário climático de uso do solo “bau (Tabela 24). A diferença entre os dois cenários justifica-se pelo maior número de células desmatadas no cenário de uso do solo “BAU”.

Tabela 24. Produtividade média para o cenário controle (kg.ha^{-1}), anomalias de produtividade (kg.ha^{-1}) e % de redução para cada cenário futuro de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) “BAU” e “GOV”, nos quais as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle (kg.ha^{-1})	Anomalias (kg.ha^{-1})	% de redução
GOV	2.704,7	-454,3	-16,8
BAU	2.704,7	-462,0	-17,1

O modelo da soja apresentou valores baixos de produtividade apenas para o norte do estado do Maranhão e o nordeste do estado do Pará, quando foram considerados os efeitos das mudanças no uso do solo. Isto justifica pelo fato de essas regiões já apresentarem menores valores de precipitação, os quais são ainda menores quando somados aos efeitos climáticos do desmatamento (Figura 51).

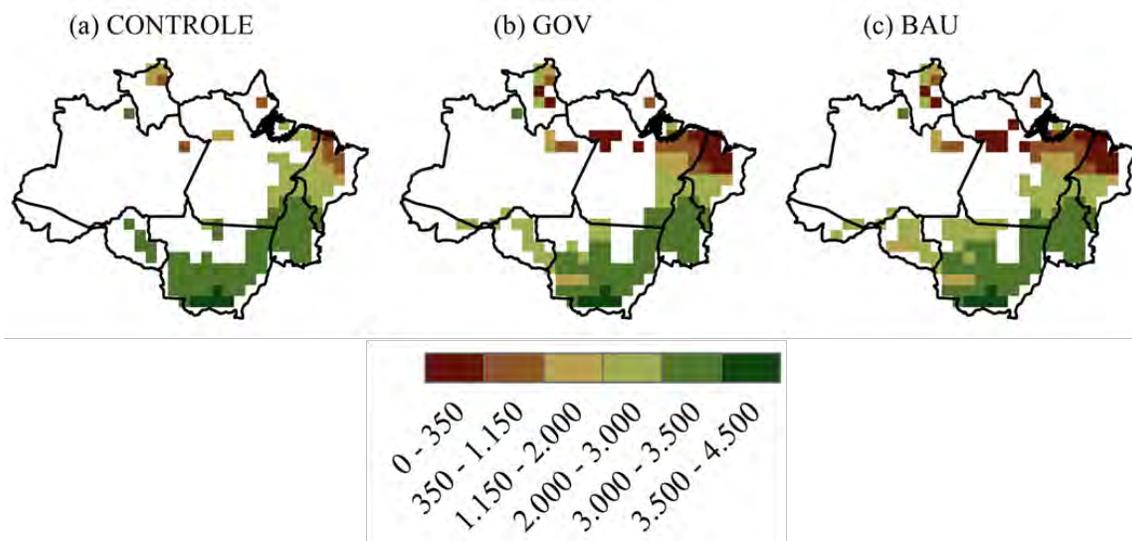


Figura 51. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2020: controle (a), GOV (b) e BAU (c).

4.4.3.4. Efeito radiativo e fisiológico da elevação de CO_2 e das mudanças no uso do solo

As anomalias médias de produtividade da soja, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO_2 e o cenário de desmatamento “BAU” para o ano de 2020, variaram entre $-407,2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-15,1\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo MRICGCM e $-916,8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-33,9\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da pastagem foi de $-578,9 \text{ kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, equivalente a uma redução de $-21,4\%$, quando comparada à simulação controle (Tabela 25).

Tabela 25. Produtividade média para o cenário controle ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 e o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Anomalias ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	% de redução
Clima Médio	2.704,7	-578,9	-21,4
CCSM3	2.704,7	-618,4	-22,9
CNRM3	2.704,7	-623,7	-23,1
GISSER	2.704,7	-489,1	-18,1
INMCM3	2.704,7	-695,6	-25,7
IPSLCM4	2.704,7	-597,6	-22,1
MIROC	2.704,7	-916,8	-33,9
MRICGCM	2.704,7	-407,2	-15,1

Anomalias médias de produtividade da soja, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO_2 e o cenário de desmatamento “GOV” para o ano de 2020, variaram entre $-390,8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-14,4\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo MRICGCM e $-906,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-33,5\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da pastagem foi de $-575,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, equivalente a uma redução de $-21,3\%$, quando comparada à simulação controle (Tabela 26). Reduções menores na produtividade média da pastagem para o cenário “GOV” justificam-se pelo menor número de células desmatadas para este cenário, quando comparado ao cenário “BAU”.

Tabela 26. Produtividade média para o cenário controle ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 e o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Anomalias ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	% de redução
Clima Médio	2.704,7	-575,5	-21,3
CCSM3	2.704,7	-618,4	-22,9
CNRM3	2.704,7	-614,4	-22,7
GISSER	2.704,7	-498,9	-18,4
INMCM3	2.704,7	-689,5	-25,5
IPSLCM4	2.704,7	-602,0	-22,3
MIROC	2.704,7	-906,5	-33,5
MRICGCM	2.704,7	-390,8	-14,4

Nas Figuras 52 e 53 encontram-se representadas as produtividades da soja, obtidas considerando as condições climáticas futuras, o efeito fisiológico do CO_2 e os cenários de desmatamento proposto por Soares-Filho *et al.* (2006).

A produtividade da soja foi muito semelhante nos dois cenários de desmatamento avaliados e, assim como para a pastagem, as diferenças ocorrem apenas por causa da extensão da área desmatada, que é maior no cenário “BAU”. Para as condições de clima médio, a maior parte das áreas desmatadas apenas no cenário “BAU” apresenta valor de produtividade nas classes de 2.000 a 3.000 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e de 3.000 a 3.500 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, compreendendo aproximadamente 60% da área desmatada nesse cenário (Figuras 52 e 53).

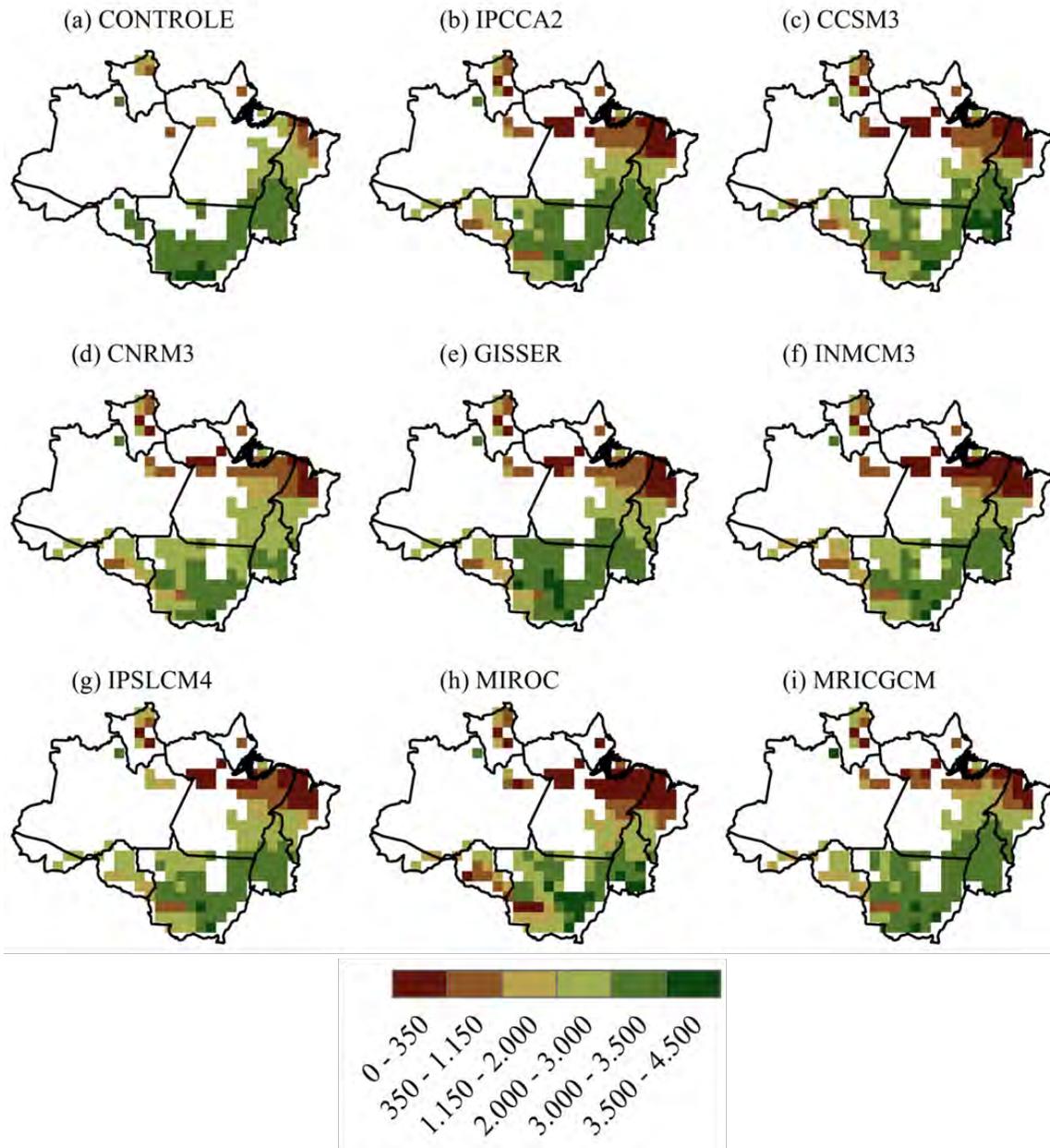


Figura 52. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

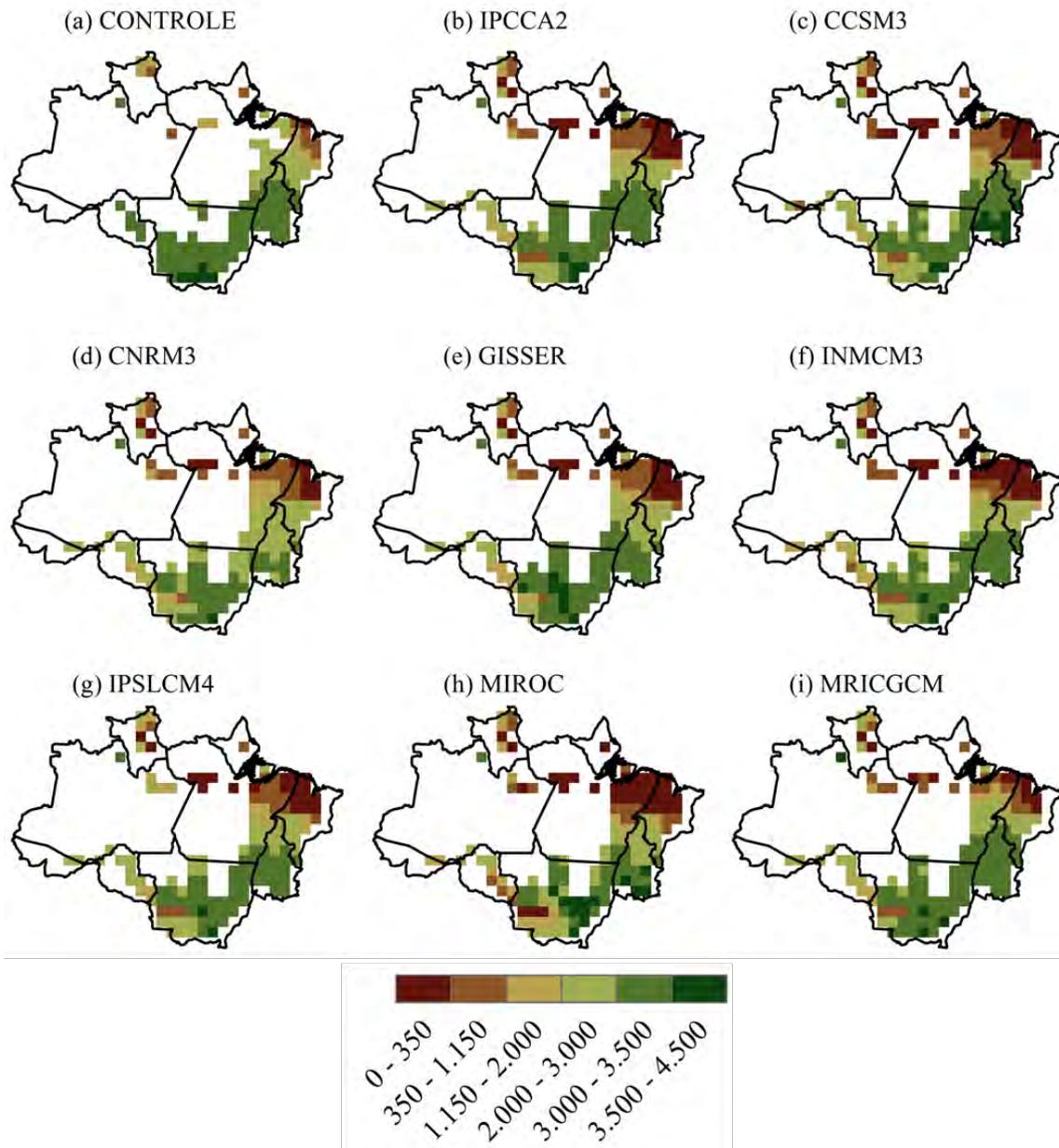


Figura 53. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2020: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

4.4.3.5. Síntese

A Tabela 27 sintetiza os principais valores dos efeitos dos cenários futuros na produtividade da soja para o ano de 2020. Quando considerados os efeitos radiativo e fisiológico da concentração de CO₂, houve uma redução de -3,3% na produtividade da soja. No entanto, os cenários que consideraram o efeito climático da mudança no uso do solo indicaram reduções de até -21,4% (Tabela 27).

Tabela 27. Produtividade média para o cenário controle (kg.ha⁻¹), anomalias de produtividade (kg.ha⁻¹) e % de redução para cada cenário testado para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m ⁻²)	% de redução
IPCC A2	2.704,7	-266,4	-9,8
IPCC A2+CO ₂	2.704,7	-90,3	-3,3
GOV	2.704,7	-454,3	-16,8
BAU	2.704,7	-462,0	-17,1
IPCC A2+CO ₂ +GOV	2.704,7	-575,5	-21,3
IPCC A2+CO ₂ +BAU	2.704,7	-578,9	-21,4

4.4.4. Efeitos dos cenários futuros no ecossistema natural para o ano de 2050

4.4.4.1. Efeito radiativo da elevação do CO₂ (aquecimento global)

Anomalias da biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²), considerando as condições climáticas futuras, estão representadas na Figura 54.

As quedas na biomassa viva acima do solo, já observadas para o ano de 2020, se tornam mais acentuadas em 2050, em todos os modelos do IPCC analisados, principalmente, para a Amazônia oriental, conforme Figura 54. Consequentemente, o número de pixels que apresentaram incremento diminuiu significativamente quando comparado ao ano de 2020. Isto

explica-se pelo fato de todos os modelos simularem um clima mais quente com valor médio de 2,31 °C. O clima mais seco continua sendo projetado pelo modelo MIROC (Tabela 28).

Tabela 28. Anomalias de temperatura (em °C) e precipitação (em mm.mês) simuladas pelos modelos para o período de 2045 a 2065 e fatores ambientais usados no CARLUC

MODELOS	Anomalias de Temp (°C)	fTemp	Anomalias de Prec (mm.mês ⁻¹)	fSW
Clima Médio	2,31	0,976	3,17	0,861
CCSM3	2,43	0,975	6,08	0,849
CNRM3	2,67	0,974	4,44	0,855
GISSER	2,12	0,976	6,68	0,867
INMCM3	2,25	0,975	0,78	0,852
IPSLCM4	2,24	0,977	11,42	0,872
MIROC	2,79	0,972	-5,32	0,851
MRICGCM	1,67	0,977	-1,93	0,879

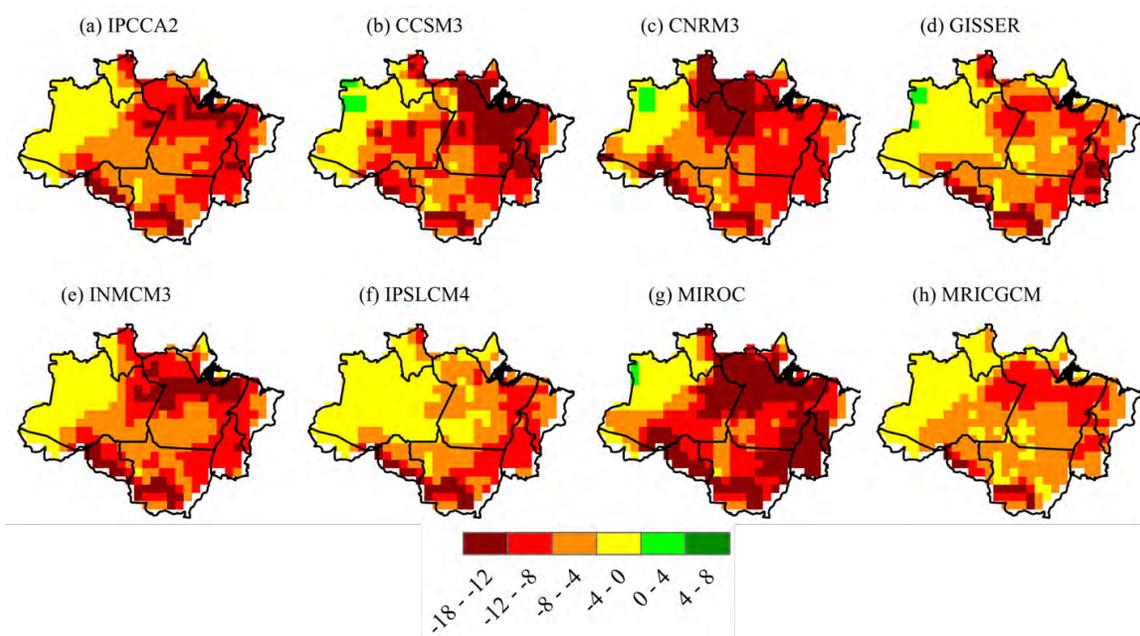


Figura 54. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2050: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).

Somente as regiões norte e sudoeste do estado do Amazonas e o estado do Acre não apresentaram valores menores de biomassa viva acima do solo nas simulações considerando os cenários de clima futuro para o ano de 2050 (Figura 55).

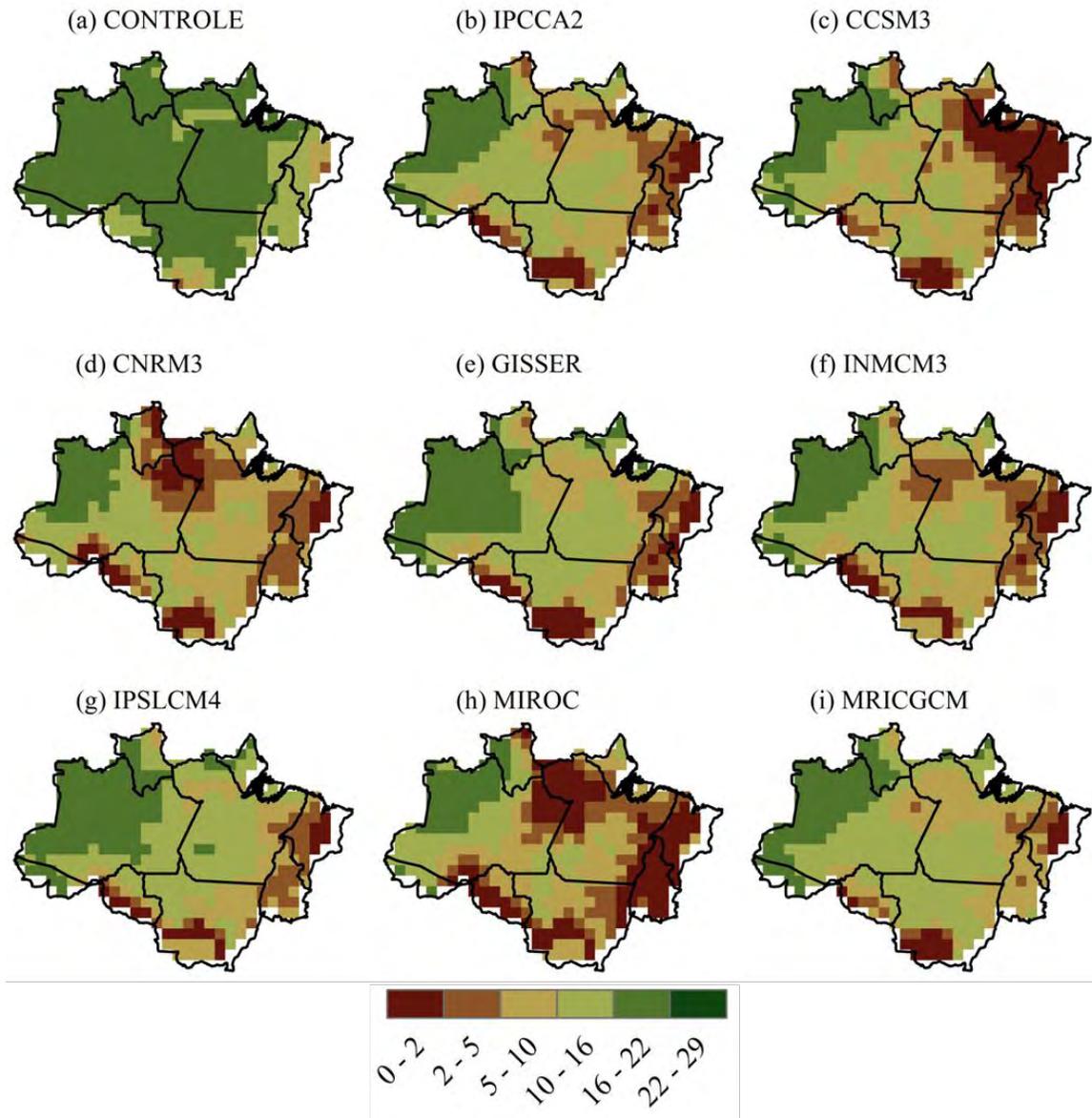


Figura 55. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

Anomalias médias de biomassa viva acima do solo variaram entre $-5,2 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-29,6\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo IPSLCM4 e

-9,9 kgC.m⁻², que equivale a uma redução de -55,6% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de biomassa viva acima do solo foi de -7,0 kgC.m⁻², equivalente a uma redução de -39,1%, quando comparada à simulação controle (Tabela 29).

Tabela 29. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m⁻²), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²) e % de redução para cada cenário climático para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m ⁻²)	% de redução
Clima Médio	17,9	-7,0	-39,1
CCSM3	17,9	-7,9	-44,4
CNRM3	17,9	-8,5	-47,4
GISSER	17,9	-5,6	-31,4
INMCM3	17,9	-7,4	-41,6
IPSLCM4	17,9	-5,2	-29,6
MIROC	17,9	-9,9	-55,6
MRICGCM	17,9	-5,4	-30,3

4.4.4.2. Efeito radiativo (aquecimento global) e fisiológico da elevação de CO₂

As anomalias da biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²), considerando as condições climáticas futuras e o efeito fisiológico do CO₂ estão representadas na Figura 56.

Observa-se que, ao introduzir o efeito fisiológico do aumento da concentração de CO₂ nas simulações, o incremento na biomassa viva acima do solo na região nordeste da Amazônia legal já notado no ano de 2020 ficou mais evidente (Figura 56). Em contrapartida, para as demais regiões, as quedas observadas foram bem maiores que as observadas para o ano de 2020.

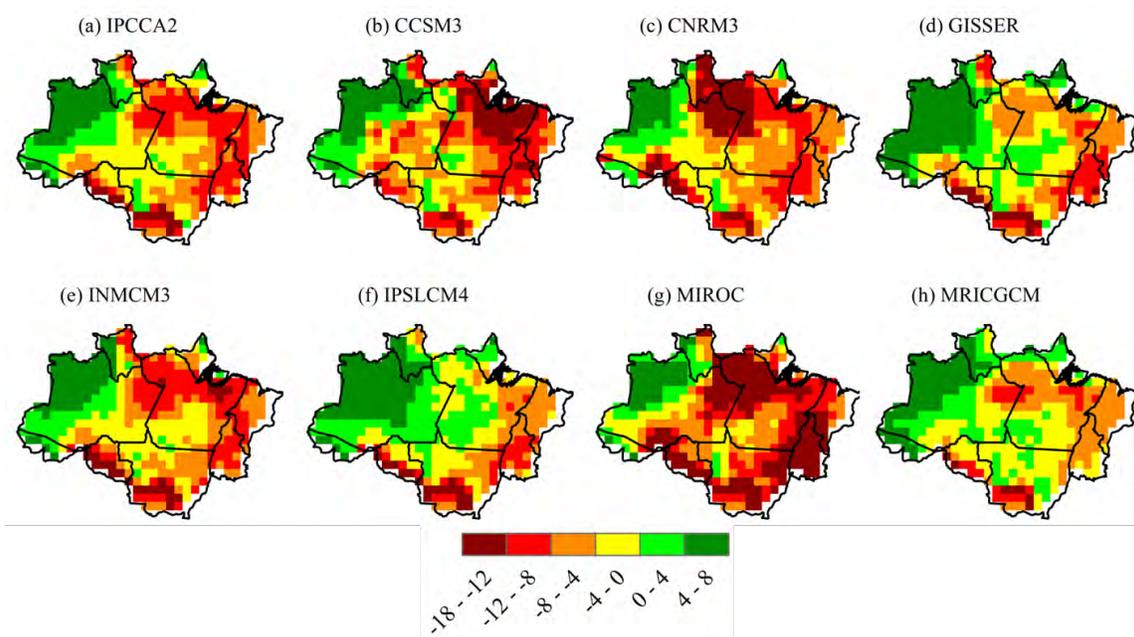


Figura 56. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2050: IPCC A2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).

O efeito fisiológico da elevação da concentração do CO_2 foi suficiente para mitigar os efeitos das condições climáticas futuras na estimativa de biomassa viva acima do solo na Amazônia Ocidental. Para as demais regiões, os resultados das simulações indicam quedas, embora tais quedas sejam menores que as observadas quando avaliadas apenas as condições climáticas futuras (Figura 57).

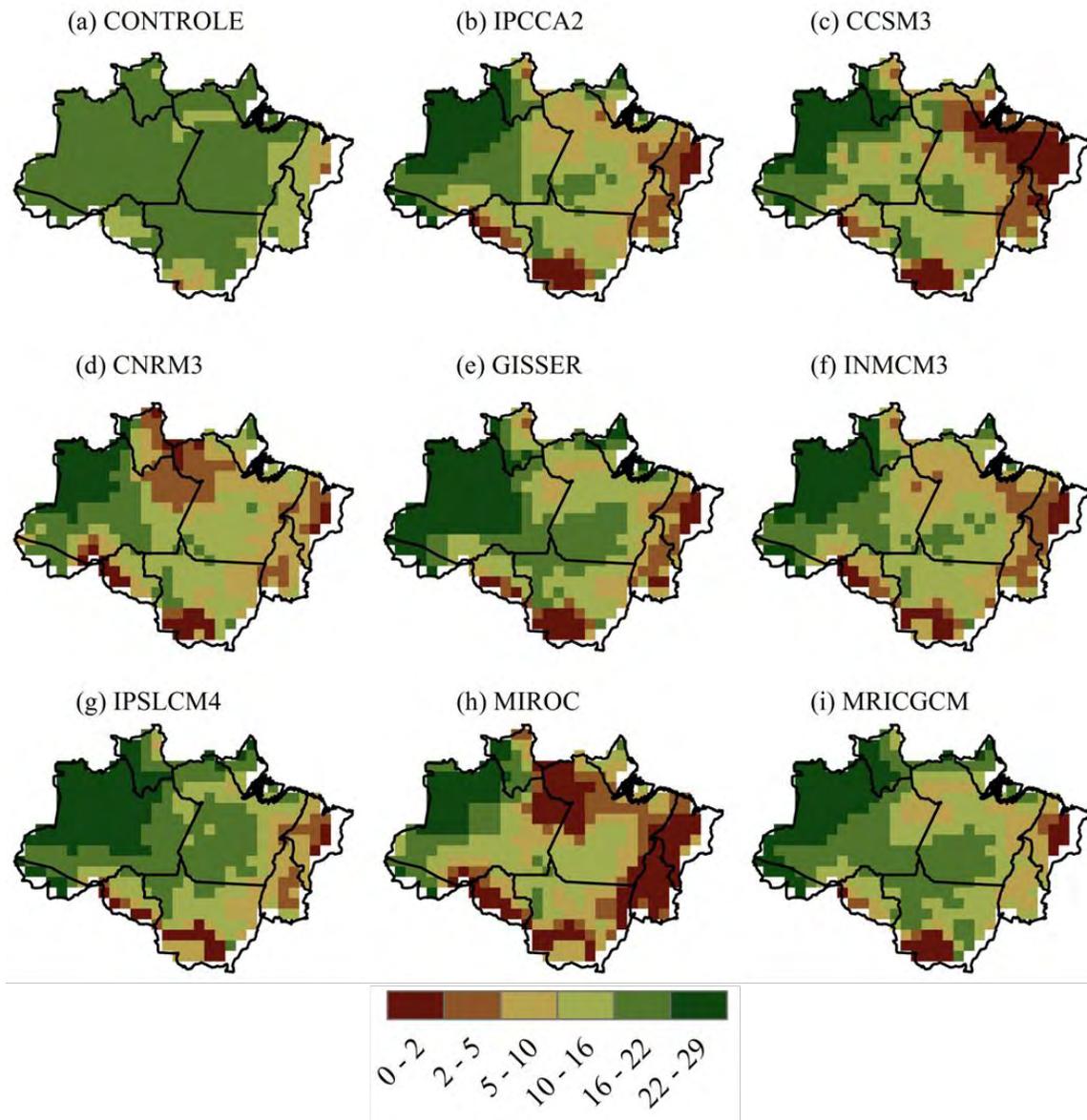


Figura 57. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico da elevação do CO_2 para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

Anomalias médias de biomassa viva acima do solo variaram entre $-1,0 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-5,6\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo IPSLCM4 e $-7,2 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-40,5\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia

média de biomassa viva acima do solo foi de $-3,3 \text{ kgC.m}^{-2}$, equivalente a uma redução de $-18,7\%$, quando comparada à simulação controle (Tabela 30). A diferença entre a simulação considerando apenas o efeito radiativo do CO_2 e a simulação considerando os efeitos radiativo e fisiológico de CO_2 foi de $-20,4\%$, valor bem abaixo do usado para quantificar o efeito fisiológico da concentração de CO_2 na assimilação de carbono do ecossistema natural para o ano de 2050, que foi de $32,2\%$. Estes resultados indicam que o efeito fisiológico do CO_2 não compensou os efeitos das condições climáticas futuras na produtividade do ecossistema natural para o ano de 2050.

Tabela 30. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro considerando o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m^{-2})	% de redução
Clima Médio	17,9	-3,3	-18,7
CCSM3	17,9	-4,6	-25,7
CNRM3	17,9	-5,3	-29,7
GISSER	17,9	-1,5	-8,5
INMCM3	17,9	-3,9	-22,0
IPSLCM4	17,9	-1,0	-5,6
MIROC	17,9	-7,2	-40,5
MRICGCM	17,9	-1,3	-7,0

4.4.4.3. Efeitos climáticos das mudanças no uso do solo

Anomalias da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando apenas os cenários de desmatamento proposto por Soares-Filho *et al.* (2006), estão representadas na Figura 58, respectivamente.

As anomalias da biomassa viva acima do solo geradas a partir da substituição da área desmatada nos cenários “GOV” e “BAU” foram muito parecidas para as duas culturas avaliadas (Figura 58).

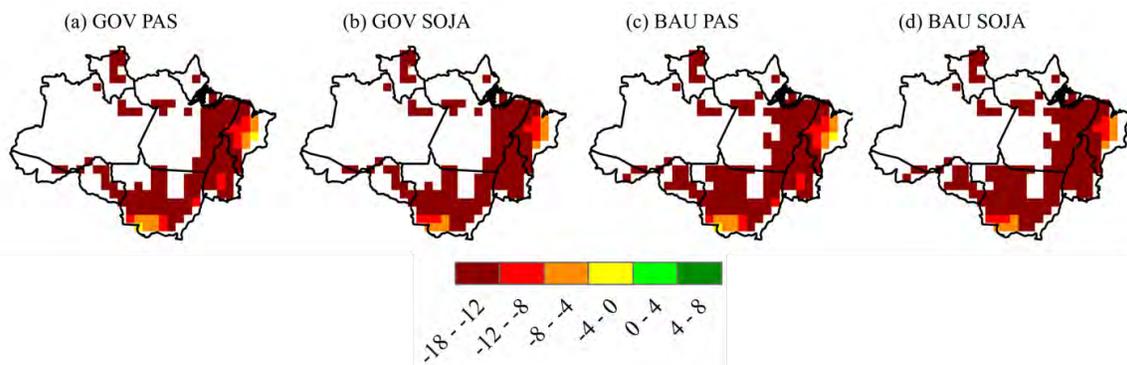


Figura 58. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2050: GOV PAS (a), GOV SOJA (b), BAU PAS (c) e BAU SOJA (d).

A biomassa viva acima do solo apresentou menores valores quando a área desmatada foi substituída pela soja nos dois cenários de desmatamento avaliados. Isso ocorreu, devido à cultura da soja apresentar valores de biomassa até 10 vezes menores quando comparada à pastagem (Figura 59).

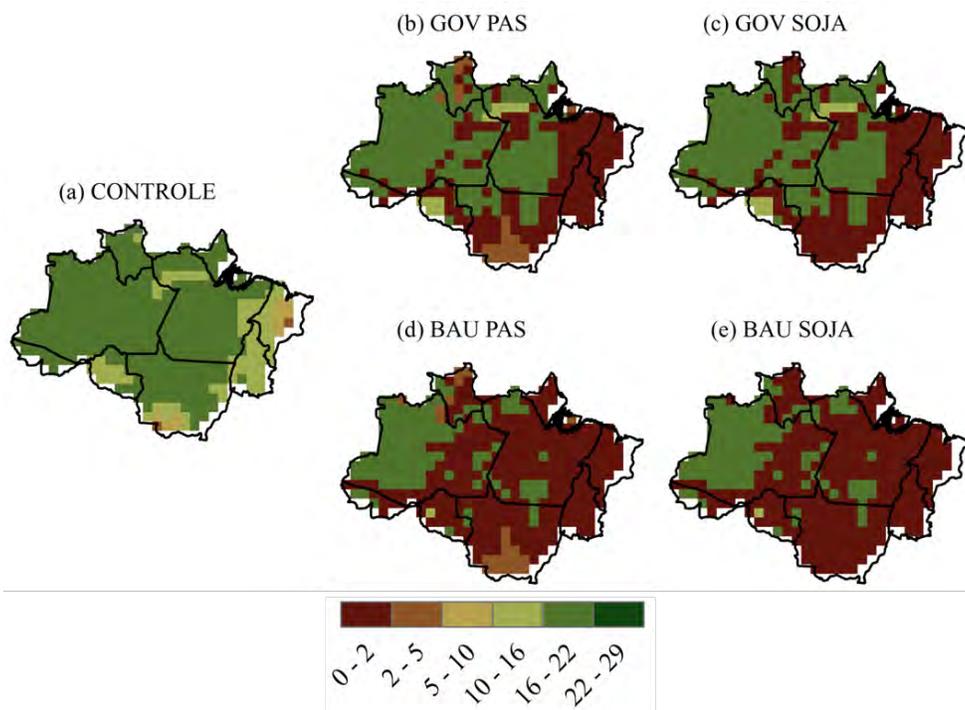


Figura 59. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2050: controle (a), GOV PAS (b), GOV SOJA (c), BAU PAS (d) e BAU SOJA (e).

Anomalias médias de biomassa viva acima do solo variaram de $-6,2 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-34,6\%$ para o cenário de uso do solo “GOV”, quando as células desmatadas foram substituídas pela pastagem, a $-12,0 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-67,0\%$ para o cenário de uso do solo “BAU”, quando as células desmatadas foram substituídas pela soja (Tabela 31). O efeito climático do uso do solo foi maior quando as células desmatadas foram substituídas pela soja em todos os cenários de uso do solo avaliados para o ano de 2020, conforme Tabela 31.

Tabela 31. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro considerando o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m^{-2})	% de redução
GOV_PAS	17,9	-6,2	-34,6
GOV_SOY	17,9	-6,9	-38,4
BAU_PAS	17,9	-10,9	-61,1
BAU_SOY	17,9	-12,0	-67,0

4.4.4.4. Efeito radiativo e fisiológico da elevação de CO_2 e das mudanças no uso do solo

Nas Figuras 60 a 62, encontram-se representadas as anomalias da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), obtidas considerando as condições climáticas futuras, o efeito fisiológico do CO_2 e os cenários de desmatamento proposto por Soares-Filho *et al.* (2006).

Quando combinados todos os cenários futuros, o incremento na biomassa viva acima do solo ao norte do estado do Amazonas é fortalecido, embora isso ocorra numa área menor que a observada em 2020. Para as demais regiões da Amazônia, os efeitos negativos são mais fortes e uma área maior da floresta está sujeita ao desaparecimento (Figuras 60 a 62).

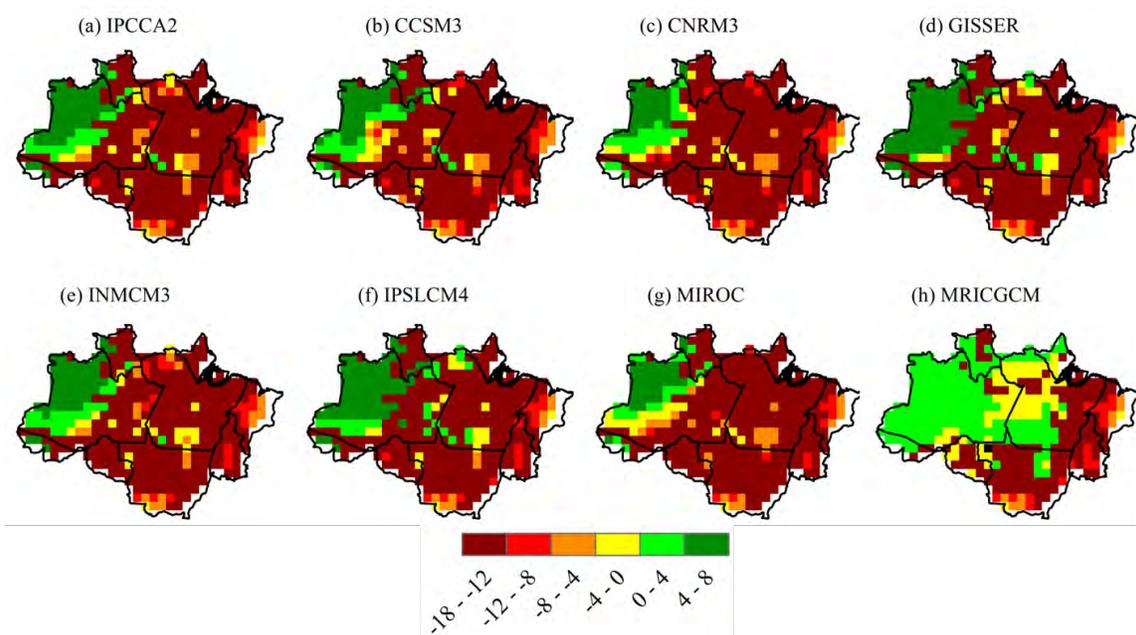


Figura 60. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO₂, o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050: : IPCCA2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).

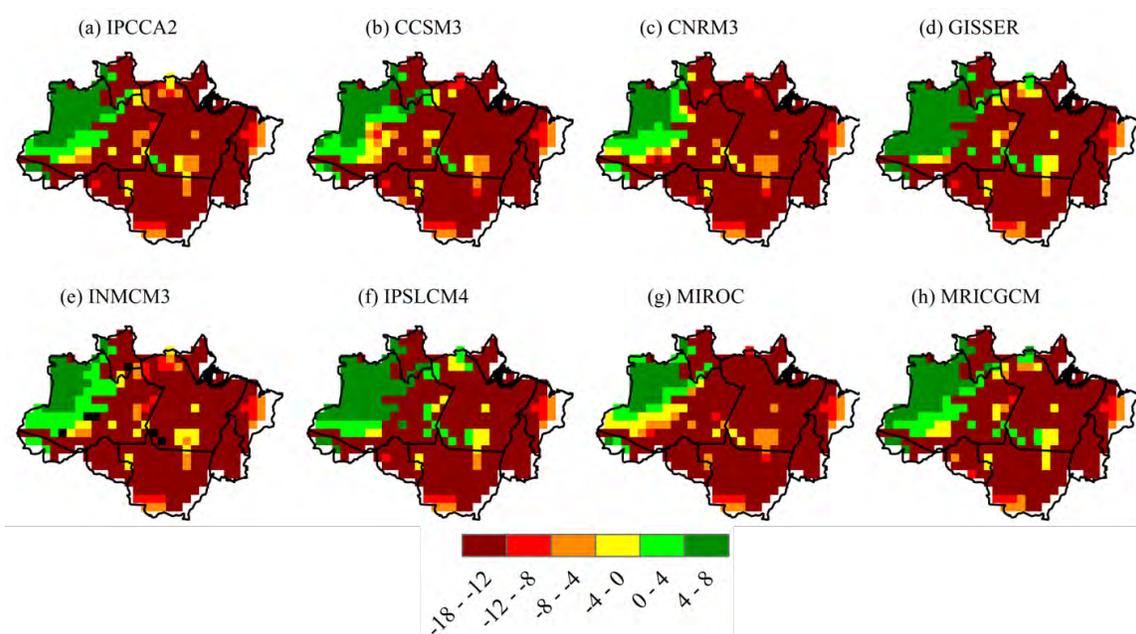


Figura 61. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO₂, o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050: IPCCA2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).

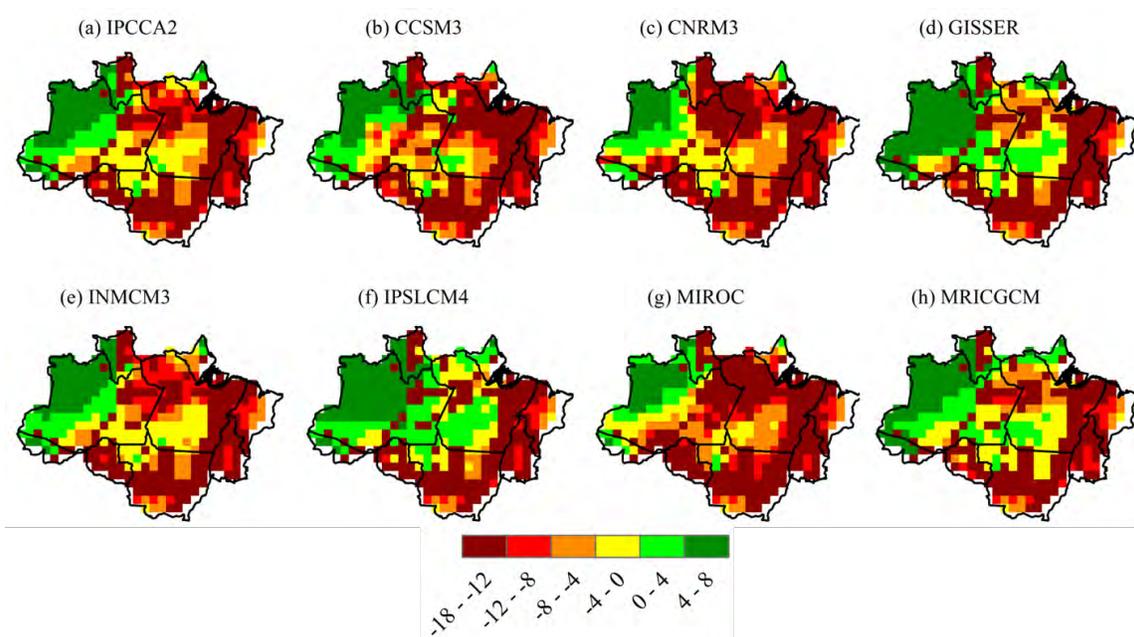


Figura 62. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO₂, o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).

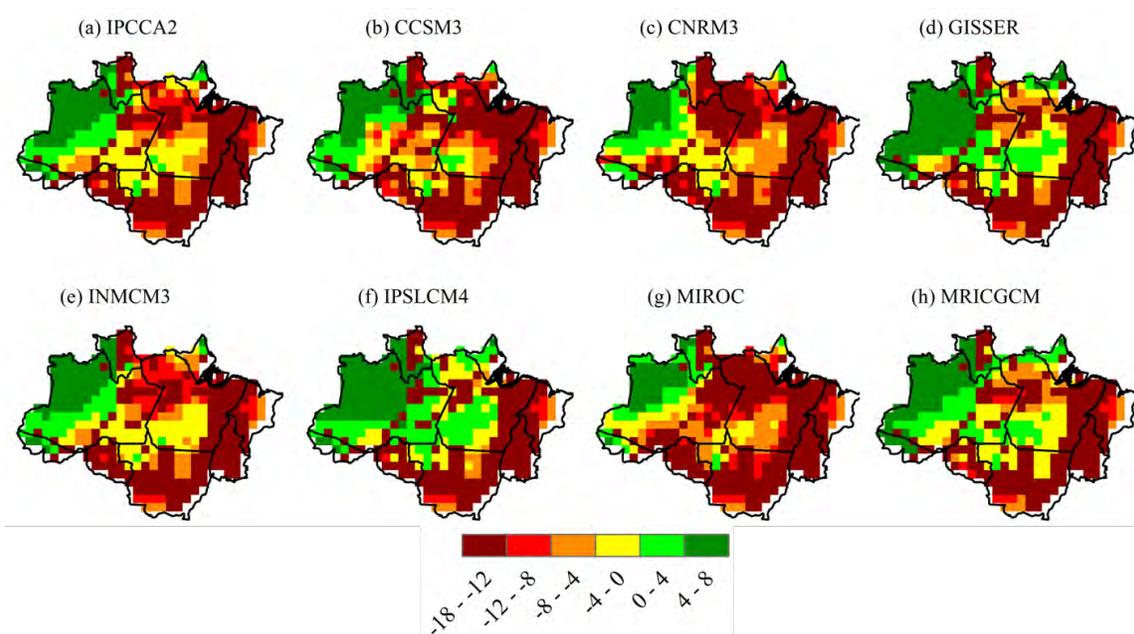


Figura 63. Anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO₂, o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050: IPCC2 (a), CCSM3 (b), CNRM3 (c), GISSER (d), INMCM3 (e), IPSLCM4 (f), MIROC (g) e MRICGCM (h).

Quando considerados todos os efeitos combinados, a biomassa viva acima do solo foi muito menor que a observada para a simulação controle em todos os cenários avaliados (Figuras 64 a 67), principalmente, para os cenários de desmatamento “BAU” e quando a àrea desmatada foi ocupada pela soja.

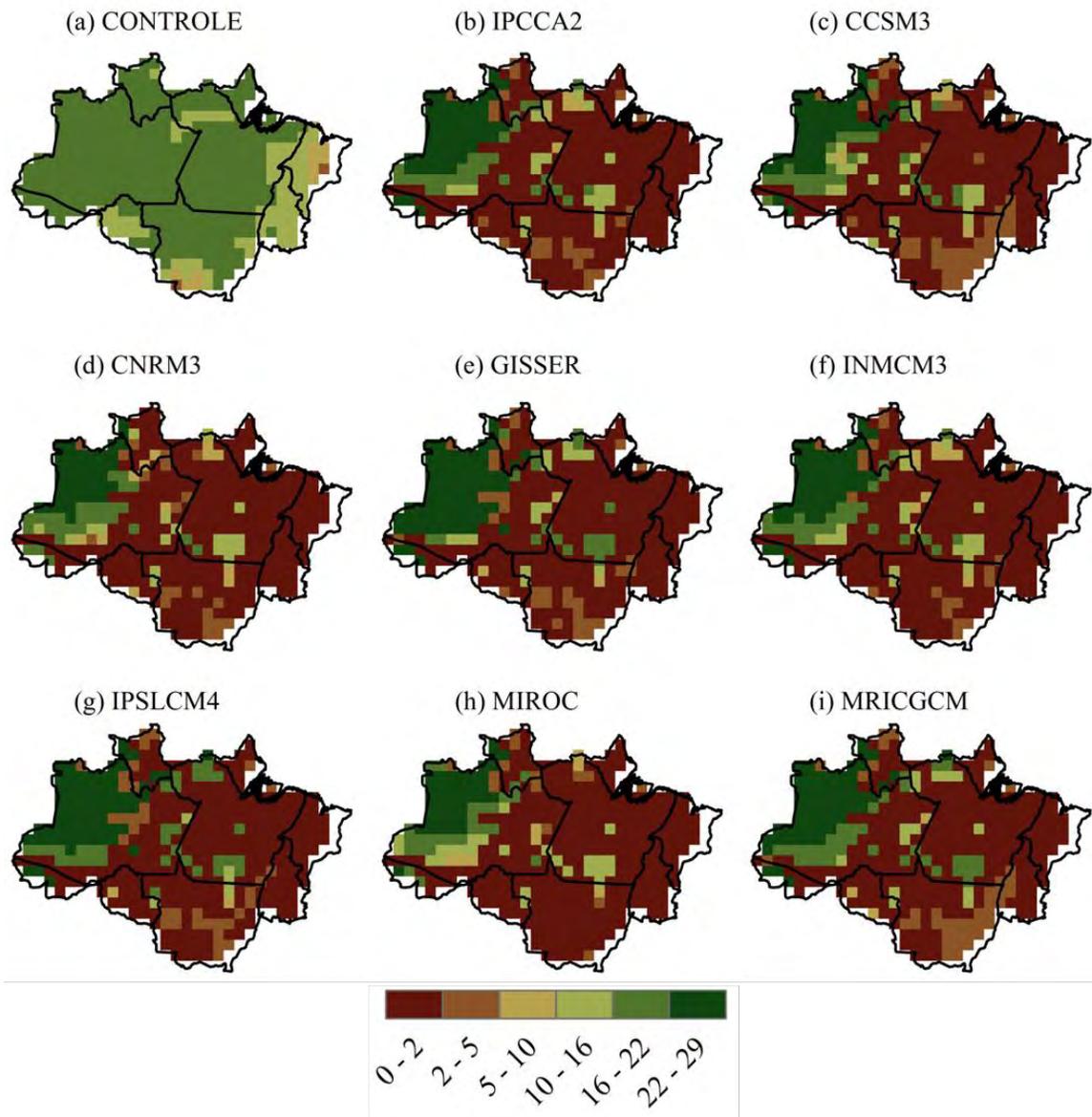


Figura 64. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

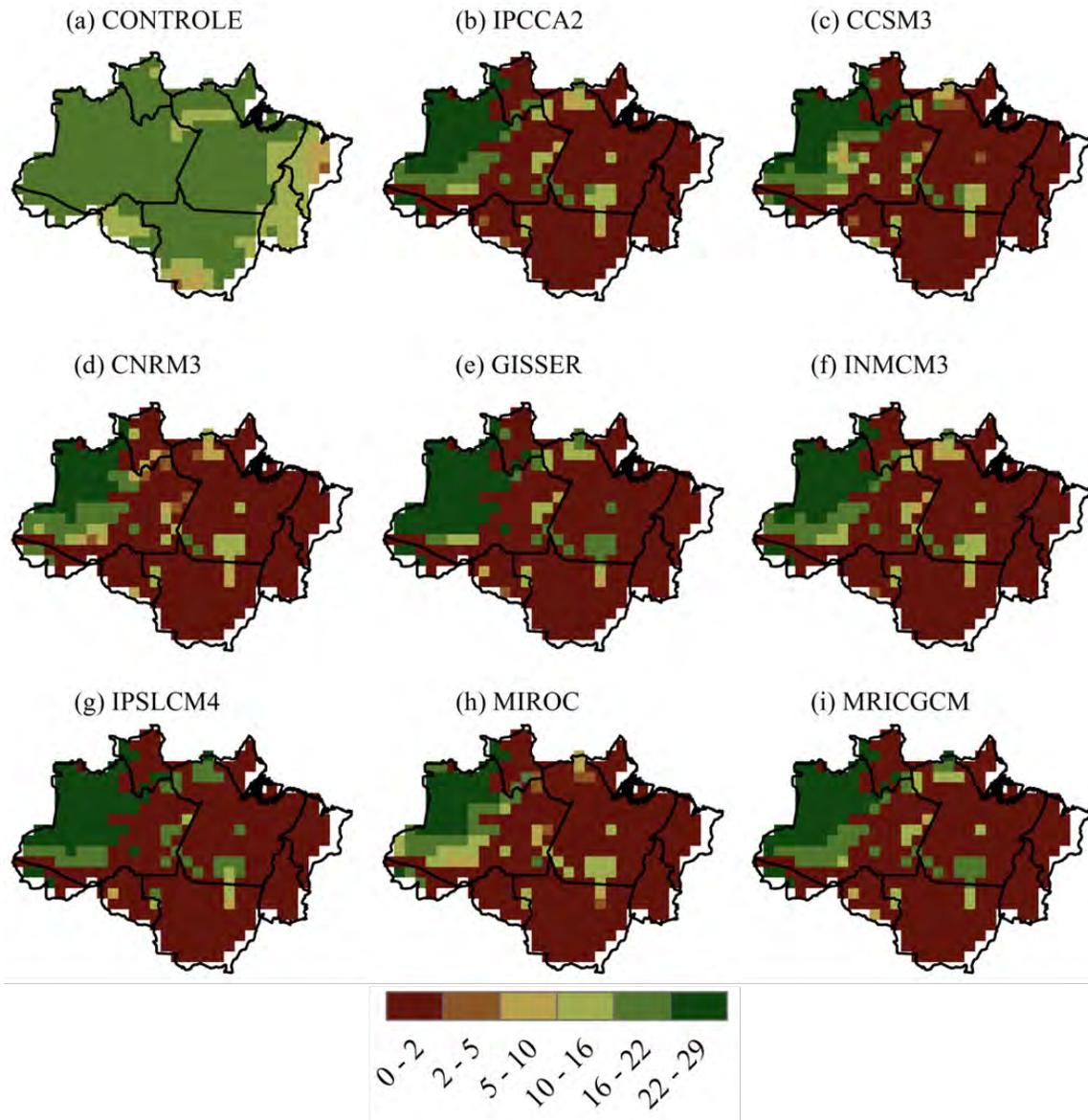


Figura 65. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

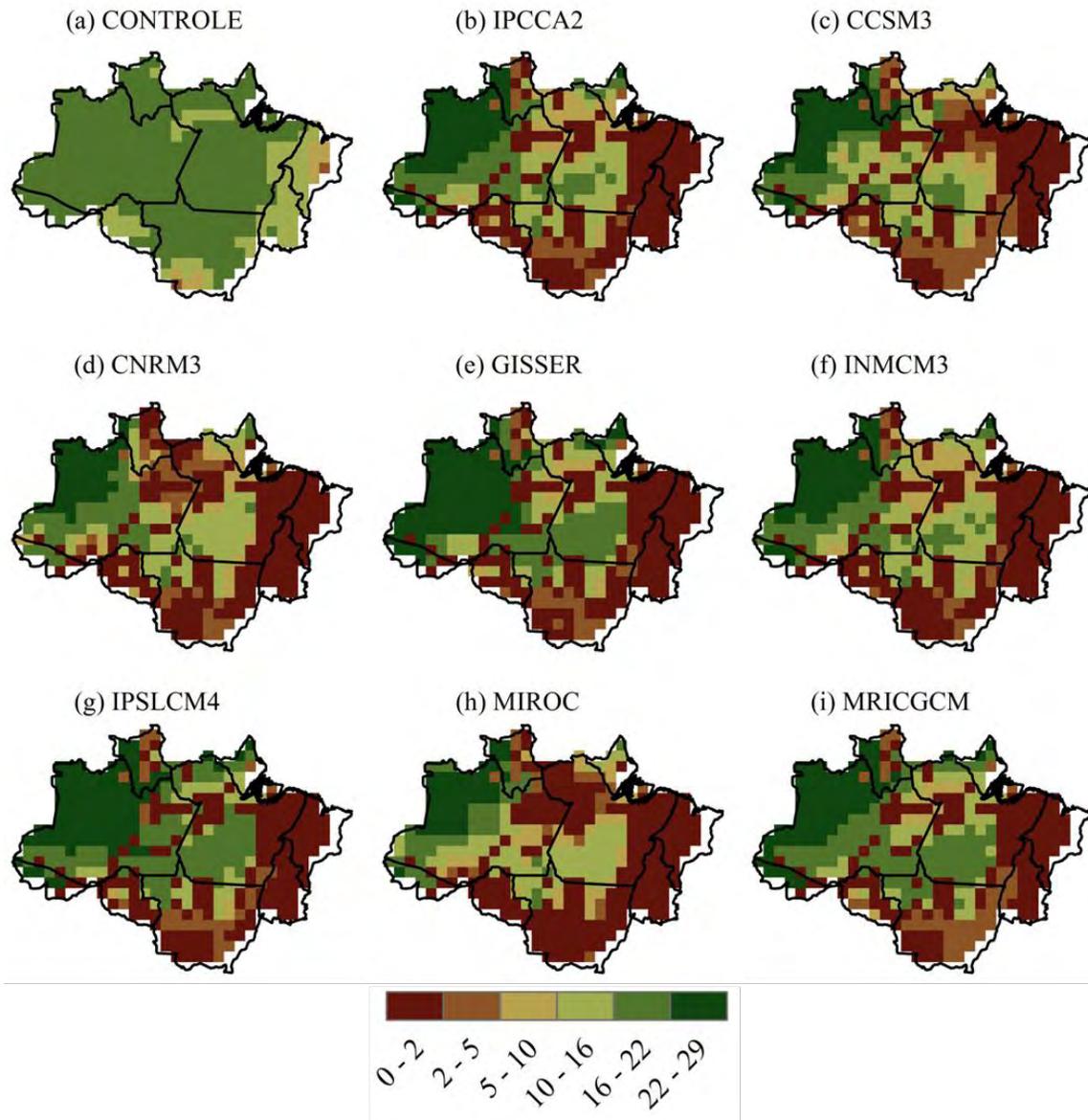


Figura 66. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

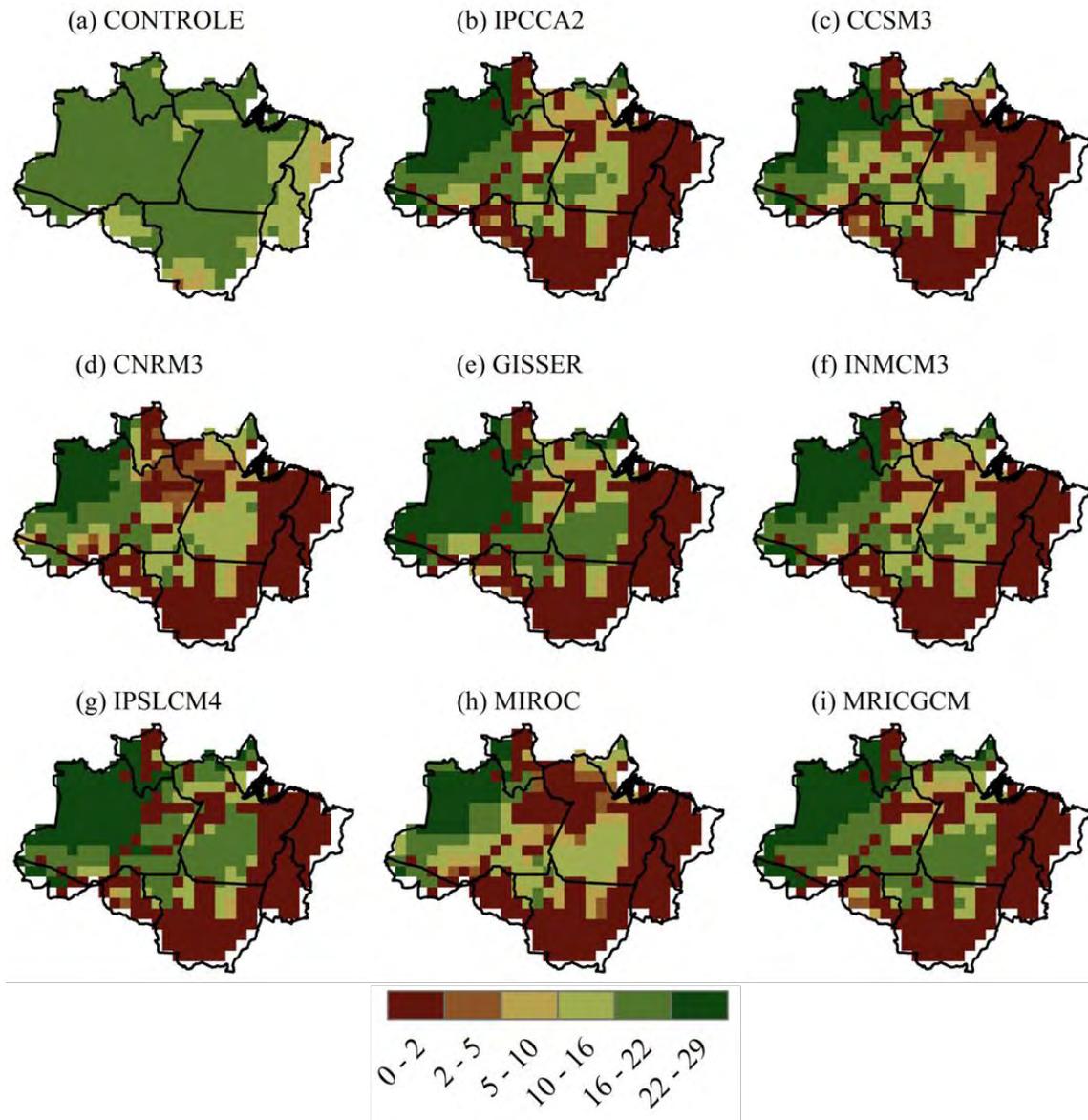


Figura 67. Distribuição espacial da biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

Anomalias médias de biomassa viva acima do solo, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO_2 e o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050, variaram entre $-9,8 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de -55% para o cenário climático proposto pelo modelo IPSLCM4 e $-11,7 \text{ kgC.m}^{-2}$, que

equivale a uma redução de -65,5% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de biomassa viva acima do solo foi de $-10,5 \text{ kgC.m}^{-2}$, equivalente a uma redução de -58,6%, quando comparada à simulação controle (Tabela 32).

Tabela 32. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m^{-2})	% de redução
Clima Médio	17,9	-10,5	-58,6
CCSM3	17,9	-10,8	-60,3
CNRM3	17,9	-11,2	-62,7
GISSER	17,9	-9,9	-55,4
INMCM3	17,9	10,7	-59,9
IPSLCM4	17,9	-9,8	-55,0
MIROC	17,9	-11,7	-65,5
MRICGCM	17,9	-10,1	-56,7

Anomalias médias de biomassa viva acima do solo, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO_2 e o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050, variaram entre $-11,0 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de -33,8% para os cenários climáticos propostos pelos modelos IPSLCM4 e GISSER e $-12,6 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de -70,3% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de biomassa viva acima do solo foi de $-11,5 \text{ kgC.m}^{-2}$, equivalente a uma redução de -64,5%, quando comparada à simulação controle (Tabela 33).

Tabela 33. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m^{-2})	% de redução
Clima Médio	17,9	-11,5	-64,5
CCSM3	17,9	-11,8	-66,1
CNRM3	17,9	-12,3	-68,7
GISSER	17,9	-11,0	-61,7
INMCM3	17,9	-11,7	-65,5
IPSLCM4	17,9	-11,0	-61,7
MIROC	17,9	-12,6	-70,3
MRICGCM	17,9	-11,2	-62,6

Anomalias médias de biomassa viva acima do solo, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO_2 e o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050, variaram entre $-5,1 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-28,4\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo IPSLCM4 e $-9,0 \text{ kgC.m}^{-2}$, que equivale a uma redução de $-50,1\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de biomassa viva acima do solo foi de $-6,7 \text{ kgC.m}^{-2}$, equivalente a uma redução de $-37,2\%$, quando comparada à simulação controle (Tabela 34).

Tabela 34. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m^{-2})	% de redução
Clima Médio	17,9	-6,7	-37,2
CCSM3	17,9	-7,5	-41,9
CNRM3	17,9	-8,2	-45,9
GISSER	17,9	-5,4	-30,3
INMCM3	17,9	-7,0	-39,3
IPSLCM4	17,9	-5,1	-28,4
MIROC	17,9	-9,0	-50,1
MRICGCM	17,9	-5,7	-31,7

Anomalias médias de biomassa viva acima do solo, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO₂ e o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050, variaram entre -5,8 kgC.m⁻², que equivale a uma redução de -32,5% para o cenário climático proposto pelo modelo IPSLCM4 e -9,5 kgC.m⁻², que equivale a uma redução de -53,2% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de biomassa viva acima do solo foi de -7,3 kgC.m⁻², equivalente a uma redução de -41,0%, quando comparada à simulação controle (Tabela 35).

Tabela 35. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m⁻²), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m⁻²) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico do CO₂, o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m ⁻²)	% de redução
Clima Médio	17,9	-7,3	-41,0
CCSM3	17,9	-8,2	-45,7
CNRM3	17,9	-8,9	-49,8
GISSER	17,9	-6,1	-34,3
INMCM3	17,9	-7,7	-42,9
IPSLCM4	17,9	-5,8	-32,5
MIROC	17,9	-9,5	-53,2
MRICGCM	17,9	-6,4	-35,6

4.4.4.5. Síntese

A Tabela 36 sintetiza os principais valores dos efeitos dos cenários futuros no ecossistema natural para o ano de 2050. Reduções na biomassa viva acima do solo, quando considerados os efeitos radiativo e fisiológico da concentração de CO₂, foram de -18,7%. No entanto, nos cenários que consideraram o efeito climático da mudança no uso do solo indicam reduções de até -67% (Tabela 36).

Tabela 36. Biomassa média para o cenário controle (kgC.m^{-2}), anomalias de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}) e % de redução para cada cenário testado para o ano de 2020

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m^{-2})	% de redução
IPCC A2	17,9	-7,0	-39,1
IPCC A2+CO ₂	17,9	-3,3	-18,7
GOV_PAS	17,9	-6,2	-34,6
GOV_SOY	17,9	-6,9	-38,4
BAU_PAS	17,9	-10,9	-61,1
BAU_SOY	17,9	-12,0	-67,0
IPCC A2+CO ₂ +GOV_PAS	17,9	-6,7	-37,2
IPCC A2+CO ₂ +GOV_SOJ	17,9	-7,3	-41,0
IPCC A2+CO ₂ +BAU_PAS	17,9	-10,5	-58,6
IPCC A2+CO ₂ +BAU_SOJ	17,9	-11,5	-64,5

4.4.5. Efeitos dos cenários futuros na produtividade da pastagem para o ano de 2050

4.4.5.1. Efeito radiativo da elevação do CO₂ (aquecimento global)

A produtividade da pastagem não apresentou grandes diferenças entre as simulações, considerando apenas as condições climáticas futuras para o ano de 2050 e a simulação controle, exceto para o modelo MIROC. Esses resultados indicam que o clima futuro provavelmente não trará grandes impactos à produtividade da pastagem (Figura 68).

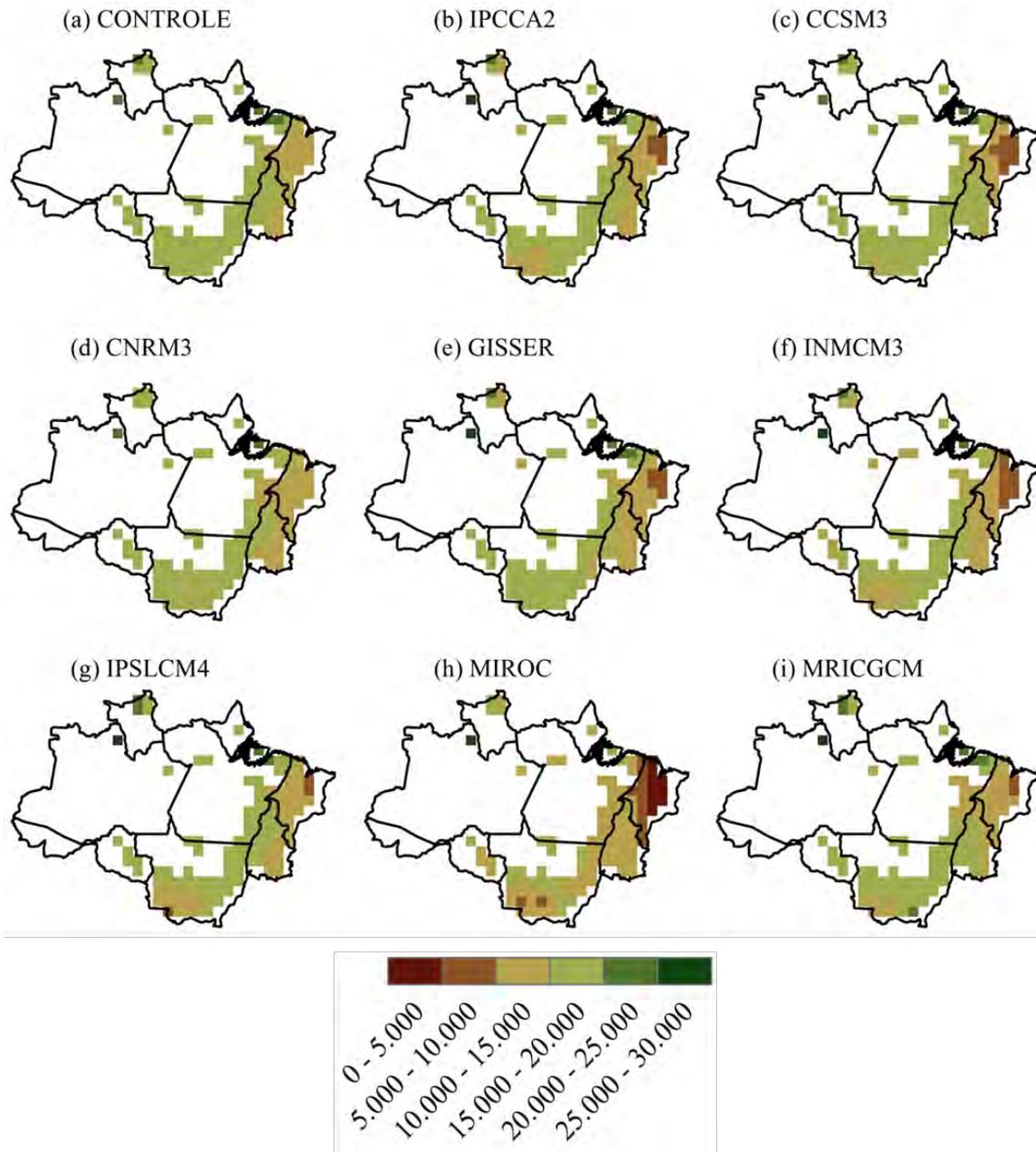


Figura 68. Distribuição espacial da produtividade da pastagem (kgMS.ha⁻¹), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

Anomalias médias de produtividade da pastagem variaram entre -561,7 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, que equivale a uma redução de -3,5% para o cenário climático proposto pelo modelo MRICGCM e -4.161,1 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, que equivale a uma redução de -25,6% para o cenário climático

proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da pastagem foi de -1.198,1 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, equivalente a uma redução de -7,4%, quando comparada à simulação controle (Tabela 37).

Tabela 37. Produtividade média para o cenário controle (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹), anomalias de produtividade (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	Anomalias (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	% de redução
Clima Médio	16.245,4	-1.198,1	-7,4
CCSM3	16.245,4	-655,1	-4,0
CNRM3	16.245,4	-1.019,5	-6,3
GISSER	16.245,4	-820,8	-5,1
INMCM3	16.245,4	-1875,4	-11,5
IPSLCM4	16.245,4	-875,0	-5,4
MIROC	16.245,4	-4.161,1	-25,6
MRICGCM	16.245,4	-561,7	-3,5

4.4.5.2. Efeito radiativo (aquecimento global) e fisiológico da elevação de CO₂

Ao considerar-se o efeito fisiológico do CO₂ não foram verificadas diferenças significativas no padrão de distribuição da produtividade da pastagem simulada, pois os resultados estimados pelos diferentes modelos foram muito parecidos (Figura 69).

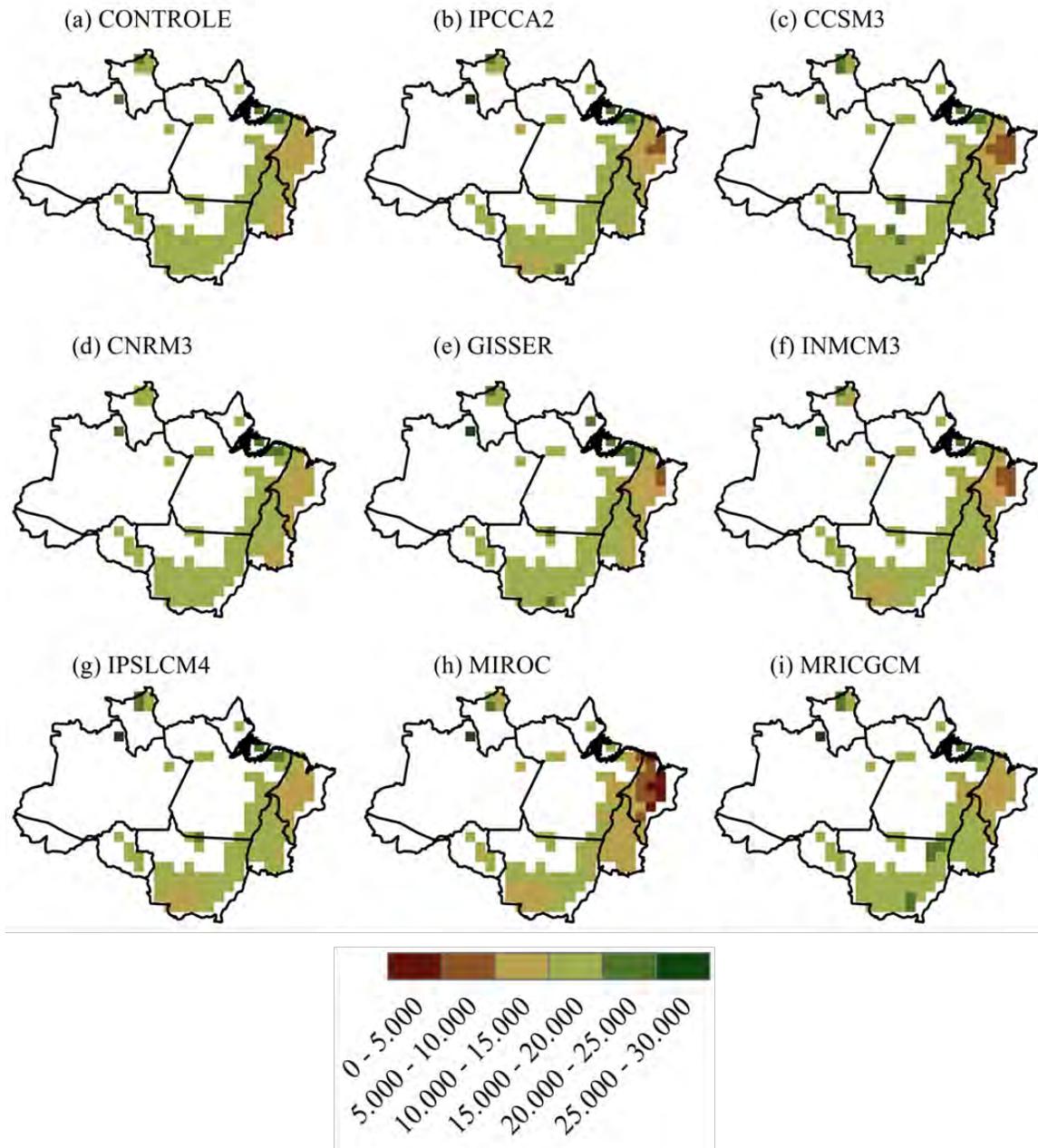


Figura 69. Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

Anomalias médias de produtividade da pastagem variaram entre $692,0 \text{ kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, que equivale a um incremento de 4,3% para o cenário climático proposto pelo modelo MRICGCM e $-3.022,8 \text{ kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, que equivale a uma redução de -18,6% para o cenário climático proposto

pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da pastagem foi de 26,7 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, equivalente a um incremento de 0,2%, quando comparada à simulação controle (Tabela 38). A diferença entre a simulação que considera apenas o efeito radiativo do CO₂ e a simulação que considera os efeitos radiativo e fisiológico de CO₂ foi de -7,2%, valor superior ao usado para quantificar o efeito fisiológico da concentração de CO₂ na assimilação de carbono da pastagem para o ano de 2050, que foi de 5,2%.

Tabela 38. Produtividade média para o cenário controle (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹), anomalias de produtividade (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO₂ para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	Anomalias (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	% de redução
Clima Médio	16.245,4	26,7	0,2
CCSM3	16.245,4	560,7	3,5
CNRM3	16.245,4	206,1	1,3
GISSER	16.245,4	435,3	2,7
INMCM3	16.245,4	-661,9	-4,1
IPSLCM4	16.245,4	389,0	2,4
MIROC	16.245,4	-3.022,8	-18,6
MRICGCM	16.245,4	692,0	4,3

4.4.5.3. Efeitos climáticos das mudanças no uso do solo

Os efeitos simulados das mudanças no uso do solo na produtividade da pastagem mostram valores muito baixos de produtividade no norte dos estados do Maranhão e do Pará. Isto indica que o plantio da pastagem se autoinviabiliza nessas regiões, devido à diminuição da precipitação, dano este provocado pelo desmatamento (Figura 70).

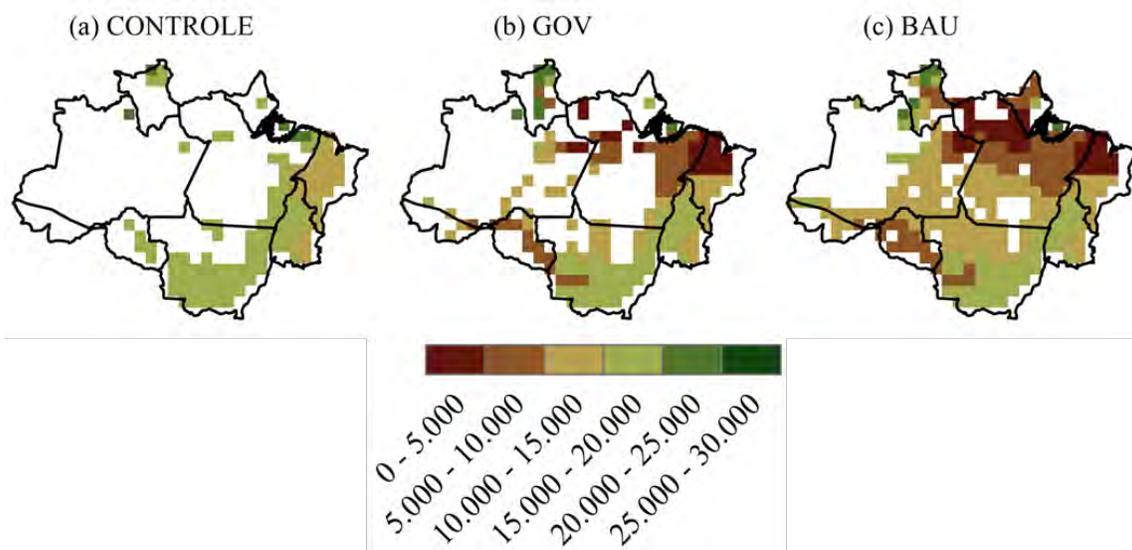


Figura 70. Distribuição espacial da produtividade da pastagem (kgMS.ha^{-1}), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) para o ano de 2050: controle (a), GOV (b) e BAU (c).

As anomalias médias de produtividade da pastagem variaram de $-4.678,4 \text{ kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-28,8\%$ para o cenário de uso do solo “GOV” a $-5.185,2 \text{ kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-31,9\%$ para o cenário climático de uso do solo “BAU” (Tabela 39). A diferença entre os dois cenários explica-se pelo maior número de células desmatadas no cenário de uso do solo “BAU”.

Tabela 39. Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário futuro de desmatamento obtidos por Soares-Filho *et al.* (2006) “BAU” e “GOV”, nos quais as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$)	Anomalias ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$)	% de redução
GOV	16.245,4	-4.678,4	-28,8
BAU	16.245,4	-5.185,2	-31,9

4.4.5.4. Efeito radiativo e fisiológico da elevação de CO₂ e das mudanças no uso do solo

Anomalias médias de produtividade da pastagem, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO₂ e o cenário de desmatamento “BAU” para o ano de 2020, variaram entre -4.140 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, que equivale a uma redução de -25,5% para o cenário climático proposto pelo modelo IPSCLM4 e -7.568,1 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, que equivale a uma redução de -46,6% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da pastagem foi de -5.428,6 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, equivalente a uma redução de -33,4%, quando comparada à simulação controle (Tabela 40).

Tabela 40. Produtividade média para o cenário controle (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹), anomalias de produtividade (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO₂ e o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	Anomalias (kgMS.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	% de redução
Clima Médio	16.245,4	-5.428,6	-33,4
CCSM3	16.245,4	-5.787,5	-35,6
CNRM3	16.245,4	-5.452,6	-33,6
GISSER	16.245,4	-4.647,2	-28,6
INMCM3	16.245,4	-5.993,8	-36,9
IPSLCM4	16.245,4	-4.140,4	-25,5
MIROC	16.245,4	-7.568,1	-46,6
MRICGCM	16.245,4	-5.199,0	-32,0

Anomalias médias de produtividade da pastagem, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO₂ e o cenário de desmatamento “GOV” para o ano de 2020, variaram entre -4.010,1 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, que equivale a uma redução de -24,7% para o cenário climático proposto pelo modelo IPSLCM4 e -7.102,6 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, que equivale a uma redução de -43,8% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o

cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da pastagem foi de $-4.856,5 \text{ kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, equivalente a uma redução de $-29,9\%$, quando comparada à simulação controle (Tabela 41). Reduções menores na produtividade média da pastagem para o cenário “GOV” justificam-se pelo menor número de células desmatadas para este cenário quando comparado ao cenário “BAU”.

Tabela 41. Produtividade média para o cenário controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 e o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$)	Anomalias ($\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$)	% de redução
Clima Médio	16.245,4	-4.856,5	-29,9
CCSM3	16.245,4	-4.846,2	-29,8
CNRM3	16.245,4	-4.556,7	-28,0
GISSER	16.245,4	-4.223,9	-26,0
INMCM3	16.245,4	-5.496,6	-33,8
IPSLCM4	16.245,4	-4.010,1	-24,7
MIROC	16.245,4	-7.102,6	-43,8
MRICGCM	16.245,4	-4.330,1	-26,7

O efeito combinado de todos os cenários futuros na produtividade da pastagem para os dois cenários de desmatamento podem ser visualizados nas Figuras 71 e 72. Comparando-se os resultados para o clima médio (cenário mais provável), para o cenário de desmatamento “BAU” e a simulação controle, pode-se verificar que 56% e 32% da área expandida para a pecuária, apresentariam, respectivamente, produtividade nas faixas de 10.000 a 15.000 $\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$ e de 5.000 a 10.000 $\text{kgMS.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$ (Figura 71). Além disso, 32% da área utilizada para a pecuária atingiriam apenas um terço da produtividade observada para a pastagem, atualmente. Para o cenário de desmatamento “GOV”, esse percentual seria de 18%. Ainda para o cenário “GOV”,

haveria redução da 40% da área com produtividades maiores que 15.000 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹ (Figura 72).

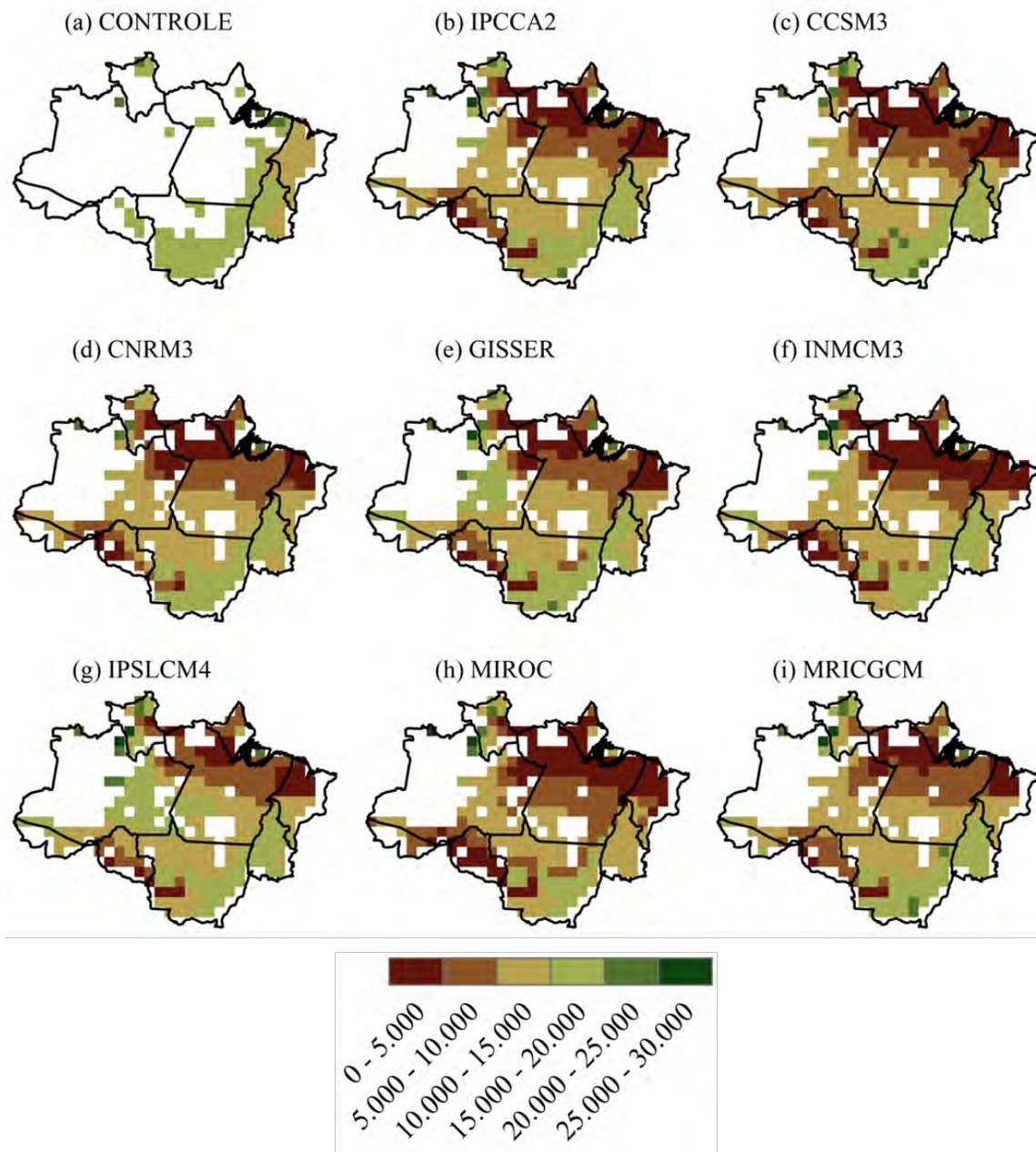


Figura 71. Distribuição espacial da produtividade da pastagem (kgMS.ha⁻¹), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO₂, o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

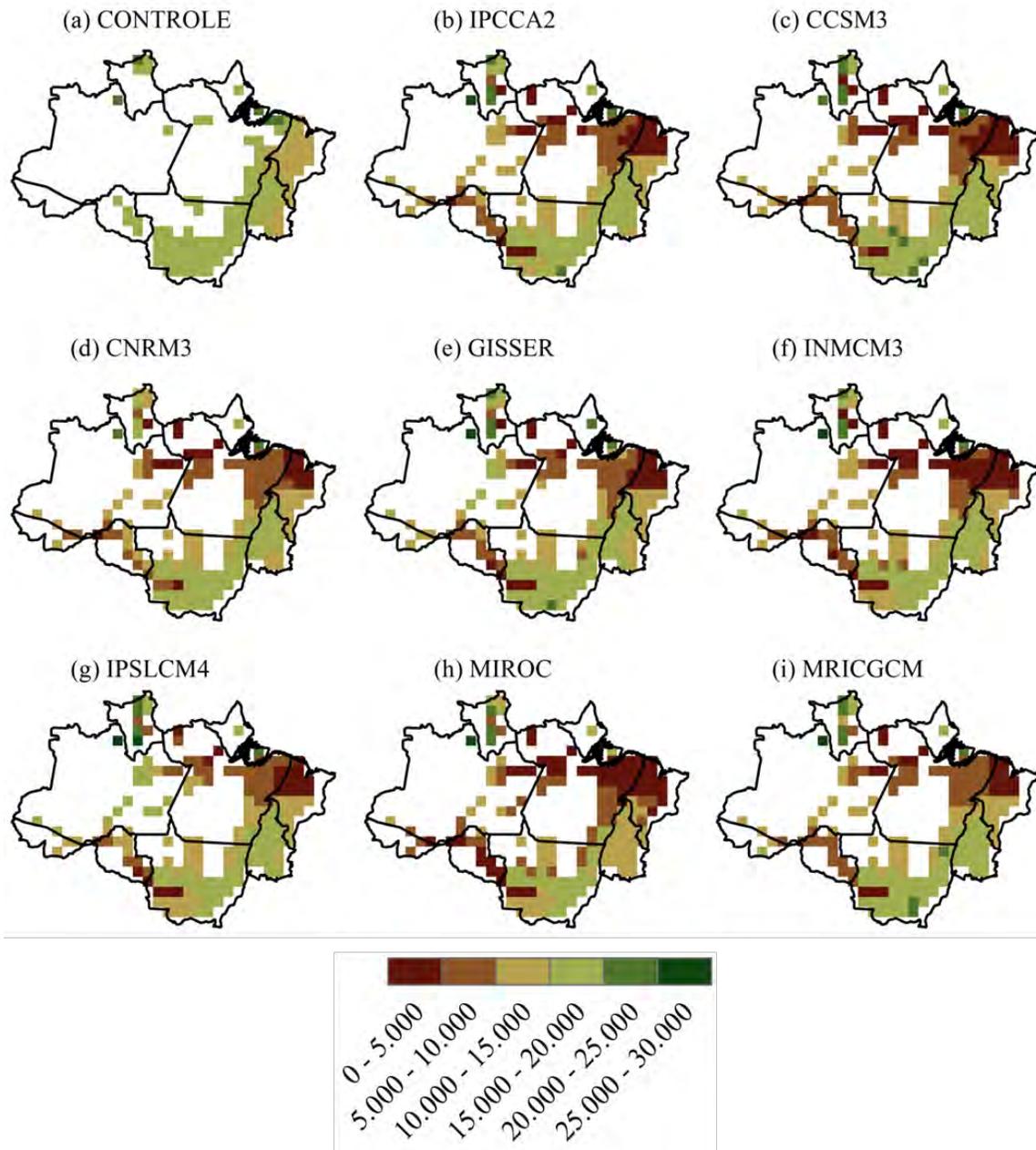


Figura 72. Distribuição espacial da produtividade da pastagem ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela pastagem para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

4.4.5.5. Síntese

A Tabela 42 sintetiza os principais valores dos efeitos dos cenários futuros na produtividade da pastagem para o ano de 2050. Quando considerados os efeitos radiativo e fisiológico da concentração de CO₂, houve um incremento de 0,2% na produtividade da pastagem. No entanto, os cenários que consideraram o efeito climático da mudança no uso do solo indicaram reduções de até -33,4% (Tabela 42).

Tabela 42. Produtividade média para o cenário controle (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹), anomalias de produtividade (kgMS.ha⁻¹.a⁻¹) e % de redução para cada cenário testado para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m ⁻²)	% de redução
IPCC A2	16.245,4	-1.198,1	-7,4
IPCC A2+CO ₂	16.245,4	26,7	0,2
GOV	16.245,4	-4.678,4	-28,8
BAU	16.245,4	-5.185,2	-31,9
IPCC A2+CO ₂ +GOV	16.245,4	-4.856,5	-29,9
IPCC A2+CO ₂ +BAU	16.245,4	-5.428,6	-33,4

4.4.6. Efeitos dos cenários futuros na produtividade da soja para o ano de 2050

4.4.6.1. Efeito radiativo da elevação do CO₂ (aquecimento global)

A produtividade da soja sofreria uma redução média de 25% em resposta apenas às condições climáticas futuras para o ano de 2050. Essa redução seria ainda maior nos estados do Maranhão e no sul do estado do Mato Grosso (Figura 73).

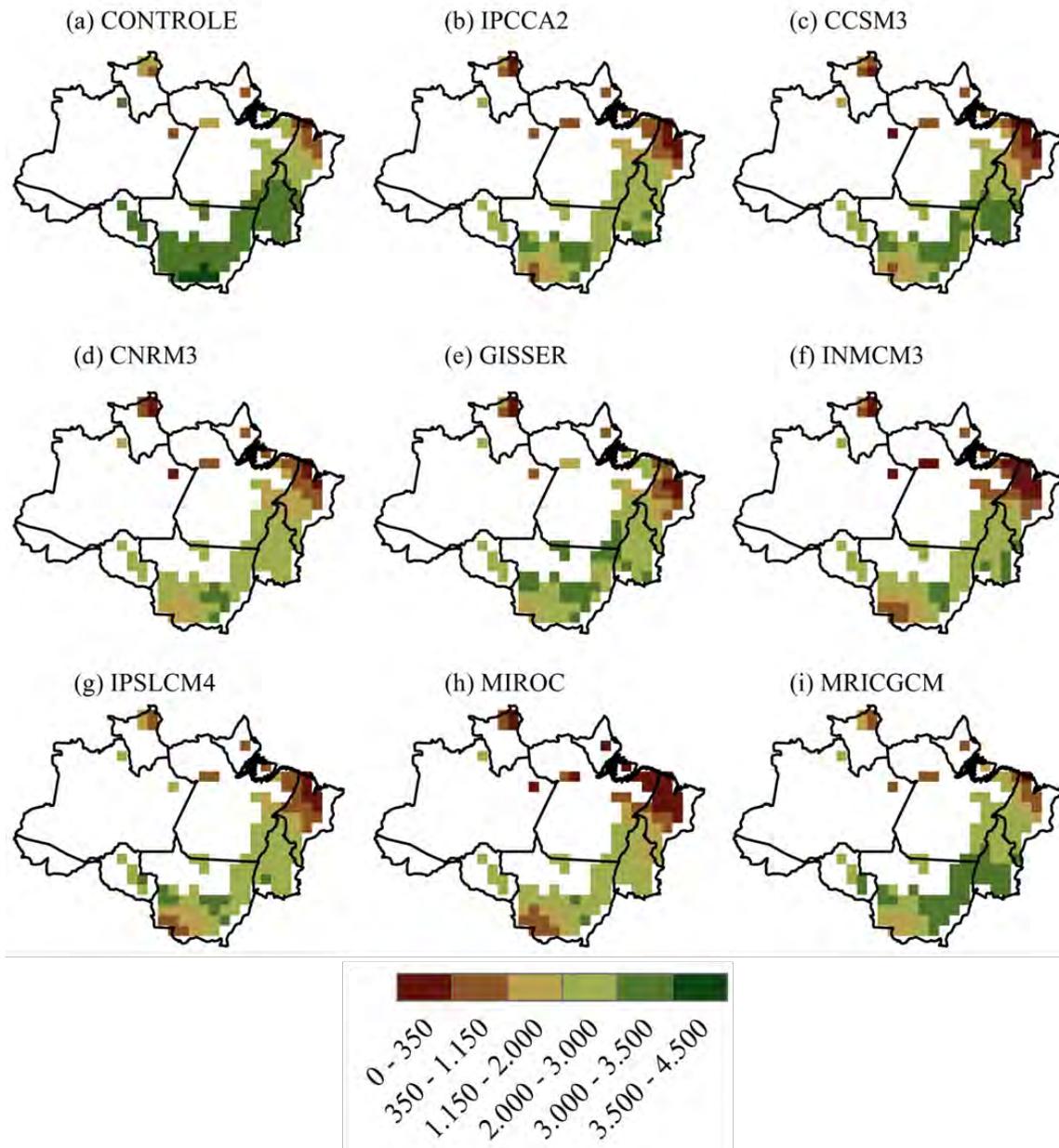


Figura 73. Distribuição espacial da produtividade da soja (kg.ha^{-1}), considerando apenas os cenários de clima futuro para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

As anomalias médias de produtividade da soja variaram entre $-307,2 \text{ kg.ha}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-11,4\%$ para o cenário climático proposto pelo modelo MRICGCM e $-1.134 \text{ kg.ha}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-41,9\%$ para o cenário climático proposto pelo

modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da soja foi de $-665,8 \text{ kg.ha}^{-1}$, equivalente a uma redução de $-24,6\%$, quando comparada à simulação controle (Tabela 43).

Tabela 43. Produtividade média para o cenário controle (kg.ha^{-1}), anomalias de produtividade (kg.ha^{-1}) e % de redução para cada cenário climático futuro para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle (kg.ha^{-1})	Anomalias (kg.ha^{-1})	% de redução
Clima Médio	2.704,7	-665,8	-24,6
CCSM3	2.704,7	-602,9	-22,3
CNRM3	2.704,7	-779,2	-28,8
GISSER	2.704,7	-495,9	-18,3
INMCM3	2.704,7	-831,8	-30,8
IPSLCM4	2.704,7	-771,8	-28,5
MIROC	2.704,7	-1.134,0	-41,9
MRICGCM	2.704,7	-307,2	-11,4

4.4.6.2. Efeito radiativo (aquecimento global) e fisiológico da elevação de CO_2

O efeito fisiológico do CO_2 mais que compensaria os efeitos das condições climáticas futuras em algumas regiões do estado do Mato Grosso para o ano de 2050 para a cultura da soja. Desse modo, nessas regiões, a produtividade da soja sofreria um incremento quando comparada à simulação controle (Figura 74).

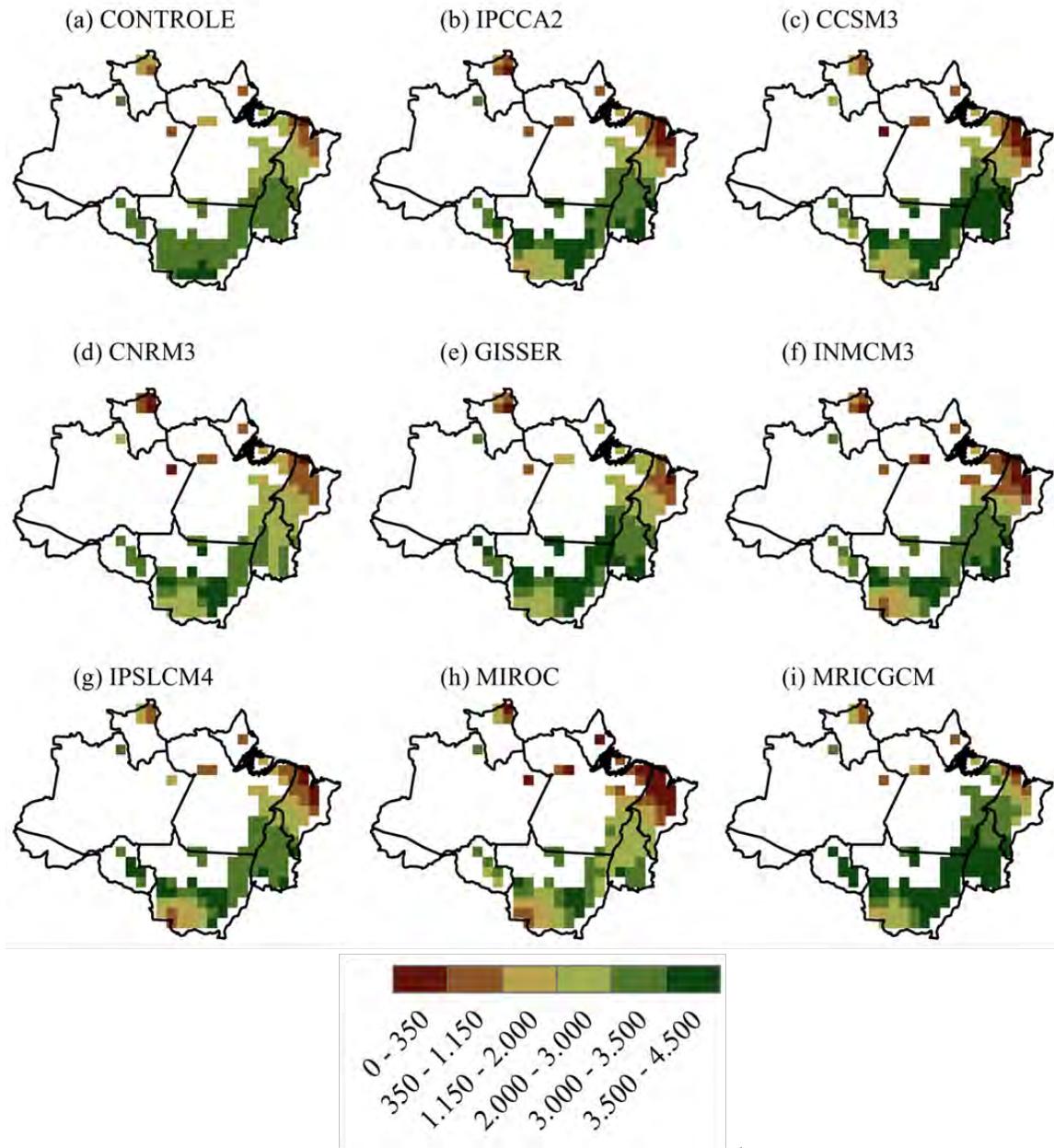


Figura 74. Distribuição espacial da produtividade da soja (kg.ha^{-1}), considerando os cenários de clima futuro e o efeito fisiológico do CO_2 para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

As anomalias médias de produtividade da soja variaram entre 219 kg.ha^{-1} , que equivale a um incremento de 8,1% para o cenário climático proposto pelo modelo MRICGCM a $-683,8 \text{ kg.ha}^{-1}$, que equivale a uma redução de -25,3% para o cenário climático proposto pelo

modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da soja foi de $-172,5 \text{ kg.ha}^{-1}$, equivalente a uma redução de $-6,4\%$, quando comparada à simulação controle (Tabela 44). A diferença entre a simulação que considera apenas o efeito radiativo do CO_2 e a simulação que considera os efeitos radiativo e fisiológico de CO_2 foi de $-19,5\%$, valor muito alto se comparado ao valor usado para quantificar o efeito fisiológico da concentração de CO_2 na assimilação de carbono da soja para o ano de 2050, que foi de $12,8\%$. Estes resultados indicam que o efeito fisiológico do CO_2 foi mais que suficiente para atenuar os efeitos das condições climáticas futuras na produtividade da soja.

Tabela 44. Produtividade média para o cenário controle (kg.ha^{-1}), anomalias de produtividade (kg.ha^{-1}) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle (kg.ha^{-1})	Anomalias (kg.ha^{-1})	% de redução
Clima Médio	2.704,7	-172,5	-6,4
CCSM3	2.704,7	-112,6	-4,2
CNRM3	2.704,7	-284,4	-10,5
GISSER	2.704,7	24,3	0,9
INMCM3	2.704,7	-384,7	-14,2
IPSLCM4	2.704,7	-304,8	-11,3
MIROC	2.704,7	-683,8	-25,3
MRICGCM	2.704,7	219,0	8,1

4.4.6.3. Efeitos das mudanças no uso do solo

As simulações, considerando apenas os efeitos das mudanças no uso do solo na produtividade da soja, indicam que os efeitos climáticos do plantio da soja acima da latitude de 5°S poderia levar à não sustentabilidade da soja nessas regiões (Figura 75).

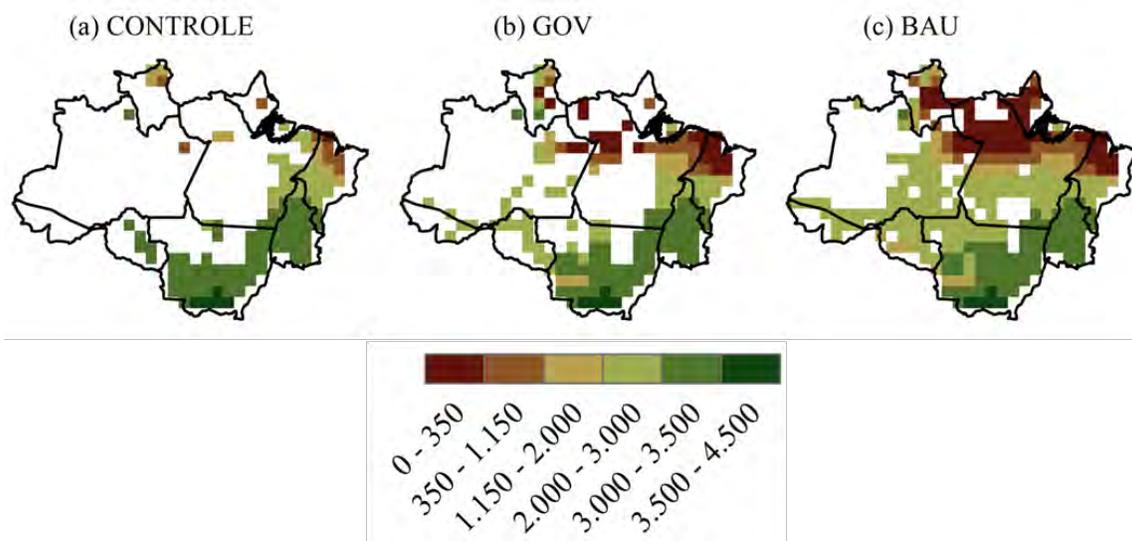


Figura 75. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários futuros de desmatamento obtidos por Soares-Filho et al. (2006) para o ano de 2050: controle (a), GOV (b) e BAU (c).

Anomalias médias de produtividade da soja variaram de $-520,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-19,2\%$ para o cenário de uso do solo “GOV” a $-644,4 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, que equivale a uma redução de $-23,8\%$ para o cenário climático de uso do solo “BAU” (Tabela 45). A diferença entre os dois cenários deve-se ao maior número de células desmatadas no cenário de uso do solo “BAU”.

Tabela 45. Produtividade média para o cenário controle ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e % de redução para cada cenário futuro de desmatamento obtidos por Soares-Filho et al. (2006) “BAU” e “GOV”, nos quais as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Anomalias ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	% de redução
GOV	2.704,7	-520,5	-19,2
BAU	2.704,7	-644,4	-23,8

4.4.6.4. Efeito radiativo e fisiológico da elevação de CO₂ e das mudanças no uso do solo

As anomalias médias de produtividade da soja, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO₂ e o cenário de desmatamento “BAU” para o ano de 2050, variaram entre -598 kg.ha⁻¹, que equivale a uma redução de -22,1% para o cenário climático proposto pelo modelo MRICGCM e -1.334,2 kg.ha⁻¹, que equivale a uma redução de -49,3% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da pastagem foi de -830,8 kgMS.ha⁻¹.a⁻¹, equivalente a uma redução de -30,7%, quando comparada à simulação controle (Tabela 46).

Tabela 46. Produtividade média para o cenário controle (kg.ha⁻¹), anomalias de produtividade (kg.ha⁻¹) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO₂ e o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle (kg.ha ⁻¹)	Anomalias (kg.ha ⁻¹)	% de redução
Clima Médio	2.704,7	-830,8	-30,7
CCSM3	2.704,7	-1.046,2	-38,7
CNRM3	2.704,7	-951,4	-35,2
GISSER	2.704,7	-560,8	-20,7
INMCM3	2.704,7	-971,1	-35,9
IPSLCM4	2.704,7	-745,2	-27,6
MIROC	2.704,7	-1.334,2	-49,3
MRICGCM	2.704,7	-598,0	-22,1

As anomalias médias de produtividade da soja, considerando os efeitos radiativo e fisiológico do CO₂ e o cenário de desmatamento “GOV” para o ano de 2050, variaram entre -450,5 kg.ha⁻¹, que equivale a uma redução de -16,7% para o cenário climático proposto pelo modelo MRICGCM e -1.208,1 kg.ha⁻¹, que equivale a uma redução de -44,7% para o cenário climático proposto pelo modelo MIROC. Para o cenário climático mais provável, o cenário de clima médio, a anomalia média de produtividade da pastagem foi de -732,2 kg.ha⁻¹, equivalente

a uma redução de -27,1%, quando comparada à simulação controle (Tabela 47). Reduções menores na produtividade média da pastagem para o cenário “GOV” ocorreram devido ao menor número de células desmatadas para este cenário quando comparado ao cenário “BAU”.

Tabela 47. Produtividade média para o cenário controle ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), anomalias de produtividade ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e % de redução para cada cenário climático futuro, considerando o efeito fisiológico da elevação da concentração de CO_2 e o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Anomalias ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	% de redução
Clima Médio	2.704,7	-732,2	-27,1
CCSM3	2.704,7	-847,3	-31,3
CNRM3	2.704,7	-807,4	-29,9
GISSER	2.704,7	-512,1	-18,9
INMCM3	2.704,7	-900,9	-33,3
IPSLCM4	2.704,7	-722,8	-26,7
MIROC	2.704,7	-1.208,1	-44,7
MRICGCM	2.704,7	-450,5	-16,7

A produtividade da soja simulada, considerando-se todos os efeitos combinados dos cenários futuros, indicam produtividades maiores que $2.000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ em 55% e 62% da área cultivada pela soja nos cenários “BAU” (Figura 76) e “GOV” (Figura 77), respectivamente. No entanto, a região acima da latitude de 5°S , que representa 35% da área cultivada nos dois cenários, apresenta produtividades inferiores a $1.150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

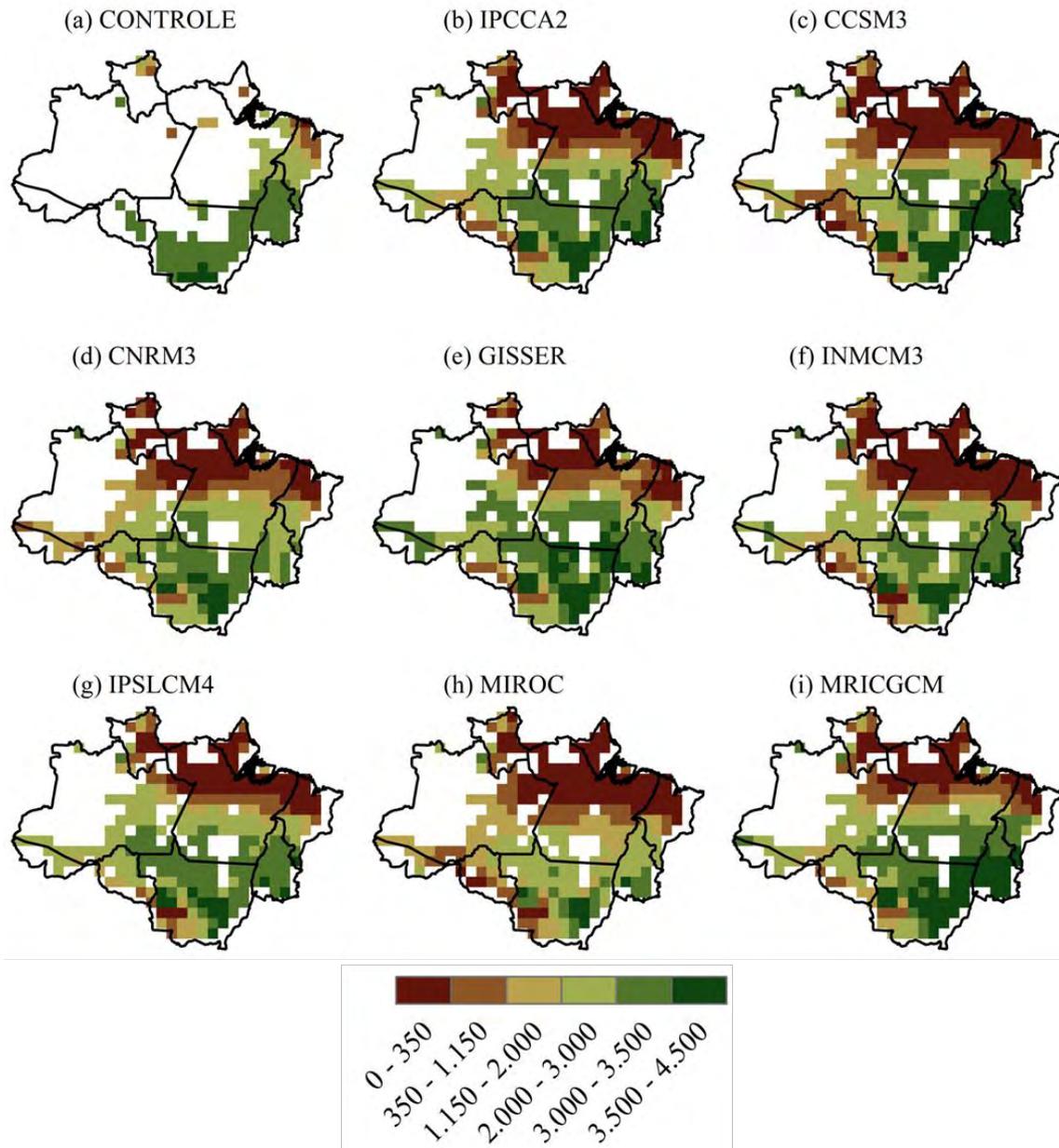


Figura 76. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “BAU”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

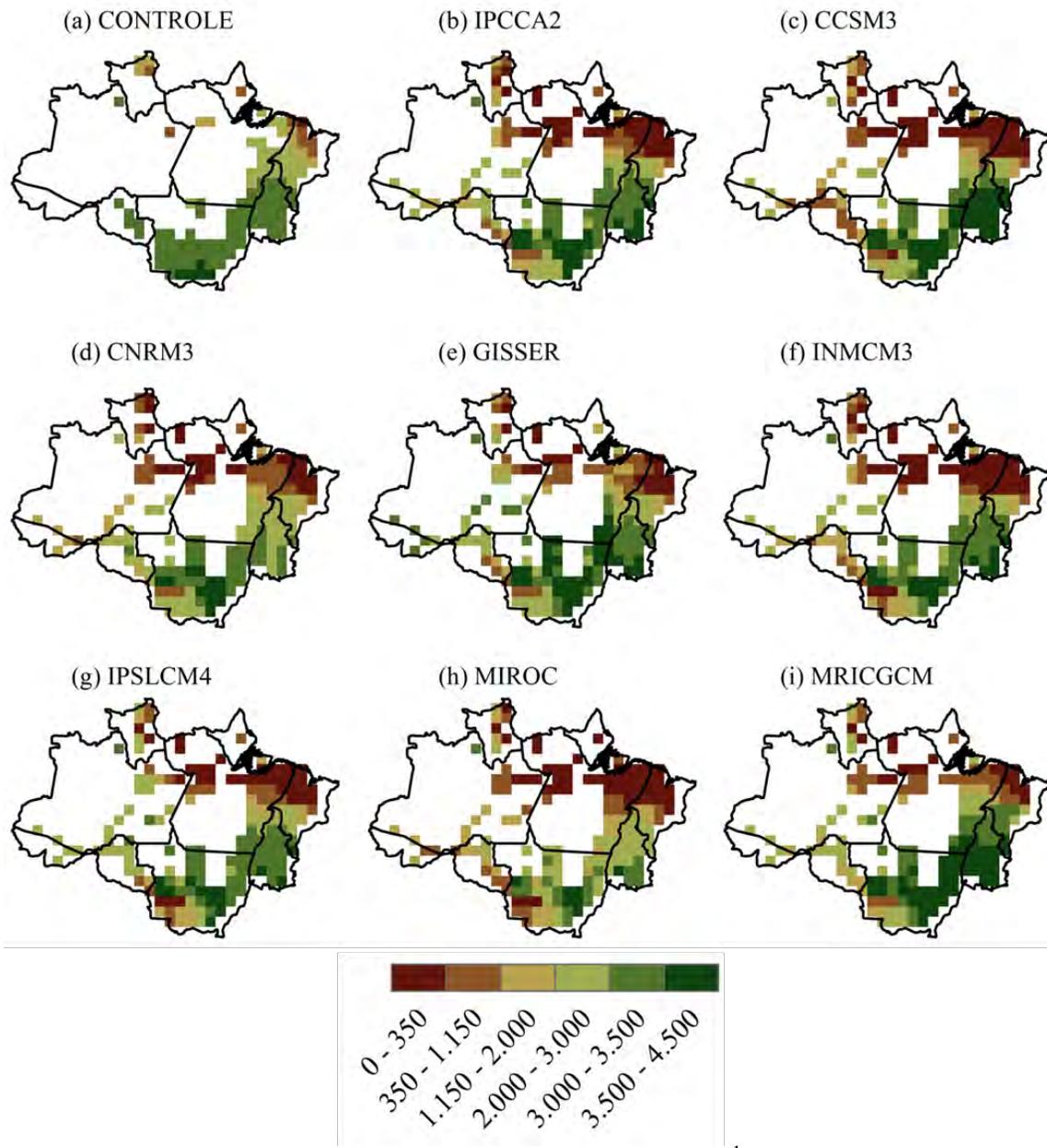


Figura 77. Distribuição espacial da produtividade da soja ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), considerando os cenários de clima futuro, o efeito fisiológico do CO_2 , o cenário de desmatamento “GOV”, no qual as células desmatadas foram substituídas pela soja para o ano de 2050: controle (a), IPCC2 (b), CCSM3 (c), CNRM3 (d), GISSER (e), INMCM3 (f), IPSLCM4 (g), MIROC (h) e MRICGCM (i).

4.4.6.5. Síntese

A Tabela 48 sintetiza os principais valores dos efeitos dos cenários futuros na produtividade da soja para o ano de 2020. Quando considerados os efeitos radiativo e fisiológico da concentração de CO₂, houve uma redução de -6,4% na produtividade da soja. No entanto, os cenários que consideraram o efeito climático da mudança no uso do solo indicaram reduções de até -30,7% (Tabela 48).

Tabela 48. Produtividade média para o cenário controle (kg.ha⁻¹), anomalias de produtividade (kg.ha⁻¹) e % de redução para cada cenário testado para o ano de 2050

CENÁRIO	Controle	Anomalias (kgC.m ⁻²)	% de redução
IPCC A2	2.704,7	-665,8	-24,6
IPCC A2+CO ₂	2.704,7	-172,5	-6,4
GOV	2.704,7	-520,5	-19,2
BAU	2.704,7	-644,4	-23,8
IPCC A2+CO ₂ +GOV	2.704,7	-732,2	-27,1
IPCC A2+CO ₂ +BAU	2.704,7	-830,8	-30,7

4.5. Avaliação da resiliência da floresta e das culturas agrícolas

Com a finalidade de avaliar a resiliência da floresta amazônica e das culturas agrícolas em reposta aos cenários futuros estudados, foi realizado o teste *t* de Student. Inicialmente, foi aplicado o teste *F*, com 95% de significância, para verificar-se se as variâncias das amostras eram iguais ou diferentes. Em seguida, aplicou-se o teste *t* adequado para cada amostra, também com 95% de significância. As Tabelas 49, 50 e 51 sintetizam os principais resultados estatísticos para os anos de 2020 e de 2050 para o ecossistema natural, a produtividade da pastagem e da soja, respectivamente. Nos cenários de clima futuro, foi analisado apenas o cenário de clima médio.

Para o ano de 2020, em termos de biomassa viva acima do solo, pode-se afirmar, com 95% de confiança pelo teste *t*, que as médias estimadas pelos diferentes cenários foi inferior à obtida na simulação controle para o ano de 2020 (Tabela 49). Já para o ano de 2050, as diferenças obtidas entre a biomassa viva acima do solo simulada para os cenários futuros e a biomassa da simulação controle são maiores. Neste caso, assim como para o ano de 2020, o teste *t* foi significativo para todos os cenários. Tais resultados indicam que os cenários futuros afetam a resiliência da floresta, não permitindo que ela volte a atingir os valores atuais em nenhum dos cenários estudados.

Tabela 49. Valores médios de biomassa viva acima do solo (kgC.m^{-2}), valores de *t* e de *p* para os anos de 2020 e de 2050. Valor médio de biomassa para o cenário controle é de $17,9 \text{ kgC.m}^{-2}$

CENÁRIO	Média	2020		2050		
		<i>t</i>	<i>p</i>	Média	<i>t</i>	<i>p</i>
IPCC A2	15,0	-11,44	<0,01	10,9	-23,22	<0,01
IPCC A2+CO ₂	16,7	-4,41	<0,01	14,5	-8,72	<0,01
BAU_PAS	11,9	-13,67	<0,01	6,9	-26,36	<0,01
BAU_SOJ	11,2	-14,04	<0,01	5,9	-26,94	<0,01
GOV_PAS	12,8	-11,98	<0,01	11,7	-14,11	<0,01
GOV_SOJ	12,2	-12,34	<0,01	11,0	-14,49	<0,01
IPCC A2+CO ₂ +BAU_PAS	11,9	-13,31	<0,01	7,4	-22,26	<0,01
IPCC A2+CO ₂ +BAU_SOJ	11,3	-13,73	<0,01	6,4	-23,07	<0,01
IPCC A2+CO ₂ +GOV_PAS	12,7	-11,91	<0,01	11,2	-14,02	<0,01
IPCC A2+CO ₂ +GOV_SOJ	12,1	-12,29	<0,01	10,5	-14,48	<0,01

Os valores médios de produtividade da pastagem para o ano de 2020 foram menores que aqueles obtidos na simulação controle, com 95% de confiança pelo teste *t*, apenas nos cenários em que foram considerados os efeitos climáticos do desmatamento. No que se refere ao ano de 2050, apenas para o cenário em que foram avaliados os efeitos radiativo e fisiológico do CO₂ (valor em destaque na Tabela 50), o teste *t* não foi significativo. Para os demais, a média da produtividade da pastagem foi sempre inferior à da simulação controle. Estes resultados mostram

que a produtividade da pastagem para o ano de 2020 apenas é resiliente se não houver expansão da área plantada. Já para 2050, o único cenário em que a produtividade da pastagem é resiliente é aquele em que se consideram os efeitos radiativos e fisiológicos do CO₂.

Tabela 50. Valores médios de produtividade da pastagem (MgMS.ha⁻¹.a⁻¹) valores de *t* e de *p* para os anos de 2020 e de 2050. Valor médio de produtividade da pastagem para o cenário controle é de 16,2 MgMS.ha⁻¹.a⁻¹

CENÁRIO	2020			2050		
	Média	<i>t</i>	<i>p</i>	Média	<i>t</i>	<i>p</i>
IPCC A2	16,0	-0,49	0,62	15,0	-3,10	<0,01
IPCC A2+CO ₂	16,4	0,53	0,60	16,3	0,07	0,95
BAU_PAS	11,6	-9,30	<0,01	11,0	-13,02	<0,01
GOV_PAS	11,9	-7,97	<0,01	11,6	-9,05	<0,01
IPCC A2+CO ₂ +BAU_PAS	11,5	-9,16	<0,01	10,8	-13,08	<0,01
IPCC A2+CO ₂ +GOV_PAS	11,8	-7,89	<0,01	11,4	-9,26	<0,01

Para a cultura da soja (Tabela 51), valores médios obtidos para os cenários foram sempre inferiores ao valor médio da simulação controle. No entanto, para os cenários em que foram considerados somente o efeito radiativo e fisiológico do CO₂, com 95% de confiança, pode-se verificar pelo teste *t* que as médias obtidas para os anos de 2020 e 2050 são iguais à média da simulação controle (valor em destaque na Tabela 51). Em todos os outros cenários, o teste *t* foi significativo. Observa-se ainda que os valores mais baixos de produtividade são encontrados nos cenários em que as mudanças climáticas, motivadas pela mudança na composição atmosférica e pelo desmatamento, são avaliadas conjuntamente. Apenas no cenário em que são considerados os efeitos radiativo e fisiológico do CO₂, a produtividade da soja é resiliente.

Tabela 51. Valores médios de produtividade da soja ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) valores de t e de p para os anos de 2020 e de 2050. Valor médio de produtividade da pastagem para o cenário controle é de $2,7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$

CENÁRIO	2020			2050		
	Média	t	p	Média	t	p
IPCC A2	2,4	-2,24	<0,01	2,0	-5,40	<0,01
IPCC A2+CO ₂	2,6	-0,74	0,46	2,5	-1,28	0,20
BAU_SOY	2,2	-3,82	<0,01	2,0	-6,05	<0,01
GOV_SOY	2,2	-3,59	<0,01	2,2	-4,29	<0,01
IPCC A2+CO ₂ +BAU_SOY	2,1	-4,66	<0,01	1,8	-7,40	<0,01
IPCC A2+CO ₂ +GOV_SOY	2,1	-4,42	<0,01	1,9	-5,62	<0,01

De maneira geral, em termos da resiliência, pode-se afirmar que o estoque de carbono não é resiliente em nenhum dos cenários testados e as produtividades da soja e da pastagem só são resilientes se não houver expansão da área plantada.

4.6. Discussão do efeito da política pública (GOVxBAU) no estoque de carbono, produção de soja e carne

O estoque de carbono, a produção de carne e de soja para os diferentes cenários podem ser verificados nas Tabelas 52, 53 e 54, respectivamente. Para os cenários: controle, BAU 2020, BAU 2050, GOV 2020 e GOV 2050 foram consideradas, respectivamente, as áreas de $1.496.086,7 \text{ km}^2$, $2.151.390,2 \text{ km}^2$, $3.622.743,3 \text{ km}^2$, $1.879.375,4 \text{ km}^2$ e $2.200.847,5 \text{ km}^2$ para o cálculo da produção de soja e de carne.

Já para o cálculo do estoque de carbono, considerou-se a área de $5.118.825 \text{ km}^2$. Tal valor inclui a área já desmatada na Amazônia Legal. Por isso, o estoque de carbono na simulação controle de $91,6\pm 13,2 \text{ PgC}$ (incerteza refere-se ao intervalo de confiança de 95%) é muito superior aos valores encontrados em outros trabalhos - por exemplo, Leite *et al.* (2012) encontraram o valor de $64,4\pm 17,1$ (90% de confiança) para o bioma Amazônia. No entanto,

quando se considera apenas a área ocupada pela floresta (3.622.743,3 km²), o estoque de carbono é de 64,8±11,1 PgC.

Para o ano de 2020, os cenários “GOV” apresentam um estoque de carbono 8% superior ao observado para os cenários “BAU”, independentemente da cultura analisada, embora a diferença na área desmatada entre tais cenários é de 12%. Já para o ano de 2050, os estoques de carbono nos cenários “GOV” são 65% superiores ao estoque de carbono no cenário “BAU”, com uma diferença de apenas 30% entre as áreas desmatadas pelos dois cenários. Essas diferenças se mantêm quando se avaliam os cenários em que estão imbutidos todos os efeitos (Tabela 52).

Tabela 52. Estoque de carbono na biomassa viva acima do solo (PgC) na Amazônia Legal Brasileira nos diferentes cenários avaliados e intervalo de confiança de 95%. O estoque de carbono na simulação controle é de 91,6±13,2 PgC

CENÁRIOS	2020	2050
IPCC A2	76,8±12,2	55,7±12,7
IPCC A2 +CO ₂	85,4±12,4	74,4±13,6
BAU_PAS	60,8±14,2	35,6±13,9
BAU_SOY	57,5±14,6	30,2±14,3
GOV_PAS	65,4±14,1	59,8±14,2
GOV_SOY	62,3±14,5	56,4±14,5
IPCC A2 + CO ₂ +BAU_PAS	60,9±14,3	37,9±14,5
IPCC A2 + CO ₂ +BAU_SOY	57,6±14,7	32,5±14,8
IPCC A2 + CO ₂ +GOV_PAS	64,9±14,2	57,5±14,6
IPCC A2 + CO ₂ +GOV_SOY	61,9±14,5	54,0±14,9

Para a estimativa da produção de carne, foram adotados os valores de conversão alimentar, índice que representa a eficiência com que o animal converteu o alimento consumido em carne, de 4,61 kgMS/kg de GMD obtido por Ramos *et al.* (2000) na análise de 16 novilhos em regime de confinamento e de 6,75 kgMS/kg de GMD obtido por Perotto *et al.* (2000) na análise de 80 machos bovinos semi-confinados. Assim, a produção de carne variou de 245,9±7,9 milhões de toneladas a 360,1±11,6 milhões de toneladas (incerteza refere-se ao intervalo de confiança de 95%) para a simulação controle. A produção de carne apresentou diferenças

significativas entre os cenários “GOV” e “BAU”. Para o ano de 2020, tais diferenças foram de 11% e para o ano de 2050, foram de 56% (Tabela 53) para os dois valores de conversão alimentar.

Tabela 53. Produção de carne em milhões de toneladas, considerando que toda a área desmatada seria ocupada pela pastagem nos diferentes cenários avaliados e intervalo de confiança de 95%.

CENÁRIOS	2020		2050	
	CA1 ¹	CA2 ²	CA1	CA2
IPCC A2	243,1±8,1	355,9±11,9	227,8±8,3	333,5±12,2
IPCC A2 +CO ₂	248,9±8,2	364,6±12,1	246,3±8,8	360,6±12,9
BAU_PAS	251,8±18,2	368,7±26,6	405,4±21,2	593,6±31,1
GOV_PAS	226,2±17,7	331,2±25,9	259,4±18,9	379,8±27,6
IPCC A2 + CO ₂ +BAU_PAS	250,7±18,9	367,1±27,6	396,5±22,8	580,5±33,4
IPCC A2 + CO ₂ +GOV_PAS	225,0±18,3	329,5±26,8	253,6±19,7	371,3±28,8

1 CA1 refere-se a conversão alimentar segundo Ramos *et al.* (2000)

2 CA2 refere-se a conversão alimentar segundo Peroto *et al.* (2000)

A produção de soja na simulação controle é de 404,6±24,0 milhões de toneladas (incerteza refere-se ao intervalo de confiança de 95%), considerando que toda a área desmatada na Amazônia Legal seria ocupada pelo seu cultivo. Comparando-se os resultados obtidos pelos cenários “GOV” e “BAU”, constata-se que o aumento na produção nos cenários “BAU” não é proporcional ao aumento na área desmatada. Isso ocorre devido ao fato de as áreas onde possivelmente a expansão da soja aconteceria apresentarem baixas produtividades.

Tabela 54. Produção de soja em milhões de toneladas, considerando que toda a área desmatada seria ocupada pela soja nos diferentes cenários avaliados e intervalo de confiança de 95%. A produção de soja na simulação controle é de 404,6±24,0 milhões de toneladas

CENÁRIOS	2020	2050
IPCC A2	364,8±25,3	305,0±27,0
IPCC A2 +CO ₂	391,1±26,5	378,8±31,4
BAU_SOY	482,5±37,5	746,4±48,4
GOV_SOY	422,9±35,6	480,8±38,6
IPCC A2 + CO ₂ +BAU_SOY	457,3±39,4	678,9±54,4
IPCC A2 + CO ₂ +GOV_SOY	400,2±37,3	434,1±43,7

De modo geral, observou-se que, em relação ao período atual, houve quedas no estoque de carbono e aumentos na produção de soja e carne em todos os cenários futuros avaliados. Vale destacar aqui que os aumentos na produção agrícola devem-se à expansão da área plantada, uma vez que a produtividade das duas culturas é inferior à observada no período atual.

4.7. Qual agente externo é mais importante (desmatamento ou aquecimento global)? Qual tipo de governança é mais importante (governança no uso do solo, mitigação de CO₂ ou adaptação às mudanças climáticas)?

Assumindo-se que o aquecimento global é inevitável, pode-se verificar nas simulações que apenas ele poderia levar à redução de 7% e de 17% da biomassa viva acima do solo do ecossistema natural nos anos de 2020 e 2050, respectivamente. Os efeitos climáticos do desmatamento somados ao aquecimento global causariam uma redução da biomassa viva acima do solo, num percentual de 11% (cenário “GOV”) e 37% (cenário “BAU”) para o ano de 2020 e de 33% (cenário “GOV”) e 65% (cenário “BAU”) para o ano de 2050.

Tais resultados indicam que o desmatamento é uma força importante no ecossistema natural. Portanto, a identificação de áreas estratégicas para a preservação do ecossistema natural deve ser priorizada pelos tomadores de decisão para a conservação deste importante bioma. Sabe-se que o desmatamento não está distribuído uniformemente em toda a região amazônica, mas em diferentes intensidades e em diferentes regiões ou estados. A maioria do desmatamento concentra-se na proximidade de estradas, por isso, planos para controle territorial ao longo dos eixos das principais estradas são necessários. Isto significa que esforços governamentais para combater o desmatamento devem centrar-se em estados específicos, municípios ou regiões e não se diluir no território continental da Amazônia. Áreas críticas devem ser objetos de negociações na definição e na manutenção de incentivos. Restrições temporárias sobre os investimentos que

causam desmatamento poderiam ser adotadas em determinadas regiões. Da mesma forma, as metas quantitativas para a redução do desmatamento poderiam ser estabelecidas por lei para regiões críticas. Isso exigiria, todavia, medidas complementares para evitar-se a transferência de atividades predatórias para outras áreas.

Para as culturas agrícolas, observou-se que a expansão da área plantada não aumentou a produção na mesma proporção, pois os efeitos combinados das mudanças climáticas causadas pela mudança na composição atmosférica e pela mudança no uso do solo provocaram uma redução significativa na produtividade das duas culturas. Por esta razão, deve-se buscar o desenvolvimento de novos cultivares adaptados às condições climáticas futuras. Deste modo, seria possível fortalecer a agropecuária na Amazônia, aproveitando melhor as áreas já desmatadas e sem a necessidade de avançar-se de forma tão acelerada nas florestas.

4.8. Avaliação socioeconômica dos resultados

A busca de soluções capazes de conter o avanço da agropecuária e o crescente desmatamento da Amazônia é um grande desafio, já que a conversão do uso do solo para a expansão agrícola na Amazônia apresenta um impasse. Por um lado, a agricultura é essencial para a oferta de alimentos; ademais, o custo de oportunidade da conversão da floresta em pastagem ou produção agrícola é muito grande. Por outro lado, a agricultura em larga escala está degradando serviços ecossistêmicos dos quais é dependente, como por exemplo, a regulação do clima.

As simulações realizadas neste trabalho indicaram que a retirada da floresta para a expansão da soja e da pecuária em algumas regiões amazônicas - regiões acima da latitude de 5° S nos estados do Pará, Maranhão e Roraima podem provocar perda significativa da

produtividade, tanto da pastagem, quanto da soja, devido aos efeitos climáticos decorrentes desta mudança no uso do solo.

De acordo com estes resultados, pode-se inferir que o desenvolvimento agrícola estaria comprometido nestas regiões. Isto deve-se à possibilidade de a substituição da floresta pela agricultura, além de provocar uma perda no estoque de carbono armazenado na floresta, levar a quedas na produção de alimentos, uma vez que a produtividade nestas regiões seria muito baixa. Outra consequência deste cenário seria o aumento das áreas abandonadas, acelerando o desmatamento. Isto ocorreria porque, muitas vezes, é mais barato e mais lucrativo desmatar novas áreas do que investir no aumento da produtividade das áreas já desmatadas.

Em termos de formulação de políticas públicas, sugere-se que os tomadores de decisão avaliem a viabilidade econômica da recuperação das áreas abandonadas para uso agrícola, evitando assim que novas áreas sejam desmatadas. Segundo Rossi (2010), é possível dobrar a produção agropecuária brasileira sem derrubar árvores. Para isso, seria necessário aumentar a produtividade das áreas já desmatadas, principalmente nos 100 milhões de hectares de pastos degradados no país. Assim, recuperar e reincorporar áreas degradadas ao sistema produtivo é um excelente caminho para conciliar desenvolvimento com conservação dos recursos naturais. Desse modo, não apenas o desmatamento será reduzido, como também suas causas subjacentes, tais como a procura de terras férteis. Esforços governamentais para combater o desmatamento devem ainda seguir as novas tendências para as políticas florestais no mundo, ou seja, caminhar no sentido de atribuir valor às florestas. As florestas precisam ser valorizadas, não apenas pelos produtos que elas ofertam para o mercado, como também pelos serviços ecológicos que elas apresentam, como é o caso do sequestro de carbono e da regulação do clima.

5. CONCLUSÕES

5.1. Resumo

Os serviços ambientais são cruciais para o funcionamento e a manutenção da vida no sistema Terra. Eles contribuem direta e indiretamente para o bem-estar humano e, portanto, representam parte do valor total econômico do planeta (Constanza *et al.*, 1997). Mudanças do uso da terra em todo o mundo estão sendo impulsionadas pela necessidade de fornecerem-se alimentos, fibras, água e abrigo para mais de seis bilhões de pessoas. Áreas agrícolas e urbanas têm se expandido nas últimas décadas, fator atrelado a grandes aumentos no consumo de energia, água e fertilizantes, juntamente com consideráveis perdas de biodiversidade. Tais mudanças no uso da terra têm permitido a apropriação de uma parcela crescente dos recursos do planeta, porém, elas também afetam a capacidade dos ecossistemas de sustentar a produção de alimentos, manter os recursos de água doce e florestas, regular o clima e a qualidade do ar e melhorar as doenças infecciosas. Enfrentamos o desafio de gerenciar as necessidades humanas imediatas e a manutenção da capacidade da biosfera de prover bens e serviços no longo prazo (Foley *et. al.*, 2005). Esta é exatamente a situação atual da Amazônia Legal Brasileira, que enfrenta forte pressão de conversão de florestas para plantações e pastagens de gado (Nepstad *et al.*, 2008). Além de fornecer matérias-primas agrícolas e madeira, estas paisagens também podem sequestrar e armazenar carbono, regular os fluxos de água doce dos rios e influenciar os padrões regionais de clima (Foley *et al.*, 2007).

Outro motor de mudança ambiental na Amazônia é a alteração na composição atmosférica, o que pode provocar mudanças no clima global. Modelos climáticos globais estimam que o crescente acúmulo de gases de efeito estufa associado a aumentos na forçante radiativa da atmosfera provocará um declínio substancial (mais de 20%) das chuvas na Amazônia oriental até o final do século, com a maior queda ocorrendo no período seco (Malhi *et al.*, 2008).

Além do efeito radiativo das moléculas de CO₂ na atmosfera, como um gás de efeito estufa, existe também um efeito adicional do CO₂ atmosférico nos processos do dossel da vegetação, já que a pressão parcial mais elevada de CO₂ na atmosfera frequentemente estimula a fotossíntese do dossel e diminui a condutância estomática, aumentando a eficiência do uso de água das plantas, em especial, as plantas do tipo C3.

Dentro desse contexto, este trabalho concentrou-se em três principais serviços fornecidos pela Amazônia: regulação do clima, armazenamento de carbono e produtividade agrícola. Para isto, avaliou-se como os padrões climáticos locais são modificados por diferentes cenários de desmatamento, considerando-se também o papel dos efeitos radiativos e fisiológicos do CO₂ sobre estes serviços ambientais. O principal objetivo desta pesquisa foi avaliar a resiliência do ecossistema natural e da produtividade da soja e da pastagem em cenários futuros de desmatamento e aumento da [CO₂].

As resiliências do armazenamento de carbono pelo ecossistema natural, da produtividade da soja e da pastagem na Amazônia foram avaliadas em vários níveis de desmatamento e aumento da [CO₂], utilizando-se um modelo simplificado que representa as interações entre o clima e o uso da terra.

Foram realizados cinco conjuntos de simulações: (1) controle, (2) efeito radiativo (aquecimento global) do CO₂, (3) efeitos radiativo e fisiológico do CO₂, (4) efeito climático da mudança no uso do solo e (5) efeitos radiativo e fisiológico do CO₂ + mudanças no uso do solo. Em seguida, as produtividades simuladas, considerando todos os efeitos dos cenários futuros para os anos de 2020 e 2050, foram comparadas à simulação controle. Os efeitos combinados das mudanças climáticas causadas pela mudança na composição atmosférica e pela mudança no uso do solo provocaram uma redução significativa na produtividade do ecossistema natural e das duas culturas agrícolas analisadas. De maneira geral, o efeito do desmatamento foi o mais importante para essa redução.

5.2. Conclusões

O modelo apresentou bom desempenho para simular, tanto a produtividade do ecossistema natural, quanto das culturas agrícolas para as condições atuais.

Nas simulações considerando apenas as condições climáticas futuras, houve decréscimo significativo, tanto da produtividade, quanto da biomassa do ecossistema natural em todos os modelos testados. O efeito fisiológico do CO₂ apenas foi suficiente para atenuar os efeitos negativos das condições climáticas futuras na região ocidental da Amazônia para o ecossistema natural. O decréscimo da biomassa do ecossistema natural, considerando apenas o efeito das mudanças no uso do solo, foi significativo para todos os cenários testados. Quando combinados todos os cenários futuros, os efeitos negativos são mais acentuados, pois os efeitos negativos das condições climáticas futuras e do desmatamento se somam.

Alterações simuladas na produtividade das soja, considerando-se apenas as condições climáticas futuras, indicaram tendência de queda em todas as regiões. Com a introdução do efeito

fisiológico do CO₂, essa tendência foi minimizada, principalmente para o ano de 2050. Ao considerar-se também o efeito climático do desmatamento nas simulações, verificou-se que as quedas foram mais acentuadas, especialmente para a região acima da latitude de 5°S. Para esta região, o efeito das mudanças no uso do solo foi o mais importante.

Simulações dos efeitos dos cenários futuros na produtividade da pastagem indicaram que a diminuição da precipitação provocada pelo desmatamento é o maior responsável pelas quedas na produtividade futura dessa cultura.

Em termos de resiliência, pode-se inferir que o armazenamento de carbono na Amazônia brasileira não é resiliente, em qualquer dos cenários testados, enquanto produtividade de soja e pastagens são resilientes apenas nos cenários em que não há expansão da área plantada.

A identificação de áreas estratégicas para a preservação de ecossistemas naturais associada ao desenvolvimento de novos cultivares adaptados às futuras condições climáticas poderia fortalecer a agropecuária na Amazônia. Esta identificação viabilizaria melhor uso de áreas já desmatadas, sem a necessidade de avançar-se tão rapidamente nas florestas remanescentes.

5.3. Recomendações para pesquisas futuras

Apesar de o modelo ter apresentado bom desempenho para simular a produtividade das culturas agrícolas e do ecossistema natural, sugere-se a incorporação dos seguintes módulos ao modelo:

- Incorporar o consumo pelo gado no modelo de pastagem;
- Adaptar e testar o modelo para outras culturas e outras regiões;
- Acoplar o modelo desenvolvido à modelos de rentabilidade da soja e da pecuária;
- Avaliar outros serviços ambientais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, D.; ARTAXO, P.; COSTA, A. A.; FRANK, G. P.; LONGO, K.M.; SILVA-DIAS, M. A. F. Smoking rain clouds over the Amazon, **Science**, v..303, p.1337-1342, 2004.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; METCALFE, D. B.; SILVA-ESPEJO, J. E.; JIMÉNEZ, E.; NAVARRETE, D.; ALMEIDA, S.; COSTA, A. C. L.; SALINAS, N.; PHILLIPS, O. L.; ANDERSON, L. O.; BAKER, T. R.; GONCALVEZ, P. H.; HUAMÁN-OVALLE, J.; MAMANI-SOLÓRZANO, M.; MEIR, P.; MONTEAGUDO, A.; PEÑUELA, M. C.; PRIETO, A.; QUESADA, C. A.; ROZAS-DÁVILA, A.; RUDAS, A.; SILVA JUNIOR, J. A.; VÁSQUEZ, R. Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. **Biogeosciences**, v.6, p.2759-2778, 2009.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophys. Res. Lett.** v.34, L07701, 2007.

BAKER, T. R.; PHILLIPS, O. L.; MALHI, Y.; Almeida, S.; Arroyo, L.; Di Fiore, A.; Erwin, T.; Higuchi, N.; Killeen, T. J.; Laurance, S. G.; Laurance, W. F.; Lewis, S. L.; Monteagudo, A.; Neill, D. A.; Vargas, P. N.; Pitman, N. C. A.; Silva, J. N. M.; Martínez, R. V. Increasing biomass in Amazonian forest plots. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.** **359**, p. 353–365. doi: 10.1098/rstb.2003.1422, 2004.

BETTS, R.; SANDERSON, M.; WOODWARD, S. Effects of large-scale Amazon forest degradation on climate and air quality through fluxes of carbon dioxide, water, energy, mineral dust and isoprene. **Phil. Trans. R. Soc. B.** (doi:10.1098/rstb.2007.0027), 2007.

BETTS R. A.; COX, P. M.; HARRIS, C.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C. D. The role of ecosystem atmosphere interactions in simulated Amazon forest dieback under global climate warming. **Theoretical and Applied Climatology**, v.78, p.157-175, 2004.

BOONS-PRINS, E. R.; KONING DE, G. H. J., VAN DIEPEN, C. A.; PENNING DE VRIES, F. W. T. **Crop-specific parameters for yield forecasting across the European Community: simulation reports.** Wagening, CABBO-TT-32. 160p, 1993.

BUTT, N.; OLIVEIRA, P. A. DE.; COSTA, M. H. Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v.116, D11120, doi:10.1029/2010JD015174.

CATTANEO, A. Balancing Agricultural Development and Deforestation in the Brazilian Amazon. Research Report 129, **International Food Policy Research Institute**, 2002.

CARDILLE, J. A.; FOLEY, J. A. Agricultural land-use change in Brazilian Amazônia between 1980 and 1995: Evidence from integrated satellite and census data. **Remote Sensing of Environment**, v.87, p.551–562, 2003.

CLARK, D. A. Sources or sinks? The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition. **Phil. Trans. R. Soc. B** **359**, 477- 491. doi:10.1098/rstb.2003.1426, 2004.

CRAMER, W.; BONDEAU, A.; SCHAPHOFF, S.; LUCHT, W.; SMITH, B.; SITCH, S. Tropical forests and the global carbon cycle: Impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation. **Philos. Trans. Roy. Soc. London**, 359B, p. 331-343, 2004.

CHAMBERS, J. Q.; SILVER, W. L. Some aspects of ecophysiological and biogeochemical responses of tropical forests to atmospheric change. **Phil. Trans. R. Soc. B**, doi:10.1098/rstb.2003.1424, 2004.

CORRÊA, S. T. R. **Adaptação do modelo LINTUL (Light Interceptation and Utilization) para estimação da produtividade potencial da cultura da soja**. 106f. 2008. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, MG, 2008.

CORREIA, F. W. S.; ALVALÁ, R. C. DOS S.; MANZI, A. O. Impacto das Modificações da Cobertura Vegetal no Balanço de Água na Amazônia: Um estudo com Modelo de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, p.153-167, 2006.

COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v.283, p.206-217, 2003.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentration on the climate of Amazonia. **Journal of Climate**, v.13, p. 18-34, 2000.

COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; GROOT, R.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R. V.; PARUELO, J.; RASKIN, R. G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v.387, p.253-260, 1997.

COWLING, S. A.; SHIN, Y.; PINTO, E.; JONES, C. D. Water recycling by Amazonian vegetation: coupled versus uncoupled vegetation–climate interactions. **Philos. Trans. Roy. Soc. London B**, (doi:10.1098/rstb.2007.0035), 2008.

DAVIDSON, E. A.; ARAÚJO, A. C. de.; ARTAXO, P.; BALCH, J.K.; BROWN, F.; BUSTAMANTE, M. M. C.; COE, M. T.; DEFRIES, R.S.; KELLER, M.; LONGO, M.;

MUNGER, W.; SCHROEDER, W.; SOARES-FILHO, B. S.; SOUZA JR, C, M.; WOFSY, S. C.. The Amazon Basin in transition. **Nature**, v.481, p.321-328, 2012.

DAVIDSON, E. A; CARVALHO, C. J. R; FIGUEIRA, A. M; ISHIDA, F. Y; OMETTO, J. P. O. B; NARDOTO, G. B; SABA, R. T, HAYASHI, S. N; LEAL, E. C; VIEIRA, I. C. G.; MARTINELLI, L. A. Recuperation of nitrogen cycling in Amazonian forests following agricultural abandonment. **Nature**, v. 447, p. 995-999, 2007.

DAVIDSON, E. A.; ARTAXO, P. Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: results of the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment. **Global Change Biology**, v.10, p.519-529, 2004.

DICKINSON, R. E. Implications of tropical deforestation for climate: A comparison of model and observational descriptions of surface energy and hydrological balance. **Philos. Trans. Roy. Soc. London**, 324B, p. 423-429, 1989.

DIRZO, R.; RAVEN, P. H. Global state of biodiversity and loss. **Annual Review of Environment and Resources**, 28, p 137-167. 2003. doi: 10.1146/annurev.energy.28.050302.105532

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte (Campo Grande). *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Campo Grande, MS: **EMBRAPA – CNPGC**, 1985. Folder.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazônica**, v.36, p.395-400, 2006.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e conseqüências. **Megadiversidade**, v.1, p.114-123, 2005.

FEARNSIDE, P. M. Limiting Factors for Development of Agriculture and Ranching in Brazilian Amazonia. **Revista Brasileira de Biologia**, v.57, p.531-549, 1997.

FEARNSIDE, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: the effect of population and land tenure. **Ambio**, v.22, p.537-45, 1993.

FOLEY, J. A.; ASNER, G. P.; COSTA, M. H.; COE, M. T.; DEFRIES, R.; GIBBS, H. K.; HOWARD, E. A.; OLSON, S.; PATZ, J.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v.5, p.25-32, 2007.

FOLEY, J A.; DEFRIES, R.; ASNER, G P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global consequences of land use. **Science**, v.309, p.570-574, 2005.

FOLEY, J. A.; COSTA, M. H.; DELIRE, C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v.1, p. 38-44, 2003.

FOLEY, J. A.; BOTTA, A.; COE, M. T.; COSTA, M. H. 2002. El Niño–Southern oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, v.16, p.791-7917, 2002.

GARSTANG, M.; MASSIE JR., H. L.; HALVERSON, J.; GRECO, S.; SCALA, J: Amazon coastal squall lines, part I: Structure and kinematics. **Mon. Wea. Rev.**, v.112, p.608-622, 1994.

GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A. Climatic effects of Amazonian deforestation: Some results from ABRACOS, **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v.78, p. 823-830, 1997.

HIRSCH, A. I.; LITTLE, W. S.; HOUGHTON, R. A.; SCOTT, N. A.; WHITE, J. D. The net carbon flux due to deforestation and forest re-growth in the Brazilian Amazon: analysis using a process-based model. **Global Change Biology**, v.10: p.908-924, 2004.

HOLLING, C. S. Surprise for Science, Resilience for Ecosystems, and Incentives for People. **Ecological Applications**, v.6, p.733-735, 2006.

HOUGHTON, R. A.; SKOLE, D. L.; NOBRE, C. A.; HACKLER, J. L.; LAWRENCE, K. T.; CHOMENTOWSKI, W. H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, v.403, p.301-304, 2000.

IBGE. **Produção agrícola municipal**. Disponível em: < <http://www.sidra.ibge.gov.br>>.

IPCC. 2007a. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 581-615.

IPCC. 2007b. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Summary for Policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1-22.

IPCC. 2007c. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. D. Solomon *et al.*, Eds.(Cambridge Univ. Press, Cambridge and New York, 2007).

KILLEEN, T. J.; SOLÓRZANO, L. A. 2007. Conservation strategies to mitigate impacts from climate change in Amazonia. **Phil. Trans. R. Soc. B**, doi:10.1098/rstb.2007.0018, 2008.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v.95: p.209-228, 1997.

LAURANCE, W. F.; LAURANCE, S. G.; FERREIRA, L. V.; RANKIN-DE MERONA, J. M.; THOMAS, C. G.; LOVEJOY, E. Biomass Collapse in Amazonian Forest Fragments. **Science**, v.278, 1117- 1118, 1997.

LEAN, J.; WARRILOW, D. A. Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation. **Nature**, v.342, p.411-413, 1984.

LEITE, C. C.; COSTA, M. H.; SOARES-FILHO, B. S.; HISSA, L. de. B. V. Historical land use change and associated carbon emissions in Brazil from 1940 to 1995. **Global Biogeochemical Cycles**, v.26, GB2011, doi:10.1029/2011GB004133, 2012.

LI, W.; FU, R.; DICKINSON, E. 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, 2006.

LITTLE, W. S. An Enhanced Version of CARLUC that Utilizes Moisture-Dependent Environmental Data, 2007.

LLOYD, J.; FARQUHAR, G. D. Effects of rising temperatures and [CO₂] on the physiology of tropical forest trees. **Phil. Trans. R. Soc. B**. doi:10.1098/rstb.2007.0032, 2008.

MCGRATH, D. A.; SMITH, C. K.; GHOLZ, H. L.; OLIVEIRA, F. A. Effects of land-use change on soil nutrient dynamics in Amazonia. **Ecosystems**, v.4, 625-645, 2001.

McCALL, D. G.; HURLEY, B. A pasture growth model for use in a whole-farm dairy production model. **Agricultural Systems**, v.76, p.1183–1205, 2003.

MALHI, Y. R.; ARAGÃO, L. E. O. C.; METCALFE, D. B.; PAIVA, R.; QUESADA, C. A.; ALMEIDA, S.; ANDERSON, L.; BRANDO, P.; CHAMBERS, J. Q.; COSTA, A. C. L. da.; HUTYRA, L. R.; OLIVEIRA, P.; PATIÑO, S.; PYLE, E. H.; ROBERTSON, A. L.; TEIXEIRA, L. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. **Global Change Biology**, v.15, p.1255-1274, 2009.

MALHI, Y.; ROBERTS, J. T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. **Global Change Biology**, v.12, p. 1107-1138, 2008.

MALHI, Y.; WOOD, D.; BAKER, T. R.; WRIGHT, J. S.; PHILLIPS, O. L.; COCHRANE, T.; MEIR, P.; CHAVE, J.; ALMEIDA, S.; ARROYO, L.; HIGUCHI, N.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, S. G.; LAURANCE, W. F.; LEWIS, S.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. da.; VARGAS, P. N.; PITMAN, N. C. A.; QUESADA, C. A.; SALOMÃO, R.; SILVA, J. N.; LEZAMA, A. M.; TERBORGH, J.; MARTINEZ, R.V.; VINCENT, B. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. **Science**, v.319, p.169-172, 2006.

- MALHI, Y.; WRIGHT, J. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. **Phil. Trans. R. Soc. Lond.** **359B**, p.311–329, 2004.
- MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forest and atmospheric carbon dioxide. **Trends Ecol. Evol.**, v.15, p.332-337, 2000.
- MARENGO, J. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. **Theoretical and Applied Climatology**, v.78, p.79-96, 2004.
- MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v.281, p.227-294, 1977.
- MOORCROFT, P. R. Recent advances in ecosystem–atmosphere interactions: an ecological perspective. **Proc. R. Soc. Lond.**, v.270B, p.1215-1227, 2003.
- MORAN, E. F. Deforestation and land use in the Brazilian Amazon. **Human Ecology**, v.21, p. 1-21, 1993.
- NEPSTAD, D. C.; STICKLER, C. M.; SOARES-FILHO, B.; MERRY, F. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. **Phil. Trans. R. Soc.** 363B, p. 1737-1746, 2008.
- NEPSTAD, D.; TOHVER, I.; RAY, D.; MOUTINHO, P.; CARDINOT, G. Long-term experimental drought effects on stem mortality, forest structure, and dead biomass pools in an Eastern-Central Amazonian forest. **Ecology**, v. 88, p. 2259-2269, 2007.
- NEPSTAD, D. C.; STICKLER, C. M.; ALMEIDA, O. T. Globalization of the Amazon Soy and Beef Industries: Opportunities for Conservation. **Conservation Biology**, v.20, p.1595-1603, 2006.
- NEPSTAD, D. C.; MOUTINHO, P. R. D. S.; DIAS-FILHO, M. B.; DAVIDSON, E. A.; CARDINOT, G.; MARKEWITZ, D.; FIGUEIREDO, R.; VIANA, N.; LEFEBVRE, P. A.; RAY, D.; CHAMBERS, G. J. Q.; BARROS, L. ; ISHIDA, F. Y.; BELK, E.; SCHWALBE, K. The effects of rainfall exclusion on canopy processes and biogeochemistry of an Amazon forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 51-18, 2002.
- NEPSTAD, D. C.; CARVALHO, G.; BARROS, A. C.; ALENCAR, A.; CAPOBIANCO, J.; BISHOP, J.; MOUTINHO, P.; LEFEBVRE, P.; SILVA, U. Road Paving, Fire Regime Feedbacks, and the Future of Amazon Forests. **Forest Ecology and Management**, v. 154, p.395-407, 2001.
- NEPSTAD, D. C.; VERÍSSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; POTTERK, C.; MOUTINHO, P.; MENDOZA, E.; COCHRANE, M.; BROOKSK, V. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, p. 505-508, 1999.

OLIVEIRA, A. S. de.; GAIO, D. C.; WYREPKOWSKI, C. C.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; LOBO, F. de. A.; NOGUEIRA, J. de. S.; SANCHES, L.; PALÚ, A. D. R.; RODRIGUES, V. Eficiência de utilização da radiação fotossinteticamente ativa na produção de matéria seca de uma pastagem mista no cerrado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v.15, p.299-303, 2007.

OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. **Geophysical Research Letters**, v.30, doi:10.1029/2003GL018600, 2003.

PEROTTO, D.; MOLETTA, J. L.; OLIVEIRA, J. E. P. de.; LESSKIU, C. Consumo e Conversão Alimentar de Machos Bovinos Inteiros Charolês, Caracu e Cruzamentos Recíprocos em Confinamento. **Rev. Bras. Zootec.**, v.29, p.108-116, 2000.

PORTER, C. H.; BRAGA, R.; JONES, J. W. An approach for modular crop model development. Agricultural and Biological Engineering Department, **Research Report n° 99-0701**. University of Florida, Gainesville, Florida, 1999.

RAMOS, P. R.; PRATES, E. R.; FONTANELLI, R. S.; BARCELLOS, J. O. J.; LANGWINSKI, D.; BONELLI, I. B. Uso do Bagaço de Mandioca em Substituição ao Milho no Concentrado para Bovinos em Crescimento. Digestibilidade Aparente, Consumo de Nutrientes Digestíveis, Ganho de Peso e Conversão Alimentar. **Rev. Bras. Zootec.**, v. 29, 300-305, 2000.

ROBERTS, J. The role of plant physiology in hydrology:looking backwards and forwards. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** v.11, p. 256-269, 2007.

RODRIGUES, H.; SOARES-FILHO, B. S.; LELES, W. Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis, **Anais...** Brasil: Inpe, p. 1-8, 2007.

RONCHAIL, J.; COCHONNEAU, G.; MOLINIER, M.; GUYOT, J.; CHAVES, A. G. de. M.; GUIMARÃES, V.; OLIVEIRA, E. de. Interannual rainfall variability in the Amazon basin and seasurface temperatures in the equatorial Pacific and the tropical Atlantic Oceans. **Int. J. Climatol.**, v.22, p.1663-1686, 2002.

ROSSI, W. Ministro da agricultura Wagner Rossi. [Brasília]: Empresa Brasil de Comunicação, 29 jul. 2010. Entrevista concedida ao programa Bom Dia, Ministro.

SALATI, E.; VOSE R. Amazon basin: A system in equilibrium, **Science**, v.225, p.129-138, 1984.

SALAZAR, L. F.; NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. **Geophysical Research Letters**, v.34, L09708, 2007.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURTY, P.; SOARES-FILHO, B. S.; CARDOSO, M. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letters**, v.34, L17709, 2007.

SANTOS, F. G. dos.; CHAVES, M. A.; SILVA, M. W. R. da.; SOARES, R. D.; FRANCO, I. L.; PINHO, B. D. Índice climático de crescimento para os capins *Brachiaria brizantha* cv. MARANDU, *Cynodon dactylon* cv. TIFTON 85 e *panicum maximum* cv. TANZÂNIA e relação com a produção de massa seca. **Ciência Animal Brasileira**, v.9, p.627-637, 2008.

SANTOS, J. B.; P, S. DE O.; SILVA, A. A. da.; COSTA, L. C. Captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Bragantia**, Campinas, v.62, p.147-153, 2003.

SENNA, M. C. A.; COSTA, M. H.; PIRES, G. F. Vegetation-atmosphere-soil nutrient feedbacks in the Amazon for different deforestation scenarios, **J. Geophys. Res.**, v. 114, D04104, 2009.

SILVA, R. R. da; WERTH, D.; AVISSAR, R. Regional Impacts of Future Land_cover Changes on the Amazon Basin Wet-Season Climate. **Journal of Climate**, v. 21, p.1153-1170, 2006.

SILVA, R. R. da; AVISSAR, R. The hydrometeorology of a deforested region of the Amazon Basin. **Journal of Hydrometeorology**, v.7, p. 1028-1042, 2006.

SINCLAIR, T. R.; SHIRAIWA, T.; HAMMER, G. L. Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation. **Crop Science, Madison**, v.32, p.1281-1284, 1992.

SHEFFIELD, J.; GOTETI, G.; WOOD, E. F. Development of a 50-Year High-Resolution Global Dataset of Meteorological Forcings for Land Surface Modeling. **Journal of Climate**, v. 19, p.3088-3111, 2006.

SHUKLA, J.; NOBRE, C.; SELLERS, P. Amazon deforestation and climate change. **Science**, v. 247, p. 1322-1325, 1990.

SKOLE, D. L.; CHOMENTOWSKI, W. H.; SALAS, W. A.; NOBRE, A. D. Physical and Human Dimensions of Deforestation in Amazonia. **BioScience**, v.44, p.314-322, 1994.

SNYDER, P. K.; DELIRE, C.; FOLEY, J. A. Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. **Climate Dynamics**, v.23, p.27-302, 2004.

SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D. C.; CURRAN, L. M.; CERQUEIRA, G. C.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A., VOLL, E.; MCDONALD, C.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, p.520-523, 2006.

SUDAM. **Legislação sobre a criação da Amazônia Legal**. Disponível em: <<http://www.ada.gov.br>>. Acesso em: 10 de mar. 2010.

TIMMERMANN, A.; OBERHUBER, J.; BACHER, A.; ESCH, M.; LATIF, M.; ROECKNER, E. Increased ElNiño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. **Nature**, v.398, p.694-697, 1999.

THORNTHWAITE, C. W.; MATTHEW, J. R. The water balance. Publications in Climatology. New Jersey, **Drexel Institute of Technology**, 104p, 1955.

TUBIELLO, F. N.; DONATELLI, M.; ROSENZWEIG, C.; STOCKLE, C. O. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v.13, p.179–189, 2000.

TUCCI, C. E. M. 2002. Impactos da Variabilidade Climática e Uso do Solo sobre os Recursos Hídricos. **Agência Nacional de Águas (ANA)**, 145 p.

UVO, C. R.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The relationship between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation. **Journal of Climate**, v.11, p.551-562, 1998.

VAREJÃO JR, C. G. **Calibração hierárquica multiobjetivo de um modelo de micrometeorologia e de dinâmica de ecossistemas terrestres**. 2009. 96f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

WALKER, R.; MOORE, N. J.; ARIMA, E.; PERZ, S.; SIMMONS, C.; CALDAS, M.; VERGARA, D.; BOHRER, C. Protecting the Amazon with protected areas. **PNAS**, v.106, p. 10582-10586, 2009.

WERTH, D.; AVISSAR, R. The local and global effects of Amazon deforestation. *Journal of Geophysical Research*, v.107, p. 551-558, 2002.

WRIGHT, S. J. Tropical forests in a changing environment. **Trends Ecol. Evol.**, v.20, p.553-560, 2005.

YANAGI, S. N. M. **Albedo de uma floresta tropical amazônica: medições de campo, sensoriamento remoto, modelagem, e sua influência no clima regional**. 2006. 139f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) -Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006..

ZENG, N.; NEELIN, J. D. A land-atmosphere interaction theory for the tropical deforestation problem. **Journal of Climate**, v.12, p 857-872, 1999.