

GABRIELLE FERREIRA PIRES

**RESPOSTA DO CLIMA AMAZÔNICO AO DESMATAMENTO  
PROGRESSIVO DA AMAZÔNIA E DO CERRADO**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2012

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

T

P667r  
2012

Pires, Gabrielle Ferreira, 1987-  
Resposta do clima amazônico ao desmatamento  
progressivo da Amazônia e do Cerrado / Gabrielle Ferreira  
Pires. – Viçosa, MG, 2012.  
xvi, 52f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Marcos Heil Costa.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 47-52

1. Desmatamento - Amazônia. 2. Desmatamento -  
Cerrados. 3. Clima - Modelos matemáticos. I. Universidade  
Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 630.2515

GABRIELLE FERREIRA PIRES

**RESPOSTA DO CLIMA AMAZÔNICO AO DESMATAMENTO  
PROGRESSIVO DA AMAZÔNIA E DO CERRADO**

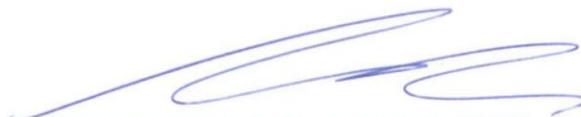
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 14 de fevereiro de 2012.



---

Ana Cláudia Mendes Malhado



---

Santiago Viana Cuadra



---

Marcos Heil Costa  
(Orientador)

**À minha mãe Margarida Ferreira Pires.  
Ao meu pai Sebastião Tarcísio Pires.**

*“Sem sonhos, as perdas se tornam insuportáveis,  
as pedras do caminho se tornam montanhas,  
os fracassos se transformam em golpes fatais.  
Mas, se você tiver grandes sonhos...  
seus erros produzirão crescimento,  
seus desafios produzirão oportunidades,  
seus medos produzirão coragem.  
... Nunca desista dos seus sonhos.”*

*(Augusto Cury)*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por tantas bênçãos em minha vida e por dar-me força, sabedoria e saúde para seguir no caminho do bem e do amor.

À minha mãe Margarida, ao meu pai Tarcísio e à minha irmã Monique pelo apoio constante, pelos ensinamentos e incentivos e por toda a confiança depositada em mim.

Aos meus familiares, que mesmo distantes fisicamente sempre estiveram presentes através de orações e pensamentos positivos.

Ao meu grande companheiro e amigo Ulisses Bifano Comini, por todo incentivo e apoio nas horas de dificuldade, por todo o amor, pelos exemplos de dedicação e de caráter e por todas as sugestões dadas a este trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade de concluir o Mestrado em Meteorologia Agrícola.

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

Ao meu orientador, Professor Marcos Heil Costa, pela amizade, pelos ensinamentos, pelo apoio profissional e pessoal, pelos exemplos de profissionalismo e competência, e por todas as sugestões dadas durante a realização deste trabalho.

À Mônica Carneiro Alves Senna por toda a ajuda, ensinamentos e sugestões no início do meu trabalho no Grupo de Pesquisas, ainda na Iniciação Científica. Foi muito bom contar com você!

A todos os professores do programa de pós-graduação em Meteorologia Agrícola, pelos conhecimentos transmitidos.

À querida amiga Francisca Lima, pelas conversas e conselhos, pela agradável convivência e pelos momentos de descontração.

À querida amiga Luciana Pinto, principalmente pelo positivismo e pelos exemplos de perseverança e caráter.

À querida amiga Letícia Braidá, por toda sua competência e principalmente pelos momentos de conselhos e de risadas.

Aos amigos Fabrício e Matheus, pela amizade e por todas as grandes e valiosas ajudas com os servidores.

Aos demais colegas do Grupo de Pesquisas, Hewlley, Livia, Vítor, Carla, Paulinha, Patrícia, Leydimere, Marcos Paulo, Ana Cláudia, Richard, Graciela, Christiane, Santiago, João Paulo e Alessandro, pela agradável convivência e por toda a ajuda, disponibilidade e parceria.

Às queridas Rômula e Marine, pela amizade e carinho, e aos demais colegas do programa de pós-graduação por todos os momentos de estudos e pelo convívio agradável.

À Graça, excelente secretária da Meteorologia Agrícola, pela ajuda e amizade ao longo do Mestrado.

Às atuais e às antigas companheiras de república em Viçosa, em especial à Ana Paula, Isabella, Paula e Catharina, pelo carinho da convivência.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

## **BIOGRAFIA**

GABRIELLE FERREIRA PIRES, filha de Sebastião Tarcísio Pires e Margarida Ferreira Pires, nasceu em 02 de janeiro de 1987, na cidade de Belo Horizonte - MG.

Iniciou a graduação em Engenharia Ambiental em março de 2005, obtendo o título de Engenheira Ambiental em janeiro de 2010 pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Em março de 2010 iniciou o curso de pós-graduação, nível mestrado, em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	8
2.1 Objetivos específicos .....	8
3. METODOLOGIA .....	9
3.1 Descrição dos modelos.....	9
3.2 Delineamento do experimento numérico .....	12
3.3 Cenários de desmatamento.....	14
3.4 Identificação do ponto de desequilíbrio do sistema .....	18
3.5 Regiões analisadas.....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	23
4.1 Validação da simulação controle .....	23
4.2 Efeitos do desmatamento .....	28
4.2.1 Precipitação anual.....	28
4.2.2 Diagramas Bioclimáticos .....	37
4.2.3 Probabilidade de Savanização Bioclimática.....	41
5. CONCLUSÕES .....	44
6. REFERÊNCIAS.....	47

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Diagrama Bioclimático: relação entre o tipo de vegetação e o regime de chuvas, em função do Déficit Hídrico Climatológico Máximo, como introduzido por Malhi et al (2010)..... **6**
- Figura 2 - Esquema modular do modelo IBIS 2.6. Fonte: adaptado de Kucharik et al. (2000)..... **10**
- Figura 3 - Áreas de preservação na Amazônia Legal. Fonte: Walker et al. (2009) ..... **16**
- Figura 4 - Principais estradas na Amazônia Legal. Fonte: Leite (2005) ..... **16**
- Figura 5 - Cenários de cobertura do solo utilizados no Grupo I de simulações. O cenário (a)FOCO é a simulação controle, que considera floresta e Cerrado não-desmatados. A percentagem de área desmatadas nas figuras (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), (j) e (l) estão apresentadas na Tabela 1. .... **17**
- Figura 6 - Cenários de cobertura do solo utilizados no Grupo II de simulações. A percentagem de área desmatadas nas figuras (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i) e (j) estão apresentadas na Tabela 1. .... **17**
- Figura 7 - Diagrama Bioclimático: relação entre o tipo de vegetação e o regime de chuvas, em função do Déficit Hídrico Climatológico Máximo. Adaptado de Malhi et al. (2009) ..... **20**
- Figura 8 - Regiões analisadas durante o trabalho: (a) região total da floresta, (b) arco do desmatamento, (c) subdivisões do arco do desmatamento e (d) obtidas através de algoritmo computacional. .... **22**

Figura 9 – Precipitação média anual para o norte da América do Sul (mm/dia) (a) simulada pelo CCM3-IBIS na simulação controle, e estimada pelos bancos de dados (b) CRU, (c) CMAP, (d) TRMM, (e) Leemans and Cramer e (f) Legates and Willmott.	<b>26</b>
Figura 10 – Representação da sazonalidade da precipitação simulada pelo CCM3-IBIS e pelos bancos de dados para (a) região da floresta e (b) arco do desmatamento. ....	<b>27</b>
Figura 11 - Precipitação anual simulada pelo CCM3-IBIS versus desmatamento para as regiões definidas na Figura 6. ....	<b>33</b>
Figura 12 - Evapotranspiração anual simulada pelo CCM3-IBIS versus desmatamento para as regiões definidas na Figura 6. ....	<b>34</b>
Figura 13 - Convergência de umidade anual simulada pelo CCM3-IBIS versus desmatamento para as regiões definidas na Figura 6. ....	<b>35</b>
Figura 14 - Velocidade vertical (Pa/s) simulada pelo CCM3-IBIS para as regiões definidas na Figura 6. ....	<b>36</b>
Figura 15 - Diagramas Bioclimáticos de Malhi et al. (2009) para as regiões definidas na Figura 6. ....	<b>40</b>
Figura 16 – Probabilidade de savanização os cenários do Grupo I de simulações, como definidos na Tabela 2. ....	<b>42</b>
Figura 17 – Probabilidade de savanização os cenários do Grupo II de simulações, como definidos na Tabela 2. ....	<b>43</b>
Figura 18 – Percentagem de área dentro da Amazônia (região A) que transpõe o equilíbrio bioclimático, passando a um equilíbrio clima-vegetação característico de savana. O ponto vermelho se refere à simulação controle. ....	<b>46</b>

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Área desmatada (Amazônia e Cerrado) para cada um dos cenários desenvolvidos. Os índices i e j dos tratamentos FiCj representam, respectivamente, a percentagem de floresta e Cerrado desmatados. ....14
- Tabela 2 – Precipitação anual média para a floresta tropical amazônica e para a região do arco do desmatamento, para cinco bancos de dados e para o CCM3-IBIS. ....24

## LISTA DE SÍMBOLOS

DHC = Déficit Hídrico Climatológico (mm)

DHCM = Déficit Hídrico Climatológico Máximo (mm)

E = Evapotranspiração real (mm)

$F_iC_j$  = Área desmatada (Amazônia e Cerrado) para cada um dos cenários desenvolvidos. Os índices  $i$  e  $j$  dos tratamentos  $F_iC_j$  representam a percentagem de floresta e Cerrado desmatados, respectivamente.

PA = Precipitação anual (mm/ano)

$r$  = Região analisada

$t$  = Tratamento (cenário de desmatamento)

## LISTA DE ABREVIATURAS

AP = Áreas de Proteção

BAU = Business-as-usual

CCM3 = Community Climate Model

CMAP = CPC Merged Analysis of Precipitation

CRU = Climatic Research Unit

GOV = Governance

IBIS = Integrated Biosphere Simulator

IPCC AR4 = Intergovernmental Panel on Climate Change - Assessment

Report #4

NCAR = National Center for Atmospheric Research

TRMM = Tropical Rainfall Measuring Mission

TSM = Temperatura da Superfície do Mar

## RESUMO

PIRES, Gabrielle Ferreira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2012. **Resposta do clima amazônico ao desmatamento progressivo da Amazônia e do Cerrado.** Orientador: Marcos Heil Costa.

Há uma clara mudança acontecendo no ambiente físico da floresta amazônica, onde a intervenção humana se intensificou drasticamente durante a última metade do século XX. Recentes estudos sugerem que mudanças no clima regional causadas pelo desmatamento local possuem o potencial de fazer com que partes da Amazônia atravessem o chamado ponto de desequilíbrio do sistema. Este ponto se refere à probabilidade da Amazônia cruzar um limite crítico, que poderia fazer com que a mesma salte para um estado de equilíbrio bioclimático alternativo, mais seco que o atual. Além do desmatamento amazônico, a remoção total do Cerrado, que atualmente já foi desmatado em mais de 55%, agindo em conjunto o desmatamento da Amazônia, poderia induzir a um aumento na duração da estação seca na região de transição entre floresta e savana (arco do desmatamento), o que pode contribuir para o surgimento de um equilíbrio bioclimático alternativo para a região. Porém, ainda não se sabe quais os limites e sob quais padrões de desmatamento da Amazônia e do Cerrado o clima da floresta será afetado. O objetivo deste trabalho é investigar a resposta do clima de diferentes regiões da floresta amazônica ao desmatamento progressivo da Amazônia e do Cerrado, e verificar a possibilidade do surgimento de equilíbrio bioclimático alternativo para as mesmas. Para atingir esse objetivo, foram gerados 10 cenários de desmatamento amazônico e 10 cenários de desmatamento combinado entre floresta e Cerrado, que foram implantados no modelo acoplado atmosfera-biosfera CCM3-IBIS. Foram rodadas cinco ensembles para cada cenário, e as simulações tiveram a duração de 50 anos, com CO<sub>2</sub> fixo em 380 ppm. Os resultados mostram que quando se considera o clima médio para a região total de floresta, não ocorre transposição de equilíbrio. Porém, considerando o clima médio para a região do arco do desmatamento, foi observado o

surgimento de equilíbrio bioclimático típico de floresta sazonal, e em regiões no sul, sudoeste e leste da floresta foi observada transição para equilíbrio bioclimático típico de savana. Nos casos em que houve transposição do ponto de desequilíbrio do sistema, o efeito combinado do desmatamento de floresta e Cerrado mostrou-se significativo. Estes resultados mostram a resiliência de algumas regiões da floresta e a fragilidade de outras, o que pode auxiliar tomadores de decisão e conservacionistas na elaboração e implementação de políticas de conservação na floresta.

## ABSTRACT

PIRES, Gabrielle Ferreira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2012. **Response of the Amazonian climate to progressive deforestation of the Amazon and Cerrado.** Adviser: Marcos Heil Costa.

There is a clear shift happening in the physical environment of the Amazon forest, where human intervention has intensified dramatically during the last half of the twentieth century. Recent studies suggest that changes in regional climate caused by local deforestation have the potential to cause parts of the Amazon to cross an ecological “tipping point”: a critical threshold at which a relatively small perturbation can qualitatively alter the state or development of a system, in this case shifting the Amazon system into a new and drier equilibrium. In addition to the deforestation of the Amazon, continuing deforestation of the Cerrado (which has already been deforested by more than 55%) could combine with the climate impacts of Amazonian deforestation to produce a significant increase of the duration of the dry season in the transition zone between forest and savanna (‘arc-of-deforestation’) in south east Amazonia. However, the limits and patterns of deforestation in the Amazon and Cerrado that would affect forest’s climate remain unknown. The aim of this study is to investigate the response of the climate of different regions of the Amazon rainforest to progressive deforestation of the Amazon and the Cerrado, and assess the possibility of the emergence of an alternative bioclimatic equilibrium. To achieve this goal, we generated 10 Amazon deforestation scenarios and 10 mixed deforestation scenarios, combining forest and savanna removal, and all scenarios were implemented in the coupled atmosphere-biosphere model CCM3-IBIS. We run 5 ensembles for each scenario, for 50 years each, with CO<sub>2</sub> fixed at 380 ppm. The results show that when we consider the climate for the total forest area, there is no transposition of the tipping point. However, considering the arc-of-deforestation climate, we observed the emergence of a bioclimatic equilibrium typical of seasonal forest, and in

regions in the south, southwest and east of the forest a bioclimatic equilibrium typical of savanna. In all of these cases, the combined effect of forest and Cerrado deforestation was significant. These results show the resilience of some regions of the forest and the vulnerability of others, which can help decision makers and conservationists in the development and implementation of conservation policies.

## 1. INTRODUÇÃO

A Amazônia é um dos maiores tesouros biológicos da Terra e um dos principais componentes do sistema terrestre. A floresta tem importância crítica para a manutenção da biodiversidade tropical, uma vez que abriga um quarto de todas as espécies do planeta (Dirzo e Raven, 2003). Estimativas de 1998 mostraram a floresta como sendo responsável por 15 % da fotossíntese terrestre (Field et al., 1998), o que a configura como um reservatório de carbono significativo. A floresta amazônica desempenha também um importante papel no balanço de energia e vapor d'água regional e global (Werth e Avissar, 2002). As raízes das árvores podem retirar água de até 10 m de profundidade no solo e devolvê-la à atmosfera (Malhi et al., 2008). Estima-se que aproximadamente oito trilhões de toneladas de água são evapotranspiradas anualmente na floresta (IPCC AR4, 2007). Através desse mecanismo, são reciclados 25 a 35% da precipitação na bacia (Eltahir e Bras, 1994; Costa e Foley, 1999). Dessa forma, o clima regional está fortemente acoplado às características da cobertura do solo na Amazônia, e sua remoção através do desmatamento pode levar a uma mudança climática e a uma retroalimentação no clima do resto do planeta (Malhi et al., 2008).

A Amazônia é circundada por alguns biomas, com os quais pode interagir através do clima local. Um dos maiores e mais importantes destes biomas é o Cerrado, o segundo maior bioma brasileiro (superado apenas pela própria floresta Amazônica). O Cerrado ocupa 21% do território do

país (Klink e Machado, 2005) e abriga cerca de 160.000 espécies de plantas (45% delas são endêmicas), fungos e animais (Ratter et al., 1997). De acordo com estimativas realizadas para o ano de 2002, 55% do bioma já haviam sido desmatados ou transformados para produzir soja, milho, arroz (dentre outros) e pastagem plantada para criação de bovinos, e acredita-se que apenas aproximadamente 40% do Cerrado conservam, parcialmente, suas características iniciais (Machado et al., 2004). Apesar de sua exuberância, as políticas de conservação do Cerrado são atualmente fracas. As taxas anuais de desmatamento deste bioma são superiores às da Amazônia, em parte pelo fato de o Código Florestal brasileiro exigir que apenas 20% do Cerrado sejam mantidos em seu estado natural como "reserva legal". Na floresta Amazônica esta parcela é de 80% (Klink e Machado, 2005). Além disso, Costa e Pires (2010) sugerem que a remoção total do Cerrado, agindo em conjunto com os cenários de desmatamento da Amazônia gerados por Soares-Filho et al. (2006) para 2030 e 2050, pode induzir a um aumento na duração da estação seca da região de transição entre floresta e savana, o que pode trazer severas consequências à vegetação da região. Esta alteração sugerida por modelagem numérica foi efetivamente observada por Butt et al. (2011) nas séries históricas de precipitação do estado de Rondônia.

Além dos danos à biodiversidade e ao ambiente físico, o desmatamento pode alterar o clima local. De forma geral, Foley et al. (2003) afirmam que as alterações no uso e na cobertura do solo podem

alterar os fluxos biofísicos em superfície de várias maneiras: a primeira seria modificar o albedo da superfície modificando assim o balanço de energia e a temperatura em superfície. Este, em troca, afetaria como a superfície se resfria, pela mudança no balanço entre perda de calor sensível e perda de calor latente. Finalmente, a altura e a densidade da vegetação afetam a rugosidade da superfície, que por sua vez influencia na turbulência próxima ao solo. Superfícies mais rugosas misturam o ar com maior eficiência, melhorando o processo de resfriamento. Mudanças no albedo, na rugosidade da superfície, e na razão entre perda de calor sensível e calor latente podem afetar, então, os fluxos entre a superfície e a atmosfera e, como resultado, alterar a circulação atmosférica e modificar o clima. Os ecossistemas terrestres também afetam o clima alterando a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> através da fotossíntese e da respiração. A simples remoção da Amazônia ou do Cerrado implica em uma menor quantidade de CO<sub>2</sub> sendo removido da atmosfera, o que poderia intensificar o efeito estufa.

Além das mudanças climáticas regionais causadas pelo desmatamento, existe ainda a perspectiva das mudanças climáticas causadas pela modificação da composição atmosférica. De acordo com os modelos numéricos de circulação geral da atmosfera utilizados no quarto relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) a Amazônia será mais quente e mais seca no futuro (IPCC AR4, 2007). Condições mais adversas à vegetação da floresta, além da interferência antropogênica por exploração

madeira, queimadas e desmatamento, podem levar a vegetação a um novo equilíbrio e a um processo de savanização. Essas alterações na vegetação, por sua vez, tendem a exercer influência sobre o clima, o que poderia disparar processos de retroalimentação.

Estudos recentes sugerem que as mudanças no clima, sejam elas causadas pelo aumento na concentração de gases de efeito estufa ou pelo desmatamento local, e mudanças de uso do solo, possuem o potencial de fazer com que partes da Amazônia atravessem o ponto de desequilíbrio do sistema clima-biosfera (Sternberg, 2001; Higgins et al., 2002; Oyama e Nobre 2003; Costa et al., 2007; Sampaio et al., 2007; Nobre e Borma, 2009; Malhi et al., 2009; Mei e Wang, 2009; Malhado et al., 2010). Estes pontos se referem, em termos quantitativos, à probabilidade de um elemento do sistema terrestre cruzar um limite crítico, que poderia fazer com que o mesmo salte para outro estado de equilíbrio estável (Lenton et al., 2008). Estes estudos fornecem evidências teóricas da existência de estados de equilíbrio alternativos entre o clima e a vegetação da floresta em geral, e em particular na região de transição entre a floresta e o Cerrado. Oyama e Nobre (2003) sugerem que dois estados de equilíbrio estável sejam possíveis na Amazônia, delineando o ponto de desequilíbrio do sistema acoplado clima-biosfera: um é obviamente o estado presente de clima e vegetação, com a floresta tropical cobrindo a maior parte da bacia Amazônica, associada com elevada precipitação (e evapotranspiração) mesmo durante a estação seca; o segundo estado de equilíbrio estável

estaria associado a uma savana tropical cobrindo parte da bacia (ou outro tipo de vegetação adaptado à seca e ao fogo), com baixa precipitação durante a estação seca, caracterizando um novo e mais seco equilíbrio. Malhi et al. (2009) sugerem que um estado de equilíbrio intermediário também seria possível, característico de floresta sazonal.

A probabilidade de a Amazônia transpor o ponto de desequilíbrio do sistema clima-vegetação pode ser intensificada, ainda, pelo aumento dos incêndios florestais e das secas, mas ainda não há a quantificação desses efeitos (Nobre e Borma, 2009). Por outro lado, a resiliência da floresta pode aumentar significativamente se o efeito de fertilização do CO<sub>2</sub> se confirmar (o que resultaria em uma maior produtividade das florestas tropicais devido a um aumento na eficiência de uso da luz e da água), mas este efeito pode ser compensado por aumentos contínuos da temperatura, alterações na sazonalidade da precipitação e incêndios florestais (Nobre e Borma, 2009; Cardoso et al., 2009). Nobre e Borma (2009), em sua revisão sobre a possibilidade de existência de pontos de desequilíbrio na Amazônia, concluem que sua avaliação quantitativa pode se tornar uma orientação importante para as políticas de conservação em escala local, regional e global, uma vez que estudos neste sentido indicariam a probabilidade de cruzar estes limiares em curto, médio e longo prazo.

Com base nos estudos de Malhi et al. (2009) e de Costa e Pires (2010), Malhado et al. (2010) buscaram avaliar o impacto regional do desmatamento da floresta e do Cerrado que pudesse levar algumas partes

específicas da Amazônia a cruzar o ponto de desequilíbrio do sistema e transformar o clima regional em um clima típico de savanas. Estes autores afirmam que mesmo com a imposição efetiva de uma governança florestal nos próximos anos, com a remoção total do Cerrado, já é prevista uma transição de áreas de florestas para limites bioclimáticos do Cerrado, com florestas no sul e sudoeste da região sendo regidas por uma zona de transição entre Cerrado e floresta tropical (como resumido na Figura 1).

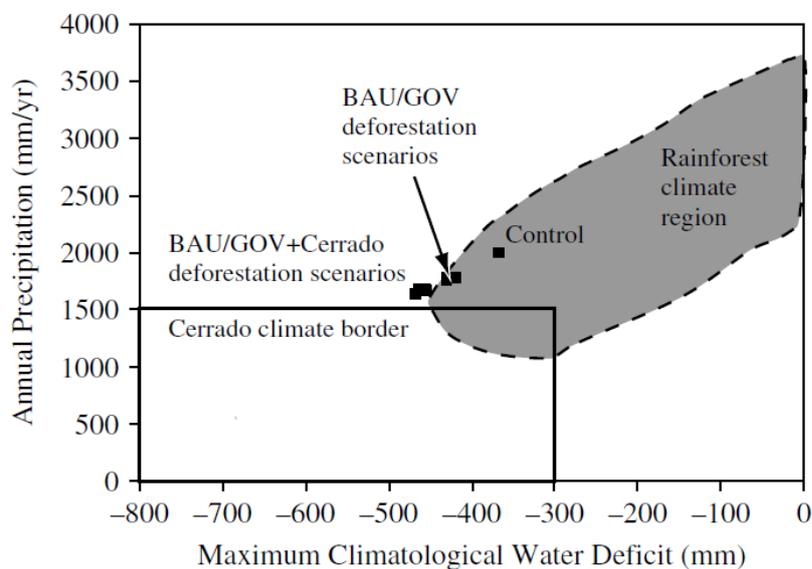


Figura 1 – Diagrama Bioclimático: relação entre o tipo de vegetação e o regime de chuvas, em função do Déficit Hídrico Climatológico Máximo, como introduzido por Malhi et al (2010). O desmatamento combinado do Cerrado e da Amazônia levam a floresta em direção a um novo envelope climático, mais típico de savanas. As siglas BAU e GOV se referem a cenários de desmatamento amazônico apresentados por Soares-Filho et al. (2006). O cenário BAU (business-as-usual) assume que o recente padrão de desmatamento irá continuar, sem que haja a criação de novas áreas de proteção, seguido ainda pelos baixos níveis de atendimento à legislação ambiental corrente. O cenário GOV (governance) assume que a legislação ambiental brasileira é implementada ao longo de toda a Amazônia, através da extensão dos atuais experimentos em governança de fronteira. Fonte: Costa e Pires (2010).

Assim, todos os esforços que têm sido feitos para conservar a floresta não seriam suficientes para evitar transições ecológicas de larga escala nas áreas de floresta.

Em resumo, a Amazônia poderá ser significativamente influenciada pelo desmatamento dentro do seu território e em ecossistemas circundantes, além das alterações climáticas associadas às mudanças nas concentrações dos gases de efeito estufa. A mudança de uso do solo, por sua vez, afeta diretamente o clima regional. Porém, ainda não se sabe quais os limites e sob quais padrões de desmatamento da Amazônia e do Cerrado (que atualmente já acumula áreas desmatadas superiores a 55%) o clima da floresta não será afetado. Esses resultados contribuirão para a sustentabilidade ecológica e climática da floresta em longo prazo, que é dependente de uma abordagem extremamente dinâmica por parte dos tomadores de decisão e conservacionistas. Os próximos anos representam uma oportunidade única, e talvez a última, de manter a resiliência, biodiversidade e os serviços prestados ao ecossistema pela floresta, em face de uma ameaça significativa de savanização deste ecossistema até o final deste século (Malhi et al., 2008).

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é investigar a resposta do clima de diferentes regiões da floresta amazônica ao desmatamento progressivo da Amazônia e do Cerrado.

### **2.1 Objetivos específicos**

- a. Gerar uma gama plausível de cenários de desmatamento da Amazônia e do Cerrado e implementar estes cenários em um modelo global de biosfera acoplado a um modelo de circulação geral atmosférica;
- b. Gerar cenários de clima a partir dos cenários de desmatamento, e
- c. Verificar sob quais níveis de desmatamento o clima de diferentes regiões da Amazônia está comprometido para a manutenção da floresta, ou seja, identificar o ponto de desequilíbrio do sistema clima-vegetação induzido pelo desmatamento.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Descrição dos modelos

Neste estudo foi utilizado o modelo atmosférico CCM3 (*Community Climate Model*) acoplado ao modelo de biosfera IBIS (*Integrated Biosphere Simulator*). O CCM3 é um modelo de circulação geral da atmosfera, desenvolvido pela Divisão de Clima e Dinâmica Global do NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) (Kiehl et al., 1998). Foi utilizada a versão 3.6.16, calibrada para a resolução T42 (2,81° x 2,81°), com 18 níveis na vertical, num sistema de coordenadas híbrido sigma-pressão (sigma próximo à superfície, pressão no topo da atmosfera).

O IBIS faz parte de uma nova geração de modelos de biosfera global, denominado de modelo dinâmico da vegetação global, que considera as mudanças ocorridas na composição e estrutura da vegetação em resposta às condições ambientais (Foley et al., 1996). O módulo da superfície terrestre do IBIS simula as trocas de energia, água, carbono e momentum no sistema solo-vegetação-atmosfera (Figura 2). O modelo representa duas camadas de vegetação (árvores e gramíneas), seis camadas de solo e três de neve. Os processos do IBIS estão organizados hierarquicamente e operam em diferentes intervalos de integração, variando de 60 minutos a 1 ano, permitindo um acoplamento de processos ecológicos, biofísicos e fisiológicos que ocorrem em escalas de tempo distintas (Kucharik et al.,

2000). Foi utilizada a versão 2.6.4 calibrada para três sítios de floresta tropical amazônica (Imbuzeiro, 2005).

O modelo acoplado CCM3-IBIS simula as interações biofísicas de curto prazo entre a superfície e a atmosfera através das trocas de energia, água, carbono e momentum. Em seguida simula as retroalimentações de longo prazo entre o ecossistema e o clima, gerando mudanças na cobertura vegetal e nos reservatórios de carbono. Esse tipo de modelagem permite considerar as retroalimentações biogeofísicas da mudança da cobertura vegetal no clima regional. Durante os últimos anos o CCM3-IBIS foi recalibrado usando dados do experimento LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia) e de sensoriamento remoto.

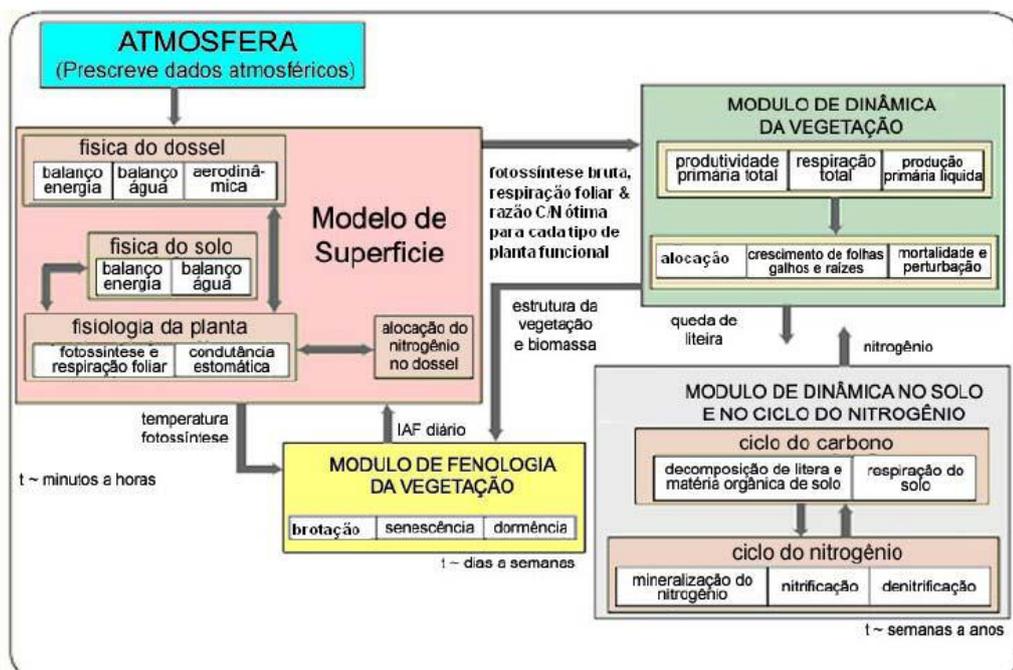


Figura 2 - Esquema modular do modelo IBIS 2.6. Fonte: adaptado de Kucharik et al. (2000).

Senna et al. (2009) avaliaram a capacidade de reproduzir a dinâmica e estrutura da vegetação na Amazônia do CCM3-IBIS. Os autores afirmam que este modelo representa bem o clima médio (dentro de uma faixa de erro de 7%), a estrutura e algumas variáveis de dinâmica da vegetação na Amazônia (dentro de uma faixa de 20% de erro). Apesar disso, há importantes variações espaciais e temporais de alguns parâmetros da vegetação (coeficientes de alocação de carbono entre folhas, madeira e raízes e tempo de residência) que influenciam seus resultados, independentemente de boas representações do clima. Estas limitações são desafiadoras, uma vez que existem poucos estudos de medição dos componentes que permitam a estimativa de alguns parâmetros (Litton et al. 2007), e os mecanismos que atualmente levam a diferenças espaciais e temporais dos mesmos também não são conhecidos. Porém, como durante o experimento aqui proposto a dinâmica da vegetação permanece desligada (o estudo foi conduzido considerando a vegetação fixa no modelo – ver seção 3.2), consideramos suficiente o desempenho atual do CCM3-IBIS.

### 3.2 Delineamento do experimento numérico

Além da simulação controle ( $F_0C_0$ ), que considera intactos os biomas Cerrado e Amazônia, foram desenvolvidos 20 cenários de desmatamento (seção 3.3), que buscam cobrir uma vasta gama de possíveis cenários de uso do solo da floresta e do Cerrado. Este experimento foi realizado na resolução T42 ( $2,81^\circ \times 2,81^\circ$ ), com vegetação fixa, cinco repetições (*ensembles*) por tratamento e por 50 anos (equivalente ao período de 1951 a 2000). Durante os 10 primeiros anos o modelo se aproxima de um estado de equilíbrio, principalmente com respeito à umidade do solo, de forma que os últimos 40 anos são usados para definir o clima médio e para realizar a análise bioclimática de acordo com a metodologia proposta por Malhi et al. (2009) (apresentada na seção 3.4). A concentração de  $CO_2$  atmosférico se manteve fixa em 380 ppm. Foram utilizados dados observados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) para o período, com inicialização das rodadas para os dias 17, 18, 19, 20 e 21 de janeiro de 1951, realizando cinco diferentes condições iniciais, a fim de diminuir a dependência das condições iniciais e obter uma representação mais realista do clima para a mesma época.

Dois grupos de simulações foram avaliados (Tabela 1). No Grupo I as simulações consideram apenas o desmatamento da Amazônia, ou seja, o Cerrado permanece intacto. A principal diferença entre as simulações deste grupo está no total de floresta desmatada, que varia de 10% a 100%. Já no

Grupo II as simulações consideram o desmatamento da Amazônia e do Cerrado agindo em conjunto. A principal diferença entre as simulações deste grupo está no total de floresta desmatada, que varia de 10% a 100%, e no total de Cerrado desmatado, que varia de 60 (total de área desmatada mais próxima ao valor atual) a 100%.

As simulações do Grupo I permitem investigar o efeito do desmatamento da floresta no clima da Amazônia. Já as simulações do Grupo II permitem investigar o efeito combinado do desmatamento da Amazônia e do Cerrado sobre o clima da região.

Este experimento esclarecerá sob quais níveis de desmatamento da floresta o clima Amazônico, mais especificamente a precipitação, estará comprometida. Esclarecerá também se o desmatamento do Cerrado exerce alguma influência sobre o equilíbrio clima-vegetação da Amazônia.

Tabela 1 - Área desmatada (Amazônia e Cerrado) para cada um dos cenários desenvolvidos. Os índices i e j dos tratamentos  $F_iC_j$  representam, respectivamente, a percentagem de floresta e Cerrado desmatados.

<b>Grupo I</b>			<b>Grupo II</b>		
<b>Cenário</b>	<b>Floresta desmatada (%)</b>	<b>Cerrado desmatado (%)</b>	<b>Cenário</b>	<b>Floresta desmatada (%)</b>	<b>Cerrado desmatado (%)</b>
$F_0C_0$	0	0	-	-	-
$F_{10}C_0$	10	0	$F_{10}C_{60}$	10	60
$F_{20}C_0$	20	0	$F_{20}C_{60}$	20	60
$F_{30}C_0$	30	0	$F_{30}C_{65}$	30	65
$F_{40}C_0$	40	0	$F_{40}C_{70}$	40	70
$F_{50}C_0$	50	0	$F_{50}C_{75}$	50	75
$F_{60}C_0$	60	0	$F_{60}C_{80}$	60	80
$F_{70}C_0$	70	0	$F_{70}C_{85}$	70	85
$F_{80}C_0$	80	0	$F_{80}C_{90}$	80	90
$F_{90}C_0$	90	0	$F_{90}C_{95}$	90	95
$F_{100}C_0$	100	0	$F_{100}C_{100}$	100	100

### 3.3 Cenários de desmatamento

Foram consideradas duas condições principais no desenvolvimento dos cenários de desmatamento da Amazônia: a presença de estradas e de áreas de proteção (AP). A presença de estradas representou um fator que viabiliza o desmatamento, para todos os tratamentos (Figura 4). Já a

presença de áreas de preservação representou uma proibição ao desmatamento até o cenário de 70% de desmatamento amazônico, uma vez que consideramos que as APs representam 30% da Amazônia legal, de forma semelhante à apresentada por Walker et al. (2009) (Figura 3). A partir do cenário de 80% de desmatamento amazônico, a presença de APs não representa mais uma proibição ao desmatamento, de forma que a derrubada destas áreas é permitida. Estes são cenários mais drásticos e têm uma menor probabilidade de ocorrência. Em todos os casos, o desmatamento avança pela floresta principalmente a partir das bordas sul e sudeste (arco do desmatamento) da Amazônia, respeitando as condições acima citadas.

Os cenários de desmatamento do Cerrado foram desenvolvidos com base no total desmatado mais próximo do valor atual, em torno de 60% (Leite et al., 2011). Em seguida foram gerados cenários que buscam considerar o avanço de áreas agrícolas no Cerrado, em direção às bordas sul e leste da floresta Amazônica (arco do desmatamento).

O desmatamento representado neste trabalho é definido como a substituição da vegetação natural (floresta tropical ou Cerrado) por pastagem, que está parametrizada de acordo com Costa et al. (2007). A Figura 5 apresenta os cenários de desmatamento utilizados nas simulações do Grupo I, e a Figura 6 apresenta os cenários utilizados no Grupo II de simulações.

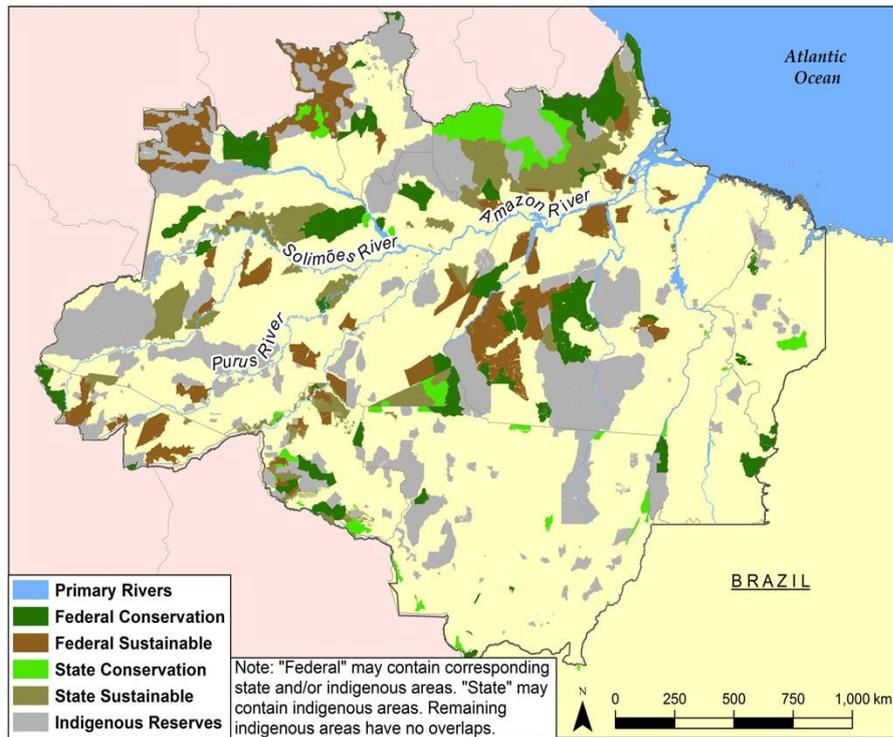


Figura 3 - Áreas de preservação na Amazônia Legal. Fonte: Walker et al. (2009)

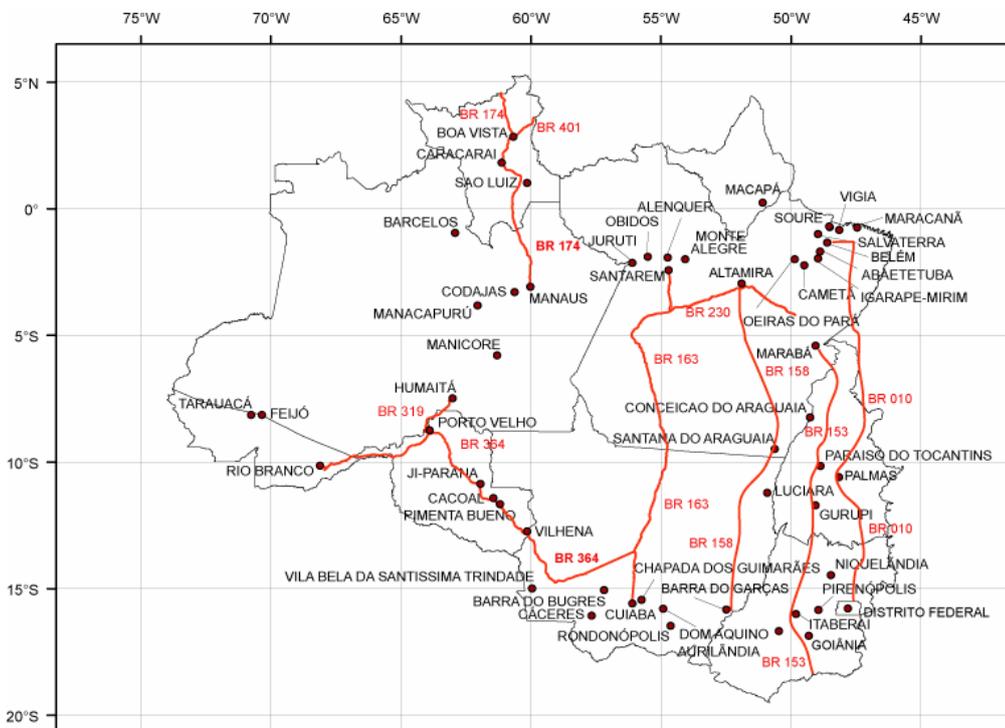


Figura 4 - Principais estradas na Amazônia Legal. Fonte: Leite (2008)

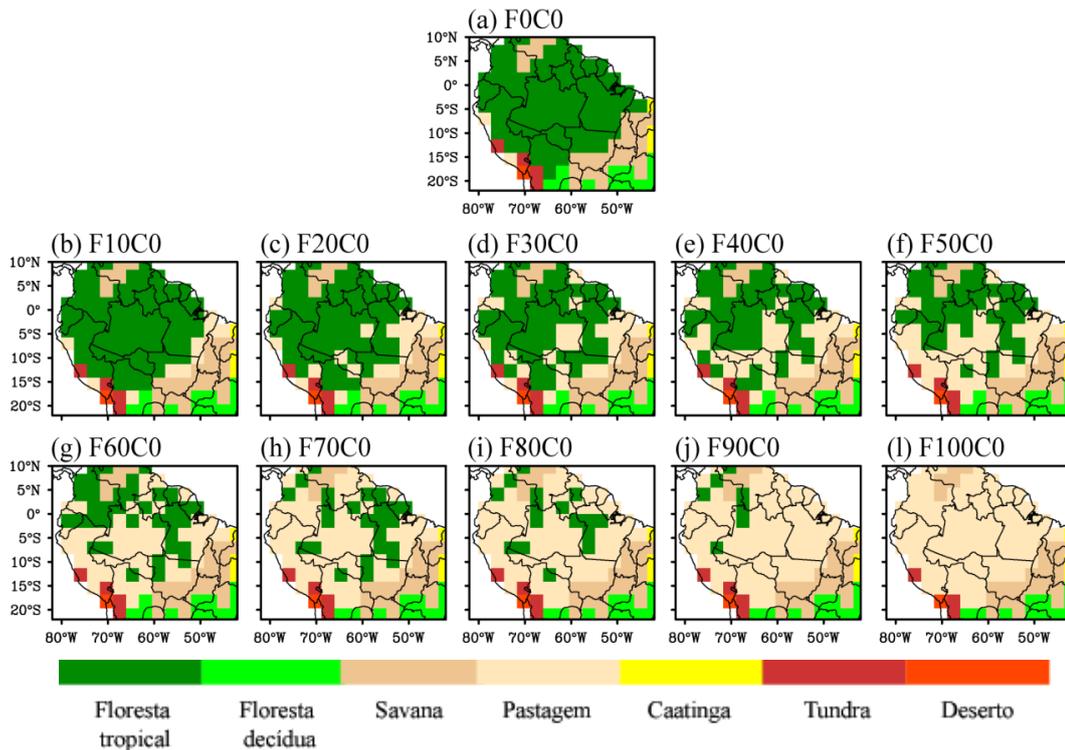


Figura 5 - Cenários de cobertura do solo utilizados no Grupo I de simulações. O cenário (a) $F_0C_0$  é a simulação controle, que considera floresta e Cerrado não-desmatados. A percentagem de área desmatada em (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i), (j) e (l) estão apresentadas na Tabela 1.

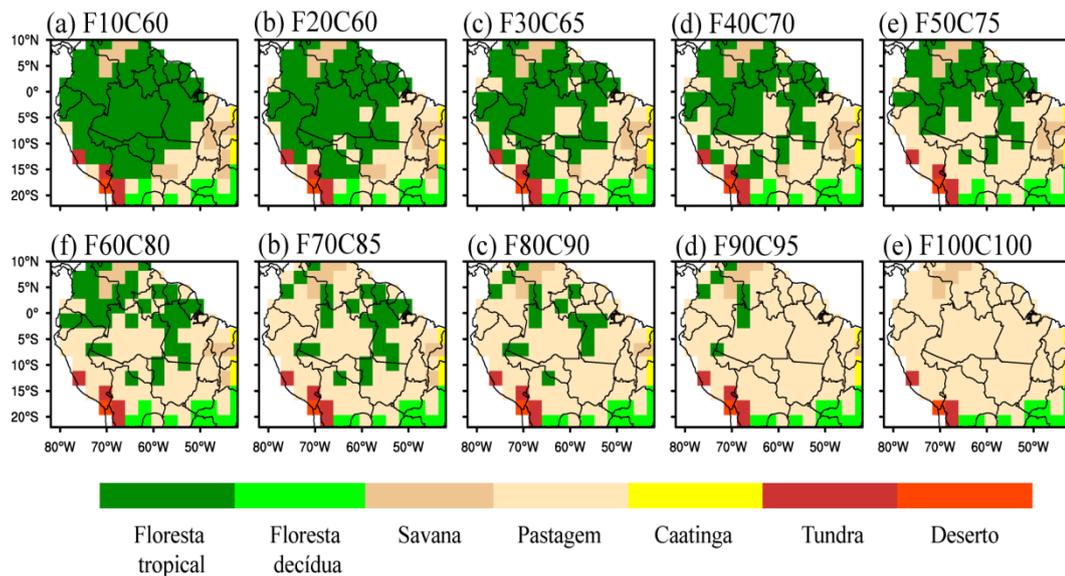


Figura 6 - Cenários de cobertura do solo utilizados no Grupo II de simulações. A percentagem de área desmatadas em (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i) e (j) estão apresentadas na Tabela 1.

### 3.4 Identificação do ponto de desequilíbrio do sistema

Utilizou-se a metodologia proposta por Malhi et al. (2009) para a identificação do ponto de desequilíbrio do sistema. Estes autores construíram um diagrama baseado na combinação de dados regionais de precipitação e de tipo de vegetação. A partir desses dados foi possível inferir fronteiras (ou limites) bioclimáticos baseadas na precipitação necessária para que seja viável a existência de floresta tropical, considerando medições de precipitação anual (PA) e o valor mais negativo do Déficit Hídrico Climatológico Máximo (DHCM) (Figura 7). Estas “fronteiras bioclimáticas” podem ser convertidas, de uma forma geral, nas seguintes tipologias vegetais: (i) floresta tropical perene:  $DHCM > -200$  mm; (ii) floresta sazonal:  $DHCM < -200$  mm e precipitação  $> 1500$  mm; (iii) savana:  $DHCM < -300$  mm (ponto médio do intervalo de transição amplo,  $-400$  mm  $< DHCM < -200$  mm) e precipitação  $\leq 1500$  mm (Malhado et al., 2010).

Considera-se que o Déficit Hídrico Climatológico (DHC), calculado a cada mês (n), é a diferença entre a Precipitação (P) e a Evapotranspiração real (E). De acordo com a metodologia utilizada, o valor de E permanece fixo em 100 mm/mês (3,33 mm/dia). Assim, na época mais úmida do ano, quando a precipitação é superior a 100 mm/mês, o solo está saturado e a vegetação não está sob stress hídrico, e portanto o valor de  $DHC = 0$ . O

valor de DHCM é obtido através da soma dos valores de DHC, conforme apresentado a seguir:

Se no mês  $n$   $P \geq E$ , então

$$DHC_n = 0 \quad (\text{eq. 1})$$

Se no mês  $n$   $P < E$ , então

$$DHC_n = P_n - E \quad (\text{eq. 2})$$

$$DHCM = \sum_{n=1}^{12} DHC_n \quad (\text{eq. 3})$$

A partir do par ordenado (DHCM ; PA), é possível marcar um ponto no Diagrama Bioclimático de Malhi et al. (2009). A identificação do eventual ponto de desequilíbrio do sistema será realizada caso o par ordenado (DHCM<sub>t</sub> ; PA<sub>t</sub>), para o tratamento t, cruze as bordas da região com clima típico de savana ou de floresta Sazonal no Diagrama Bioclimático de Malhi et al. (2009).

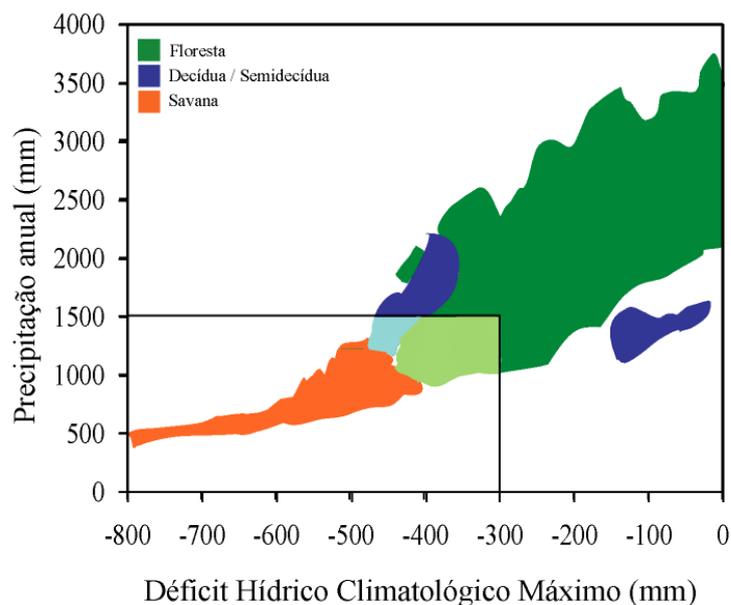


Figura 7 - Diagrama Bioclimático: relação entre o tipo de vegetação e o regime de chuvas, em função do Déficit Hídrico Climatológico Máximo. Adaptado de Malhi et al. (2009)

### 3.5 Regiões analisadas

Além da análise da precipitação da região total da Amazônia (Figura 8a), foram realizadas também análises exclusivas para nove sub-regiões da floresta, com o objetivo de conhecer os efeitos do desmatamento no clima local.

A primeira sub-região analisada (Região B) é conhecida como o arco do desmatamento (Figura 8b), nas bordas sul e leste da Amazônia, região de transição entre floresta e savana, onde se encontram atualmente as maiores taxas de remoção de floresta. Esta região apresenta a mais longa estação

seca da Amazônia, o que torna sua vegetação particularmente sensível a mudanças na duração desta estação (Costa e Pires, 2010). Outras três sub-regiões foram obtidas através da subdivisão do arco do desmatamento, regiões C, D e E (Figura 8c), o que permitiu a avaliação do efeito da continentalidade na precipitação local.

As últimas cinco sub-regiões - F, G, H, I e J (Figura 8d) - foram obtidas *a posteriori* através de um algoritmo computacional desenvolvido durante este estudo. Este algoritmo tem o objetivo principal de buscar, dentre as simulações rodadas neste experimento, sub-regiões que apresentem tendências a algum tipo de transição e que sejam, portanto, mais sensíveis que as demais aos diferentes níveis de desmatamento considerados. Dentro de sua rotina, o algoritmo cria um vetor-base composto por 10 pixels da região A (cada pixel tem  $2,81^\circ \times 2,81^\circ$ ), e calcula o valor de PA (mm) e o valor de DHCM (mm) para todos os níveis de desmatamento estudados. Em seguida verifica se houve transição de envelope típico de floresta tropical para envelope típico de savana ou de floresta decídua, da simulação controle ( $F_0C_0$ ) para qualquer tratamento ( $F_xC_x$ ). Caso haja transição, o algoritmo armazena os 10 pixels e o tipo de transição encontrada. Na sequência, o vetor é atualizado, de forma que seja considerado um novo conjunto de 10 pixels (com pelo menos 1 pixel diferente do considerado no passo anterior), até a varredura completa da região de estudo. A Figura 8d apresenta os pixels marcados com o tipo de transição encontrada: em marrom claro estão os pixels que apresentaram

tendência a savanização bioclimática, e que constituem as sub-regiões F e H; em amarelo estão os pixels que apresentaram tendências a sazonalização bioclimática, e que constituem as sub-regiões G e I; e em verde claro estão os pixels que permaneceram em envelope bioclimático típico de floresta tropical, que constituem a sub-região J.

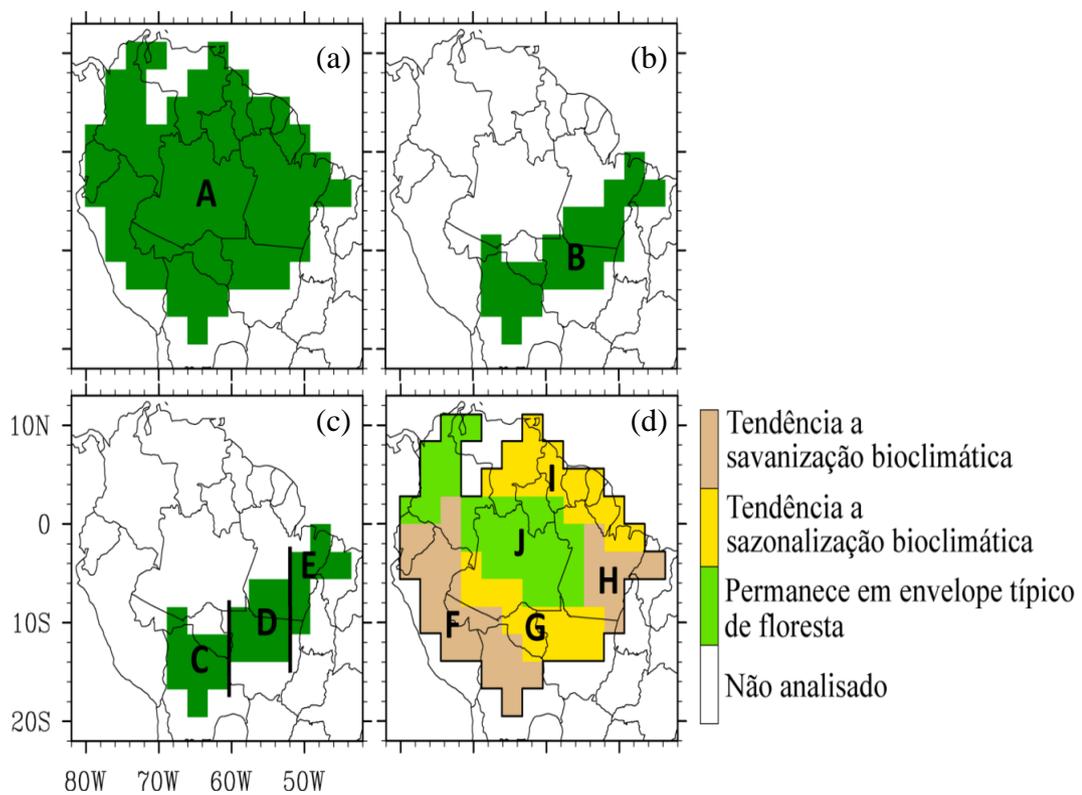


Figura 8 - Regiões analisadas durante o trabalho: (a) região total da floresta, (b) arco do desmatamento, (c) subdivisões do arco do desmatamento e (d) obtidas através de algoritmo computacional.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Validação da simulação controle

As estimativas de precipitação na Amazônia são inerentemente incertas devido à baixa densidade de pluviômetros na região e à natureza convectiva da precipitação (Costa e Foley, 1998). É necessária a inclusão de diversos bancos de dados para uma validação efetiva do modelo. Para a validação da precipitação da simulação controle utilizamos cinco bancos de dados: (i) CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation - Xie e Arkin, 1997); (ii) CRU (Climatic Research Unit, University of East Anglia – New et al., 1999; (iii) TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission – Kummerow et al., 1998); (iv) Leemans e Cramer (1990) e (v) Legates e Willmott (1990).

Para a região total da floresta (como definido na Figura 8a), a precipitação anual média varia de 5,33 a 6,43 mm/dia (Tabela 2) de acordo com os cinco bancos de dados (média de 6,02 mm/dia). A precipitação média anual simulada pelo modelo CCM3-IBIS, 6,18 mm/dia, superestima a média dos bancos de dados em 2,65%. Para o arco do desmatamento (definido na Figura 8b), as estimativas de precipitação variam de 4,87 a 5,80 mm/dia (média de 5,26 mm/dia). A precipitação simulada pelo CCM3-IBIS é de 5,32 mm/dia, o que representa uma superestimativa de 1,14%.

Tabela 2 – Precipitação anual média para a floresta tropical amazônica e para a região do arco do desmatamento, para cinco bancos de dados e para o CCM3-IBIS.

<b>Banco de dados</b>	<b>Precipitação média</b>	
	<b>(mm/dia)</b>	<b>e(%)(*)</b>
<b><i>Região da floresta</i></b>		
CMAP	5,33	+ 15,88
CRU	6,07	+ 1,87
TRMM	6,43	- 3,90
Legates and Willmot	6,21	- 0,46
Leemans and Cramer	6,06	+ 1,97
Média dos Bancos de dados	6,02	+ 2,65
CCM3-IBIS	6,18	-
<b><i>Arco do desmatamento</i></b>		
CMAP	4,87	+ 9,31
CRU	4,91	+ 8,34
TRMM	5,80	- 8,27
Legates and Willmot	5,18	+ 2,74
Leemans and Cramer	5,56	- 4,31
Média dos Bancos de dados	5,26	+ 1,14
CCM3-IBIS	5,32	-

(\*) O erro percentual médio relativo é calculado usando cada banco de dados como referência (Controle/banco de dados -1)

A Figura 9 ilustra a distribuição espacial da precipitação anual média para o norte da América do Sul, simulada pelo CCM3-IBIS e estimada pelos cinco bancos de dados utilizados. As Figuras 9(b)-(f) mostram as áreas em que o CCM3-IBIS superestima (valores positivos) ou subestima

(valores negativos) a precipitação de acordo com o CRU, CMAP, Leemans e Cramer e Legates e Willmott. No noroeste da Amazônia, o CCM3-IBIS superestima a precipitação de acordo com o CRU, CMAP, Legates and Willmott e Leemans e Cramer, mas não de acordo com o TRMM. Os quatro primeiros bancos de dados são obtidos a partir de dados de estações pluviométricas, de maneira que a baixa densidade de pluviômetros e a natureza convectiva da precipitação podem levar a uma fraca captura dos padrões espaciais de precipitação. Já o satélite TRMM apresenta uma alta resolução espacial e temporal, o que o permite superar esta limitação. O CMM3-IBIS subestima a precipitação nas Guianas, Amapá, Ilha de Marajó e na fronteira Peru-Ecuador de acordo com os referidos bancos de dados. Já a região do arco do desmatamento (representado pelo polígono marcado na Figura 9) é bem representada pelo modelo CCM3-IBIS.

A sazonalidade da precipitação também é bem representada pelo modelo, porém o CCM3-IBIS está um mês adiantado no tempo (Figura 10). Este fato não influencia as análises que serão apresentadas, pois os cálculos de DHCM, para os meses com stress hídrico, é calculada para  $P < 100$  mm/mês, e não para meses fixos. A amplitude simulada pelo modelo está condizente com as apresentadas pelos bancos de dados (Figura 10).

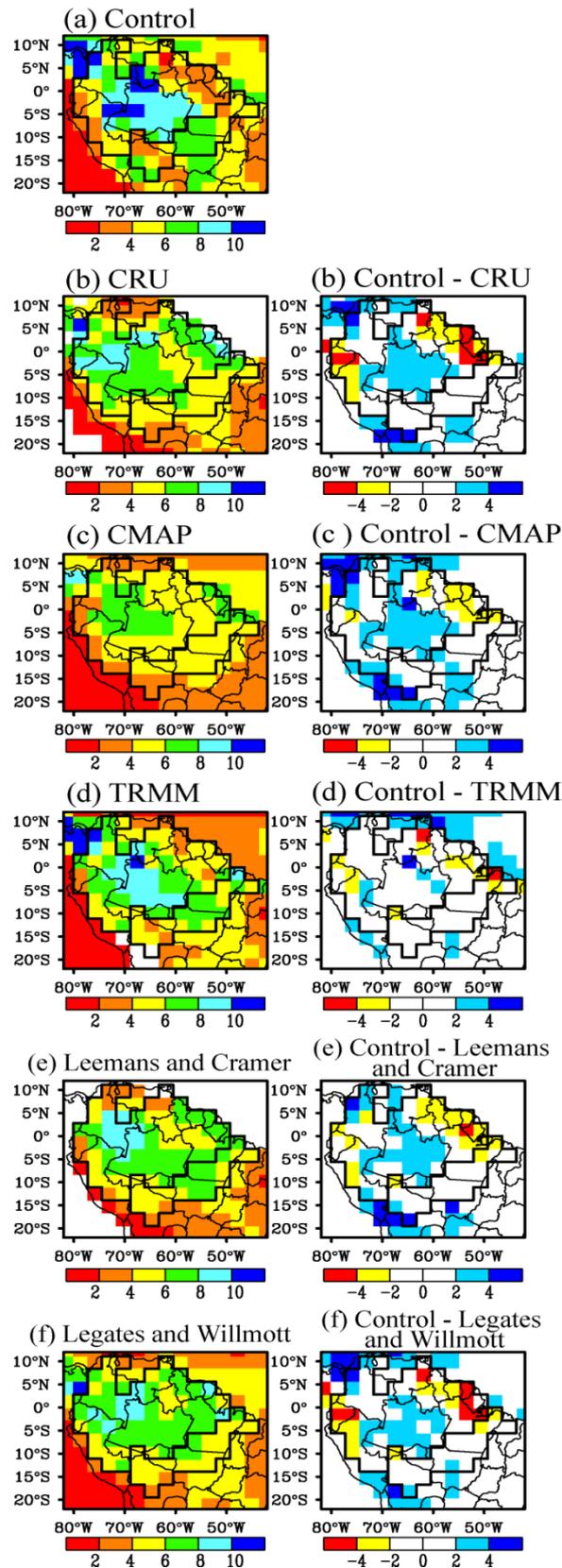


Figura 9 – Precipitação média anual para o norte da América do Sul (mm/dia) (a) simulada pelo CCM3-IBIS na simulação controle, e estimada pelos bancos de dados (b) CRU, (c) CMAP, (d) TRMM, (e) Leemans and Cramer e (f) Legates and Willmott.

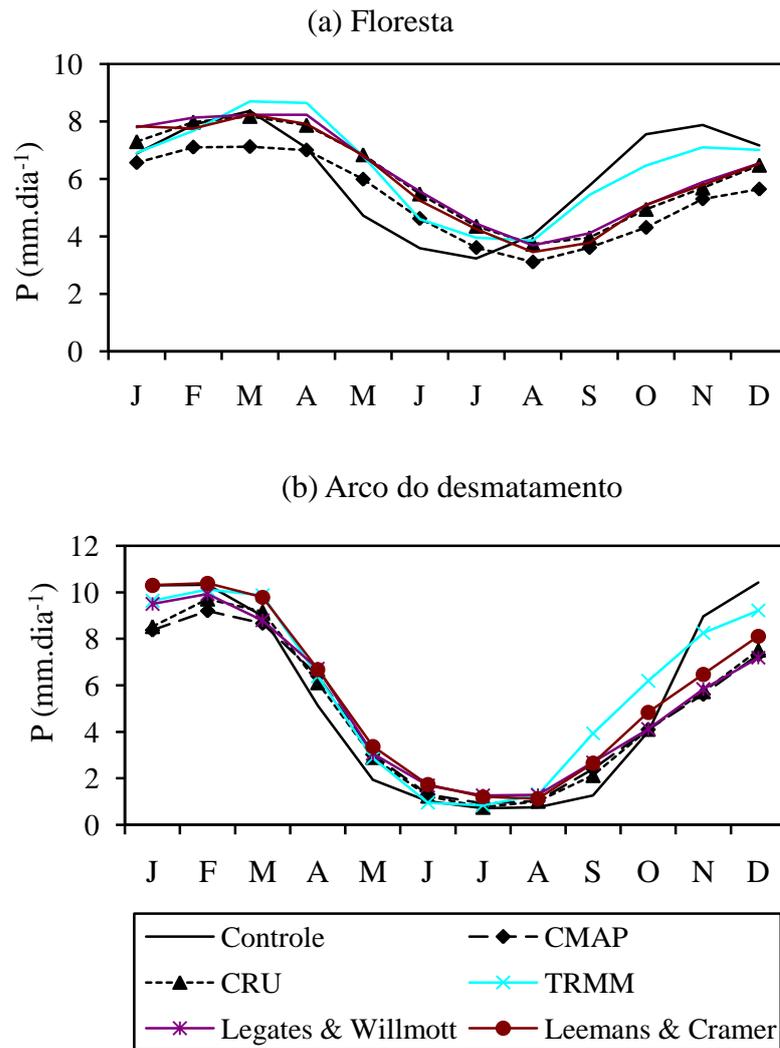


Figura 10 – Representação da sazonalidade da precipitação simulada pelo CCM3-IBIS e pelos bancos de dados para (a) região da floresta e (b) arco do desmatamento.

## 4.2 Efeitos do desmatamento

### 4.2.1 Precipitação anual

O clima regional e as características da cobertura do solo na Amazônia estão fortemente acoplados. A precipitação é muito importante na definição dos padrões de vegetação. A análise do balanço de umidade atmosférica indica que a evapotranspiração da Amazônia, por sua vez, é um dos principais motores da precipitação local, e a remoção da vegetação original pode alterar os padrões de chuva na floresta. A Figura 11 mostra a resposta da precipitação anual ao desmatamento progressivo da floresta e do Cerrado. Para todas as regiões, a precipitação anual reduz expressivamente da simulação controle ( $F_0C_0$ ) até o cenário de desmatamento mais drástico ( $F_{100}C_{100}$ ). A redução das chuvas após o desmatamento é uma consequência de alterações nos componentes do balanço de umidade na região. Entre os perfis de decréscimo de precipitação das nove regiões estudadas há claramente a presença de três sinais, ou padrões de comportamento, diferentes.

O primeiro padrão é o decréscimo praticamente constante da PA com o aumento progressivo do desmatamento: esse decréscimo segue, de maneira geral, o comportamento de uma reta com inclinação negativa. Este comportamento é evidente para as regiões A, G e J (Figura 11-a, g e j). A diminuição da precipitação destas regiões pode ser explicada pela alteração

nos padrões de evapotranspiração (Figura 12-a, g e j) e da convergência de umidade (Figura 13-a, g e j). A remoção de parte da floresta implica em uma redução na evapotranspiração, que está relacionada a um maior albedo, menor área foliar e a uma menor turbulência sobre a pastagem (Costa, 2005). Há também uma diminuição da velocidade vertical do ar em 500 hPa (Figura 14-a e j), o que contribui para uma diminuição também na convergência de umidade (Figura 13-a e j).

No segundo padrão, em níveis relativamente intermediários de desmatamento (30%-50%) não há redução expressiva da precipitação, sendo que a partir daí passa a ocorrer uma queda brusca da precipitação. Este comportamento é evidente para as regiões F e I (Figura 11-f e i). Para os diferentes níveis de desmatamento, há pouca convergência de umidade (Figura 13-f e i), e grande parte da umidade fornecida à atmosfera provém da evapotranspiração (Figura 12-f e i). A redução da evapotranspiração, por razões já mencionadas, é o fator determinante à redução da precipitação. Pode-se observar também que para a região I a partir de 60% de desmatamento amazônico ocorre o movimento descendente de massas de ar, ou subsidência, fato evidenciado pela mudança do sinal da velocidade vertical do ar a 500 hPa (Figura 14-i), o que vem a ser um fator adicional a contribuir para a redução na precipitação. O aumento do albedo da superfície (que reduz o saldo de radiação, resfriando a alta troposfera) provoca subsidência que reduz a precipitação.

O terceiro sinal, presente nos gráficos das regiões B, C, D, E e H (Figura 11-b, c, d, e, h), se caracteriza principalmente pela acentuada diminuição da precipitação para níveis baixos de desmatamento amazônico, comportamento parcialmente antagônico ao das regiões F e I. A diferença no comportamento da precipitação destas regiões está no fato de as regiões B, C, D, E e H estarem localizadas essencialmente no arco do desmatamento, que por razões históricas é a região da floresta em que o desmatamento é mais intenso, fato que os cenários de desmatamento aqui apresentados buscam representar (seção 3.3). Por esta razão, já no cenário mais conservador ( $F_{10}C_0$ ) parte do arco do desmatamento é removido, ao passo que as regiões F e I só são significativamente desmatadas a partir de cenários intermediários de desmatamento. Para as regiões B, C, D, E e H, da mesma forma como para as regiões discutidas anteriormente, a principal razão para a diminuição na precipitação é a redução da evapotranspiração. As Figuras 12-b, c, d, e, h mostram o decréscimo na evapotranspiração já para níveis conservadores de desmatamento. Para os cenários subsequentes a redução não é tão drástica, e a precipitação permanece nos mesmos patamares. A exceção acontece para região E, cuja PA volta a crescer com o aumento do desmatamento. Este comportamento está relacionado ao aumento da convergência de umidade (Figura 13-e) e aumento da velocidade vertical do ar a 500 hPa (Figura 14-e). Em áreas desflorestadas, o ar próximo à superfície torna-se mais aquecido que a área ao redor (albedo da pastagem é maior que o albedo da floresta), levando o ar mais

frio e úmido da floresta circundante (ou do oceano, no caso específico da região E) para a área desmatada. O ar úmido sobe sobre a área desmatada formando nuvens e, havendo umidade suficiente, pode haver um aumento da precipitação (Correia et al., 2007).

Para todas as regiões, a remoção do Cerrado implica em níveis inferiores de precipitação, ou seja, para um mesmo nível de desmatamento amazônico, a precipitação do Grupo I é sempre superior à precipitação do Grupo II. Porém, o efeito do desmatamento do Cerrado na precipitação anual da Amazônia é mais evidente e intenso nas regiões B, C, D, E e G, também essencialmente localizadas no arco do desmatamento, na fronteira entre floresta e savana. De acordo com Costa e Pires (2010), para a região do arco do desmatamento há uma advecção adicional de evapotranspiração vinda do Cerrado, onde parte da mesma converge e vem a precipitar. A remoção do Cerrado implica em uma diminuição na advecção de umidade para o arco do desmatamento, e como consequência há uma redução da precipitação nestas regiões. As regiões restantes sentem menos o efeito do desmatamento do Cerrado por estarem relativamente distantes do referido bioma (regiões I e J) ou o perdem por efeito da média (região A).

Para efeito comparativo, a Figura 11 também mostra o valor da precipitação em relação à simulação controle, em termos percentuais, após o desmatamento progressivo para todas as regiões analisadas. As reduções mais drásticas de precipitação ocorrem nas regiões A, F, G, H e J, cujas precipitações nos cenários mais pessimistas podem chegar a representar

menos de 80% da precipitação da simulação controle. Nas demais regiões, a redução da precipitação é menor, chegando a representar até 90% da precipitação da simulação controle. Porém, nas regiões B, C, D, E e I, onde já há pouca precipitação (ver Figura 9b, c, d, e, i), a redução das chuvas pode causar uma alteração significativa para o equilíbrio bioclimático (como será apresentado na seção 4.2.2).

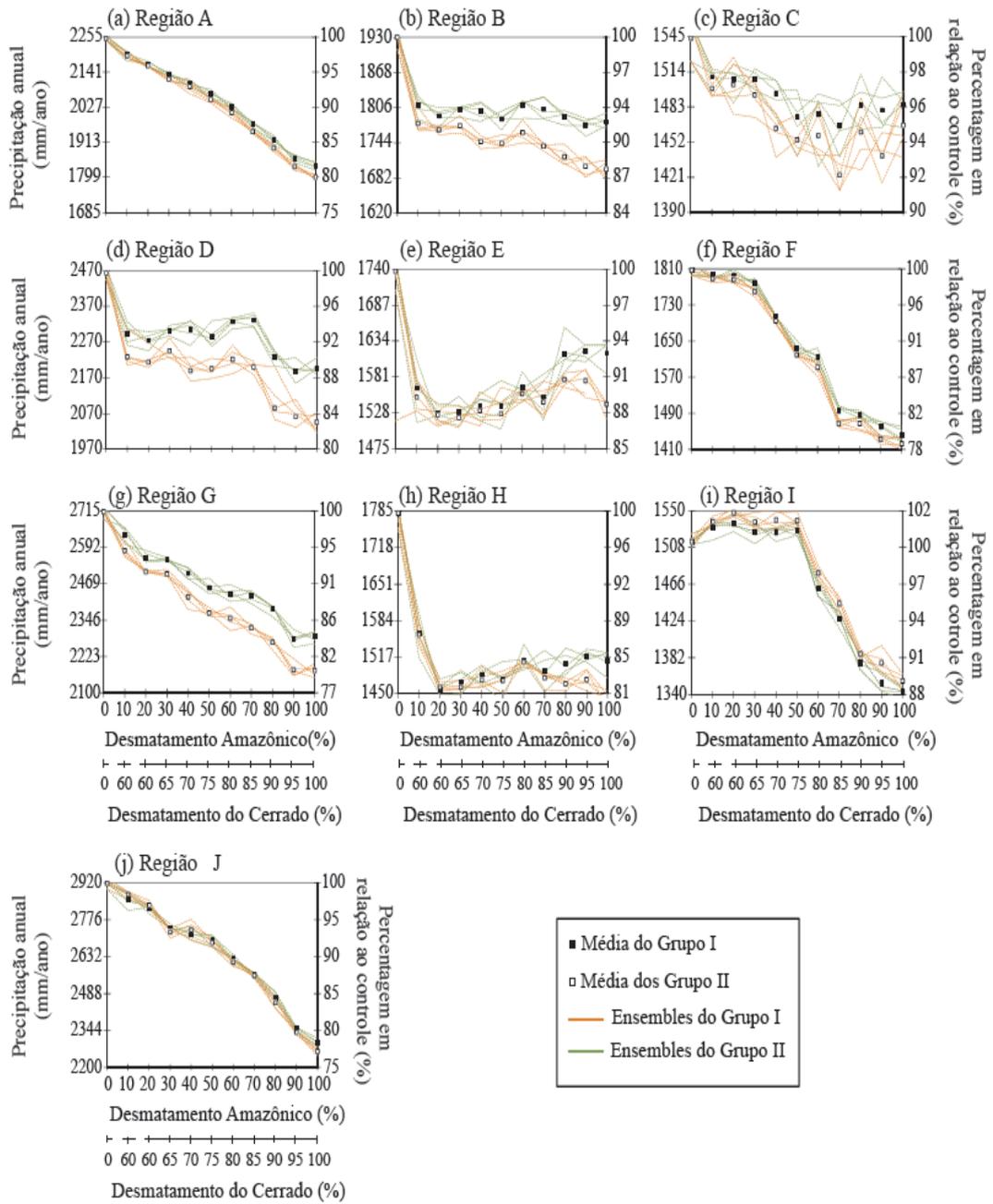


Figura 11 - Precipitação anual simulada pelo CCM3-IBIS versus desmatamento para as regiões definidas na Figura 6.

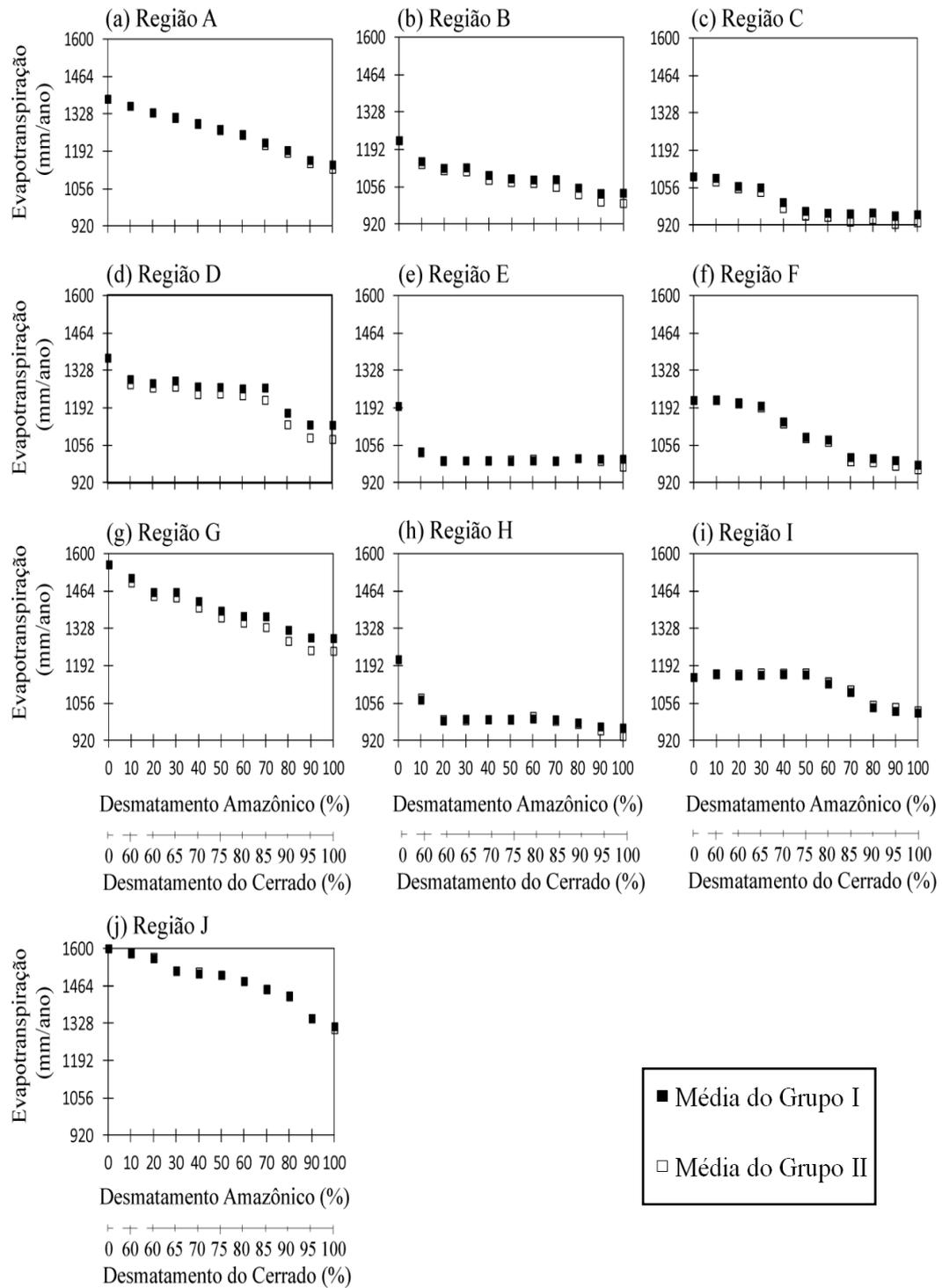


Figura 12 - Evapotranspiração anual simulada pelo CCM3-IBIS versus desmatamento para as regiões definidas na Figura 6

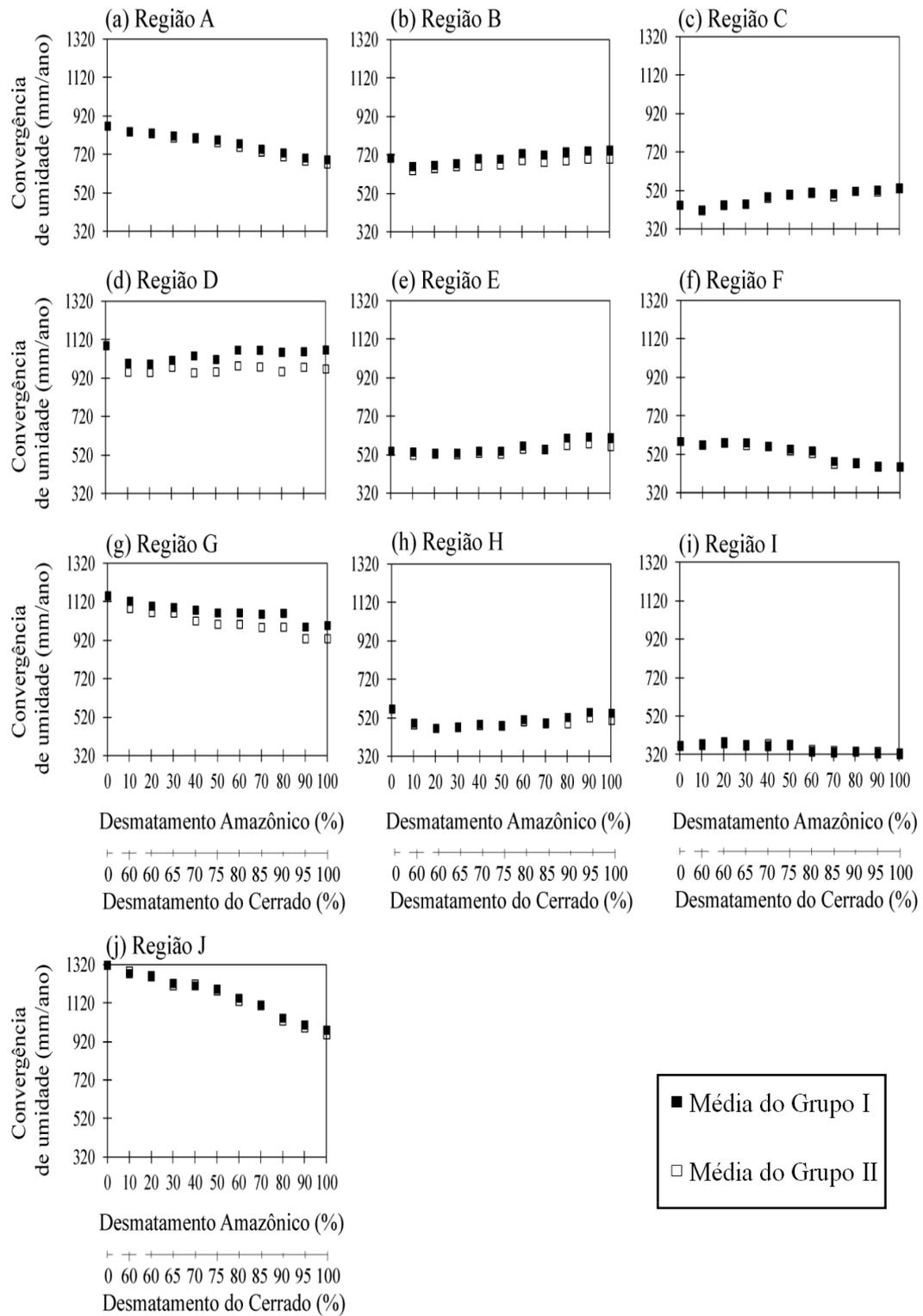


Figura 13 - Convergência de umidade anual simulada pelo CCM3-IBIS versus desmatamento para as regiões definidas na Figura 6.

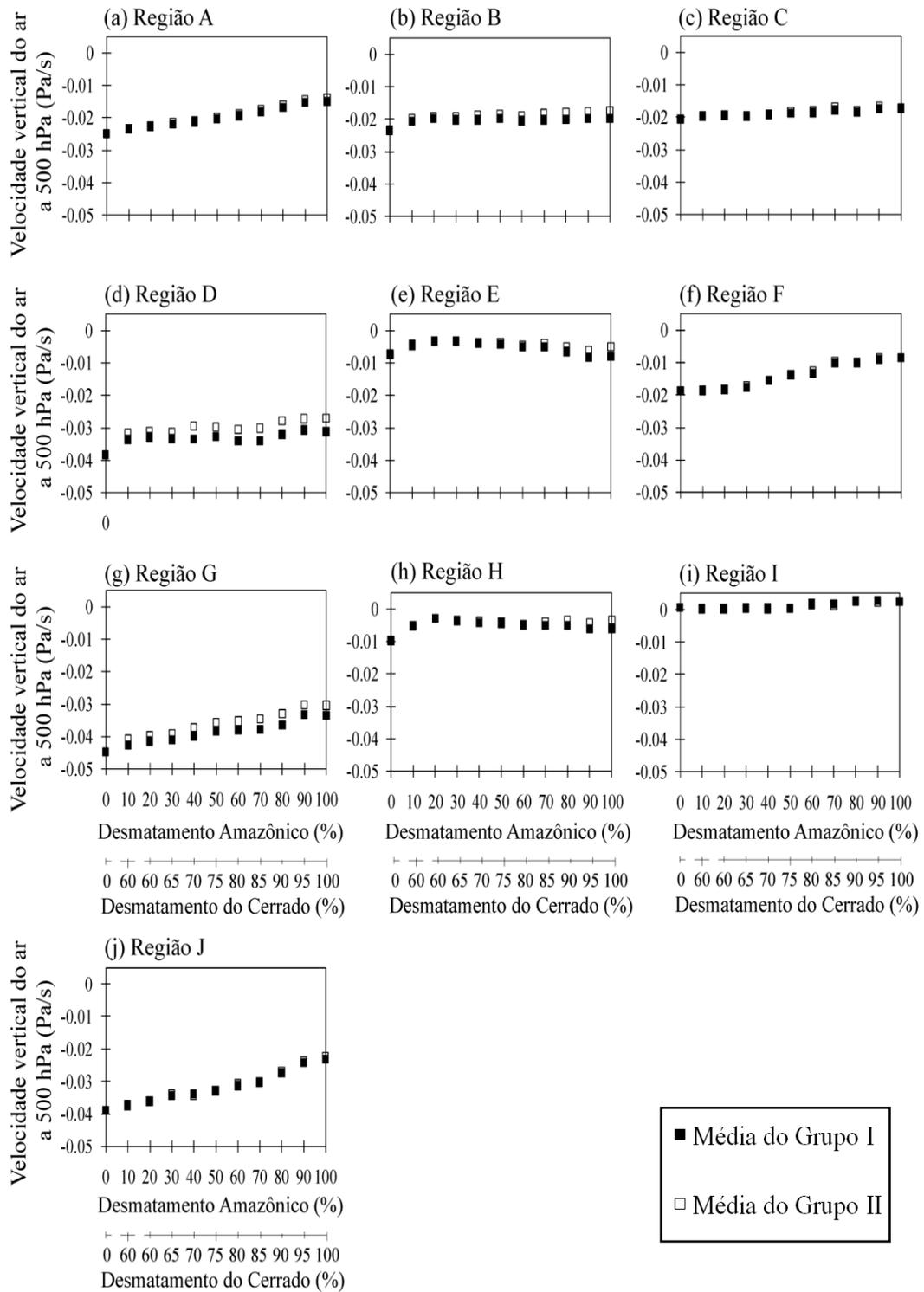


Figura 14 - Velocidade vertical (Pa/s) simulada pelo CCM3-IBIS para as regiões definidas na Figura 6

## 4.2.2 Diagramas Bioclimáticos

Para avaliar se a redução na PA (mostrada na Figura 11) e as alterações na precipitação ao longo dos meses afetam o equilíbrio clima-vegetação das diferentes regiões da floresta, calculamos o valor do par ordenado ( $DHCM_{r,t}$  ;  $PA_{r,t}$ ) para cada tratamento  $t$  e sub-região  $r$ . Os Diagramas Bioclimáticos para as dez regiões analisadas estão apresentados na Figura 15.

As regiões A e J (Figura 15-a, j) não transpuseram o ponto de desequilíbrio induzido pelo desmatamento, mesmo considerando o cenário mais pessimista ( $F_{100}C_{100}$ ). Estas regiões apresentam elevados índices de PA e não ficam sujeitas a um nível preocupante de stress hídrico. Em contrapartida, a análise de outras regiões indicou forte tendência a transições.

O equilíbrio bioclimático do arco do desmatamento, ou região B, passa de típico de floresta tropical na simulação controle para típico de floresta sazonal (Figura 15-b). O ponto de desequilíbrio acontece nos cenários  $F_{30}C_0$ , considerando o Grupo I de simulações, e  $F_{10}C_{60}$ , considerando o Grupo II. A transição encontrada está de acordo com grande parte dos modelos globais do IPCC AR4 (2007) como apresentado por Malhi et al., (2009). A análise exclusiva das regiões obtidas através da subdivisão do arco do desmatamento mostra que a única que transpõe equilíbrio bioclimático é a região C, que está localizada na Bolívia. As

alterações no clima regional provocadas pelo desmatamento transformam o regime de chuvas, de forma que, em termos de precipitação, apenas a existência de savanas é viável naquela região (Figura 15-c). A transição ocorre no cenário  $F_{40}C_0$  (Grupo I) e  $F_{10}C_{60}$  (Grupo II). Este resultado evidencia o efeito da continentalidade no arco do desmatamento. A região C é a mais sensível por consequência do transporte das propriedades atmosféricas, que foram influenciadas pela mudança na cobertura do solo, pelos ventos de oeste. A região E (Figura 15-e), apesar de se aproximar consideravelmente às bordas de savana do Diagrama Bioclimático, não cruza o limite de  $PA < 1.500$  mm/ano.

Dentre as últimas sub-regiões analisadas, as regiões F (no oeste e extremo sul da floresta) e H (no leste da floresta, tomando grande parte do Pará) também transpõem o ponto de desequilíbrio do sistema para bioclima típico de savana. Os cenários em que ocorrem as transições são  $F_{70}C_0$  (Grupo I) e  $F_{70}C_{85}$  (Grupo II) para a região F e  $F_{20}C_0$  (Grupo I) e  $F_{20}C_{60}$  (Grupo II) para a região H. Estes resultados estão de acordo com os resultados apresentados por Malhado et al. (2010), que sugerem que na ausência de Cerrado e qualquer que seja a governança futura na Amazônia, estas regiões correm um alto risco de “cruzarem” tal limite ecológico nos próximos 20 - 40 anos. As regiões G e I não cruzam efetivamente nenhum limite ecológico, pois apesar de passarem a apresentar déficit hídrico característico de floresta sazonal, ainda mantêm níveis de PA que viabilizam a existência de floresta tropical. Esta intensificação do stress

hídrico causado pelo desmatamento poderia causar efeitos negativos na vegetação, que por sua vez alteraria novamente o clima, caracterizando um processo de retroalimentação positivo. Estes processos não estão aqui representados, uma vez que as simulações foram setadas para manter fixa a vegetação no modelo.

É importante notar que quando se compara entre os dois grupos de simulações a quantidade de floresta desmatada necessária à transposição do ponto de equilíbrio, esta é, em todos os casos, menor no Grupo II. Este resultado indica que, além da evapotranspiração da Amazônia, há também a contribuição adicional da evapotranspiração do Cerrado para a precipitação da floresta. Este fato sugere que a remoção do Cerrado exerce influência efetiva na precipitação da floresta, e que deve ser considerada nos estudos referentes a alterações no clima da Amazônia desencadeadas pelo desmatamento.

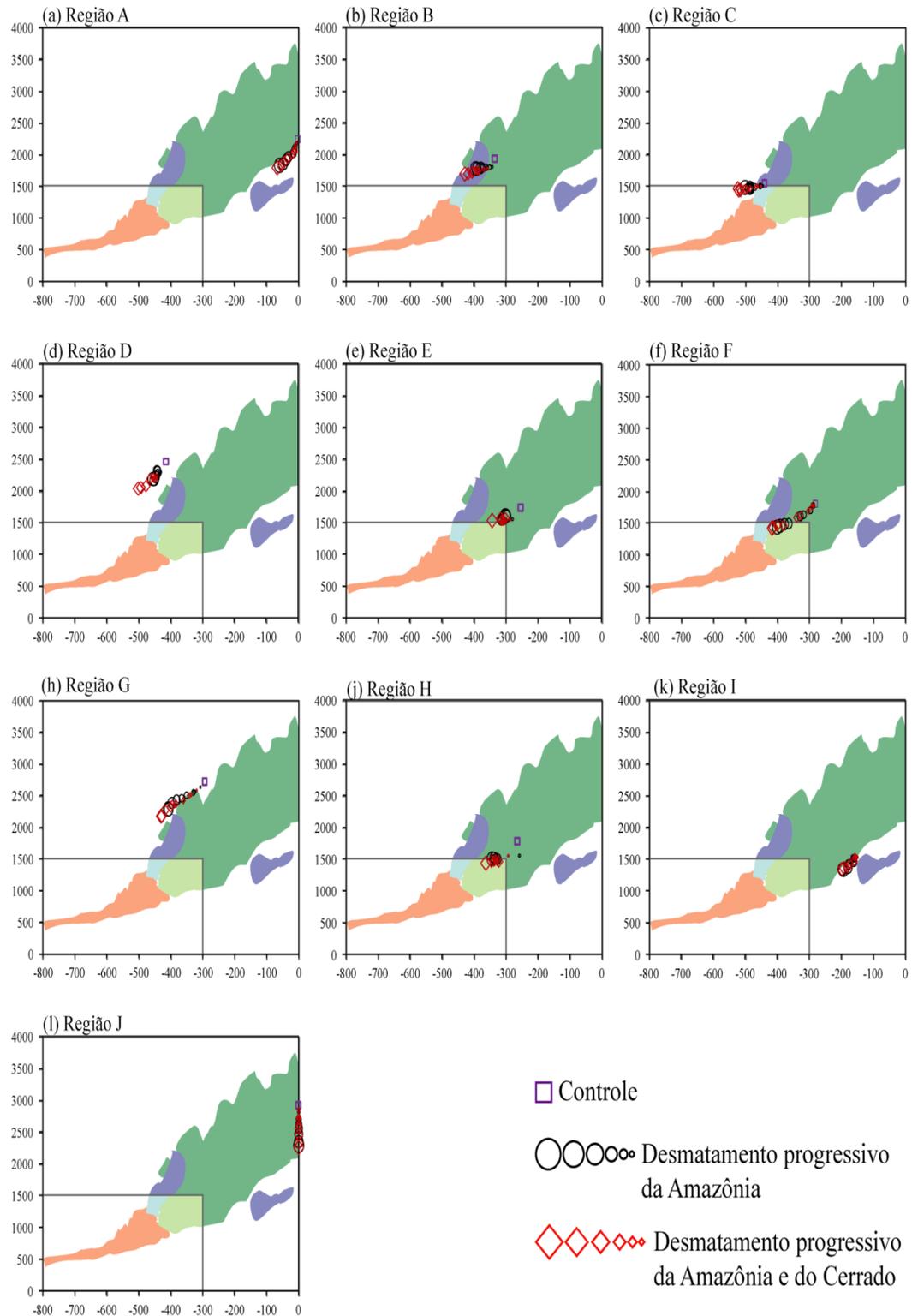


Figura 15 - Diagramas Bioclimáticos de Malhi et al. (2009) para as regiões definidas na Figura 6.

### 4.2.3 Probabilidade de Savanização Bioclimática

As Figuras 16 (Grupo I) e 17 (Grupo II) nos permitem conhecer a probabilidade de savanização para cada pixel do modelo na região da floresta. Se um pixel transpõe o equilíbrio bioclimático em mais de 90% das vezes (de um total de  $N = 40 \text{ anos} \times 5 \text{ ensembles} = 200$ ), classificamos o resultado como ‘Muito provável’; entre 90% e 66% das vezes considera-se como ‘Provável’; entre 66% e 50% considera-se ‘Pouco provável’ e valores menores que 50% entende-se como resultado ‘Improvável’ a savanização bioclimática. Esta classificação segue a utilizada pelo IPCC AR4 (2007). O polígono representado nas Figuras 16 e 17 demarca a região analisada (coincidente com a região A da Figura 8), não tendo sido analisados os pixels localizados fora deste polígono.

As regiões que apresentam maiores probabilidades de transpor os limites de savana no Diagrama Bioclimático de Malhi et al. (2009) se localizam no sudoeste e no nordeste da floresta. As probabilidades apresentadas nas Figuras 16 e 17 são em sua maioria muito prováveis (>90%). Conforme esperado, a probabilidade para estas regiões se intensifica com o aumento do desmatamento.

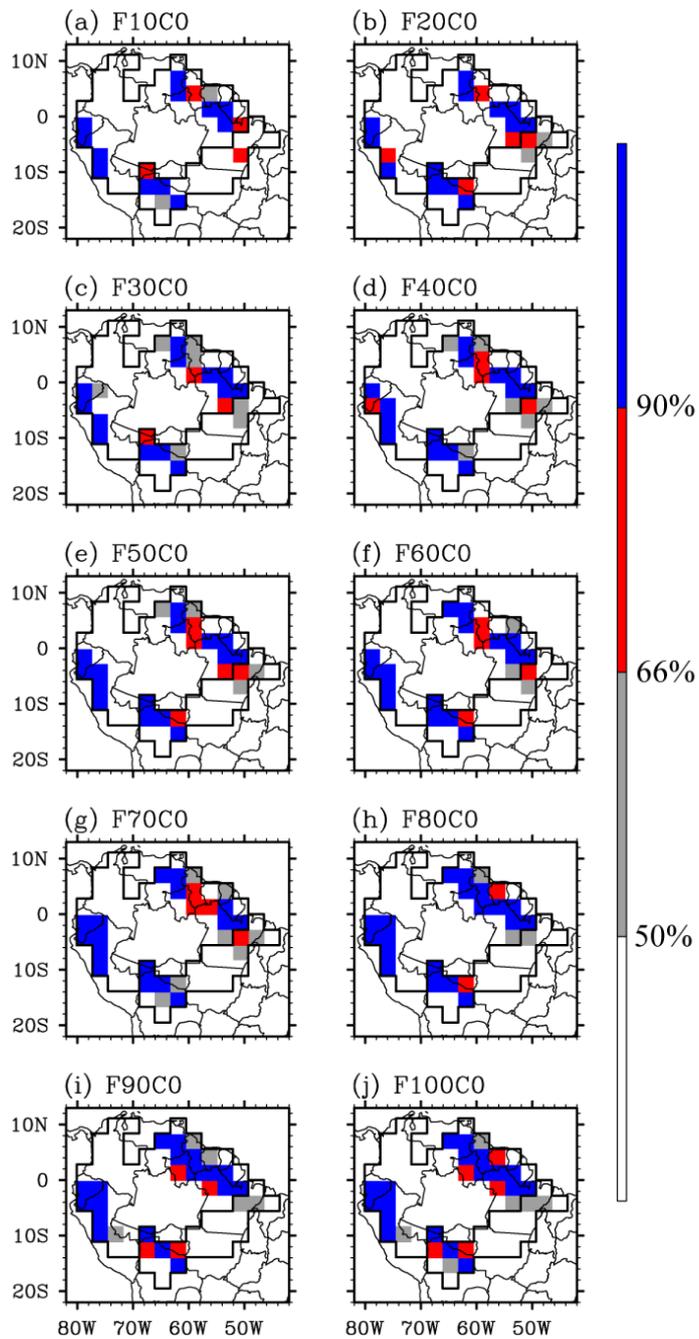


Figura 16 – Probabilidade de savanização os cenários do Grupo I de simulações, como definidos na Tabela 2.

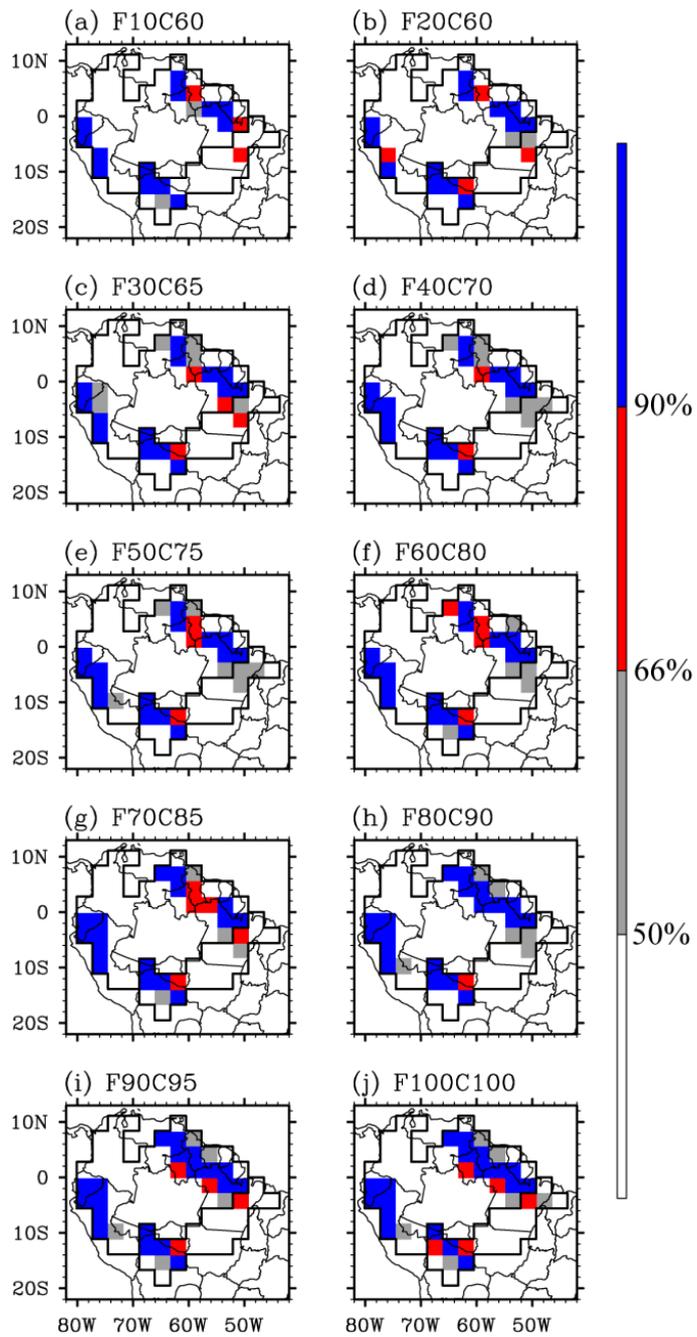


Figura 17 – Probabilidade de savanização os cenários do Grupo II de simulações, como definidos na Tabela 2.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs a investigar a resposta do clima de diferentes regiões da floresta amazônica ao desmatamento progressivo da Amazônia e do Cerrado, e verificar a possibilidade do surgimento de equilíbrio bioclimático alternativo para as mesmas. Foram gerados e analisados 10 cenários de desmatamento amazônico e 10 cenários de desmatamento combinado entre floresta e Cerrado, que foram implantados em um modelo acoplado atmosfera-biosfera.

Os resultados mostram que a precipitação amazônica pode aumentar com o desmatamento moderado e localizado, mas em geral, diminui significativamente com o desmatamento em larga escala. Porém, o clima de diferentes regiões da floresta responde de forma distinta: quando se considera o clima médio da região total da floresta, nenhuma transição é observada; quando se analisa subdivisões da floresta, são observadas tendências a transições. As sub-regiões C e F (parte da Bolívia, Peru e Acre), que se localizam no oeste e extremo sul da floresta, e H (estado do Pará) no leste da floresta, passam por um processo de savanização bioclimática. As sub-regiões B e G (arco do desmatamento e parte do estado do Amazonas) apresentam tendências à sazonalização bioclimática. Grande parte dos pixels analisados apresenta probabilidades de mais de 90% de transpor o ponto de desequilíbrio do sistema clima-biosfera. Assim como preconizado em alguns estudos teóricos, os resultados apresentados

mostram a savanização bioclimática induzida pelo desmatamento como uma ameaça real à floresta. O desmatamento progressivo da Amazônia e do Cerrado levam a um crescimento da porção de floresta sujeita à savanização bioclimática, sendo o efeito do Cerrado expressivo para cenários drásticos, a partir de 80% de desmatamento (Figura 18).

A probabilidade de transpor o ponto de equilíbrio do sistema pode ser intensificada pelo aumento dos incêndios florestais e das secas, mas ainda não há a quantificação desses efeitos. A resiliência da floresta pode aumentar significativamente se o efeito de fertilização do CO<sub>2</sub> se confirmar (o que resultaria em uma maior produtividade das florestas tropicais devido a um aumento na eficiência de uso da luz), mas este pode ser compensado por aumentos contínuos da temperatura, alterações na sazonalidade da precipitação e incêndios florestais (Nobre e Borma, 2009; Cardoso et al 2009).

Estes resultados sugerem que a Amazônia poderá ser significativamente influenciada por mudanças de uso do solo dentro do seu território e em ecossistemas circundantes. Mostram também a resiliência de algumas regiões da floresta e a fragilidade de outras, o que pode auxiliar tomadores de decisão e conservacionistas na elaboração e implantação de políticas de conservação da floresta. Assim como sugerem Malhado et al. (2010), embora a expansão de Áreas de Preservação dentro da floresta seja importante e vital, formuladores de políticas públicas e conservacionistas não devem abordar a floresta de forma isolada. Os próximos anos

representam uma oportunidade única, e talvez a última, de manter o equilíbrio bioclimático da floresta, frente às ameaças de mudanças de uso do solo e mudanças climáticas até o final deste século.

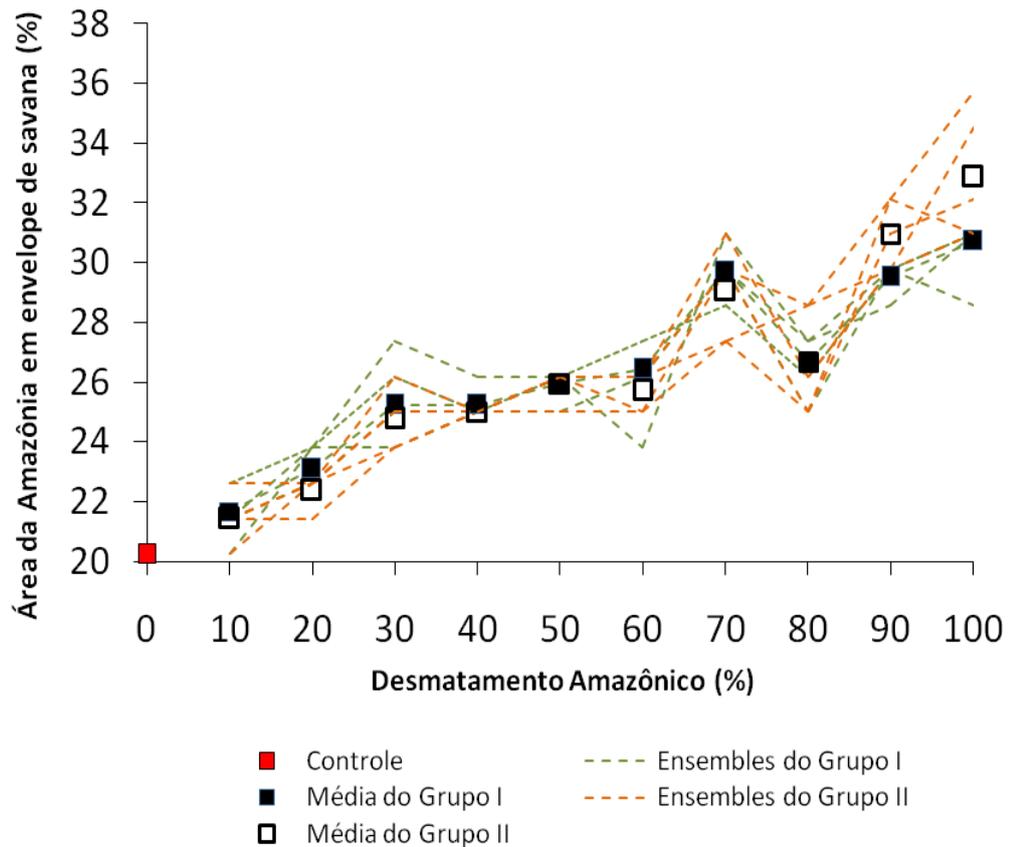


Figura 18 – Percentagem de área dentro da Amazônia (região A) que transpõe o equilíbrio bioclimático, passando a um equilíbrio clima-vegetação característico de savana. O ponto vermelho se refere à simulação controle.

## 6. REFERÊNCIAS

BUTT, N.; DE OLIVEIRA, P. A.; COSTA, M. H. Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondônia, Brazil, **Journal of Geophysical Research**, v. 116, D11120, 2011. doi:10.1029/2010JD015174.

CARDOSO, M. F.; NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; HIROTA, M.; VALERIANO, D.; CÂMARA, G. Long-term potential for tropical-forest degradation due to deforestation and fires in the Brazilian Amazon. **Biologia**, v. 64, p. 433-437, 2009. doi:10.2478/s11756-009-0076-9.

CORREIA, F. W.; MANZI, A. O.; CANDIDO, L. A.; SANTOS, R. M. N.; PAULIQUEVIS, P.. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. São Paulo: **Ciência e Cultura**, v. 59, 2007.

COSTA, M.H.. Large-scale hydrological impacts of tropical forest conversion. In BONELL, M.; BRUIJNZEEL, L.A. (eds). *Forests, Water and People in the Humid Tropics*. New York: **Cambridge University Press**, 2005. p. 590-597.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. A comparison of precipitation datasets for the Amazon basin. **Geophysical Research Letters**, v. 25, p. 155-158, 1998.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon basin. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 14189-14196, 1999.

COSTA, M.H.; YANAGI, S.N.M.; OLIVEIRA, P.J.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E.J.P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 34, L07706, 2007. doi: 10.1029/2007GL029271.

COSTA, M. H.; PIRES, G. F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. **International Journal of Climatology**, v. 30, p. 1970-1979, 2010. doi: 10.1002/joc.2048.

DIRZO, R.; RAVEN, P.H. Global state of biodiversity and loss. **Annual Review of Environment and Resources**. v. 28, p. 137–167, 2003.

ELTAHIR, E.A.B.; BRAS, R.L. Precipitation recycling in the Amazon basin. **Quarterly journal of the royal meteorological society**, n.120, p. 861-80, 1994.

FIELD, C.B.; BEHRENFELD, M.J.; RANDERSON, J.T.; FALKOWSKI, P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. **Science**, v. 281, p. 237-240, 1998.

FOLEY, J.A.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, D.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles** v. 10, p. 603–628, 1996.

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.

HIGGINS, P.A.T.; MASTRANDEA, M.D.; SCHNEIDER, S.H. Dynamics of climate and ecosystem coupling: Abrupt changes and multiple equilibria. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B**, v. 357, p. 647– 655, 2002.

IMBUZEIRO, H.M.A. **Calibração de um modelo para simular fluxos de massa e energia entre a floresta amazônica e atmosfera usando múltiplos sítios: qual a representatividade de um único sítio?** 2005. 67 p. Tese (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, **Cambridge University Press**, Cambridge, 2007.

KIEHL, J.T.; HACK, J.J.; BONAN, G.B.; BOVILLE, B.A.; WILLIAMSON, D.L.; RASCH, P.J.; The National Center for Atmospheric Research Community Climate Model: CCM3. **Journal of Climate**, v. 11, p. 1131–1149, 1998.

KLINK, C.A.; MACHADO, R.B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, p. 707-713, 2005. doi: 10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x

KUCHARIK, C. J.; FOLEY, J. A.; DELIRE, C.; FISHER, V. A.; COE, M. T.; J. LENTERS, D.; YOUNG-MOLLING, C.; RAMANKUTTY, N.; NORMAN, J. M.; GOWER, S.T. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, p. 795- 826, 2000.

KUMMEROW, C.; BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON J. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 15, p. 809-817, 1998.

LEEMANS, R., CRAMER; W. P. The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness on a global terrestrial grid, **IIASA Working Papers**, WP-90-41, Laxenburg, Austria, 1990.

LEGATES, D. R.; WILLMOTT, C. J. Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation. **International Journal of Climatology**, v. 10, p. 111-127, 1990.

LEITE, Christiane Cavalcante, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2008. **Reconstrução dos padrões de uso da terra na Amazônia, no período 1940-1995, para estudos climáticos e hidrológicos.**

Orientador: Marcos Heil Costa. Co-Orientadores: Gilberto Chohaku Sedyama e Carlos Antonio A. Soares Ribeiro.

LEITE, C.C.; COSTA, M.H.; de LIMA, C.; RIBEIRO, C.; SEDIYAMA, G. Historical reconstruction of land use in the Brazilian Amazon (1940-1995). **Journal of Land Use Science**, v. 6, p. 33-52, 2011. doi: 10.1080/1747423X.2010.501157

LENTON, T.M.; HELD, H.; KRIEGLER, E.; HALL, J.H.; LUCHT, W.; RAHMSTORF, S.; SCHELLNHUBER, H.J. Tipping elements in the Earth's climate system. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA**, v. 105, p. 1786–1793, 2008. doi:10.1073/pnas.0705414105.

LITTON, C. M.; RAICH, J. W. e RYAN, M. G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology.**, v. 13, p. 2089–2109, 2007. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01420.x

MACHADO, R.B.; NETO, M.B.R.; PEREIRA, P.G.P.; CALDAS, E.F.; GONÇALVES, D.A.; SANTOS, N.S.; TABOR, K. E STEININGER, M. Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro. Conservação Internacional: Brasília, DF. 2004. Disponível em <http://www.conservation.org.br/arquivos/RelatDesmatamCerrado.pdf>. Acessado em jan/2011.

MALHADO, A.C.; PIRES, G.F.; COSTA, M.H. Cerrado Conservation is Essential to Protect the Amazon Rainforest. **Ambio**. v. 39, p. 580-584, 2010. doi:10.1007/S13280-010-0084-6.

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, **Science**, v. 319, p. 169-172, 2008. doi: 10.1126/science.1146961.

MALHI, Y.; ARAGÃO, L.E.O.C.; GALBRAITH, D.; HUNTINGFORD, C.; FISHER, R.; ZELAZOWSKI, P.; SITCH S.; MCSWEENEY, C.; MEIR, P. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-

induced dieback of the Amazon rainforest. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA**, v. 106 p. 20610–20615, 2009. doi: 10.1073/pnas.0804619106.

MEI, R.; WANG, G.L. Rain follows logging in the Amazon? Results from the CAM3-CLM3. **Climate Dynamics**, v. 34, p. 983-996, 2009. doi:10.1007/s00382-009-0592-x.

NEW, M.; HULME, M.; JONES, P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology, **Journal of Climate**, v. 12, p. 829-856, 1999.

NOBRE, C. A.; BORMA, L. S. Tipping points for the Amazon forest. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 1, p. 28–36, 2009. doi:10.1016/j.cosust.2009.07.003.

OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A. A new climate-vegetation equilibrium state for tropical South America, **Geophysical Research Letters**, 30(23), Art. No. 2199, 2003. doi:10.1029/2003GL018600.

RATTER, J. A.; RIBEIRO, J. F.; BRIDGEWATER, S. The Brazilian Cerrado Vegetation and Threats to its Biodiversity. **Annals of Botany**, v. 80, p. 223-230, 1997.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.A.; 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. doi:10.1029/2007GL030612..

SENNA, M. C. A., COSTA, M. H., PINTO, L. I. C., IMBUZEIRO, H. M. A., DINIZ, L. M. F., PIRES, G. F. Challenges to reproduce vegetation structure and dynamics in Amazonia using a coupled climate-biosphere model. **Earth Interactions**, v. 13 (11), 2009. doi: 10.1175/2009EI281.1.

SOARES-FILHO, B.; NEPSTAD, D.C.; CURRAN, L.; CERQUEIRA, G.; GARCIA, R.; RAMOS, C.; VOLL, E.; MCDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modeling Amazon conservation. **Nature**, v. 440, p. 520–523, 2006. DOI:10.1038 /nature04389.

STERNBERG, L.S.L. Savanna-Forest Hysteresis in the Tropics. **Global Ecology and Biogeography**, v. 10, n. 4, p. 369-378, 2001.

WALKER, R.; MOORE, N.J.; ARIMA, E.; PERZ, S.; SIMMONS, C.; CALDAS, M.; VERGARA, D.; BOHRER, C. Protecting the Amazon with protected areas. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA**, v. 26, p. 10582–10586, 2009. doi:10.1073/pnas.0806059106

WERTH, D.; AVISSAR, R. The local and global effects of Amazon deforestation, **Journal of Geophysical Research. Atmospheres**, 107, 2002. doi: 10.1029/2001jd000717.

XIE, P.; ARKIN, P. A. Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, p. 2539-2558, 1997.