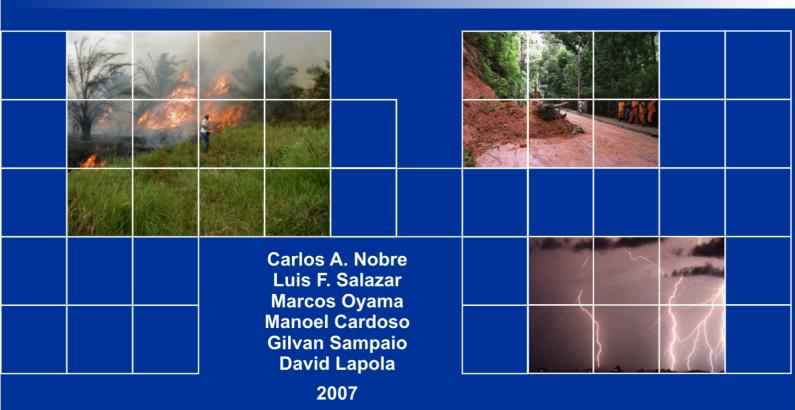


Mudanças Climáticas e possíveis alterações nos Biomas da América do Sul



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS - SBF DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE — DCBio

Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade

Sub projeto:

Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI

Relatório No. 6

Mudanças Climáticas e possíveis alterações nos Biomas da América do Sul

Carlos A. Nobre ¹
David Lapola ¹
Gilvan Sampaio ¹
Luis F. Salazar ¹
Manoel Cardoso ¹
Marcos Oyama ²

CPTEC/INPE ¹
IAE/CTA ²
São Paulo, Brasil

Equipe Científica:

Jose A. Marengo, Coordenador, CPTEC/INPE, SP Carlos A. Nobre, CPTEC/INPE, SP Igor Pisnitchenko, CPTEC/INPE, SP Tatiana Tarasova, CPTEC/INPE, SP María Valverde, CPTEC/INPE, SP Renaud Laborbe, CPTEC/INPE, SP Guillermo Obregón, CPTEC/INPE, SP Julio P. Reyes Fernandez, CPTEC/INPE, SP Wagner R. Soares, CPTEC/INPE, SP Lincoln M. Alves, CPTEC/INPE, SP Tercio Ambrizzi, IAG/USP, SP Rosemeri P. Rocha, IAG/USP, SP Simone T. Ferraz, IAG/USP, SP Santiago. V. Quadra, IAG/USP Eneas Salati, FBDS, RJ Eneida Salati, FBDS, RJ Tatiana Campanhol, FBDS, RJ Nilson Villa Nova, ESALQ/USP, SP

Apoio Administrativo:

Diana Raigoza, CPTEC/INPE, SP Evanize Fidalgo, CPTEC/INPE, SP Josiane C. M. de Oliveira, CPTEC/INPE, SP Letícia Maria Barbosa de Faria, CPTEC/INPE, SP

ÍNDICE

		Pág.
Agradecimentos		2
Apresentação		3
Siglas		4
Índice de Tabelas		5
Índice de Figuras		6
Capítulo 1	Introdução	7
Capítulo 2	Dados e Modelo utilizados	9
	2.1 Dados Utilizados	9
	2.1.1 Cenários Climáticos do IPCC/AR4	9
	2.2 Modelo Utilizado	10
	2.2.1 Modelo de vegetação potencial	10
Capitulo 3	Metodologia e Resultados	14
Capítulo 4	Discussões e conclusões	23
Referências		24

Agradecimentos

Este documento é derivado principalmente dos resultados dos projetos "Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XX", apoiado pelo Projeto de Conservação e Utilização Diversidade Biológica Brasileira PROBIO, Sustentável da financiado pelo MMA/BIRD/GEF/CNPq, e pelo Global Opportunity Fund-GOF do Reino Unido, através do projeto "Using Regional Climate Change Scenarios for Studies on Vulnerability and Adaptation in Brazil and South América". Os pesquisadores do projeto agradecem ao CNPg pelas outorga de bolsas de pesquisa para os colaboradores e de bolsas de produtividade na pesquisa para os líderes do projeto. Outras fontes de financiamento incluem o Programa Nacional de Mudanças Climáticas do Ministério da Ciência e Tecnologia, a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP - Projeto de Pesquisa Temático 01/13816-1), o Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq através do Projeto Instituto do Milênio LBA II, o Projeto GEOMA (Tema Modelagem Climática) e o Instituto Inter-Americano de Pesquisas sobre Mudanças Globais - Projeto IAI-PROSUR CRN55. Grande parte do material incluído neste documento é resultado de estudos publicados pelos autores na literatura nacional e internacional, assim como da revisão de trabalhos realizada para a preparação do Quarto Relatório Científico AR4 do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

Estendemos nosso agradecimento ao Centro Técnico Aeroespacial - CTA, Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, a Agência Nacional de Águas - ANA, o CPTEC/INPE, o Instituto Agronômico de Paraná - IAPAR, e o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - DAEE pelo fornecimento de informações meteorológicas. Um agradecimento muito especial vai para o Hadley Centre for Climate Research and Prediction, do Reino Unido, por fornecer dados do modelo global HadAM3P que servem de condições de contorno para as simulações dos modelos regionais, e ao IPCC – Data Distribution Centre (DDC) por fornecer as saídas de modelos climáticos globais do IPCC-TAR e AR4 analisados neste relatório. Agradecemos aos grupos de modelagem internacionais por fornecer os dados para a análise, ao Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) por coletar e arquivar os dados, ao JSC/CLIVAR Working Group on Coupled Modelling (WGCM) e ao Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) and Climate Simulation Panel pela organização nas atividades da análise dos dados, e ao IPCC WG1 TSU pelo suporte técnico.

APRESENTAÇÃO

Este documento constitui o Relatório VI para o projeto PROBIO sobre as mudanças climáticas e as alterações nos biomas da América até 2100. O estudo se faz através da integração de um modelo de vegetação potencial (PVM, desenvolvido no CPTEC-INPE), com projeções futuras de precipitação e temperatura provenientes de quinze modelos globais de circulação Oceano Atmosfera (AOGCMs) preparados para o Painel Intergovernamental de mudanças climáticas – Quarto relatório de avaliação (IPCC/AR4) para três cenários climáticos: SRES A2, SRES A1B e SRES B1 que representam possíveis desenvolvimentos futuros e as emissões associadas.

As anomalias de precipitação e temperatura dos quinze modelos analisados, que serão utilizados para a integração do modelo de vegetação potencial, são discutidas neste relatório. Através das análises em conjunto dos mapas de vegetação potencial para todos os modelos e para cada um dos três cenários analisados (A2, A1B e B1), se estudará em quais regiões os modelos apresentam um consenso (mais do 75% dos modelos) da condição futura (permanência, desaparecimento ou aparecimento) da floresta e da savana, em relação à vegetação potencial natural atual. Algumas considerações serão discutidas nas conclusões finais.

Siglas

AOGCMs Atmosphere-Ocean General Circulation Models

CMIP Coupled Model Intercomparison Project

CPTEC Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC/AR4 Intergovernamental Panel on Climate Change - Fourth Assessment

Report

PCMDI Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison

PROBIO Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade

Biológica Brasileira

PVM Potential Vegetation Model

SRES Special Report Emission Scenarios

ZCIT Zona de Convergência Intertropical

WGCM Working Group on Coupled Modelling

Índice de Tabelas

Tabela	Descrição	Pág.
Tabela 1	Modelos globais do IPCC usados neste estudo	9
Tabela 2	Classificação da vegetação segundo Dorman e Sellers (1989). A tradução das características de cada bioma, apresentadas em Dorman e Sellers, segue Francis (1994) e Oyama (2002). (Fonte: Oyama, 2002)	11

Índice de Figuras

Figuras	Descrição	Pág.
Figura 1	Evolução da concentração de CO ₂ para os diferentes cenários considerados no IPCC/AR4 (Fonte: http://nomads.gfdl.noaa.gov/).	10
Figura 2	Algoritmo de obtenção do bioma potencial a partir das variáveis ambientais. Temperatura são dadas em °C; tempo térmico acumulado (G_0 , G_5), em °C dia/mês. A letra S sobre (ou ao lado de) as setas significa sim; N, não. (Fonte: Oyama, 2002).	13
Figura 3	Projeções de anomalias de precipitação (mm/dia) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário B1) em relação ao período base de 1961-1990.	14
Figura 4	Projeções de anomalias de temperatura (°C) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário B1) em relação ao período base de 1961-1990.	15
Figura 5	Projeções de anomalias de precipitação (mm/dia) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário A1B) em relação ao período base de 1961-1990.	15
Figura 6	Projeções de anomalias de temperatura (°C) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário A1B) em relação ao período base de 1961-1990.	16
Figura 7	Projeções de anomalias de precipitação (mm/dia) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário A2) em relação ao período base de 1961-1990.	16
Figura 8	Projeções de anomalias de temperatura (°C) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário A2) em relação ao período base de 1961-1990.	17
Figura 9	Biomas naturais em equilíbrio com o clima atual. Note que eles representam os biomas potenciais, porém não a distribuição atual da vegetação, que é resultado das mudanças no uso do solo e na cobertura vegetal.	18
Figura 10	Biomas potenciais para o período 2071-2100 do cenário B1.	18
Figura 11	Biomas potenciais para o período 2071-2100 do cenário A1B.	19
Figura 12	Biomas potenciais para o período 2071-2100 do cenário A2.	19
Figura 13	Condição da (a) floresta tropical e da (b) savana para o período 2070-2099 para mais do 75% dos modelos, comparados com a vegetação potencial natural atual (Figura 9), nos cenários A2, A1B e B1.	22

Capítulo 1

Introdução

O aquecimento global, provocado pelo aumento da quantidade de gases do efeito estufa na atmosfera terrestre, pode provocar mudanças nos ecossistemas terrestres com mudanças nos padrões globais da vegetação. Estudos recentes indicam que, ao contrário da maioria das atividades humanas, ecossistemas naturais não apresentam grande capacidade de adaptação (ou bem-sucedida migração em resposta) à magnitude das mudanças climáticas se estas ocorrerem no curto intervalo de décadas. Estes podem normalmente migrar ou se adaptar a mudanças climáticas que ocorram na escala de muitos séculos a milênios. Quando somamos ao aquecimento global as alterações de vegetação resultantes das mudanças dos usos da terra, notadamente os desmatamentos das florestas tropicais e dos cerrados, é quase certo que acontecerão rearranjos importantes nos ecossistemas e mesmo a redistribuição de biomas. A assombrosa velocidade com que tais alterações estão ocorrendo, em comparação àquelas dos processos naturais em ecossistemas, introduz séria ameaça à mega-diversidade de espécies da flora e da fauna dos ecossistemas, em especial da Amazônia, com o provável resultado de sensível empobrecimento biológico (Nobre et al., 2005).

A intensificação do efeito estufa indica que a região tropical da América do Sul (portanto o Brasil em quase sua totalidade) será a mais afetada em termos de temperatura, com um aumento em torno de 2°C a 6°C. Todos os modelos concordam com o sinal, o limite inferior e a uniformidade [em consonância com Giorgi e Francisco (2000)] do aquecimento para o Brasil. Em relação à precipitação, na América do Sul as regiões mais afetadas seriam a Amazônia e o Nordeste Brasileiro, em processos relacionados principalmente com a intensidade e posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Entre esses processos, destacam-se: a provável desintensificação da célula de Hadley no Hemisfério Norte (ocasionando uma ZCIT mais ao norte, já que o gradiente de temperatura neste hemisfério diminuiria) e o aumento da concentração de vapor de água atmosférico na região equatorial. Porém, a discordância é grande: enquanto alguns modelos apontam para anomalias positivas de precipitação sobre a

Amazônia e Nordeste Brasileiro, outros apontam para anomalias negativas (Giorgi e Francisco, 2000; Oyama, 2002), muito embora ambas as regiões sejam relativamente tidas como locais de grande previsibilidade climática (Moura e Hastenrath, 2004). O que entra em cena aqui são as diferentes formas em que cada modelo representa os processos hidrológicos na região, culminando na limitada representação de sistemas convectivos de escala regional (como complexos convectivos de mesoescala ou linhas de instabilidade). Tanto na Amazônia, como no Nordeste Brasileiro, esses sistemas convectivos de mesoescala, junto com a ZCIT, são de suma importância para os regimes de precipitação locais (Satyamurty et al., 1998).

A distribuição geográfica das comunidades da vegetação e sua relação para o clima têm sido examinadas com modelos biogeográficos ou modelos de biomas. Estes modelos usam como tese central que o clima exerce o controle dominante sobre a distribuição da vegetação. Os modelos biogeográficos podem simular a vegetação potencial (sem os efeitos dos usos da terra e do solo) baseando-se em alguns parâmetros climáticos, tais como a temperatura e a precipitação. Devido à simplicidade destes modelos e a existência de regras empíricas globais entre a vegetação natural e o clima, estes modelos têm sido utilizados para a estimativa de impactos das mudanças climáticas na cobertura vegetal (King e Neilson, 1992; Claussen e Esch, 1994, Nobre et al., 2004). Oyama e Nobre (2004) desenvolveram um modelo de vegetação potencial (PVM) que consegue representar a distribuição global dos diferentes biomas, e em escala regional, os biomas da América do Sul, onde outros modelos extensamente utilizados como o BIOME (Prentice et al., 1992) e o BIOME3 (Haxeltine e Prentice, 1996) têm algumas deficiências.

Capítulo 2

Dados e Modelos utilizados

2.1 DADOS UTILIZADOS

2.1.1 Cenários Climáticos do IPCC/AR4

Para este estudo foram utilizados os resultados de quinze modelos acoplados Oceano-Atmosfera (AOGCMs) preparados para o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - Quarto Relatório de Avaliação (IPCC/AR4). A resolução horizontal dos modelos varia de 2 a 3 graus. A Tabela 1 mostra uma descrição dos modelos globais do IPCC que foram utilizados neste estudo. As condições iniciais dos cenários são de simulações que começam no final do século 20 (Cenário 20CM3), que por sua vez é inicializado na época pré-industrial (1860). O cenário 20CM3 representa o clima atual em cada modelo, com uma mudança temporal da taxa de CO₂ atmosférico de 350 ppm para 370 ppm desde 1990 até 2000. No cenário A2 (A1B, B2) a concentração de CO₂ atinge o valor de 850 ppm (720 pmm, 550 ppm) em 2100 depois do qual a concentração de CO₂ é mantida constante para os cenários A1B e B1. A figura 1 mostra a evolução das concentrações de CO₂ para os diferentes cenários.

Tabela 1. Modelos globais do IPCC usados neste estudo

Modelo	Instituto (Pais)	Resolução
BCCR-BCM2.0	Bjerknes Centre for Climate Research (Norway)	T42L31 (aprox. 2.8° lat/lon)
CCSM3	National Center for Atmospheric Research (USA)	T85L26 (aprox. 1.4° lat/lon)
CGCM3.1(T47)	Canadiar Centre for Climate Modelling & Analysis (Canada)	T47L31 (aprox. 3.75° lat/lon)
CNRM-CM3	Météo-France /Centre National de Recherches Météorologiques (France)	T42L45 (aprox. 2.8° lat/lon)
CSIRO-Mk3.0	CSIRO Atmospheric Research (Australia)	T63L18 (aprox. 1.875° lat/lon)
ECHAM5/MPI-OM	Max Planck Institute for Meteorology (Germany)	T42L31 (aprox. 2.8° lat/lon)
ECHO-G	Meteorological Institute of the University of Bonn (Germany), Institute of KMA (Korea)	T30L19 (aprox. 3.75° lat/lon)
GFDL-CM2.0	US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical	2.° lan. x 2.5° lon., L24

	Fluid Dynamics Laboratory (USA)	
GFDL-CM2.1	US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)	2.° lat. x 2.5° lon., L24
GISS-ER	NASA/Goddar Institute for Space Studies (USA)	4° lat x 5° lon., L15
INM-CM3.0	Institute for Numerical Mathematics (Russia)	5° lat. x 4° lon, L21
IPSL-CM4.0	Institut Pierre Simon Laplace (France)	2.5° lat x 3.75° lon., L19
MIROC3.2(medres)	Center for Climate System Research (Univ. of Tokyo), National Institute For Environmental Studies, and Frontier Research Center For Global Change (Japan)	T42L20 (aprox. 2.8° lat/lon)
MRI-CGCM2.3.2	Meteorological Research Institute (Japan)	T42L21 (aprox. 2.8° lat/lon)
UKMO-HadCM3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research /Met Office (UK)	2.5° lat. x 3.75° lon. L19

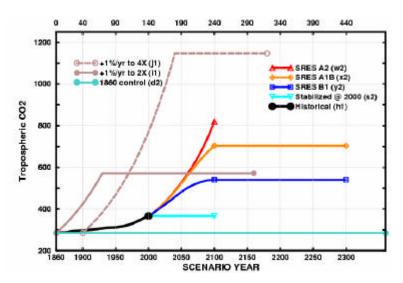


Figura 1. Evolução da concentração de CO₂ para os diferentes cenários considerados no IPCC/AR4 (Fonte: http://nomads.gfdl.noaa.gov/).

2.2. MODELO UTILIZADO

2.2.1 Modelo de vegetação potencial

O modelo de vegetação potencial que será utilizado é o PVM (Oyama e Nobre, 2004). O modelo utiliza como variáveis de entrada o tempo térmico acumulado (G, em °C dia/mês, G: Temperatura basal de 0°C, G5: Temperatura basal de 5°C), a temperatura do mês mais frio (T_c em °C), um índice hídrico (H, que permite diferenciar entre climas úmidos e secos) e um índice de seca (D, que representa a sazonalidade da umidade do solo). Estas variáveis são obtidas

mediante um modelo de balanço hídrico. Como saída, o modelo gera um bioma que pertence à classificação de Dorman e Sellers (Tabela 2).

Tabela 2. Classificação da vegetação segundo Dorman e Sellers (1989). A tradução das características de cada bioma, apresentadas em Dorman e Sellers, segue Francis (1994) e Oyama (2002). (Fonte: Oyama, 2002).

Bioma	Características	Nome usado por Oyama (2002) adotado neste trabalho
1	Árvores perenifólias com folhas largas	Floresta tropical
2	Árvores caducifólias com folhas largas	Floresta temperada
3	Árvores com folhas aciculadas e arvores com folhas aciculadas	Floresta mista
4	Árvores perenifólias com folhas aciculadas	Floresta boreal
5	Árvores caducifólias com folhas aciculadas	Floresta de lariços
6	Árvores de folhas largas e gramíneas	Savana (cerrado)
7	Somente gramíneas (perene)	Campos extratropicais (campos, pradarias, estepes)
8	Arbustos com folhas largas e gramíneas perenes	Caatinga
9	Arbustos com folhas largas e solo nu	Semi-deserto
10	Arbustos e árvores anãs com musgos, liquens, gramíneas e ervas baixas	Tundra
11	Solo nu	Deserto
12	Trigo de inverno e árvores caducifólias com folhas largas	Cultivos agrícolas
13	Gelo perpétuo	gelo

O modelo de balanço hídrico descrito em Oyama e Nobre (2004) está baseado principalmente em Willmott et al. (1985) com algumas modificações no que diz respeito à possibilidade de congelamento do solo e a formulação da evapotranspiração, que é feito pelo método de Penman-Monteith ao invés do método de Thornthwaite. O modelo considera uma única camada homogênea de solo coberta por um único tipo de vegetação em todas as áreas continentais. Isso significa que diferentes tipos de solos e vegetação não são considerados. Adota-se que a espessura do solo é de 1 m e que o armazenamento máximo de água no solo é de 500 mm. Estas suposições foram feitas para utilizar uma menor quantidade de parâmetros no modelo.

Conforme citado em Oyama e Nobre (2004), as variáveis ambientais de entrada são:

$$G_5 = \sum_{i=1}^{12} n_i F[T_i - 5]$$

$$\sum_{i=1}^{12} g_i E_i$$

$$H = \frac{\sum_{i=1}^{12} g_i E_i}{\sum_{i=1}^{12} g_i E_{\text{max}, i}}$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{12} F[0.5 - w_i]}{6}$$

$$F[x] = \begin{cases} x, x \ge 0 \\ x, x < 0 \end{cases}; \qquad g = \begin{cases} 1, \text{ solo sem congelamen to} \\ 0, \text{ solo congelado} \end{cases}$$

Onde, T é a temperatura média mensal (°C); n é o número de dias do mês; E a evapotranspiração real; E_{max} a evapotranspiração máxima; e o subscrito i refere-se ao mês (de 1 a 12). Como descrito em Oyama e Nobre (2004), a escolha das variáveis G_0 , G_5 , T_c e H baseia-se em Prentice et al. (1992), e a variável D representa, explicitamente, a sazonalidade da água no solo, e é acrescentada para que a duração da estação seca possa ser considerada na escolha dos biomas potenciais (H leva em conta a sazonalidade implicitamente).

Para cada ponto de grade (localidade), a partir da climatologia mensal da precipitação e temperatura do ar, roda-se o modelo de balanço hídrico e calculam-se, então as variáveis de entrada do Modelo de vegetação potencial (G₀, G₅, Tc, H e D; doravante chamadas ambientais). A partir do conjunto de variáveis ambientais, o CPTEC-PVM diagnostica o bioma em equilíbrio com o dado clima, seguindo o algoritmo mostrado na Figura 2.

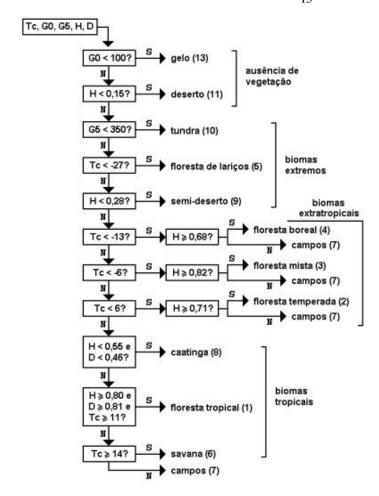


Figura 2. Algoritmo de obtenção do bioma potencial a partir das variáveis ambientais. Temperaturas são dadas em °C; tempo térmico acumulado (G₀, G₅), em °C dia/mês. A letra S sobre (ou ao lado de) as setas significa sim; N, não. (Fonte: Oyama, 2002).

Capítulo 3

METODOLOGIA E RESULTADOS

As figuras 3 a 8 apresentam as anomalias de precipitação e temperatura para o período 2071 - 2100 nos cenário B1, A1B e A2 e para todos os modelos analisados. As análises mostram maiores diferenças nas anomalias de precipitação e temperatura entre os diferentes modelos do que entre os diferentes cenários para o mesmo modelo. Como esperado, as maiores fontes de incertezas dos cenários de mudança climática regional estão associadas às projeções dos diferentes AOGCMs. O aquecimento projetado para América do Sul varia de 1° a 4°C para o cenário B1 e de 2° a 6°C para o cenário A2. Esta análise é mais complicada para as mudanças na precipitação, uma vez que os diferentes modelos apresentam diferenças no valor e no sinal da anomalia.

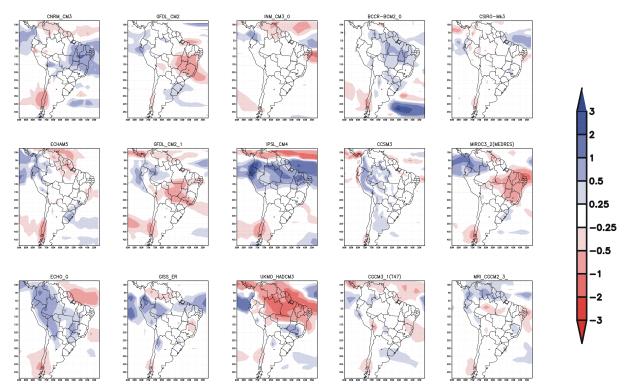


Figura 3. Projeções de anomalias de precipitação (mm/dia) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário B1) em relação ao período base de 1961-1990.

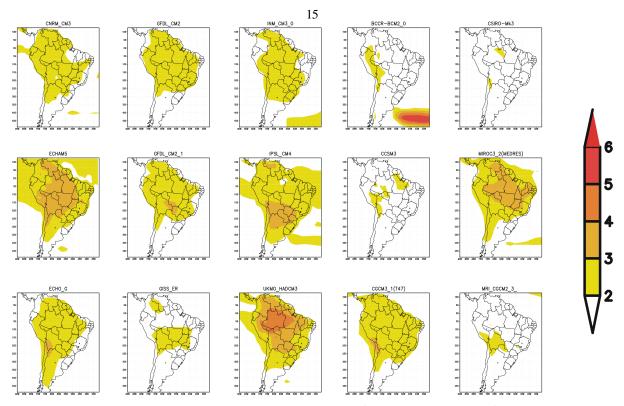


Figura 4. Projeções de anomalias de temperatura (°C) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário B1) em relação ao período base de 1961-1990.

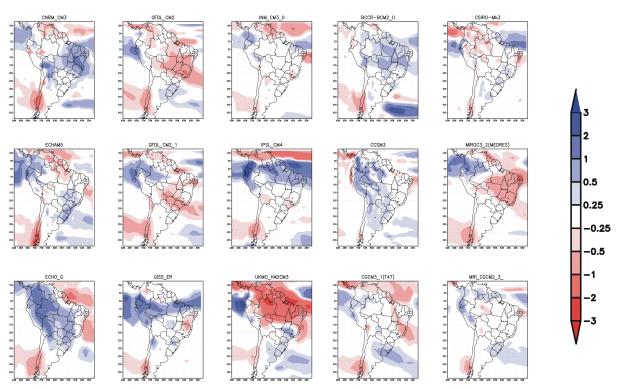


Figura 5. Projeções de anomalias de precipitação (mm/dia) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário A1B) em relação ao período base de 1961-1990.

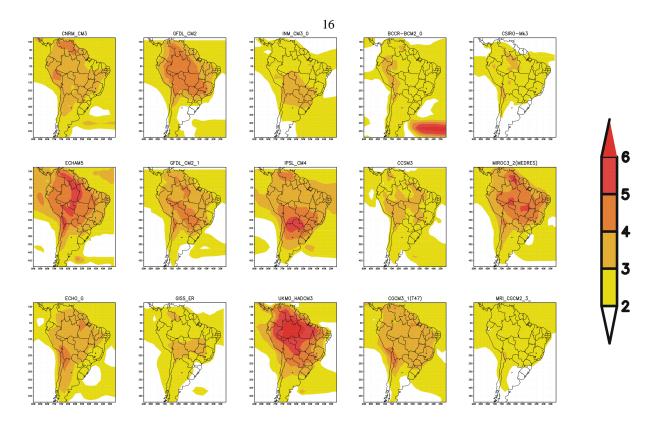


Figura 6. Projeções de anomalias de temperatura (°C) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário A1B) em relação ao período base de 1961-1990.

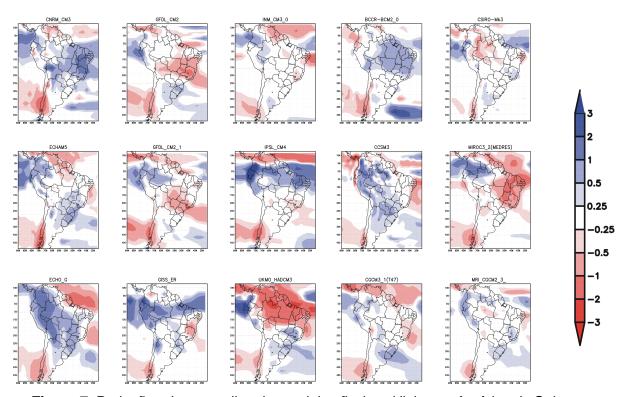


Figura 7. Projeções de anomalias de precipitação (mm/dia) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário A2) em relação ao período base de 1961-1990.

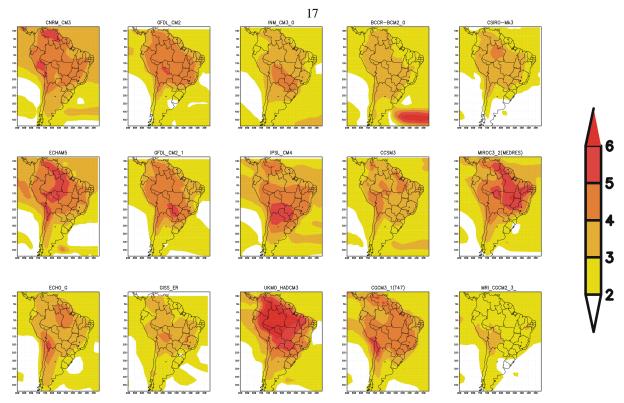


Figura 8. Projeções de anomalias de temperatura (°C) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário A2) em relação ao período base de 1961-1990.

As anomalias de precipitação e temperatura, calculadas subtraindo os cenários de mudança climática de 2071-2100 à climatologia dos modelos de 1961-1990 (cenário 20C3M), são adicionados á climatologia observada e, utilizando essa nova climatologia como entrada, integra-se o PVM. Este procedimento é feito para eliminar os erros sistemáticos dos modelos na subestimação da precipitação na Amazônia, já que, como discutido em Oyama e Nobre (2004), as diferenças entre a simulação (cenário futuro) e o controle (clima atual dos modelos), ou seja, as anomalias independem da climatologia obtida no controle. Sob essa hipótese, os erros sistemáticos serão filtrados ao se subtrair a simulação do controle.

As figuras 9 a 12 apresentam a vegetação potencial atual e a redistribuição de biomas projetados com o modelo de vegetação potencial PVM para América do Sul para os cenários B1, A1B e B2 e para todos os modelos analisados. Como esperado, as maiores diferenças na distribuição de biomas acontecem entre os diferentes modelos, mais do que nos diferentes cenários para o mesmo modelo. Imediatamente, nota-se que, independente dos cenários serem de baixas ou altas emissões de gases do efeito estufa, em média há uma diminuição da área de floresta tropical e um aumento da área de savana.

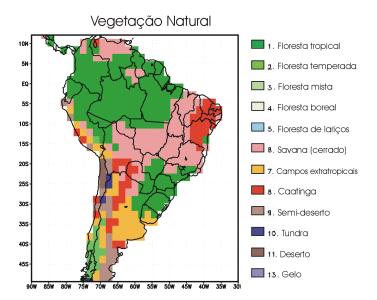


Figura 9. Biomas naturais em equilíbrio com o clima atual. Note que eles representam os biomas potenciais, porém, não a distribuição atual da vegetação, que é resultado das mudanças no uso do solo e na cobertura vegetal.

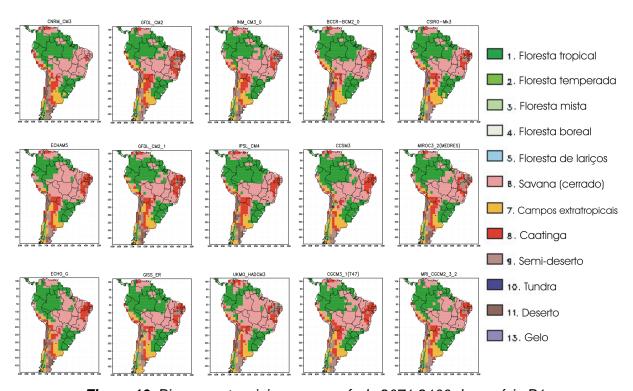


Figura 10. Biomas potenciais para o período 2071-2100 do cenário B1.

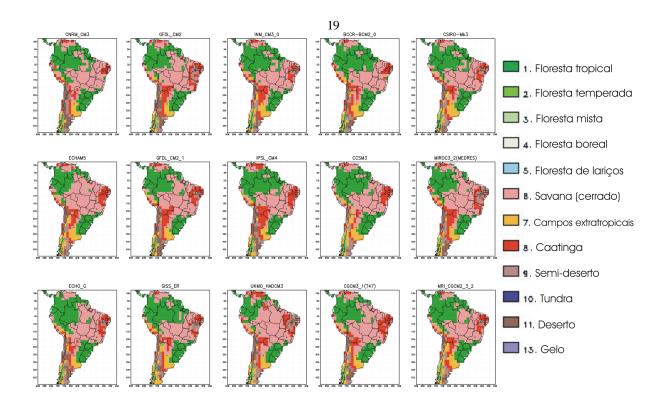


Figura 11. Biomas potenciais para o período 2071-2100 do cenário A1B.

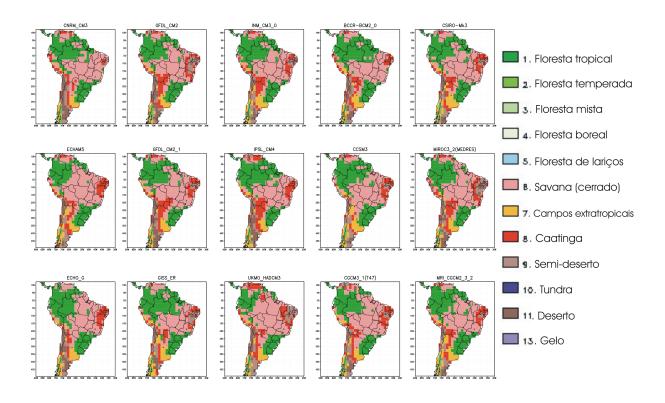


Figura 12. Biomas potenciais para o período 2071-2100 do cenário A2.

Para a América do Sul Tropical, tomando-se uma média destas projeções, constata-se a projeção do aumento da área de savanas (com o cerrado invadindo o Pará) e um substituição de área de caatinga por semi-deserto no núcleo mais árido do Nordeste do Brasil (Nobre et al., 2004; Hutyra et. al., 2005). Em termos simples, o aumento de temperatura induz a uma maior evapotranspiração (soma da evaporação da água à superfície com a transpiração das plantas), reduzindo a quantidade de água no solo, mesmo que as chuvas não diminuam significativamente. Este fator pode por si só pode desencadear a substituição dos biomas existentes hoje por outros mais adaptados a climas com menor disponibilidade hídrica para as plantas (por exemplo, savanas substituindo florestas, caatinga substituindo savanas, semi-deserto substituindo caatinga).

A figura 13 apresenta os pontos de grade onde mais do 75% dos 15 modelos usados (mais de 11 modelos) coincidem na condição futura (donde um determinado bioma permanece, desaparece, aparece ou não existe consenso entre os modelos) da floresta tropical e da savana para os três cenários analisados. Para América do Sul tropical, os resultados indicam que para o cenário A2, mais de 75% dos modelos apresentam regiões de redução da floresta tropical que é substituída por savana. Para o cenário B1, pode-se concluir que existe uma egião (este da Amazônia) onde mais do 75% dos modelos não apresentam permanência nem desaparecimento da floresta tropical, o que indica que não existe um consenso conclusivo do que acontecerá com esse bioma nessa região para esses cenários particulares. A combinação do aquecimento e das mudanças na precipitação indica menor água disponível para grandes porções da floresta tropical, o que têm fortes impactos na agricultura e nos recursos hídricos.

Em Cramer et al. (2001) a floresta amazônica seria substituída por floresta mista, savana e pastagem na parte leste da Amazônia e expansão da savana na parte oeste. Em White et al. (1999), usando simulações do HADCM2, savana, pastagem e deserto se expandem para o nordeste da Amazônia. Simulações usando os cenários mais recentes do HADCM3 mostram perda de uma grande parte da Amazônia (White et al., 1999), que pode ser acelerada pelo feedback positivo entre a emissão de carbono do solo e a vegetação (Cox et al., 2000, Jones et al., 2003; Cox et al., 2004).

Feddema et al. (2005), utilizando cenários futuros do IPCC SRES B1 e A2, estudou os efeitos na mudança do uso do solo. O estudo projetou as mudanças do uso do solo para os anos de 2050 e 2100 e os resultados indicaram que as regiões tropical e as de latitudes médias apresentam os mais significativos impactos. Durante o período de JJA, os resultados indicam um aquecimento da região tropical, principalmente na Amazônia. Este aquecimento, segundo os autores, é ocasionado pelo desflorestamento projetado para o ano de 2100. Sugerem que os desflorestamentos da Amazônia e o resfriamento de áreas vizinhas sobre os oceanos podem estar relacionados ao enfraquecimento da célula de Hadley e que isto poderia induzir a uma migração da Zona de Convergência Intertropical para o norte.

Ao aquecimento global deve-se também levar em conta outras alterações que contribuem para criar as condições de substituição de biomas. É o caso das alterações da cobertura da vegetação que ocorrem em diversas partes do globo, assim como no Brasil a taxas alarmantes como os desmatamentos da floresta tropical amazônica, que, segundo várias projeções, causarão mudanças climáticas regionais em direção a clima mais quente e seco na região. Um terceiro fator de distúrbio é o fogo. A floresta densa amazônica era praticamente impenetrável ao fogo. Mas, devido à combinação da fragmentação florestal, desmatamentos e aquecimento em razão dos próprios desmatamentos e devido ao aquecimento global, aliada a prática agrícola predominante que utiliza fogo intensamente, este quadro está rapidamente mudando e a freqüência de incêndios florestais vem crescendo assustadoramente a cada ano. O grande incêndio nas florestas, savanas e campos de Roraima, entre janeiro e março de 1998, é um ilustrativo exemplo do que pode acontecer no futuro com mais freqüência. Resultado de uma seca persistente e intensa causada pelo fortíssimo episódio El Niño de 1997-98 e o uso indiscriminado de fogo, mais de 13 mil km² de florestas foram afetadas pelo fogo, talvez no maior incêndio jamais observado na Amazônia (Nobre et al., 2005).

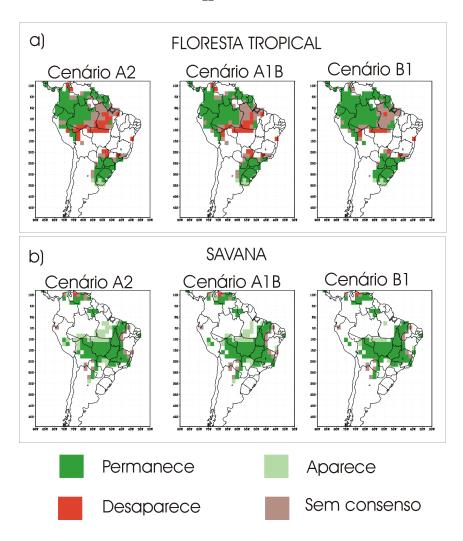


Figura 13. Condição da (a) floresta tropical e da (b) savana para o período 2070-2099 para mais do 75% dos modelos, comparados com a vegetação potencial natural atual (Figura 9), nos cenários A2, A1B e B1.

Capítulo 4

Discussões e Conclusões

Os modelos climáticos globais do IPCC/AR4 e os modelos regionais de mudança climática apontam para cenários climáticos futuros de aumento da temperatura superficial de 2 a 4°C na América do Sul. No entanto, quanto à precipitação, ainda não há consenso em relação ao sinal das anomalias para a Amazônia e o Nordeste brasileiro. Evidentemente, essas mudanças climáticas têm um impacto nos ecossistemas naturais e especificamente na distribuição de biomas, o que por vez êm impactos na biodiversidade, agricultura, nos recursos hídricos, etc. O futuro da distribuição de biomas na América do Sul poderá ser afetado pela combinação dos impactos da mudança climática e da mudança no uso da terra, que podem levar o sistema a savanização de partes da Amazônia e desertificação do Nordeste Brasileiro (outro estado de equilíbrio encontrado por Oyama e Nobre, 2003). A combinação de aquecimento e mudanças na precipitação indica menos água disponível, o que tem um forte impacto na agricultura e nos recursos hídricos.

A combinação sinérgica dos impactos climáticos regionais decorrentes dos desmatamentos, com aqueles resultantes do aquecimento global, implicando em climas mais quentes e possivelmente também mais secos, aliada a maior propensão a incêndios florestais, amplifica tremendamente a vulnerabilidade dos ecossistemas tropicais, favorecendo as espécies mais adaptadas a estas novas condições, e que são tipicamente aquelas de savanas tropicais e subtropicais, naturalmente adaptadas a climas quentes, com longa estação seca e onde o fogo é desempenha papel fundamental em sua ecologia (Nobre et al, 2005).

REFERÊNCIAS

- Claussen, M., and M. Esch, 1994: Biomes computed from simulated climatologies. *Climate Dynamics*, **9**, 235-243.
- Cox. P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall, and I. J. Totterdell, 2000: Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. Nature, 408, 184-187.
- Cox P.M., R.A. Betts, M. Collins, P.P. Harris, C. Huntingford, and C.D. Jones, 2004: Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. Theorethical and Applied Climatology, 78, 137-156.
- Cramer W, A. Bondeau, F.I. Woodward, I.C. Prentice, R.A. Betts, V. Brovkin, P.M. Cox, V. Fisher, J.A. Foley, A.D. Friend, C. Kucharik, M.R. Lomas, N. Ramankutty, S. Sitch, B. Smith, A. White, C. Young-Molling, 2001: Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO2 and climate change: results from six dynamic global vegetation models. Global Change Biology 7, 357–373.
- Dorman, J. L., and P.J. Sellers, 1989: A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the Simple Biosphere model (SiB). *Journal of Applied Meteorology*, **28**, 833-855.
- Feddema, J.J., K.W. Oleson, G.B. Bonan. L.O. Mearns., L.E. Buja, G.A. Meehl., and W.M. Washington, 2005: The importance of land-cover change in simulating future climates. Science, 310, 1674-1678.
- Francis, J.K., 1994: English-Portuguese Equivalents of Forestry and Conservation Terms (Termos Equivalentes em silvicultura e conservação Português-Inglês). United States Department of Agriculture, General Technical Report so-1 09.
- Giorgi, F.; Francisco, R. Evaluating uncertainties in the prediction of regional climate. Geophysical Research Letters, v. 27, n. 9, p. 1295-1298, 2000.
- Haxeltine, A., and I.C. Prentice, 1996: BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constrains, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, v.**10**, n.4, p.693-709.
- Hutyra, L.R., J.W. Munger, C.A. Nobre, S.R. Saleska, and S.A. Vieira, 2005: Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazônia. *Geophysical Research Letters*, **32**, L24712, doi:10.1029/2005GL024981.
- Jones, C. D., P. M. Cox, R. L. H. Essery, D. L. Roberts, and M. J. Woodage, 2003: Strong carbon cycle feedbacks in a climate model with interactive CO2 and sulphate aerosols. Geophysical Research Letters 30(9): 1479.
- King, G.A, and R.P. Neilson, 1992: The transient response of vegetation to climate change: a potential source of CO2 to the atmosphere. *Water, Air and Soil Pollution*, **64**, 365-383.
- Moura, A. D.; Hastenrath, S. Climate prediction for Brazil's Nordeste: performance of empirical and numerical modeling methods. Journal of Climate, v. 17, n. 13, p. 2667-2672, 2004.
- Nobre, C.A., M.D. Oyama, G.S. Oliveira, J.A. Marengo, E. Salati, 2004: Impacts of climate change scenarios for 2091-2100 on the biomes of South America. First CLIVAR International Conference, Baltimore, USA, 21-25 June.

- Nobre, C.; Assad, E.D. e M.D. Oyama (2005) Mudança ambiental no Brasil. Em Terra na Estufa, ed. especial Scientific American Brasil, no 12, pp. 70-75.
- Oyama, M. (2002) Consequências climáticas da mudança de vegetação do nordeste brasileiro: um estudo de modelagem. Tese de doutorado. São José dos Campos. 222 pp.
- Oyama, M.D. and C.A. Nobre, 2004. A simple potencial vegetation model for coupling with the Simple Biosphere Model (SIB). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. **19**, n. 2, p. 203-216, 2004.
- Prentice, L. C., W. Cramer, S. P Harrison, R. Leemans, R. A. Monserud. and A. M. Solomon, 1992: A global bio'me model based on plant physiology and dominance, soil properties, and climate. *Journal of Biogeography*, **19**, 117-134.
- Satyamurty, P., C.A. Nobre, C. A. and P.L.S. Dias, 1998: Meteorology of the south hemisphere. Boston, Massachusetts: Am. Meteoro. Soc., December: 27(49): 119 139.
- White, A.M., G.R. Cannell, and A.D. Friend, 1999: Climate change impacts on ecosystems and the terrestrial carbon sink: a new assessment. Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions, 9, S21-S30.























