

**ANAILTON SALES DE MÉLO**

**SUSCETIBILIDADE DO AMBIENTE A OCORRÊNCIA  
DE QUEIMADAS SOB CONDIÇÕES CLIMÁTICAS  
ATUAIS E DE AQUECIMENTO GLOBAL**

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  
2009

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

T

M528s  
2009

Mélo, Anailton Sales de, 1975-  
Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas  
sob condições climáticas atuais e de aquecimento global  
/ Anailton Sales de Mélo. – Viçosa, MG, 2009.  
xviii, 77f.: il. col. ; 29cm.

Orientador: Flávio Barbosa Justino.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 73-77.

1. Queimada - Avaliação de riscos. 2. Climatologia.  
3. Mudanças climáticas. 4. Aquecimento global.  
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

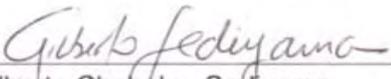
CDD 22.ed. 363.73874

ANAILTON SALES DE MÉLO

**SUSCETIBILIDADE DO AMBIENTE A OCORRÊNCIA  
DE QUEIMADAS SOB CONDIÇÕES CLIMÁTICAS  
ATUAIS E DE AQUECIMENTO GLOBAL**

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: 13 de fevereiro de 2009.

  
\_\_\_\_\_  
Gilberto Chonaku Sedyama  
(Co-orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Guido Assunção Ribeiro  
(Co-orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Carlos Fernando Lemos

  
\_\_\_\_\_  
Marcos Heil Costa

  
\_\_\_\_\_  
Flavio Barbosa Justino  
(Orientador)

in memoriam

Mitoca (irmão)

Pai Pedro (avô)

Vovô Joaquim

Tio Zé (Padrinho)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus onipotente, onipresente e onisciente.

A minha família, Milton e Ana, Valéria e Artur, Tonires e família, Milano e Eliene, Mitoca, Milana, Tino e família,

A família do Professor Orientador, Flávio B.J. que me fez acreditar que é possível, dando todo suporte necessário para o desenvolvimento do trabalho, e muitas vezes me fez enxergar além de novos horizontes.

A família do compadre Eduardo.

A Universidade Federal de Viçosa e ao programa de pós-graduação em Meteorologia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola.

Aos Professores Co-orientadores: Sedyama e Guido, por suas atenciosas correções no delineamento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Fernando Lemos, por todo auxílio nesta longa caminhada.

Aos professores Alberto Setzer e Raffi Sismanoglu, pelas atenciosas sugestões.

Aos professores que ministraram disciplinas (1), participaram do projeto (2), do seminário (3) e defesa (4): Zé Maria (1,2,3), Sedyama (1,1,4), Aristides (1), Zonier (2), Marco Heil (1,4), Antonio (3) e Hamakaua (2).

Aos amigos: danoninho (Angelo Zanoni) e piruquetes (Humberto Petrelli), por suas colaborações mesmo de tão longe.

Ao Dr. Marcelo Cid de Amorim pelo incentivo.

Ao Jeferson que sempre esteve ao lado nesta empreitada.

A família do Hudson (Dani, Malu e Gregório).

Aos colegas do grupo de estudo de pesquisa: Viviane, Geraldo e Bruno.

E todos pessoal do anexo (2º andar) do DEA.

## EPÍGRAFE

*Muitas vezes, Pedro, você fala  
Sempre a se queixar da solidão  
Quem te fez com ferro, fez com fogo, Pedro  
É pena que você não sabe não  
Vai pro seu trabalho todo dia  
Sem saber se é bom ou se é ruim  
Quando quer chorar vai ao banheiro  
Pedro as coisas não são bem assim  
Toda vez que eu sinto o paraíso  
Ou me queimo torto no inferno  
Eu penso em você meu pobre amigo  
Que só usa sempre o mesmo terno  
Pedro, onde você vai eu também vou  
Mas tudo acaba onde começou ...*

### **Meu Amigo Pedro**

Raul Seixas e Paulo Coelho

*“Toda a atmosfera já tomou um tom de cinza escuro. Só o céu de verão, no alto, parece um dossel de paraíso, com o azul translúcido a palpitar uma luz misteriosa. Já começaram a acender os combustores na rua, já as estrelas de ouro ardem no alto. A rua vai de novo precipitar-se no delírio.”*

### **A Alma Encantadora das Ruas**

João do Rio

## **BIOGRAFIA**

Anailton Sales de Melo, filho de José Milton Castelo Branco de Mélo e Anaires Clementino de Mélo, nasceu em Campina Grande, Paraíba em 19 de maio de 1975.

Em setembro de 1996, graduou-se em Licenciatura Plena em Física pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), em Campina Grande. Tornou-se especialista em Ensino de Ciências, modalidade Física pela Universidade de São Paulo (USP), em 2000. Atuou como professor de física no Ensino Médio na cidade de São Paulo da Rede Estadual Paulista, durante os anos de 1999 até 2007.

Atualmente é professor de física da Rede Estadual Mineira, lecionando no Ensino Médio. Iniciou o mestrado em Meteorologia Agrícola na área de concentração em Climatologia em agosto de 2007.

## SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS .....	viii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiv
RESUMO .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
1.0 - INTRODUÇÃO.....	1
2.0 - DADOS UTILIZADOS .....	10
2.1 - Reanálise: NCEP/NCAR .....	10
2.2 - Dados Simulados: ECHAM5/MPI-OM .....	12
3.0 - COMPORTAMENTOS CLIMÁTICO .....	14
3.1 - Análise Climatológica .....	14
3.2 - Análise Harmônica .....	18
3.2.1 - Análise harmônica da temperatura .....	21
3.2.2 - Análise harmônica da precipitação .....	23
3.2.3 - Análise harmônica da umidade relativa .....	25
4.0 - MODELO DE RISCO DE QUEIMADA: ÍNDICE DE HAINES .....	27
4.1 - Análises do Índice de Haines (IH) .....	31
4.1.1 - Análise para o mês de junho .....	31
4.1.2 - Análise para o mês de julho .....	35
4.1.3 - Análise para o mês de agosto .....	39
4.1.4 - Análise para o mês de setembro .....	42
4.1.5 - Análise para o mês de outubro .....	45

5.0 - MODELO DE RISCO DE QUEIMADA: ÍNDICE DE SETZER .....	48
5.1 - Conceito de Risco de Fogo .....	48
5.1.1 - Seqüência do cálculo do risco de fogo observado .....	49
5.2 - Mudança na Vegetação.....	53
5.3 - Análises do Índice de Setzer (IS) .....	55
5.3.1 - Análise para o mês junho .....	55
5.3.2 - Análise para o mês julho .....	58
5.3.3 - Análise para o mês agosto .....	61
5.3.4 - Análise para o mês setembro.....	64
5.3.5 - Análise para o mês outubro .....	67
6.0 - CONCLUSÕES .....	70
7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{y}$	média dos valores da série
<b>(A)</b>	termo da estabilidade do índice de Haines
<b>(B)</b>	termo da umidade do índice de Haines
<b>A</b>	termo associado aos tipos de vegetações do índice de Setzer
$A_j$	componente do cosseno
$B_j$	componente do seno
$C_j$	amplitude
$CO_2$	dióxido de carbono
<b>hPa</b>	hectopascal
<b>J</b>	variância
<b>T</b>	temperatura do ar
<b>Td</b>	temperatura do ponto de orvalho
<b>Tg[C]/ano</b>	teragrama de carbono por ano
$T_{máx}$	temperatura máxima
<b>UR</b>	umidade relativa do ar
$UR_{mín}$	umidade relativa mínima
$W_j$	freqüência
$\Phi$	fase

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>AD</b>	Assimilação de Dados
<b>AG</b>	Aquecimento Global
<b>AP</b>	Antes do Presente
<b>AS</b>	América do Sul
<b>AN</b>	América do Norte
<b>CPTEC</b>	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
<b>ESSENCE</b>	Ensemble SimulationS of Extreme weather events under Nonlinear Climate changE
<b>FP</b>	Fator de Precipitação
<b>HS</b>	Hemisfério Sul
<b>IH</b>	Índice de Haines
<b>INPE</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>IS</b>	Índice de Setzer
<b>M</b>	Média Atmosfera
<b>MCGA</b>	Modelo de Circulação Geral Atmosférico
<b>NCAR</b>	National Center for Atmospheric Research
<b>NCEP</b>	National Centers for Environmental Prediction
<b>NEB</b>	Nordeste Brasileiro
<b>OMM</b>	Organização Meteorológica Mundial
<b>P</b>	Presente
<b>ppmv</b>	Partes por Milhão em Volume
<b>PSE</b>	Dias de Secura
<b>RB</b>	Risco Básico
<b>RF</b>	Risco de Fogo
<b>RT</b>	Risco Total
<b>UTC</b>	Tempo Universal Coordenado
<b>ZCAS</b>	Zona de Convergência do Atlântico Sul
<b>ZCIT</b>	Zona de Convergência Intertropical

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Desmatamento .....	4
<b>Figura 1.1:</b> Fumaça. ....	5
<b>Figura 1.2:</b> Evolução temporal do total de queimadas (1998-2008) .....	6
<b>Figura 1.3:</b> Distribuição espacial e temporal das queimadas (2007) .....	7
<b>Figura 3:</b> Climatologia no período de junho a outubro, média dos anos 1980 a 2000. Reanálises (NCEP): a) Temp. (°C), c), Prec. (mm/dia), e) UR (%); Simulações ECHAM5: b) Temp.(°C), d) Prec. (mm/dia), f) UR (%) .....	17
<b>Figura 3.1:</b> Primeiro harmônico da Temp. de junho a outubro, média dos anos 1980 a 2000. Reanálises (NCEP): a) variância (%), c) fase (mês), e) amplitude (°C); Simulações (ECHAM): b) variância (%), d) fase (mês), f) amplitude (°C) .....	22
<b>Figura 3.2:</b> Primeiro harmônico da Prec. de junho a outubro, média dos anos 1980 a 2000. Reanálises (NCEP): a) variância (%), c) fase (mês), e) amplitude; Simulações (ECHAM): b) variância (%), d) fase (mês), f) amplitude (mm/dia). ....	24
<b>Figura 3.3:</b> Primeiro harmônico da UR de junho a outubro, média dos anos 1980 a 2000. Reanálises (NCEP): a) variância (%), c) fase (mês), e) amplitude (°C); Simulações (ECHAM): b) variância (%), d) fase (mês), f) amplitude (%) .....	26
<b>Figura 4:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do NCEP no mês de junho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines. ....	33
<b>Figura 4.1:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do ECHAM no mês de junho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines .....	33
<b>Figura 4.2</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas no futuro a partir dos dados do ECHAM no mês de junho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines .....	33
<b>Figura 4.3:</b> a) Focos de queimadas acumuladas em junho de 2006, b) Focos de queimadas acumuladas do mês de junho de 2007 .....	34
<b>Figura 4.4:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do NCEP no mês de julho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines .....	37

<b>Figura 4.5:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do ECHAM no mês de julho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines .....	37
<b>Figura 4.6:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas no futuro a partir dos dados do ECHAM no mês de junho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines .....	37
<b>Figura 4.7:</b> a) Focos de queimadas acumuladas em julho de 2006, b) Focos de queimadas acumuladas do mês de julho de 2007. ....	38
<b>Figura 4.8:</b> a) Focos de queimadas acumuladas em agosto de 2006, b) Focos de queimadas acumuladas do mês de agosto de 2007. ....	40
<b>Figura 4.9:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do NCEP no mês de agosto: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines. ....	41
<b>Figura 4.10:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do ECHAM no mês de agosto: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines. ....	41
<b>Figura 4.11:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas no futuro a partir dos dados do ECHAM no mês de junho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines .....	41
<b>Figura 4.12:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do NCEP no mês de setembro: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.....	43
<b>Figura 4.13:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do ECHAM no mês de setembro: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.....	43
<b>Figura 4.14</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas no futuro a partir dos dados do ECHAM no mês de setembro: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.....	43
<b>Figura 4.15:</b> a) Focos de queimadas acumuladas em setembro de 2006, b) Focos de queimadas acumuladas do mês de setembro de 2007 .....	44
<b>Figura 4.16:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do NCEP no mês de outubro: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.....	46
<b>Figura 4.17:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do ECHAM no mês de outubro: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.....	46

<b>Figura 4.18:</b> Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas no futuro a partir dos dados do ECHAM no mês de junho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines .....	46
<b>Figura 4.19:</b> a) Focos de queimadas acumuladas em outubro de 2006, b) Focos de queimadas acumuladas do mês de outubro de 2007 .....	47
<b>Figura 5:</b> Variação do risco de fogo (RF) para diferentes vegetações.....	51
<b>Figura 5.1:</b> a) Distribuição da vegetação atual para a América do Sul, b) Distribuição da vegetação prevista para o futuro na América do Sul .....	54
<b>Figura 5.2:</b> a) Anomalia da T <sub>máx</sub> entre a simulação de clima futuro e vegetação atual e o presente para junho; b) o mesmo que (a) para UR <sub>mín</sub> e c) para o PSE, d), e) ,f) mostra a distribuição espacial da T <sub>máx</sub> , UR <sub>mín</sub> e PSE com simulações futuras de clima e vegetação para junho .....	56
<b>Figura 5.3:</b> a) Índice de Setzer (IS) para o clima e vegetação atual em junho; b) IS para o clima futuro e vegetação atual em junho; c) IS para simulações futuras de clima e vegetação em junho; d) são as anomalias entre b) e a); e) são as anomalias entre c) e b) .....	57
<b>Figura 5.4:</b> a) Anomalia da T <sub>máx</sub> entre a simulação de clima futuro e vegetação atual e o presente para julho; b) o mesmo que (a) para UR <sub>mín</sub> e c) para o PSE; d), e) ,f) mostra a distribuição espacial da T <sub>máx</sub> , UR <sub>mín</sub> e PSE com simulações futuras de clima e vegetação para julho.....	59
<b>Figura 5.5:</b> a) Índice de Setzer (IS) para o clima e vegetação atual em julho; b) IS para o clima futuro e vegetação atual em julho; c) IS para simulações futuras de clima e vegetação em julho; d) são as anomalias entre b) e a); e) são as anomalias entre c) e b).....	60
<b>Figura 5.6:</b> a) Anomalia da T <sub>máx</sub> entre a simulação de clima futuro e vegetação atual e o presente para agosto; b) o mesmo que (a) para UR <sub>mín</sub> e c) para o PSE, d), e) ,f) mostra a distribuição espacial da T <sub>máx</sub> , UR <sub>mín</sub> e PSE com simulações futuras de clima e vegetação para agosto .....	62
<b>Figura 5.7:</b> a) Índice de Setzer (IS) para o clima e vegetação atual em agosto; b) IS para o clima futuro e vegetação atual em agosto; c) IS para simulações futuras de clima e vegetação em agosto; d) são as anomalias entre b) e a); e) são as anomalias entre c) e b) .....	63
<b>Figura 5.8:</b> a) Anomalia da T <sub>máx</sub> entre a simulação de clima futuro e vegetação atual e o presente para setembro; b) o	

mesmo que (a) para URmín e c) para o PSE, d), e) ,f) mostra a distribuição espacial da Tmáx, URmín e PSE para simulações futuras de clima e vegetação para setembro .....	65
<b>Figura 5.9:</b> a) Índice de Setzer (IS) para o clima e vegetação atual em setembro; b) IS para o clima futuro e vegetação atual em setembro; c) IS para simulações futuras de clima e vegetação em setembro; d) são as anomalias entre b) e a); e) são as anomalias entre c) e b) .....	66
<b>Figura 5.10:</b> a) Anomalia da Tmáx entre a simulação de clima futuro vegetação atual e o presente para outubro; b) o mesmo que (a) para URmín e c) para o PSE, d), e) ,f) mostra a distribuição espacial da Tmáx, URmín e PSE para simulações de futuras de clima e vegetação para outubro .....	68
<b>Figura 5.11:</b> a) Índice de Setzer (IS) para o clima e vegetação atual em outubro; b) IS para o clima futuro e vegetação atual em outubro; c) IS para simulações futuras de clima e vegetação em outubro; d) são as anomalias entre b) e a); e) são as anomalias entre c) e b).....	69

## LISTA DE TABELA

<b>Tabela 1:</b> Ilustração dos diferentes componentes.....	29
<b>Tabela 2:</b> Cálculo do Índice de Haines (IH) .....	30
<b>Tabela 3:</b> Cálculo do IH em função da temperatura.....	30
<b>Tabela 4:</b> Classe de vegetação empregada no Índice de Setzer (IS) .....	50
<b>Tabela 5:</b> Classes de risco de fogo.....	52

## RESUMO

MELO, Anailton Sales de, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2009.  
**Suscetibilidade do Ambiente a Ocorrências de Queimadas Sob Condições Climáticas Atuais e de Aquecimento Global.** Orientador: Flávio B. Justino. Co-orientadores: Gilberto C. Sedyama e Guido A. Ribeiro.

As queimadas, a nível global, são a segunda maior fonte de emissões de gases de efeito estufa. Um passo importante para a redução dos impactos das queimadas é por meio de investigação da suscetibilidade que um determinado ambiente possui para a queima ou mesmo para o alastramento do fogo (risco de fogo). Diante da necessidade de se conhecer possíveis implicações das mudanças na circulação atmosférica, em um futuro próximo, pretendeu-se, neste trabalho, investigar a suscetibilidade do ambiente a ocorrência de queimadas, baseado em dois índices de risco de queimadas: Índice de Haines (IH) e Índice de Setzer (IS). Para tanto, dados de modelagem numérica do modelo ECHAM5/MPI-OM, e dados das reanálises do NCEP são empregados para os cálculos dos referidos índices em dois períodos: atual (1980-2000) e projeções climáticas para o final do século (2080-2100). Com base nos resultados, concluiu-se que os modelos de risco de fogo reproduziram bem as áreas com maior incidência de queimadas sob condições atuais. A comparação entre os resultados proposto pelo IH e o IS mostra que a metodologia de Setzer intensifica o nível de risco máximo, e sob condições de Aquecimento Global (AG) observou-se um aumento na área de risco em especial para a região Amazônica em ambos os conjuntos de dados. Isto resulta do maior secamento da atmosfera associada à escassez de chuvas e ao aumento da temperatura, em particular para a região Centro-Oeste do Brasil.

## ABSTRACT

MELO, Anailton Sales de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2009.  
**Environmental Susceptibility for the Occurance of Vegetacion Fire Under Present Day and Greenhouse Warming Conditions.** Advisor: Flávio B. Justino. Co-advisors: Gilberto C. Sedyama and Guido A. Ribeiro.

Vegetation fires are the second source of greenhouse gas emissions in the atmosphere. An important step to reduce the climate impact of these emissions is the investigation of the atmospheric susceptibility of a region for fire development (fire risk). This study aims to investigate the environmental susceptibility to fires, based on two fire risk models: the Haines Index (IH) and the Setzer Index (IS). The study is carried out with data from the ECHAM5/MPI-OM climate model and the NCEP reanalysis data, to calculate both indices during two periods: present day (1980-2000) and climate projections for the end of the 21<sup>st</sup> century (2080-2100). The results demonstrate that the fire risk models accurately reproduced the areas with the observed vegetation fire as detected by satellite under actual conditions. A comparison between the results proposed by the IH and IS shows that the Setzer methodology intensified the maximum risk level, and under global warming (GW) conditions, there exist an increase in the atmospheric favorability to fire development in the Amazon region. This is associated with the drying of the atmosphere due to less precipitation and increase in temperature, especially in the central part of Brazil.

## **Capítulo 1**

### **1.0 INTRODUÇÃO**

Há tempos os povos têm percebido a estreita relação entre o homem e o clima devido à influência das variações climáticas no bem-estar social. Com o incremento das necessidades de consumo associadas ao aumento da população nos últimos 10.000 anos, cresceram as atividades agropecuárias. As atividades agrícolas, por sua vez, necessitam de um manejo sazonal do solo, o que envolve na maior parte dos casos o uso do fogo. De acordo com LATURNER e SCHERER (2004), na história evolutiva do homem, este utiliza o fogo desde as mais remotas eras. Nas últimas décadas tem crescido a preocupação de vários setores da sociedade com o uso indiscriminado do fogo. O fogo cultural, como AGEE (1993) designa as ignições de origem humana é, no entanto, tão ou mais importante que o fogo natural.

A queima de biomassa nos ecossistemas devido à expansão da fronteira agrícola, à conversão de florestas e cerrados em pastagens, e à renovação de cultivos agrícolas, são alguns dos mais importantes fatores que causam impactos sobre o clima e a biodiversidade (KIRCHOFF, 1997; COSTA *et al.*, 2007). As queimadas ainda provocam o empobrecimento do solo, a destruição da vegetação, problemas de erosão, poluição atmosférica e estão ligadas a alterações na composição química da atmosfera (CRUTZEN e ANDRAEA, 1990).

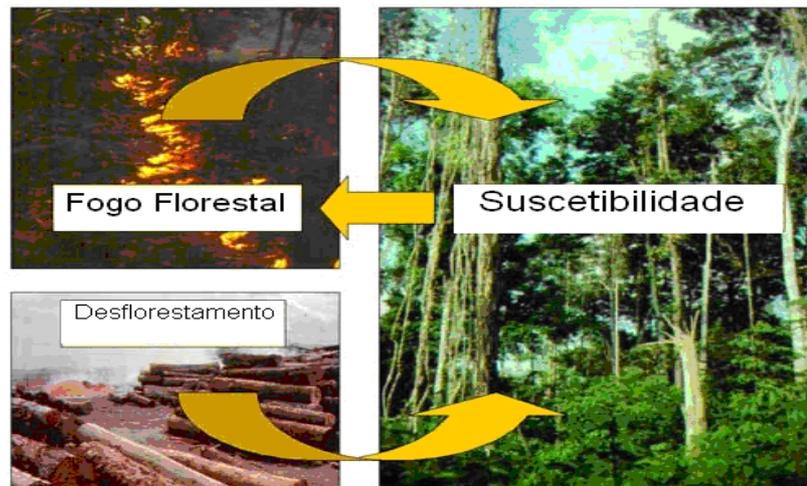
Queimadas e incêndios florestais nem sempre têm sido atribuídos diretamente à ação humana. A ocorrência do fogo depende de alguns fatores que permitem o início da reação da combustão e a sua continuação depende principalmente da energia potencial armazenada no material combustível (RIBEIRO e SOARES, 1998). Por exemplo, estudos palinológicos na região central do cerrado brasileiro indicam a presença de carvão em reconstruções que datam de 32.000 anos antes do presente (AP) (FERRAZ-VICENTINI, 1999; SALGADO-LABOURIAU e FERRAZ-VICENTINI, 1994). Este período, que está compreendido na última era glacial, que se estende de 100.000 a 10.000 anos AP, caracteriza-se por um clima mais frio e seco em relação ao atual (JUSTINO, 2004; CRUZ *et al.*, 2005). Todavia, muito pouco é sabido sobre as causas que levaram as condições suscetíveis ao fogo neste período. Acredita-se que a causa mais provável para estas queimadas glaciais foi à incidência de relâmpagos/raios.

Na região Amazônica, a presença de fragmentos de carvão vegetal em solos de florestas pluviais tem sido estudada por vários autores ao longo dos últimos 15 anos (SANFORD *et al.*, 1985; SILDARRIAGA e WEST, 1986), com datações de fragmentos que apresentavam idades entre 250 a 6500 anos AP.

As alterações climáticas, como as provocadas pelo *El Niño* (PHILANDER, 2001), podem contribuir para elevar o potencial de risco de queimadas e incêndios acidentais no Brasil. Os efeitos do *El Niño* antecipam as queimadas agrícolas, provocando uma ampliação do período tradicional e, conseqüentemente, o aumento da ocorrência de focos de queimada e incêndios florestais ao longo do ano.

O fogo, portanto, é um importante agente de transformação da paisagem e predominâncias de espécies da fauna e flora. O papel do fogo associado com o desmatamento é amplamente conhecido, mas seus impactos são ainda pouco documentados. Todos os anos sub-incêndios acidentais, o que têm sido chamados desmatamento oculto, consomem grande parte da floresta amazônica (NEPSTAD *et al.*, 1999). O fogo em vegetação, após as atividades agrícolas e urbanas, é o fator que mais contribui para as tendências globais de desflorestação/florestação (BOND e VAN WILGEN, 1996).

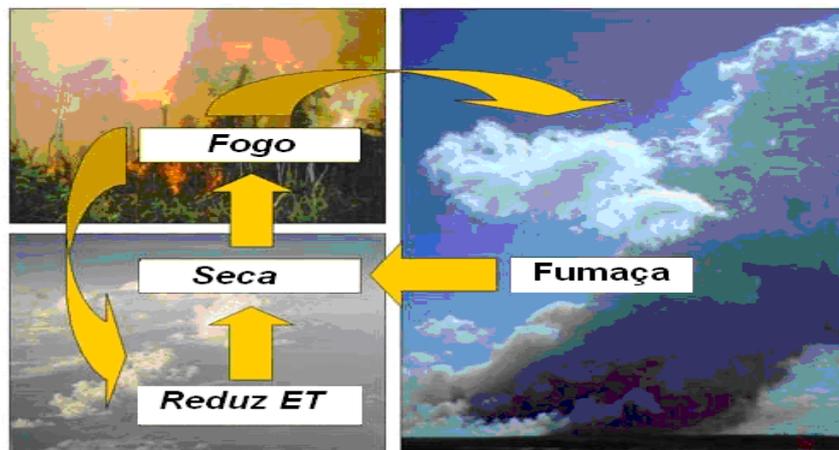
As condições ambientais pós-queimadas reforçam os comportamentos que favorecem o surgimento de novas queimadas (RIBEIRO e BONFIM, 2000). As árvores removidas no desmatamento na maioria das vezes são de grande porte. Em sua remoção deixam as florestas vulneráveis implicando numa maior radiação e, conseqüentemente, maior temperatura, ou seja, alterando todo seu microclima e favorecendo a maior suscetibilidade de incêndios futuros (Fig. 1). Entre os riscos associados à derrubada de grandes áreas da floresta, destaca-se a modificação de agentes do ciclo hidrológico, como a redução da evapotranspiração (COOK e VIZY, 2008) e, conseqüentemente, a re-alimentação do vapor da água atmosférico, podendo assim reduzir a precipitação (COSTA e FOLEY, 2000).



**Figura 1: Desmatamento**

Nota-se ainda que, como demonstrado por ANDREAE *et al.* (2004), a maior incidência de aerossóis na atmosfera, devido à presença de queimadas, é um fator desfavorável para a precipitação por causa da influência dos mesmos na diminuição do tamanho da gotícula da nuvem. As gotas pequenas são conduzidas por correntes de ar ascendente para níveis superiores da atmosfera, o que ocasiona a escassez de chuvas e, conseqüentemente, favorece as novas queimadas.

Estes fatores certamente levam a impactos negativos na biodiversidade, pois diminuem a quantidade de biomassa armazenada nas florestas, reduzindo a quantidade de água liberada a partir do solo que retorna à atmosfera pela vegetação (KLAR, 1984). A interação entre queimadas e clima também está associada à mudança do balanço de energia local, uma vez que as partículas de emissões de queimadas interagem com a radiação solar afetando o balanço radiativo atmosférico (RAMANATHAN *et al.*, 2001; KAUFMAN *et al.*, 2002; PROCÓPIO *et al.*, 2004). Além disso, devido às propriedades de espalhamento das partículas de emissões de queimadas, existe a diminuição da proporção entre a radiação direta e difusa que chega à copa das árvores (YAMASOE *et al.*, 2005) (Fig. 1.1).



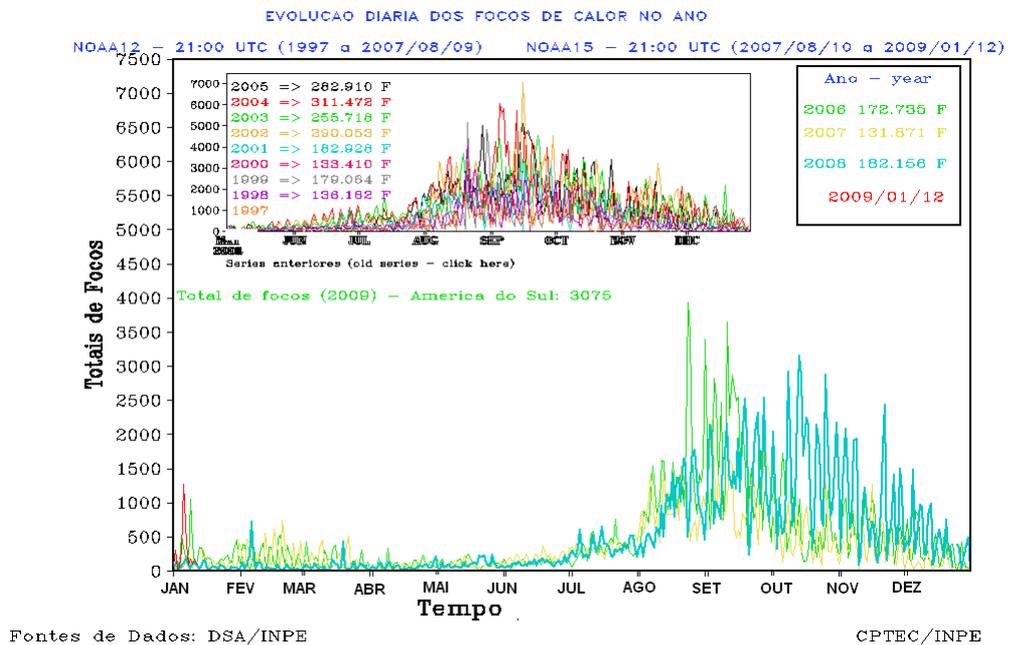
**Figura 1.1: Fumaça**

Os impactos das queimadas são destacados em questões que envolvem as mudanças climáticas futuras, sobretudo na intensificação do Aquecimento Global (AG). A queima de biomassa desempenha um papel importante nas emissões globais de carbono e outros gases-traços, além de material particulado (ANDREAE *et al.*, 1996a, b; CRUTZEN e ANDREAE, 1990). Acredita-se que as queimadas a nível global seja a segunda maior fonte de emissões de gases de efeito estufa. Por exemplo, a quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) liberada nas queimadas da Indonésia nos anos de 1997 e 1998 foi equivalente a 25% do total emitido deste gás anualmente devido à queima de combustíveis fósseis (PAGE *et al.*, 2002). No Brasil, as queimadas são responsáveis por cerca de 60-70% das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, ou seja, é a principal fonte emissora.

Somando-se às emissões de CO<sub>2</sub>, queimadas também são um importante emissor de monóxido de carbono (CO) para atmosfera (OLIVEIRA, 2005). A quantidade emitida desse gás numa queimada depende das características do fogo: queimadas rápidas com bom suprimento do oxigênio e que atingem temperaturas elevadas produzem pouco CO, enquanto queimadas ineficientes produzem grandes quantidades desse gás como produto da combustão incompleta. De acordo com ANDREAE (1991), a maior parte das queimadas ocorre nos países em desenvolvimento da região tropical. Sendo estes responsáveis por

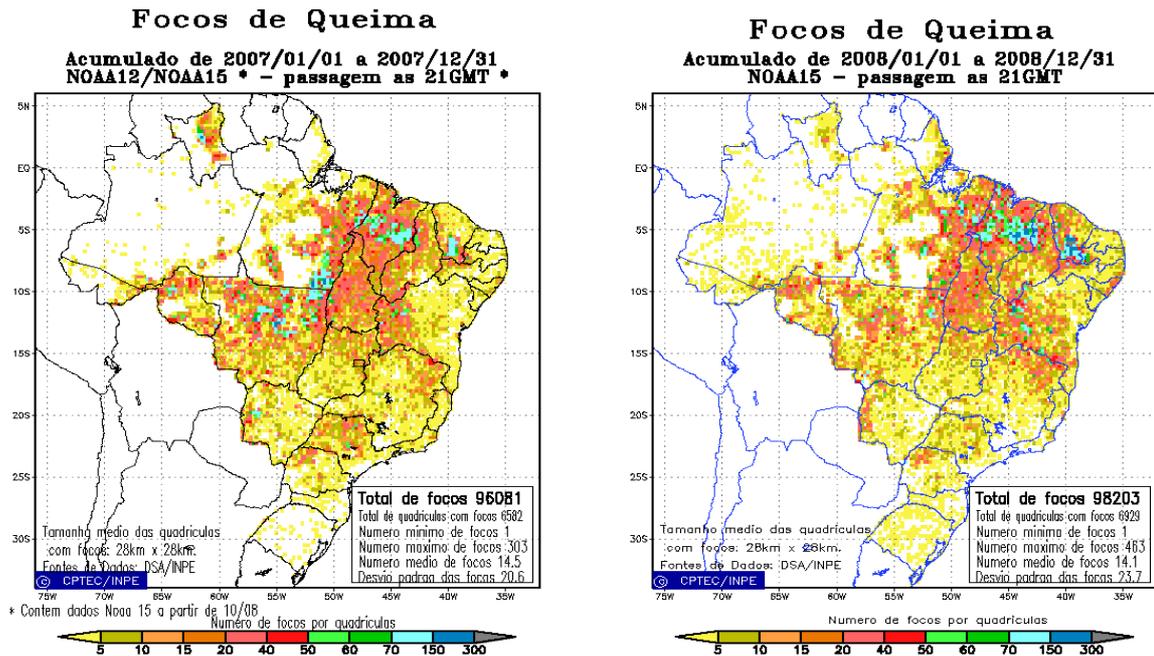
87% das emissões globais produzidas por queimadas, estimadas em 3940 Tg[C]/ano.

Atualmente, a maior incidência de queimadas no Brasil ocorre no período de agosto a novembro com um máximo em setembro (SISMANOGLU e SETZER, 2002; JUSTINO *et al.*, 2002). Este máximo sazonal está diretamente associado com o período seco que antecede a estação chuvosa e de plantio (Fig. 1.2).



**Figura 1.2: Evolução temporal do total de queimadas (2005-2008)**  
**Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)**

No extremo norte do Brasil, por outro lado, as queimadas se concentram entre janeiro e março. Como mostrado na Figura 1.3, a maior parte do Brasil apresenta queimadas. Nota-se também que os estados do Mato Grosso (MT), Pará (PA), São Paulo (SP), Roraima (RO) e Maranhão (MA) concentram grande parte dos focos de queimadas. Em 2005, a Amazônia Ocidental sofreu uma seca prolongada que propiciou grandes queimadas em áreas abertas e incêndios florestais, atingindo mais de 400.000 hectares no leste do Acre (BROWN *et al.*, 2006a, b).



**Figura 1.3: Distribuição espacial e temporal das queimadas em 2007 e 2008**  
**Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)**

A ação do fogo sobre o ambiente depende, ainda, de outros fatores além dos necessários para a ocorrência da combustão. Destacam-se o material combustível, as condições climáticas e a topografia. A ação de cada um destes fatores é diferente para cada região e para cada época do ano causando grande diferença no comportamento do fogo (BATISTA, 1995; RIBEIRO e BONFIM, 2000).

Estudos sobre o impacto do fogo em florestas tropicais tornam-se cada vez mais importantes à medida que os efeitos provocados pelos incêndios passam a ter repercussões globais negativas, particularmente devido sua influência na composição atmosférica e o estoque de biodiversidade (WHITMORE, 1990; COCHRANE, 2003). Embora estudos estejam em desenvolvimento para o presente, não existem registros na literatura de investigações que tenham focado em análises de risco de fogo sob outras condições climáticas, como por exemplo, aquecimento global. A aplicação das metodologias que avaliem o risco de fogo é útil para uma extrapolação espacial das regiões mais propícias ao fogo em um cenário de aquecimento global. Desta forma, vale ressaltar que o fogo aumenta a inflamabilidade da flora e inicia um

ciclo de retroalimentação positiva, em que as florestas tropicais são substituídas por uma vegetação ainda mais propensa ao fogo (FEARNSIDE, 1989).

Proteger a floresta e os recursos a ela associados dos efeitos devastadores dos incêndios, constitui a primeira motivação para o estudo do risco do fogo (HAINES *et al.*, 1998). Um passo importante para a redução dos impactos das queimadas é a investigação da suscetibilidade que um determinado ambiente possui à queima ou mesmo ao alastramento do fogo (risco de fogo). Isto já é feito em alguns países do Hemisfério Norte com destaque para os Estados Unidos, Canadá e também em alguns parques no cerrado brasileiro. Um índice bastante usado, que pode ser entendido como risco de fogo, é o índice de Haines - IH (HAINES, 1988). Originalmente chamado de baixo índice de severidade atmosférica, o IH é computado a partir da temperatura do ar e do ponto de orvalho na baixa troposfera e caracteriza o impacto potencial que as condições atmosféricas têm no alastramento do fogo. Uma primeira análise deste índice para o Brasil foi feita por LEMOS (2006), onde foi verificado que a primeira quinzena de setembro é o período de risco máximo no que diz respeito à incidência de focos de calor no Brasil central.

Para a América do Sul (AS) e o Caribe, a equipe do Projeto Queimadas do CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC) do INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), desenvolveu uma metodologia que relaciona as condições atmosféricas (temperatura, precipitação, umidade) e a cobertura vegetal, em um índice que quantifica a aptidão que uma região apresenta para o desenvolvimento do fogo (SISMANOGLU *et al.*, 2002). Estes dois métodos - IH e CPTEC-RF, serão descritos em mais detalhes adiante.

Tendo como base os pontos discutidos anteriormente, pretende-se neste trabalho investigar a favorabilidade do ambiente à ocorrência de queimadas (risco de fogo). O estudo será desenvolvido sob duas condições climáticas distintas: atual e

de aquecimento global. Para tal fim se fará uso dos dados provenientes de simulações numéricas acopladas e conduzidas com o modelo ECHAM5/MPI-OM. As variáveis a serem usadas no estudo são: temperatura máxima (T<sub>máx</sub>), precipitação (prec) e temperatura do ponto de orvalho (Td), que são variáveis de saída do modelo ECHAM5/MPI-OM. Estas simulações numéricas são provenientes do projeto “**E**NSEMBLE **S**IMULATIONS OF **E**XTREME WEATHER EVENTS UNDER **N**ONLINEAR **C**LIMATE CHANGE” (ESSENCE) (<http://www.knmi.nl/~sterl/Essence>).

Especificamente, pretende-se:

- 1) Identificar as principais regiões brasileiras mais suscetíveis a queimadas, sob um cenário de aquecimento global como uma estratégia de adaptação e mitigação às mudanças climáticas.
- 2) Comparar dois métodos de risco de fogo para o período atual e o futuro.

## **Capítulo 2**

### **2.0 DADOS UTILIZADOS**

Nesse capítulo são descritos os conjuntos de dados observacionais e numéricos utilizados, bem como a metodologia empregada.

#### **2.1 REANÁLISES DO NCEP/NCAR**

As observações meteorológicas são fundamentais na previsão do tempo e clima. Por isto, recomenda-se uma dedicação especial na etapa de coleta e tratamento das informações do estado da atmosfera. Diante disto, a ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM) padronizou a maneira de se obter os dados meteorológicos. As informações obtidas, seguindo as normas da OMM podem ser denominadas de observações convencionais, pois seguem um rigoroso processo de observação, tratamento e disseminação dos dados coletados.

Em 1991 teve início o PROJETO REANÁLISE, procurando organizar 50 anos de dados do NCEP<sup>1</sup>/NCAR<sup>2</sup> (NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL PREDICTION / NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH). O principal objetivo era organizar de forma sistemática os dados meteorológicos, possibilitando uma base de informação ágil para pesquisa e monitoramento do clima (KALNAY *et al.*, 1996). A assimilação e reanálises de dados são hoje um processo corrente que consiste na coleta de dados de observação em diferentes pontos do globo, os quais são posteriormente inseridos num MODELO DE CIRCULAÇÃO GERAL ATMOSFÉRICA (MGCA) em modo de prognóstico, ou numa combinação entre modelos atmosféricos e estatísticos.

Este projeto cooperativo de um conjunto de dados de reanálises assenta numa técnica de Assimilação de Dados (AD), para produzir um número significativo de variáveis climáticas e meteorológicas, provenientes de rádio sondagem em diferentes altitudes, dados de satélites, aviões, navios e sob o continente. A vantagem desta base de dados reside no fato de disponibilizar um número elevado de parâmetros (de superfície e de altitude), todos eles relacionados com a dinâmica da atmosfera, formando um conjunto de informações bastante coerente e atualizado, que é uma característica muito importante para estudos de variabilidade climática.

Neste estudo, as análises são produzidas a partir de 20 anos climatológicos para o período de janeiro de 1980 a dezembro de 2000, apresentados em mapas. A confiabilidade das reanálises do NCEP/NCAR para o Hemisfério Sul (HS) melhora significativamente a partir de 1979, beneficiando-se da assimilação de dados de satélite, que completam parcialmente a escassez de observações convencionais (HINES *et al.*, 2000).

---

<sup>1</sup> Os NCEP são constituídos por nove centros em que cada um tem contribuições e ações específicas para o conjunto de produtos e serviços disponibilizados, mas estão unidos por uma série de objetivos comuns. Os produtos oferecidos vão desde informações meteorológicas e marinhas até ao desenvolvimento de modelos de circulação geral.

<sup>2</sup> Centro criado em 1960 para centralizar a investigação nas ciências da atmosfera. O seu principal objetivo é organizar e conduzir investigação no domínio das ciências que estudam a atmosfera em colaboração com universidades, no sentido de fornecer o que há de melhor em matéria de instrumentos e técnicas de análise para a comunidade científica.

Conforme PINTO (2007), as séries históricas de reanálise do NCEP/NCAR são bastante utilizadas em trabalhos que descrevem as condições gerais da atmosfera, tanto para análise de áreas isoladas quanto para análises globais, embora apresente por exemplo o problema de superestimar a precipitação em boa parte da zona tropical. Mesmo diante destes problemas, os dados de reanálises são dos poucos que incluem a dinâmica atmosférica em sua produção.

## **2.2 DADOS SIMULADOS: ECHAM5/MPI-OM**

### **DESCRIÇÃO DO MODELO ECHAM5/MPI-OM**

As questões propostas, como citado anteriormente, serão investigadas com base em simulações numéricas para o período atual e para o cenário de Aquecimento Global (AG). Para tal fim será utilizada a sexta geração do Modelo de Circulação Geral Atmosférica (MCGA), o modelo ECHAM5/MPI-OM, desenvolvido no Instituto Max-Planck de Meteorologia (MPIM) de Hamburgo na Alemanha. Os dois componentes do modelo, a saber: o ECHAM5 para a atmosfera, e o MPI-OM para o oceano estão bem documentados (JUNGCLAUS *et al.*, 2006). Sua versão acoplada foi utilizada para os cenários climáticos do relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (ROECKNER *et al.*, 2003). Nesse contexto, menciona-se que a configuração usada nesse estudo tem truncamento triangular no número de onda T63, aproximadamente 1,8° de latitude e de longitude, o que representa uma resolução espacial de aproximadamente 180 x 180 Km, na faixa equatorial, com 31 níveis verticais.

O modelo oceânico do Instituto Max Planck (MPI-OM) (MARSLAND *et al.*, 2003) emprega as equações primitivas para um fluido hidrostático com uma superfície livre. A discretização possui 40 níveis verticais com uma resolução horizontal de 1,5°.

As análises avaliadas neste trabalho são baseadas na climatologia para os dois períodos distintos: o atual que compreende os anos de 1980 a 2000, e o período futuro que é estabelecido entre 2080 e 2100. Este intervalo mais longínquo foi escolhido pela necessidade de se investigar o risco de queimadas em condições extremamente diferentes das condições atuais.

O cenário econômico proposto baseia-se no cenário A1B. Esse cenário climático projeta uma descrição de um estado futuro de emissões dos principais gases estufa e aerossóis. Para o cenário intermediário A1B, a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> apresenta 775 ppmv (partes por milhão em volume) para o final do século XXI. VERA *et al.* (2006), usando vários modelos do IPCC, a partir de projeções futuras para o período de 2070-2099 do cenário A1B, aponta para um aumento da precipitação sobre a América do Sul (AS) subtropical durante o verão, redução de precipitação durante o inverno em quase todo o continente e uma redução da precipitação durante as quatro estações ao longo do ano na região sul dos Andes. Desta forma, pode-se argumentar que se permanecer as condições socioeconômicas propostas, o cenário climático futuro pode ser favorável a uma maior inflamabilidade do ambiente devido a maiores períodos de estiagem.

## **Capítulo 3**

### **3.0 COMPORTAMENTO CLIMÁTICO**

#### **3.1 ANÁLISE CLIMATOLÓGICA**

O Brasil apresenta vasta dimensão continental e possui diferentes regimes de temperatura e precipitação, devido às características dinâmicas e sinóticas que atuam sobre a América do Sul (AS) (GRIMM, 2004). Desta forma, assume-se que os ciclos anuais podem ser tratados como termos harmônicos através dos anos, dentro de um determinado período. Para um diagnóstico de quais variáveis climáticas são determinantes e quais regiões são mais vulneráveis às queimadas, é fundamental a análise do ciclo sazonal de temperatura (Temp), precipitação (Prec) e umidade relativa (UR), a partir de dados observados e/ou dados provenientes de simulações numéricas.

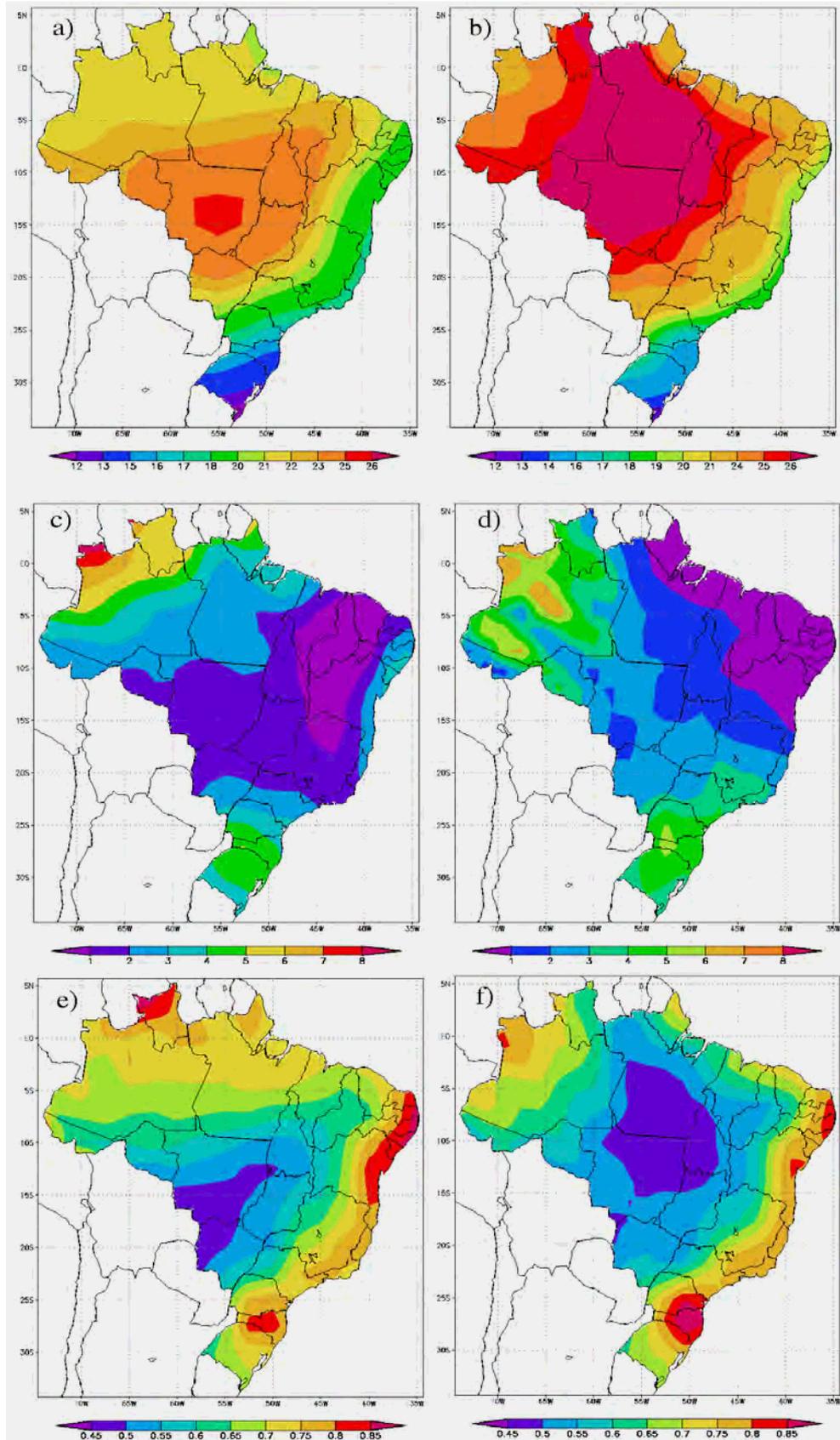
A investigação climática proveniente de simulação numérica necessita de uma avaliação de como estes resultados numéricos reproduzem os dados observados. Com este objetivo, as Figuras (3a, b, c, d, e, f) mostram a distribuição espacial de temperatura do ar, precipitação e umidade relativa, provenientes de reanálises do NCEP e dos dados do modelo ECHAM5/MPI-OM, no período de junho a outubro entre os anos de 1980 a 2000. É durante os meses de junho e outubro que se detecta o maior número de queimadas no Brasil.

Nota-se que, de acordo com as reanálises do NCEP, as regiões com maiores temperaturas para os meses de junho a outubro são: Mato Grosso, Tocantins, Rondônia, Mato Grosso do Sul e Goiás (Fig. 3a). Este comportamento também é verificado a partir dos dados do ECHAM5 (Fig. 3b). Os dados do ECHAM5, todavia, diferem dos dados de NCEP, pois o modelo apresenta temperaturas mais altas em até 5°C em relação aos dados do NCEP. Comparando-se as Figuras 3a e 3b, observa-se que o ECHAM5 mostra uma área com altos valores de temperaturas entre o Pará e o Amazonas, não existente nas reanálises. É importante notar que ao longo da região costeira e sudeste do Brasil, onde existe maior densidade de dados observados, o modelo e as reanálises apresentam maior similaridade. As reanálises do NCEP assimilam em seu processamento dados observados.

A distribuição espacial de precipitações é apresentada nas Figuras (3c, d). Observa-se que, com exceção da região sul e o noroeste da região norte, as precipitações são da ordem de 4 mm/dia para ambos os dados (reanálise e modelo). Na região que se estende desde o oeste do Amazonas até a região sudeste, observa-se que os dados do ECHAM5, apresentam maiores valores de precipitação devido a uma melhor reprodução da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Embora esta tenha sua atividade enfraquecida nesta época do ano. Nota-se ainda

que ambos os dados sejam coerentes para o nordeste brasileiro (NEB), região sul e noroeste do Brasil.

Similar análise para a umidade relativa mostra que, de acordo com as reanálises do NCEP, as regiões com menores valores de umidade relativa são o centro-sul do Mato Grosso e a faixa oeste do Mato Grosso do Sul (Fig. 3e). Em contrapartida, os resultados do ECHAM5 mostram os menores valores de umidade relativa deslocado para o centro-norte do Mato Grosso, centro-sul do estado do Pará e parte do Tocantins (Fig. 3f). Nas demais áreas ambos os conjuntos de dados mostram considerável similaridade, em particular na região sul do Brasil. Em linhas gerais, verificou-se que o clima modelado pelo ECHAM5 é mais quente, apresenta maiores índices pluviométricos e menores valores de umidade relativa, quando comparado as reanálises do NCEP. É importante destacar que as maiores diferenças entre os dados modelados e as reanálises estão em regiões que apresentam uma substancial baixa cobertura de dados.



**Figura 3: Climatologia no período de junho a outubro, média dos anos 1980 a 2000**  
Reanálises (NCEP): a) Temperatura (°C), c), Precipitação (mm/dia), e) UR (%)  
Simulações (ECHAM5): b) Temperatura (°C), d) Precipitação (mm/dia), f) UR (%).

### 3.2 ANÁLISE HARMÔNICA

A análise harmônica tem sido uma ferramenta útil no estudo dos padrões de elementos meteorológicos, representando as variações de uma série temporal como base de funções periódicas de senos e cossenos (ASLAN e TOPÇU, 1994). Estas funções apresentam freqüências como múltiplos de uma freqüência fundamental. Segundo WILKS (1995) e KRIKYLA e HAMEED (1989), uma dada série temporal de dados de amostras eqüidistantes de uma variável, pode ser representada por uma função harmônica:

$$y_t = \bar{y} + \sum_{j=1}^N C_j \cos(\omega_j t - \phi_j) \quad (1)$$

Em que:  $\bar{y}$  = média dos valores da série,

$N$  = número de observações

$C_j$  = amplitude;

$\omega_j$  = freqüência;

$\phi_j$  = ângulo de fase; e

É possível escrever a equação anterior utilizando a função seno. No entanto, a função cosseno é geralmente utilizada, pois o ângulo de fase ( $\phi$ ) pode ser facilmente determinado como correspondendo ao tempo onde a função harmônica é maximizada:

$$t = \frac{\phi_j N}{2\pi} \quad (2)$$

As equações para os cálculos da amplitude dos harmônicos segundo (EMERY e THOMSON, 1997) são:

- Amplitude ( $C_j$ ):

$$C_j = \sqrt{A_j^2 + B_j^2} \quad (3)$$

Temos:  $A_j$  = coeficiente do cosseno;

$B_j$  = coeficiente do seno;

$C_j$  = vetor amplitude.

Os termos  $A_j$  e  $B_j$  são obtidos pelas seguintes fórmulas:

$$A_j = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N y_t \cos \left( \frac{2\pi t}{N} \right) \quad (4)$$

$$B_j = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N y_t \sen \left( \frac{2\pi t}{N} \right) \quad (5)$$

- Fase ( $\phi$ )

O ângulo de fase ( $\phi$ ) é calculado a partir de uma das equações seguintes, dependendo do valor obtido para ( $A_j$ ):

$$\phi_j = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{B_j}{A_j} & A_j > 0 \\ \tan^{-1} \frac{B_j}{A_j} \pm \pi \text{ ou } \pm 180^\circ & A_j < 0 \\ \frac{\pi}{2} \text{ ou } 90^\circ & A_j = 0 \end{cases} \quad (6)$$

A contribuição de cada harmônico ( $j$ ) na variância total da série de dados é calculada a partir da razão entre a amplitude do harmônico e duas vezes a variância populacional (PANOFSKY e BRIER, 1968):

$$j = \frac{C_j^2}{2s^2} \quad (7)$$

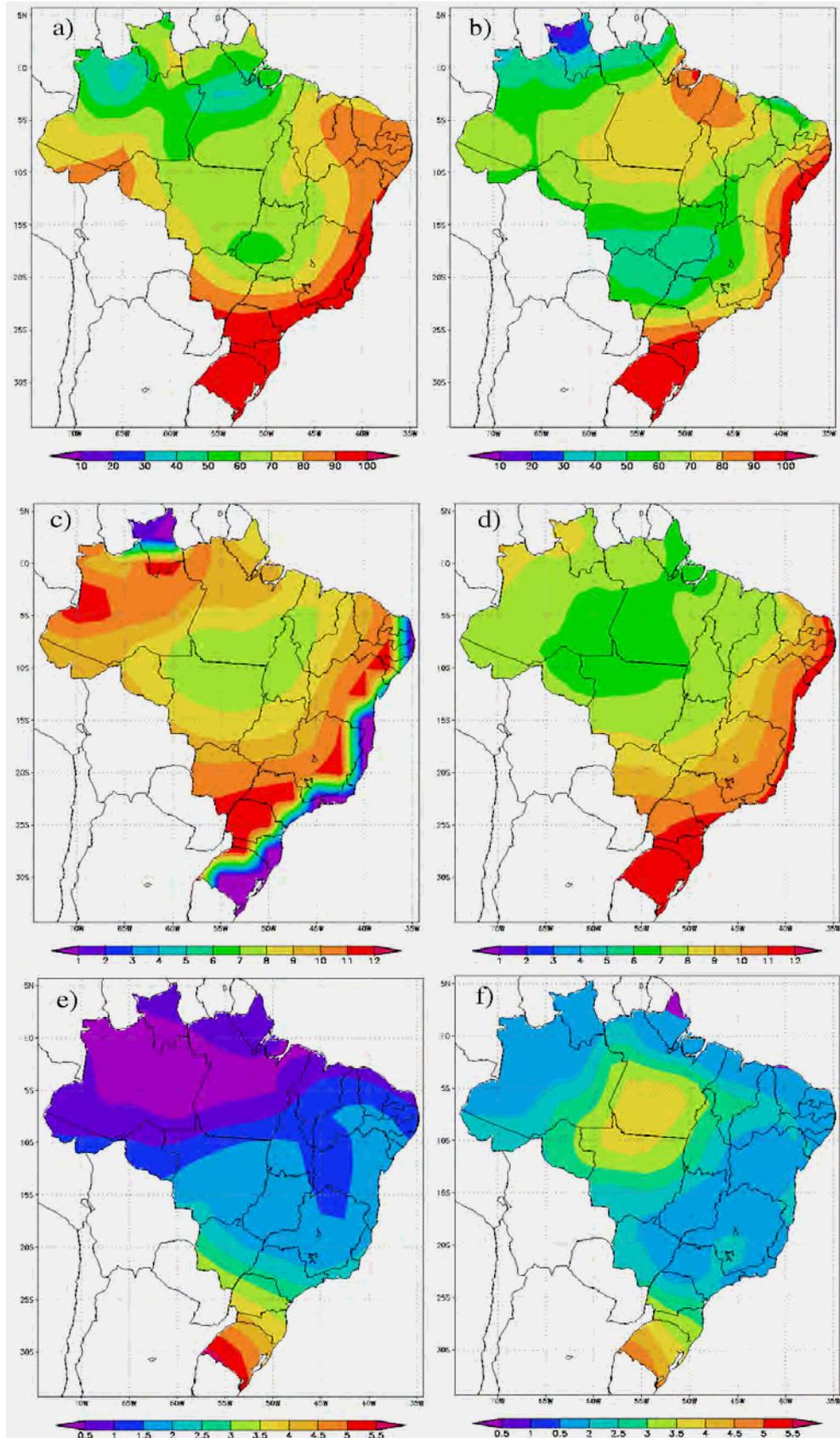
A análise harmônica tem sido utilizada em vários estudos, com os mais diferentes propósitos. Conforme discutido por AZZALI e MENETTI (2001), este tipo de análise é útil para caracterizar diferentes regimes climáticos em regiões de transição bem como classificar as zonas climáticas. A vantagem de utilizar esta abordagem matemática está associada à possibilidade de identificar qual o padrão do clima dominante no domínio espacial e temporal. Desta forma, pode-se demonstrar as principais características relacionados com a sazonalidade e, em particular, investigar como estes padrões climáticos se correlacionam com as atividades agropecuárias associados à queima de biomassa e ao risco de fogo.

Os resultados baseados em análise harmônica expressam o comportamento de uma variável em função de sua periodicidade, amplitude e fase (período que ocorre o pico na amplitude). Neste processo, objetiva-se examinar como o componente climático contribui e interage para produzir o ciclo mais representativo dos dados observados e modelados. O comportamento harmônico da temperatura observada e modelada é mostrada na Figura 3.1, para a precipitação na Figura 3.2, e para a umidade relativa na Figura 3.3.

### **3.2.1 Análise Harmônica da Temperatura (Temp).**

De acordo com as Figuras 3.1a, b, nota-se que, em grande parte do Brasil central, região onde se concentram a maior número de queimadas, o ciclo anual explica cerca de 50% da variância dos dados. Isto indica uma pequena amplitude anual de temperatura. Todavia, as análises resultantes do ECHAM5 mostram uma maior representatividade do primeiro harmônico (maior variância explicada) sobre o estado do Pará. Com relação ao campo de fase, ou meses onde ocorrem os valores máximos de temperatura, nota-se uma defasagem de um ou dois meses entre os dados do NCEP e os simulados do ECHAM5 (Fig. 3.1c, d).

As amplitudes de temperatura mostrada nas Figuras 3.1e, f ilustram que existem pequenas variações zonais, sendo as maiores variações detectadas ao longo das latitudes. Em ambos os conjuntos de dados avaliados a parte sul do Brasil apresenta as maiores variações sazonais de temperatura por possuir uma melhor definição das estações do ano, inverno e verão. De acordo com os resultados propostos pelo modelo ECHAM5 existe uma região com substancial variação sazonal de temperatura, localizada sobre a parte norte do Mato Grosso e grande parte do Pará. Isto indica que as diferenças de temperatura nesta área podem chegar a 4°C.



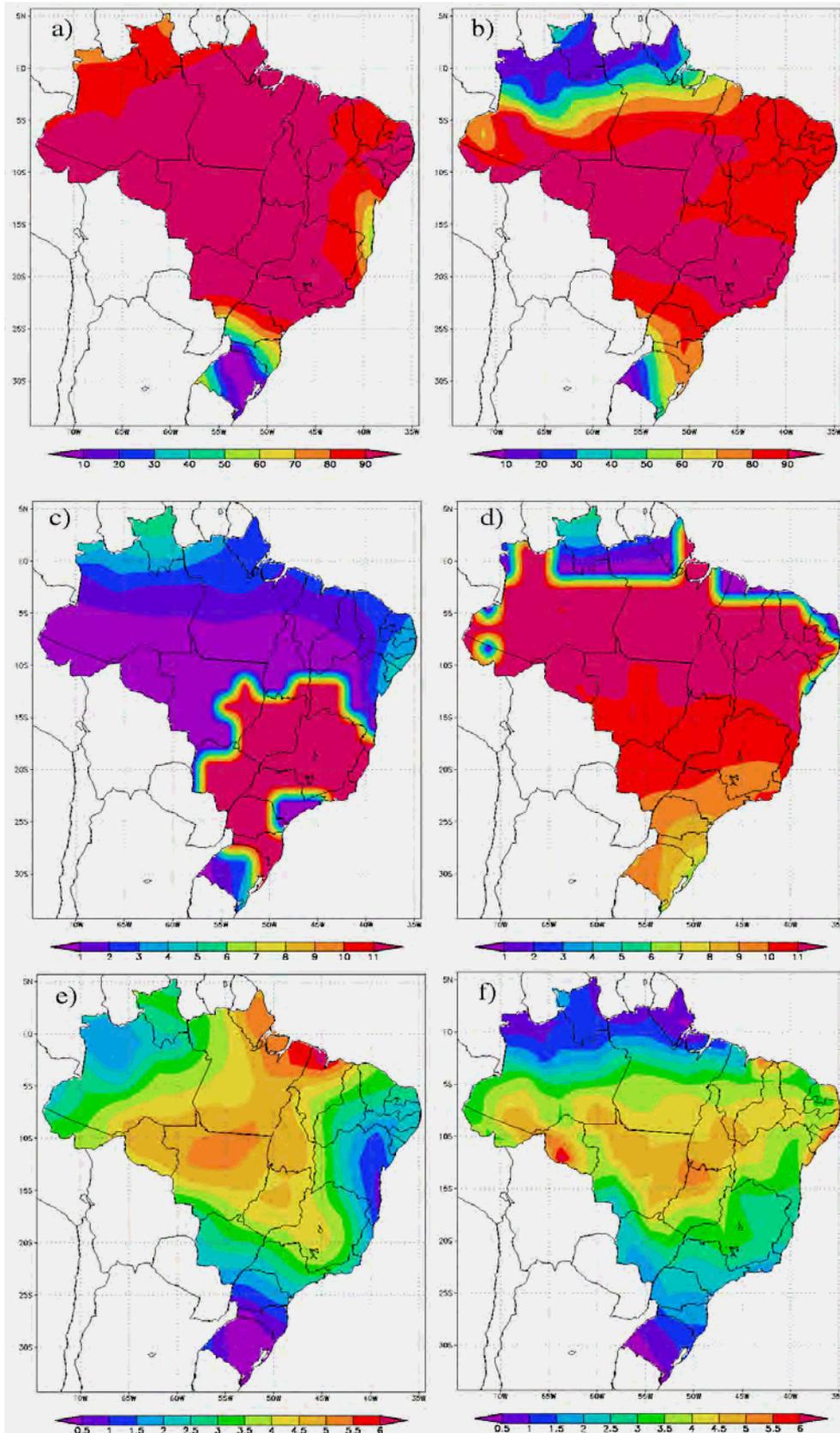
**Figura 3.1: Primeiro harmônico da temp. de junho a outubro, média dos anos 1980 a 2000**  
**Reanálises (NCEP): a) Variância (%), c) Fase (mês), e) Amplitude (°C)**  
**Simulações (ECHAM5): b) Variância (%), d) Fase (mês), f) Amplitude (°C).**

### **3.2.2 Análise Harmônica da Precipitação (Prec).**

As Figuras (3.2a, c, e) mostram a variância, fase e amplitude do primeiro harmônico da precipitação obtida através dos dados da reanálise do NCEP, e as Figuras (3.2b, d, f) mostram os mesmos campos a partir dos dados simulados do ECHAM5, respectivamente. Todas as regiões apresentam variâncias significativas entre 80%-100% para os dados do NCEP (Fig. 3.2a), exceto para a região sul (10%-60%). Isto pode ser entendido da seguinte forma: onde a variância excede 60%, tem-se que existe de fato um período bem definido tanto de estiagem, como de chuvas. Por outro lado, no sul do Brasil, onde a variância é pequena, não se tem um período seco bem definido, ou seja, a amplitude anual é pequena. Nota-se o mesmo comportamento nos dados simulados pelo ECHAM5. As diferenças são observadas na faixa norte da região norte com valores de variâncias compreendidos entre 30%-80%. Isto mostra que os dados do NCEP não capturam a variação sazonal da precipitação associada com o movimento meridional da Zona de Convergência Inter-Tropical (ZCIT).

A Figura 3.2c mostra que nas regiões norte e boa parte do nordeste o período chuvoso se concentra entre janeiro e abril de acordo com os dados do NCEP. Já para as regiões sul e sudeste e o estado de Mato Grosso do Sul as chuvas ocorrem nos últimos meses do ano. A Figura 3.2d, por sua vez, apresenta dados do ECHAM5, que tem um período chuvoso com algumas diferenças nos meses de máxima precipitação, principalmente nas regiões sul e sudeste.

As regiões com grandes amplitudes possuem uma grande distinção entre estações chuvosa e seca. Na Figura 3.2e destaca-se os estados do Acre, Amapá, Pará, Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Bahia e Maranhão, com amplitudes entre 4mm-6mm. A Figura 3.2f, a partir dos dados de ECHAM5, mostra os maiores valores de amplitudes desde o sul da região norte, até o nordeste, e nos estados de Mato Grosso, Goiás, e Tocantins, com valores entre 4mm/dia a 6mm/dia.



**Figura 3.2: Primeiro harmônico da Prec. de junho a outubro, média dos anos 1980 a 2000**  
Reanálises (NCEP): a) Variância (%), c) Fase (mês), e) Amplitude (mm/dia)

**Simulações (ECHAM5): b) Variância (%), d) Fase (mês), f) Amplitude (mm/dia).**

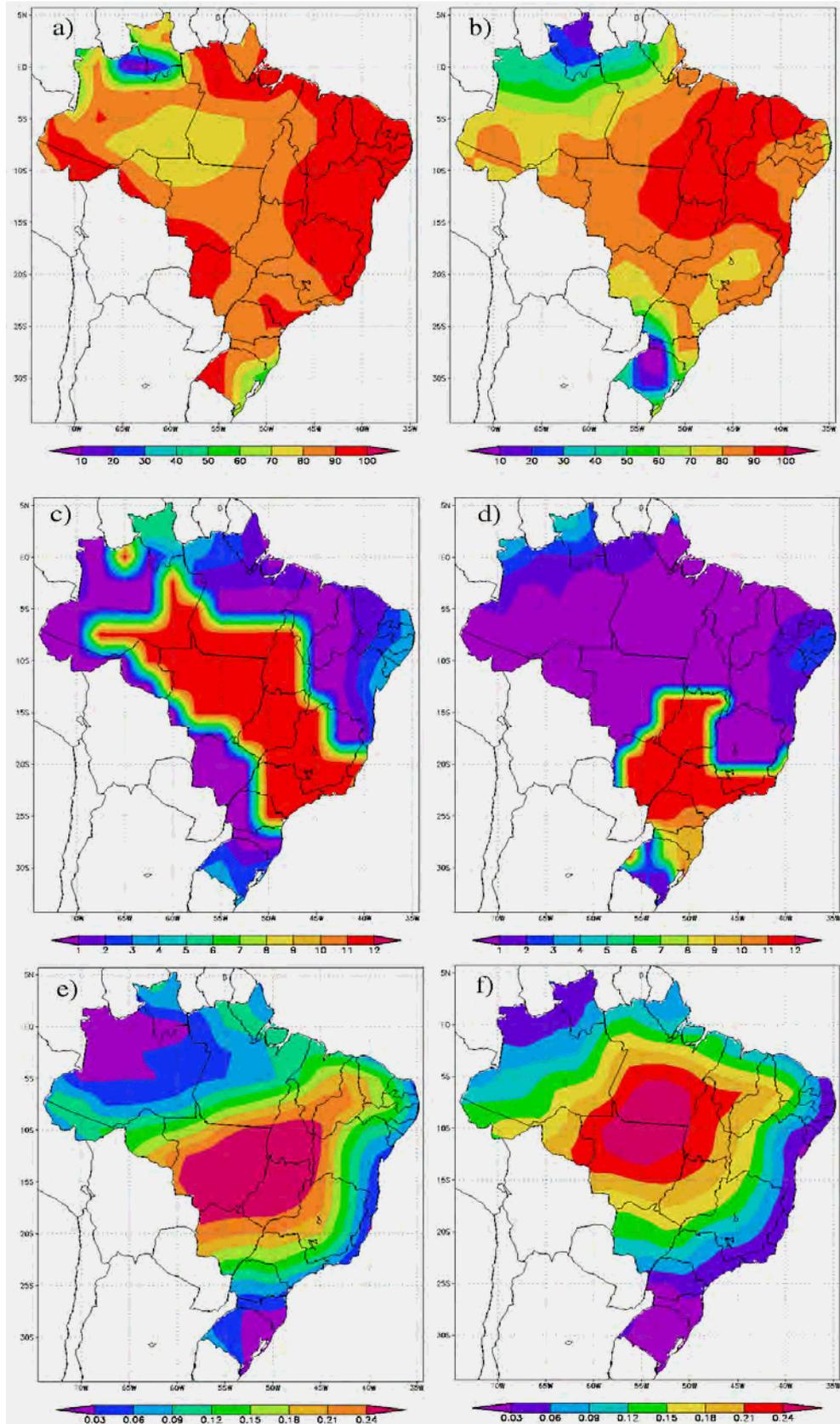
### **3.2.3 Análise Harmônica da Umidade Relativa (UR).**

Em termos da variância explicada pelo primeiro harmônico, ambos os conjuntos de dados indicam valores acima de 80%. Somente os estados da região sul e o extremo norte da região norte apresentam valores abaixo dos 80%. É importante notar a similaridade entre os conjuntos de dados.

A análise do campo de fase do primeiro harmônico da umidade relativa para os dados do NCEP (Fig. 3.3c) mostra os máximos de umidade relativa sobre o Brasil central, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo entre outubro e dezembro. Os mínimos, portanto serão observados entre maio e junho. Este comportamento diferencia-se quando comparado com os dados do ECHAM5, onde esta característica é vista unicamente para os estados de Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Rio de Janeiro e norte do Paraná. O modelo ainda simula que para parte da região norte, Mato Grosso e Minas Gerais os maiores/menores valores de umidade relativa são atingidos no início/meio do ano.

Em termos da amplitude do ciclo anual, ambos os conjuntos de dados (NCEP e ECHAM5), apresentam similar distribuição espacial com amplitudes maiores entre 0,15% e 0,25% na região centro-oeste, assim como também mostram uma similaridade nas demais regiões com menores valores, em torno de 0,03%-0,12% (Fig. 3.3e, f). É importante perceber que os dados de ECHAM5 apresentam o estado do Pará com alta variação sazonal da umidade relativa, característica não notada a partir dos dados do NCEP. Valores altos na amplitude da umidade relativa mostram uma alta flutuabilidade entre os períodos quentes e secos, e os períodos

frios e úmidos. Como será discutido adiante, áreas de alta amplitude podem se caracterizar como zonas propícias as queimadas.



**Figura 3.3: Primeiro harmônico da UR de junho a outubro, média dos anos 1980 a 2000**  
**Reanálises (NCEP): a) Variância (%), c) Fase (mês), e) Amplitude (%)**  
**Simulações (ECHAM5): b) Variância (%), d) Fase (mês), f) Amplitude (%).**

## **Capítulo 4**

### **4.0 MODELO DE RISCO DE QUEIMADA: ÍNDICE DE HAINES ( IH )**

Este capítulo discute a suscetibilidade atmosférica às queimadas para dois períodos climáticos. O período atual compreendido entre 1980-2000 e o clima futuro simulado com base no cenário A1B do IPCC (2080-2100). As análises são feitas a partir do índice de baixa severidade atmosférica, o Índice de Haines (IH) tendo como base a climatologia mensal dos dois períodos.

Por vários anos, valores característicos das condições de estabilidade atmosférica e do teor de vapor da água na atmosfera foram observados e relacionados com a propagação de focos de calor (queimadas) em grandes áreas remotas nos Estados Unidos (BROTAK e REIFSNYDER, 1977). Segundo NUNES (2005), existem dois tipos de fatores determinantes do risco de fogo. Os fatores constantes: tipo de material combustível, tipo de floresta e o relevo. E os fatores variáveis, entre os quais se destacam a umidade do material combustível e as condições climáticas

(por exemplo: a umidade relativa, a temperatura, a precipitação e a estabilidade atmosférica).

As condições climáticas e o homem mantêm uma estreita relação desde as ocorrências do fogo, oriundas das condições atmosféricas reinantes em um dado período de tempo, até a manutenção e propagação do mesmo. O Índice de Haines (IH), como anotado anteriormente, é um indicador para o desenvolvimento potencial de atividade convectiva de fogo como função da temperatura vertical e dos perfis de umidade do ar calculada na baixa, média e alta atmosfera (HAINES, 1988). A instabilidade do ar próximo às queimadas afeta o comportamento do fogo, pois aumenta as dimensões verticais das colunas de fumaça, resultando em ventos de superfície devido à diferença térmica próxima ao local das queimadas. Este é o mecanismo pelo qual as queimadas criam seus próprios ventos e a atmosfera próxima torna-se instável (KOCHTUBAJDA, 2001).

HAINES (1988) foi o primeiro pesquisador a elaborar um índice baseado nas condições de estabilidade atmosférica e umidade relativa do ar nos níveis de 925hPa, 850hPa, 700hPa e 500 hPa. Seus resultados indicaram evidência clara de forte relação entre as condições de estabilidade atmosférica, ar seco, baixa umidade e o crescimento do fogo. HAINES (1988) concluiu ainda que as temperaturas do ar (T) e do ponto de orvalho (Td), em diferentes camadas da atmosfera, juntamente com o baixo nível de umidade relativa (UR) na superfície e o material combustível interferem significativamente para o desenvolvimento de incêndios em grandes áreas. O Índice de Haines - IH (HAINES, 1987) depende diretamente do nível da camada atmosférica. A combinação de três camadas na atmosfera (Baixa, Média e Alta). Portanto, é usada para a elaboração deste índice, que é o somatório dos termos de estabilidade atmosférica com os termos de umidade do ar.

Este índice também pode ser combinado com elementos meteorológicos tais como: temperatura máxima do dia anterior, precipitação média acumulada e velocidade do vento. Recentemente, foram desenvolvidos estudos do IH para o

Brasil, no qual verificou-se que a região central do Brasil e faixa norte do nordeste brasileiro (NEB), são as regiões mais propícias ao desenvolvimento de queimadas (LEMOS, 2006).

Matematicamente, o cálculo do Índice de Haines (IH) é definido pela soma do componente da estabilidade (A), e do componente da umidade atmosférica (B), como apresentado na tabela 1.

$$IH = A + B$$

em que, o **termo A** representa a diferença de temperatura do ar entre dois níveis da atmosfera e o **termo B** caracteriza as diferenças entre as temperaturas do ar e as temperaturas do ponto de orvalho para cada nível da atmosfera, ou seja, a depressão do ponto de orvalho

Visando considerar a altitude do local, o IH é calculado em 3 níveis de pressão: baixa altitude, inferior a 1500m (950 hPa- 850 hPa); média altitude de 1500 m até 3500m (850 hPa - 700 hPa); e alta altitude (700 hPa - 500 hPa), o que corresponde aproximadamente ao perfil vertical da superfície até 5000 m. A **Tabela 1** mostra toda seqüência dos cálculos.

**Tabela 1 - Ilustração das diferentes componentes do Índice de Haines (IH)**  
**Fonte: Winkler et al. (2005)**

Altitude	Componente da Estabilidade (A)		Componente da Umidade (B)	
	Cálculo	Categoria	Cálculo	Categoria
baixa (≤1500m)	A=T950hPa – T850hPa	A=1 se < 4°C	B=T850hPa – Td850hPa	B=1 se < 6 °C
		A=2 se 4-7°C		B=2 se 6-9 °C
		A=3 se ≥ 8°C		B=3 se ≥10 °C
média (1500-3500m)	A=T850hPa – T700hPa	A=1 se < 6°C	B=T850hPa – Td850hPa	B=1 se < 6 °C
		A=2 se 6-10°C		B=2 se 6-12°C
		A=3 se ≥11°C		B=3 se ≥13°C
alta (≥3500m)	A=T700hPa – T500hPa	A=1 se < 18°C	B=T700hPa – Td700hPa	B=1 se <15 °C
		A=2 se 18-21°C		B=2 se 15-20°C
		A=3 se ≥ 22°C		B=3 se ≥21 °C

Os valores absolutos das diferenças são convertidos em índices que variam de 2 a 6, conforme a **Tabela 2**, e caracterizam o risco de queimadas como sendo muito baixo (2,3), baixo (4), moderado (5) e alto risco (6).

**Tabela 2 - Cálculo do Índice de Haines**  
**Fonte: Winkler et al. (2005)**

A + B = IH	Risco
2,3	Muito baixo
4	Baixo
5	moderado
6	alto

Nas análises optou-se em apresentar o risco de fogo (IH) em função da temperatura, a saber: índice muito baixo, com valores menores que 12°C; índice baixo com valores compreendidos entre 12°C e 20°C; índice moderado entre 20°C e 24°C e índice alto acima de 24°C, conforme **Tabela 3**.

**Tabela 3 - Cálculo do IH em função da temperatura**

Risco	IH
muito baixo	≤12°C
baixo	12°C-22°C
moderado	22°C-24°C
alto	≥24°C

## **4.1 ANÁLISES DO ÍNDICE DE HAINES ( IH ).**

No que segue são apresentados os comportamentos dos termos A, B e IH para os dados do NCEP e ECHAM5 dos meses de junho, julho, agosto, setembro e outubro, na média atmosfera, devido esta camada representar com mais propriedade as condições atmosféricas favoráveis as queimadas (LEMOS, 2006).

Deve-se notar que a maior parte das queimadas no Brasil é de origem antrópica, mesmo que o risco de queimadas seja máximo, e isto não implica que seja na presença do fogo. O caso é diferente da América do Norte (AM), onde boa parte das queimadas é de origem natural. O IH fornece unicamente a favorabilidade atmosférica à ocorrência de incêndios florestais.

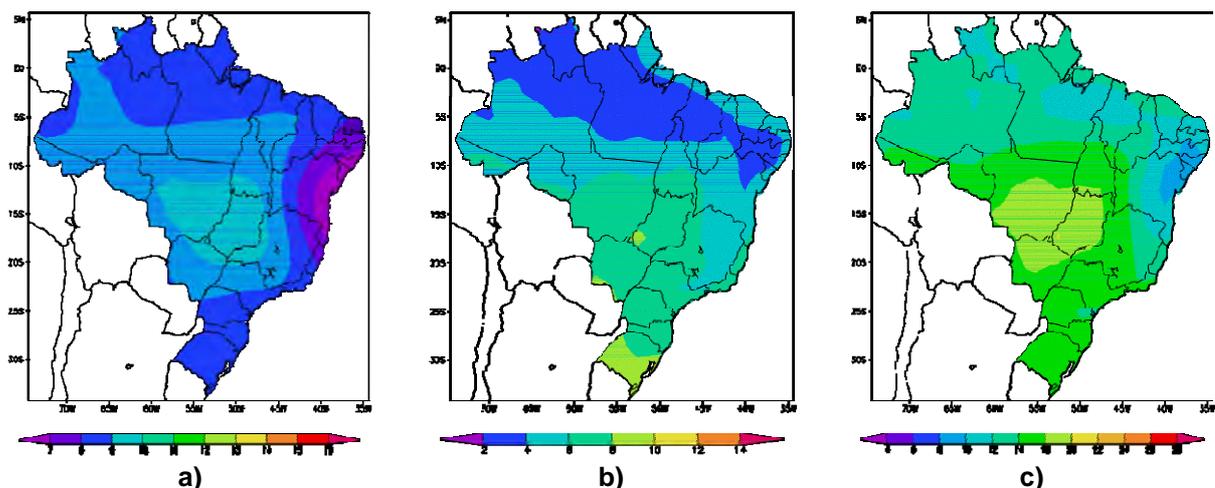
### **4.1.1 Análise para o mês de junho**

As Figuras (4a, b, c) e as Figuras (4.1a, b, c) foram geradas para o mês de junho, a partir dos dados provenientes do NCEP e do ECHAM5, respectivamente. Nota-se que na média atmosfera o componente da estabilidade (termo A) do índice de Haines para os dados do NCEP (Fig. 4a) apresenta categoria (2), com valores de temperatura entre 6°C-10°C, para todo o Brasil. O componente da umidade (termo B) (Fig. 4b) apresenta categoria (1), com temperaturas menores que 6°C, na região centro-oeste e no oeste de Minas Gérias. Com base na soma dos termos A e B ( $A + B = IH$ ), têm-se valores de temperatura menores de 12°C (risco baixo) para a costa

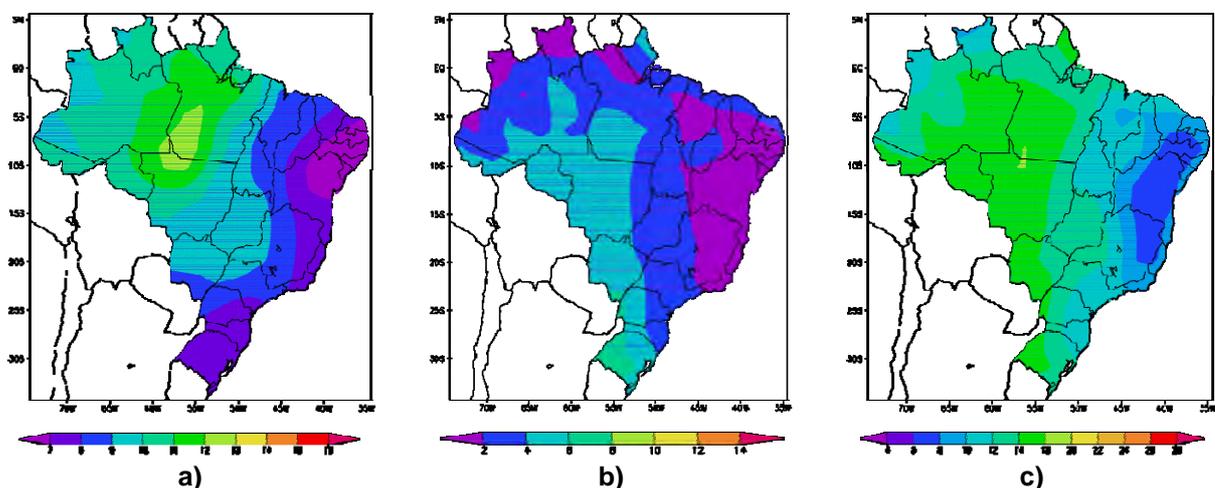
brasileira, e valores entre 12°C-20°C na maior parte da região centro-oeste do Brasil (Fig. 4c), o que caracteriza um risco moderado.

As análises para os dados do ECHAM5 mostram que existe maior instabilidade (termo A) na região leste do Pará e oeste da Amazônia (Fig. 4.1a), quando comparado aos resultados do NCEP. O componente da umidade (termo B) mostra maior umidade relativa (Fig. 4.1b), com diferenças entre a temperatura do ar e do ponto de orvalho menores que 6°C para todo o Brasil. Desta forma, pela soma dos valores tem-se que, para o mês de junho, de acordo com o IH, o risco de incêndios de grande proporção são pequenos (Fig. 4.1c).

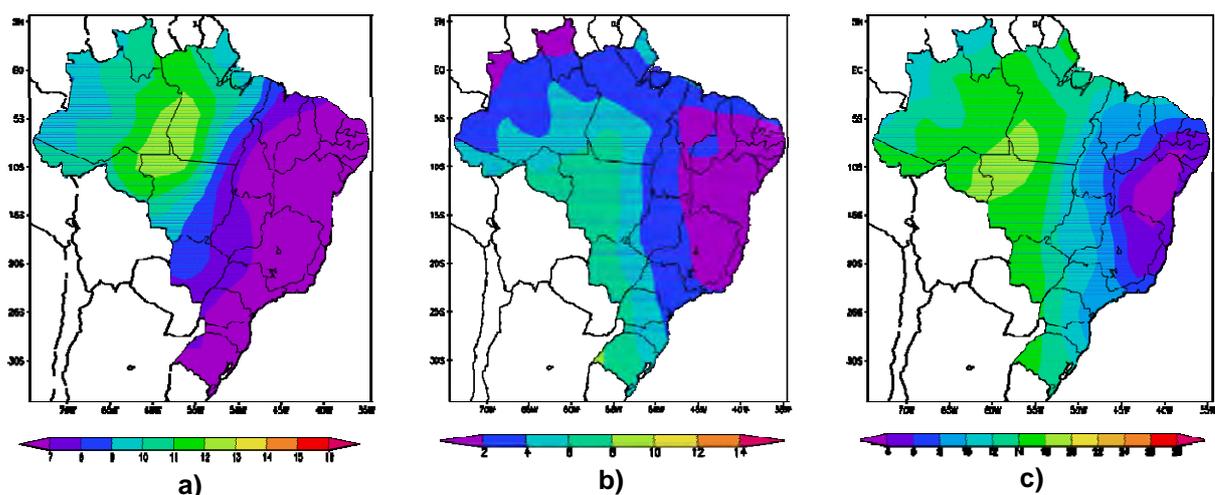
Com o objetivo de investigar a favorabilidade atmosférica às queimadas no final do século XXI, as Figuras (4.2a, b, c) foram geradas para as simulações futuras (2080-2100) a partir do modelo ECHAM5. O termo A (Fig. 4.2a) apresenta a categoria (3) na região norte e no estado do Mato Grosso, e categoria (2) para as demais regiões. O termo B (Fig. 4.2b), por outro lado, apresenta a categoria (1) na maior parte do território brasileiro, já que a depressão do ponto de orvalho é menor que 6°C. Com base nestas análises, não devem ser esperadas mudanças significativas na suscetibilidade atmosférica a ocorrências de queimadas para o final do século. Embora exista uma área de risco moderado na parte oeste do Mato Grosso com base na análise dos dados projetados para o futuro.



**Figura 4:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do NECP no mês de junho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.



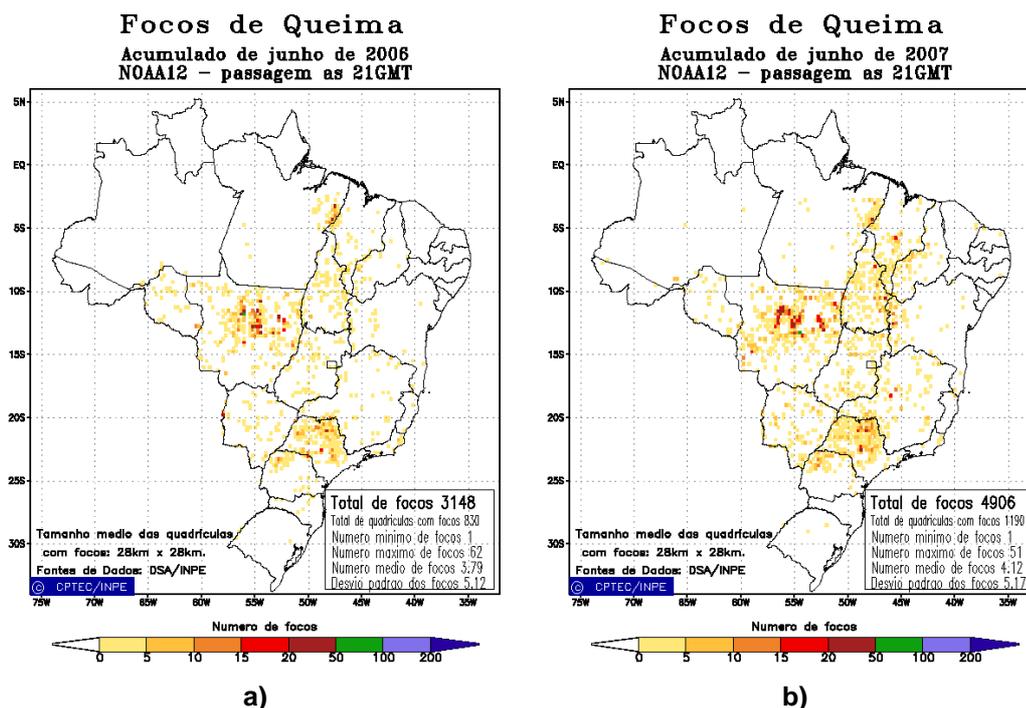
**Figura 4.1:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do ECHAM no mês de junho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.



**Figura 4.2:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas no futuro a partir dos dados do ECHAM no mês de junho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.

Visando uma investigação mais criteriosa, optou-se por apresentar as Figuras 4.3a, b com os focos de queimadas detectadas pelo satélite NOAA-12, para o mês de junho dos anos 2006 e 2007.

As queimadas detectadas pelo satélite NOAA-12 atingiram no mês de junho aproximadamente 3.150 focos para o ano de 2006 (Fig. 4.3a) e cerca de 4.900 focos para o ano de 2007 (Fig. 4.3b). O destaque para áreas de maior ocorrência de queimadas foram para as regiões sudeste e centro-oeste do Brasil. Em uma breve avaliação pode-se notar que estas áreas também apresentam os maiores valores de IH (Fig. 4c, 4.1c).



**Figura 4.3: a) Focos de Queimadas acumuladas do mês de junho de 2006  
b) Focos de Queimadas acumuladas do mês de junho de 2007  
Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)**

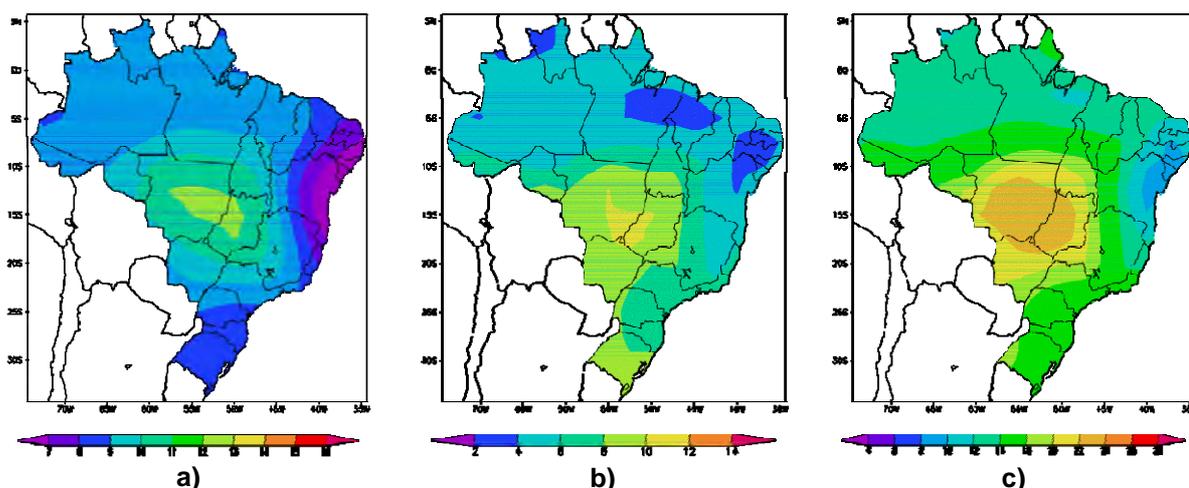
#### **4.1.2 Análise para o mês de julho**

As análises para o mês de julho, de acordo com os dados do NCEP, mostram que na média atmosfera o termo A (Fig. 4.4a) apresenta categoria (2) para as regiões norte, nordeste, sul, sudeste e Mato Grosso, e categoria (3) para os estados do Mato Grosso do Sul e Tocantins. O termo B (Fig. 4.4b) apresenta categoria (1) para as regiões norte, nordeste e sudeste e nos estados do Paraná e Santa Catarina; e categoria (2) para a região centro-oeste e o estado do Rio Grande do Sul. Assim sendo, o índice de Haines (IH) (Fig. 4.4c) caracteriza-se como risco baixo (4) em praticamente todo território brasileiro, exceto para o centro do Mato Grosso e leste de Goiás, onde este apresenta-se moderado (5).

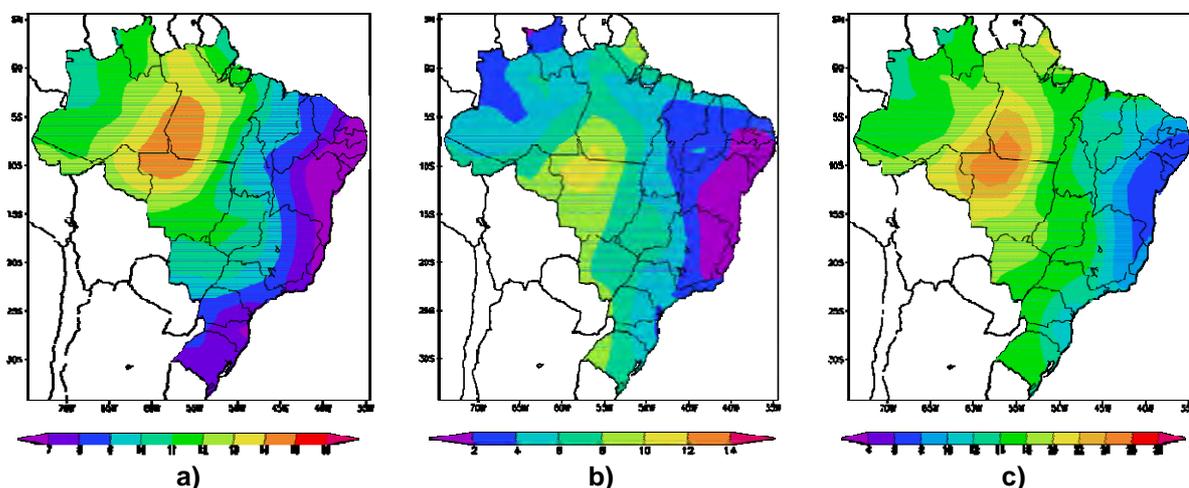
A comparação entre os dados provenientes do ECHAM5 e os dados do NCEP mostra uma intensificação de magnitude tanto nos valores do componente da estabilidade (termo A) (Fig. 4.5a), implicando numa atmosfera mais instável, quanto no termo da umidade (termo B) (Fig. 4.5b), o que sugere uma atmosfera mais seca. Em linhas gerais, esta intensificação dos termos A e B não resultam em grandes mudanças no valor final do IH em comparação aos resultados do NCEP. Deve-se notar que o norte do Mato Grosso e o sul do Pará apresentam um risco de queimadas moderado.

Comparando-se os meses de junho e julho é nítida a intensificação dos valores do IH, assim como um aumento na área de abrangência de risco máximo para o mês de julho. As análises do IH, para o cenário futuro de aquecimento global, apresenta claramente uma intensificação dos termos A e B (Fig. 4.6a, b, c). Isto mostra que toda área, desde o norte do Mato Grosso, oeste do Pará e leste do Amazonas, estará bastante vulnerável ao desenvolvimento de queimadas de grande proporção, a se confirmar as previsões do clima.

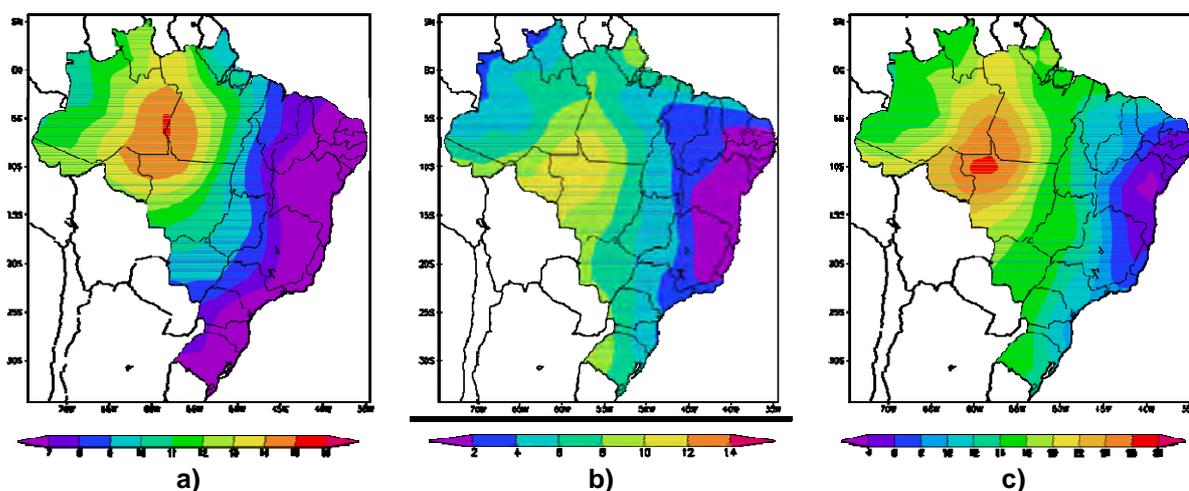
Em adição o termo A, que reproduz a estabilidade atmosférica ou o poder convectivo, domina-se o processo deixando uma contribuição menor para o termo B, que ilustra o teor de vapor d'água no nível de 850 hPa. Esta intensificação do IH, no mês de julho em relação a junho para as duas épocas, é bem acompanhada pelo aumento dos focos de queimadas (Fig. 4.7a, b). Isto é, apesar das diferenças entre as áreas de risco máximo e a localização dos focos, existe uma boa relação entre ambos, em particular para o IH dos dados do NCEP e os focos de queima.



**Figura 4.4:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do NCEP para o mês de julho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.

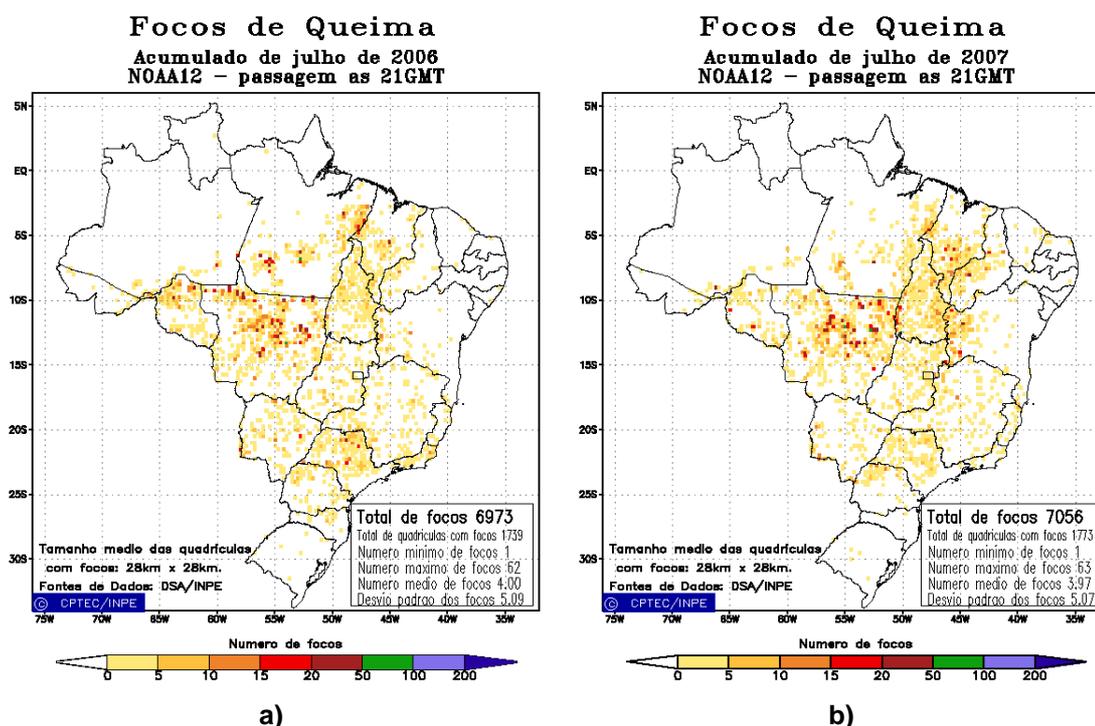


**Figura 4.5:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do ECHAM para o mês de julho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.



**Figura 4.6:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas no futuro a partir dos dados do ECHAM para o mês de julho: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.

As queimadas refletem, antes de tudo, uma prática humana que acompanha a sazonalidade natural, seguindo a ocorrência da estiagem na maior parte do País. De acordo com os dados do satélite NOAA-12, em julho de 2007, o número de focos de calor detectados no Brasil foi maior que no mesmo período do ano de 2006: 6.973 (Fig. 4.7a) contra 7.056 (Fig. 4.7b).



**Figura 4.7: a) Focos de Queimadas acumuladas do mês de julho de 2006  
b) Focos de Queimadas acumuladas do mês de julho de 2007**

**Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)**

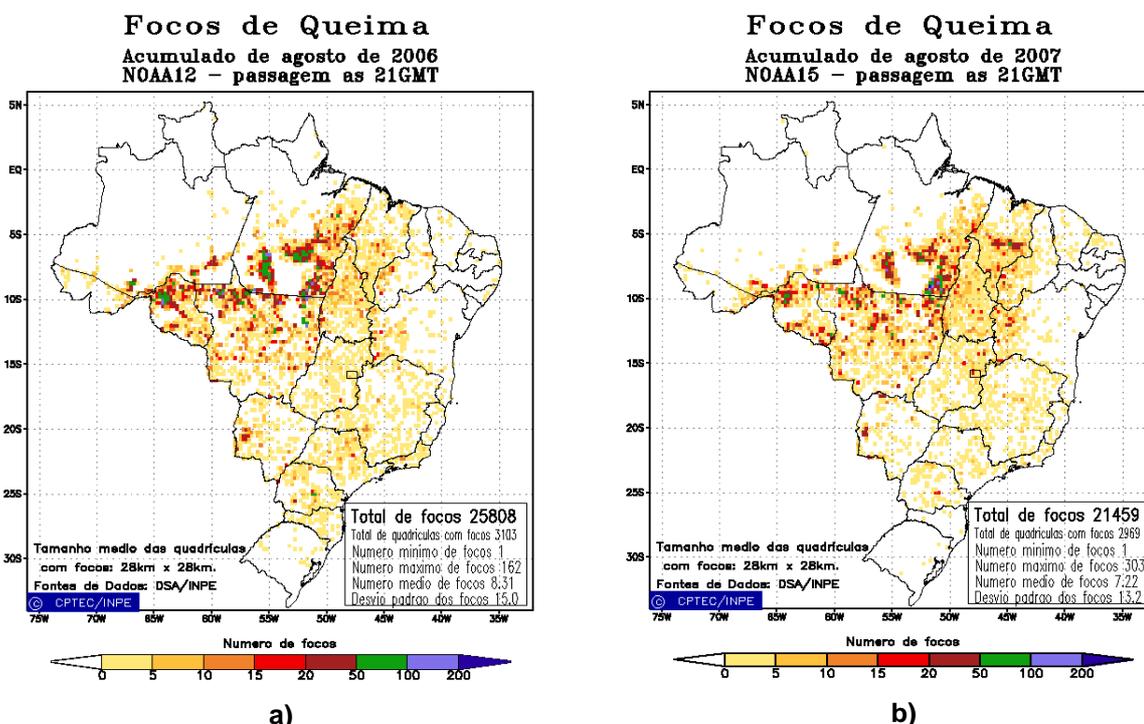
### **4.1.3 Análise para o mês de agosto**

Observou-se na média atmosfera para o mês de agosto que o componente da estabilidade (termo A), para os dados do NCEP (Fig. 4.9a), apresenta categoria (2) para as regiões sul, nordeste e norte da região norte. O sudeste do Amazonas, sul do Pará e a região centro-oeste apresenta categoria (3). O componente da umidade (termo B) (Fig. 4.9b) apresenta categoria (1) na parte norte da região norte e na região nordeste; categoria (2) para as regiões sul, sudeste e centro-oeste, e valores moderados (3) para o centro-sul do Mato Grosso. Com isso, o IH (Fig. 4.9c) é caracterizado por risco alto para a região centro-oeste com temperaturas acima de 24°C, e risco moderado (5) para as demais regiões.

Os resultados do ECHAM5, quando comparado aos resultados do NCEP, apresentam uma área de maior abrangência do termo A com diferente distribuição espacial de categoria (3), o que sugere uma maior instabilidade atmosférica (Fig. 4.10a). Para o termo B, nota-se que o modelo apresenta um clima mais úmido que o proposto pelo NCEP, já que a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho é menor para o ECHAM5 (Fig. 4.10b). Esta umidade não é suficiente, todavia, para reduzir o risco de queimada na área que se estende desde o Mato Grosso até o Pará (Fig. 4.10c).

Investigando as condições propostas pelo cenário de aquecimento global (Fig. 4.11a, b, c), nota-se uma intensificação substancial das condições favoráveis ao desenvolvimento do fogo. Isto é claramente verificado para os estados do Mato Grosso, Pará e Amazonas (Fig. 4.11c). A avaliação dos meses anteriores (junho, julho) ilustra que com o início do período de estiagem no Brasil central, cresce a possibilidade/favorabilidade atmosférica à ocorrência de queimadas. A Figura 4.8a, b mostra a distribuição dos focos de queimadas para o mês de agosto nos anos de 2006 e 2007, de acordo com o satélite NOAA-12. De fato, a região centro-norte do Brasil é a que apresenta o maior número de queimadas.

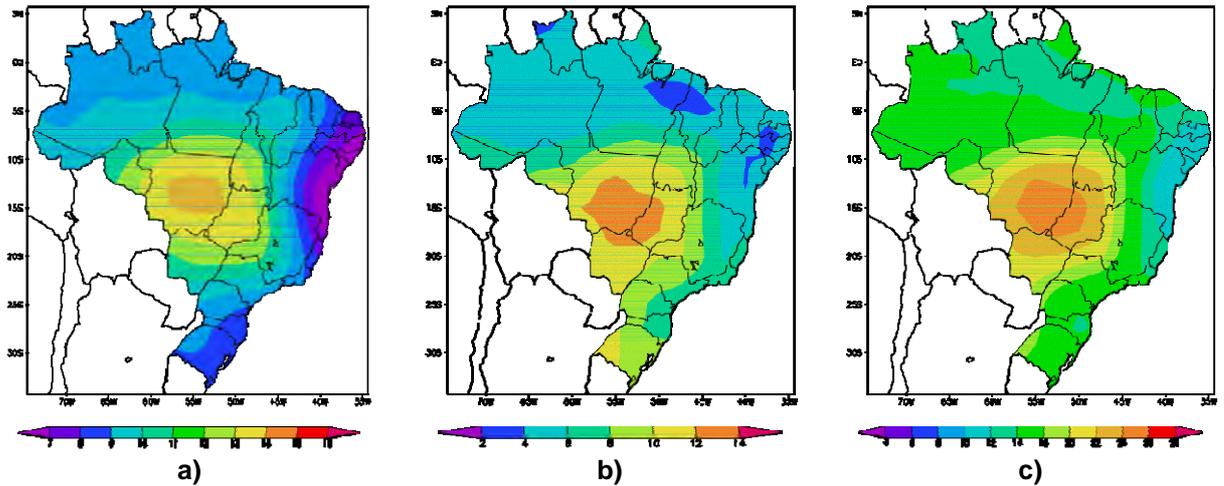
Para o ano de 2006, cerca de 25.800 focos de queimadas foram detectados, já em de 2007, foram detectados cerca de 21.450.



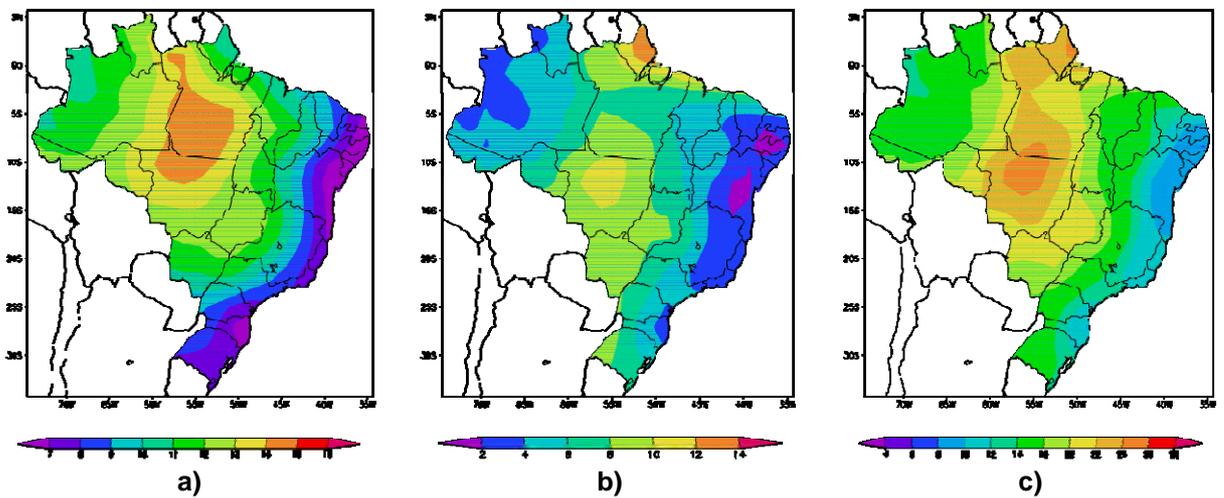
**Figura 4.8: a) Focos de Queimadas acumuladas do mês de Agosto de 2006.**

**b) Focos de Queimadas acumuladas do mês de Agosto de 2007.**

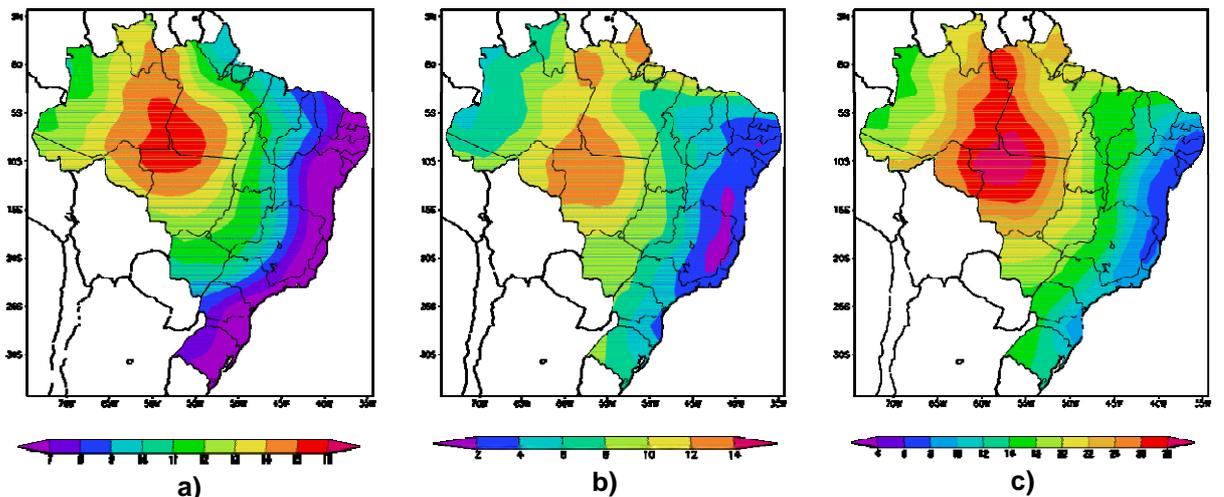
**Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)**



**Figura 4.9:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do NCEP para o mês de agosto: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.



**Figura 4.10:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do ECHAM para o mês de agosto: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.

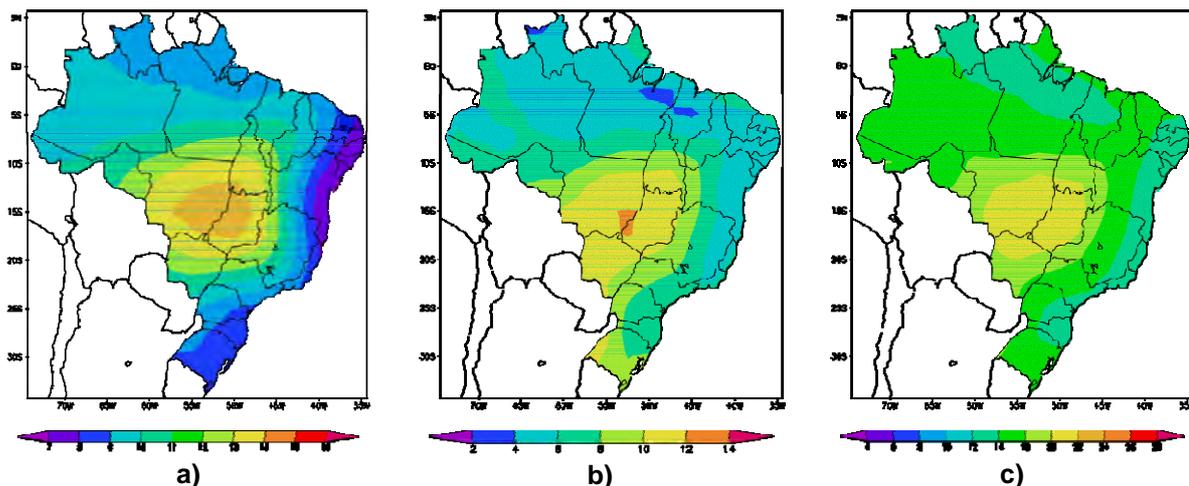


**Figura 4.11:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas no futuro a partir dos dados do ECHAM para o mês de agosto: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.

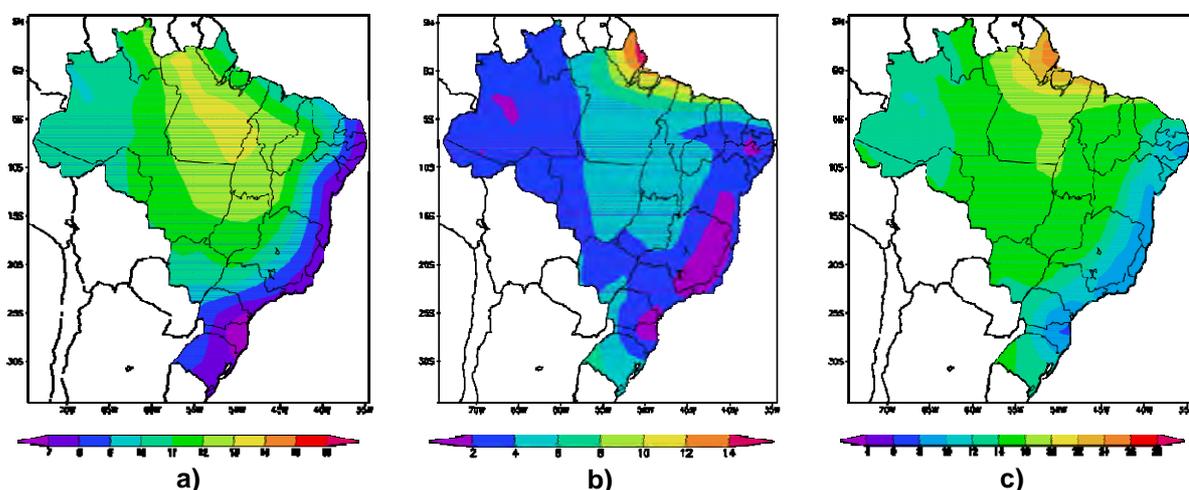
#### **4.1.4 Análise para o mês de setembro**

Durante o mês de setembro passa a haver, de acordo com os dados do NCEP, uma desintensificação dos termos A e B, e o índice de Haines, em comparação ao mês de agosto. Embora ainda possa ser observada a área de risco no Brasil central. A análise dos resultados do ECHAM5 (Fig. 4.13a, b, c) mostra-se totalmente diferente em termos de espacialização e magnitude quando comparados aos dados do NCEP (Fig. 4.12a, b, c). Enquanto os resultados do NCEP apresentam a região central do Brasil como mais instável e mais seca, os resultados do ECHAM5 apresentam o Pará e o oeste do nordeste brasileiro (NEB) como mais favorável às queimadas.

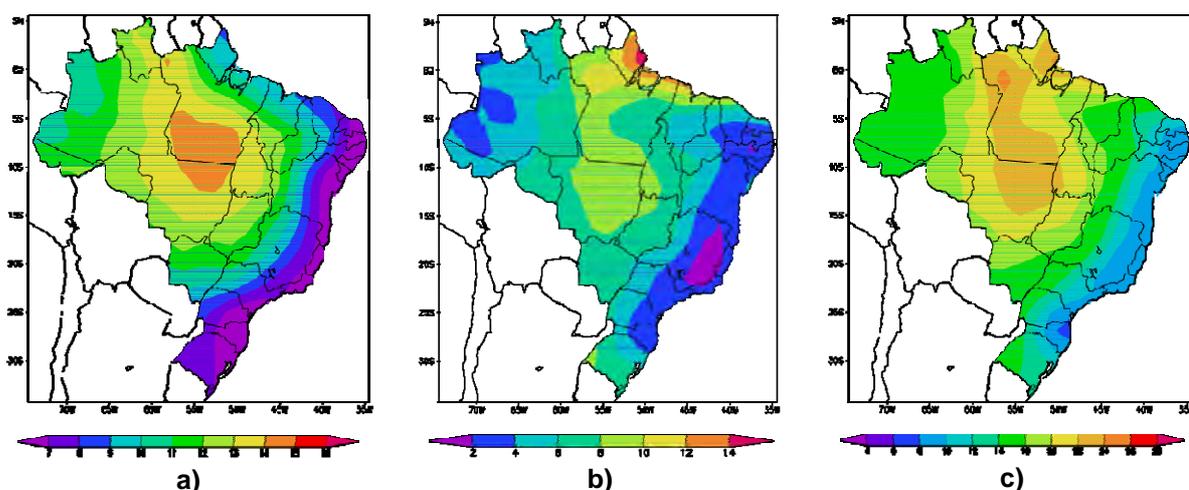
Para um cenário futuro de aquecimento global, o IH apresenta uma intensificação notória do termo A (Fig. 4.14a). Logo, o poder convectivo é responsável por grande parte do processo que resulta no risco de queimadas, enquanto que o teor de vapor d'água na atmosfera no nível de 850 hPa tem uma menor contribuição. Desta forma, acena-se com a possibilidade de grandes áreas com maior suscetibilidade a queima, a saber: região centro-oeste e região norte. Esta redução do IH em setembro quando comparado a agosto não está de acordo com o aumento no número de focos de calor como mostrado pelas Figuras 4.15a, b e 4.8a, b. Áreas que apresentam alto índice de queimadas, como Rondônia e leste do Pará, não mostram condições de risco alto de acordo com o IH.



**Figura 4.12:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do NCEP para o mês de setembro: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.

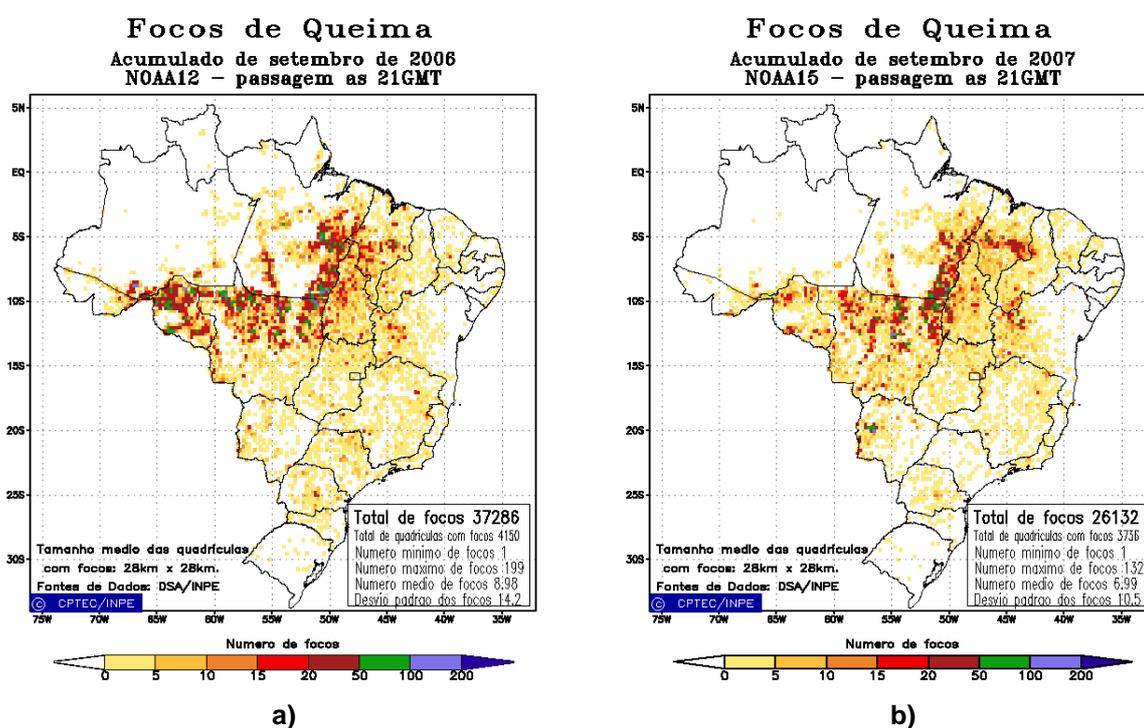


**Figura 4.13:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do ECHAM para o mês de setembro: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.



**Figura 4.14:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas no futuro a partir dos dados do ECHAM para o mês de setembro: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.

Este número corresponde ao mês com maior incidência de queimadas principalmente nos estados do Pará, Tocantins e norte do Mato Grosso. Portanto, os resultados com maior confiabilidade são os resultados do ECHAM5, já que se mostraram numa melhor coerência em relação aos focos de queimadas detectados.



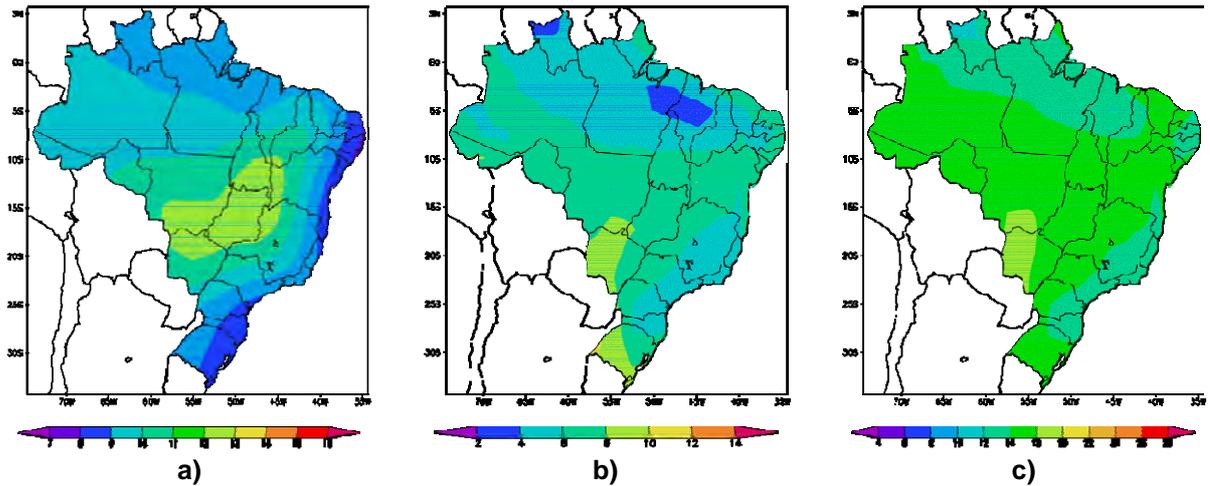
a)  
b)  
**Figura 4.15: a) Focos de Queimadas acumuladas do mês de setembro de 2006  
b) Focos de Queimadas acumuladas do mês de setembro de 2007  
Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)**

#### **4.1.5 Análise para o mês de outubro**

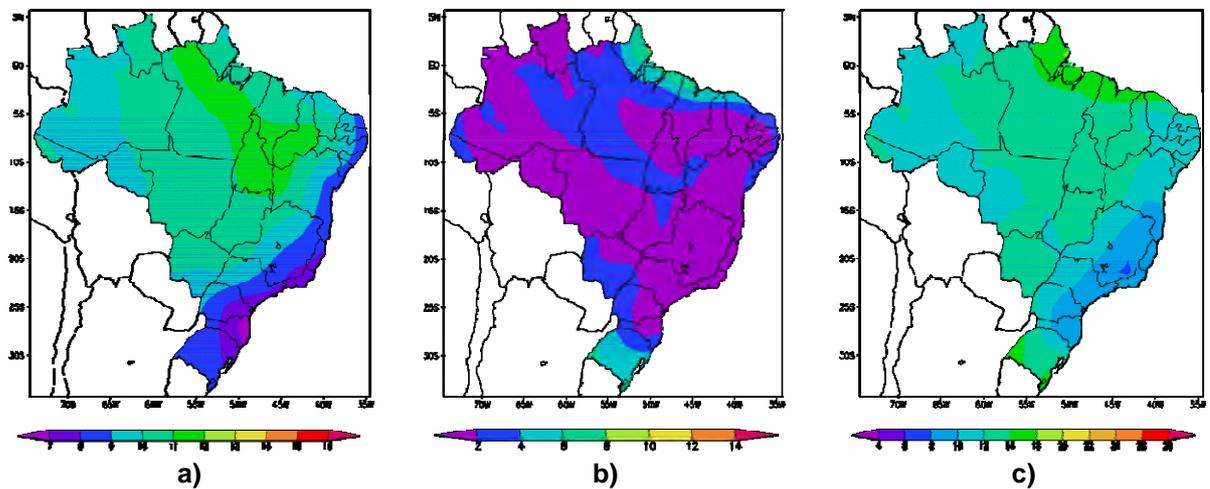
Observou-se para média atmosfera o termo A para os dados NCEP (Fig. 4.16a) apresenta categoria (3) na região central do Brasil, e parte do sudeste, com correspondentes temperaturas máximas de 13°C. O componente da umidade (termo B) (Fig. 4.16b) apresenta categoria (2), abaixo de 10°S de latitude e categoria (1) acima de 10°S de latitude. Assim sendo, o IH mostra-se para todo o Brasil como risco baixo (4), com temperaturas menores que 18°C.

Para os resultados do ECHAM5 (Fig. 4.17a, b, c), o componente da estabilidade se mostra mais estável, e a depressão do ponto de orvalho, o termo B, apresenta-se mais úmido implicando que o IH apresenta-se como risco muito baixo (2,4) e baixo (4). Assim sendo, neste mês tem-se pouca favorabilidade à queima. Similar ao descrito enteriramente, as simulações futuras (2080-2100) (Fig. 4.18a, b, c), é caracterizado por risco baixo (4) para todo o Brasil com valores menores que 16°C.

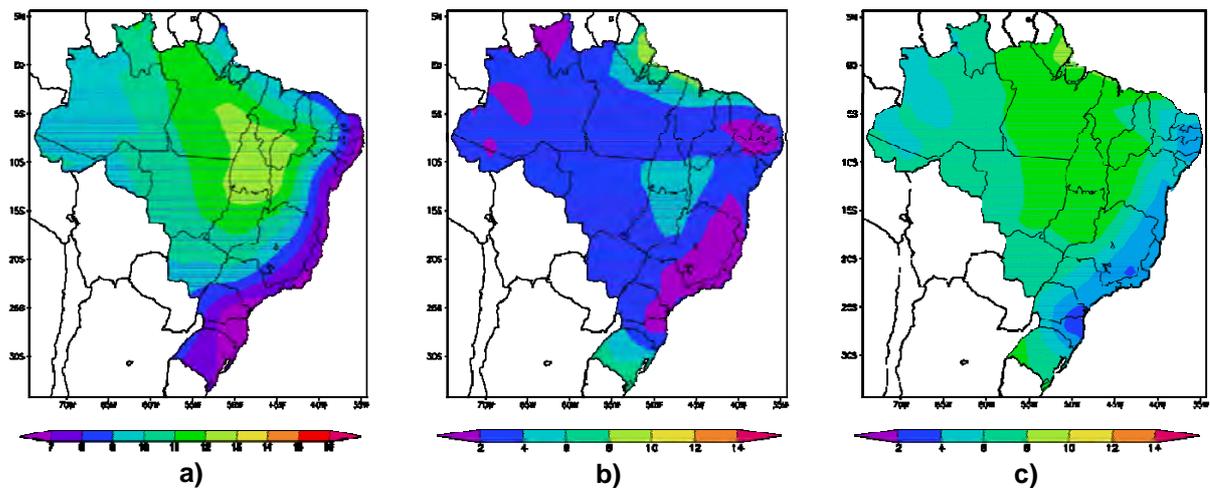
Isto não é correspondido pelos focos de calor (Fig. 4.19a, b). De acordo com esta figura, um alto índice de queimadas ainda é verificado no Brasil, principalmente no Pará e Maranhão.



**Figura 4.16:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do NCEP para o mês de outubro: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.

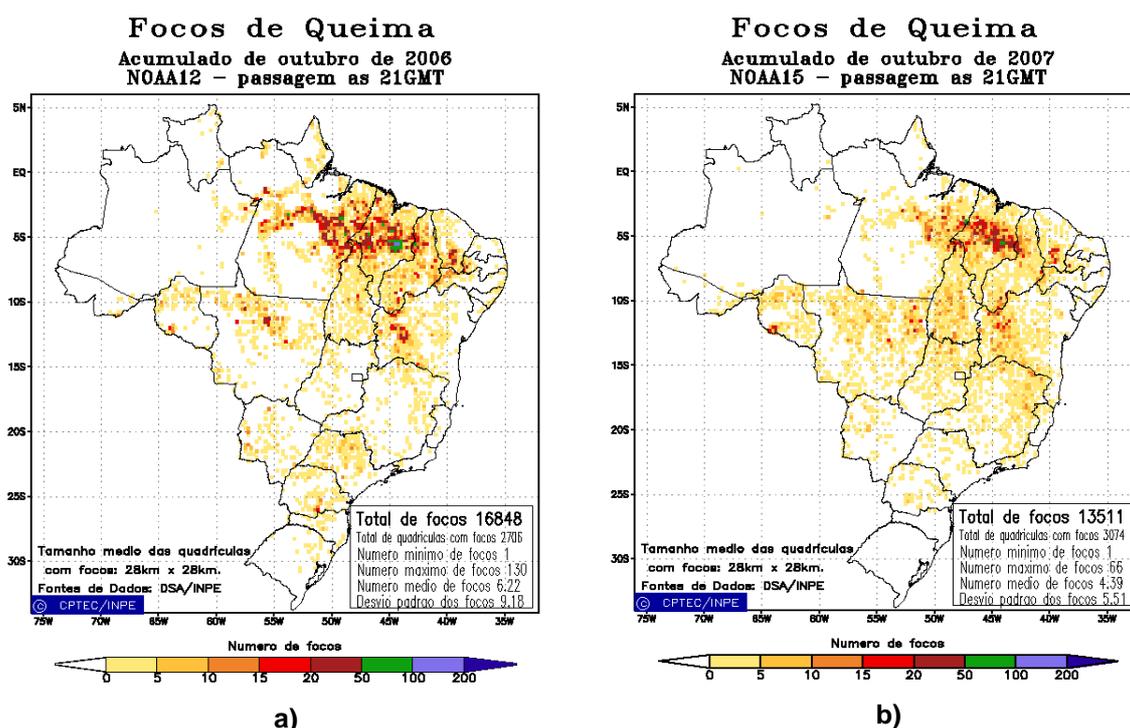


**Figura 4.17:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas do presente a partir dos dados do ECHAM para o mês de outubro: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.



**Figura 4.18:** Suscetibilidade do ambiente a ocorrências de queimadas no futuro a partir dos dados do ECHAM para o mês de outubro: a) Termo A, b) Termo B, c) Índice de Haines.

É importante salientar que estes resultados não podem ser entendidos unicamente como uma falha na metodologia do IH, mas sim, como uma possível limitação na representação do clima conforme proposto pelo NCEP, bem como pelo clima modelado pelo ECHAM5. Em adição, as análises mostradas são baseadas em médias mensais, o que pode suavizar a distribuição dos termos A, B e IH. O cálculo em nível diário pode apresentar resultados mais satisfatórios. Outro ponto a se destacar é a baixa resolução espacial dos dados. LEMOS (2006), com base em dados diários do modelo ETA, verificou uma boa correlação entre os focos detectados e as áreas de risco máximo.



**Figura 4.19: a) Focos de Queimadas acumuladas do mês de Outubro de 2006  
b) Focos de Queimadas acumuladas do mês de Outubro de 2007  
Fonte: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)**

## **Capítulo 5**

### **5.0 MODELO DE RISCO DE QUEIMADAS: ÍNDICE DE SETZER ( IS )**

#### **5.1 CONCEITO DO RISCO DE FOGO**

Esta metodologia de Risco de Fogo (RF) foi desenvolvida internamente no CPTEC, com base na análise da ocorrência de centenas de milhares de queimadas nos principais biomas (tipos de vegetação) do Brasil, em função das condições e históricos meteorológicos na área de cada evento (SETZER *et al.*, 2002; SISMANOGLU *et al.*, 2002). O seu princípio é o de que quanto mais dias sem chuva, maior o risco de queima da vegetação; adicionalmente, são incluídos no cálculo o tipo e o ciclo natural de desfolhamento da vegetação, temperatura máxima e umidade relativa mínima do ar, assim como a presença de fogo na região de interesse. A referência dos cálculos está nos “Dias de Seca”, ou “Secura”, (S), que é um número hipotético de dias sem nenhuma precipitação durante os últimos 120 dias (SETZER e SISMANOGLU, 2006).

### **5.1.1 Seqüência do cálculo do risco de fogo observado**

A seguir apresenta-se os passos para a obtenção do risco de fogo, proposto por Setzer *et al.* (2002) e definido no trabalho como Índice de Setzer (IS).

- 1) Determina diariamente para a área geográfica de abrangência, o valor da precipitação, em milímetros (*mm*), acumulada para onze períodos imediatamente anteriores, de 1; 2; 3; 4; 5; 6 a 10; 11 a 15; 16 a 30; 31 a 60; 61 a 90 e 91 a 120 dias.
- 2) Calcula os “Fatores de Precipitação” (FP), com valores de 0 a 1, para cada um dos onze períodos, por meio de uma função exponencial empírica da precipitação em milímetros de chuva para cada um deles. As equações são respectivamente:

$$FP_1 = \exp(-0,14Prec); \quad FP_2 = \exp(-0,07Prec);$$

$$FP_3 = \exp(-0,04Prec); \quad FP_4 = \exp(-0,03Prec);$$

$$FP_5 = \exp(-0,02Prec); \quad FP_{6\ a\ 10} = \exp(-0,01Pre);$$

$$FP_{11\ a\ 15} = \exp(-0,008Prec); \quad FP_{16\ a\ 30} = \exp(-0,004Prec);$$

$$FP_{31\ a\ 60} = \exp(-0,002Prec); \quad FP_{61\ a\ 90} = \exp(-0,001prec);$$

$$FP_{91\ a\ 120} = \exp(-0,0007Prec)$$

3) Calcula os “Dias de Secura” (PSE), pela multiplicação dos FP conforme a equação:

$$PSE = 105.FP_1.FP_2 \dots FP_{91a120} \quad (8)$$

4) Determina o risco de fogo básico (RB) para cada um dos cinco tipos de vegetação considerada, por meio da equação:

$$RB_{n=1,5} = 0,9[1 + \text{sen}(A_{n=1,5} \cdot PSE)]/2 \quad (9)$$

**Tabela 4 - Classe de vegetação usado no IS**  
**Fonte: Setzer et al., 2002**

<b>CLASSE DE VEGETAÇÃO</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>TIPO DE VEGETAÇÃO</b>	Ombrófila Densa	Ombrófila Aberta	Contato + Campinarama	Estacional+ Decídua+ Semi-Decidua	Não Floresta
<b>CONSTANTE “A”</b>	1,715	2	2,4	3	4,7

O Risco Básico (RB) segue uma curva senoidal ao longo do tempo, já que a radiação solar global e a resposta da vegetação apresentam aproximadamente este mesmo padrão. Desta forma, o risco aumenta segundo esta curva, atingindo o valor máximo de 0,9. A Figura 5 ilustra a variação do risco básico utilizando as equações e conceitos anteriores. Nota-se que o eixo dos “dias sem chuva” indica tanto um período real de dias sem chuva, como também os “dias de secura”, que correspondem a um período hipotético sem chuva calculado a partir da quantidade e distribuição temporal das chuvas ocorridas. A noção de períodos não chuvosos “dias sem chuvas” ou “dias de secura” se constitui no princípio básico deste método.

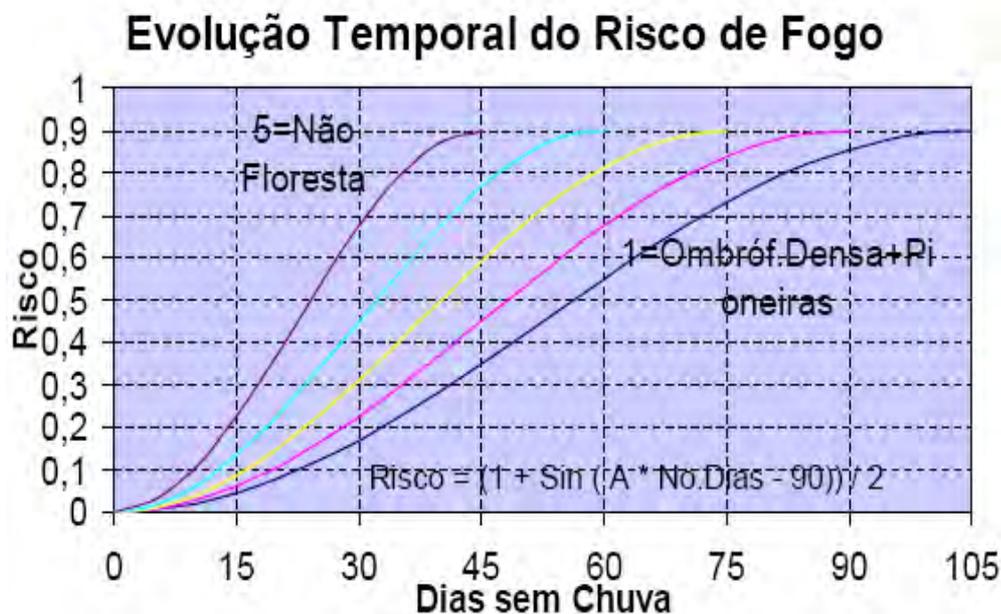


Figura 5: Variação do risco de fogo (RF) para diferentes vegetações.

Somando-se ao fator de secura existem outros dois fatores para o risco de fogo final.

- 1) Corrige o risco de fogo para a umidade relativa mínima do ar. O risco (RU) aumenta para umidade abaixo de 40% e diminui para valores acima desta referência. Usam-se os dados de umidade das observações das 18h UTC, supostamente seu mínimo. A equação de ajuste linear é:

$$RU = RB(-0,006 \cdot UR_{\min} + 1,3) \quad (10)$$

- 2) Corrige o risco de fogo para a temperatura máxima do ar. O risco (RT) aumenta para temperaturas acima de 30°C e diminui para valores abaixo desta referência. Usam-se os dados de umidade das observações das 18h UTC, supostamente seu máximo. A equação de ajuste linear é:

$$RT = RU(0,02T_{\text{máx}} + 0,4) \quad (11)$$

$$\text{Risco de Fogo Final (RF)} = RT \quad (12)$$

Feitos os cálculos tem-se que o risco em função da temperatura máxima é o risco de fogo final (RF), atribuindo-se as seguintes categorias:

**Tabela 5 - Classes de risco de fogo**

<b>NÍVEL DE RISCO</b>	<b>ÍNDICE DE SETZER ( 0 a 1 )</b>
mínimo	0 - 0,15
baixo	0,15 - 0,40
médio	0,40 - 0,70
alto	0,70 - 0,90
crítico	> 0,90

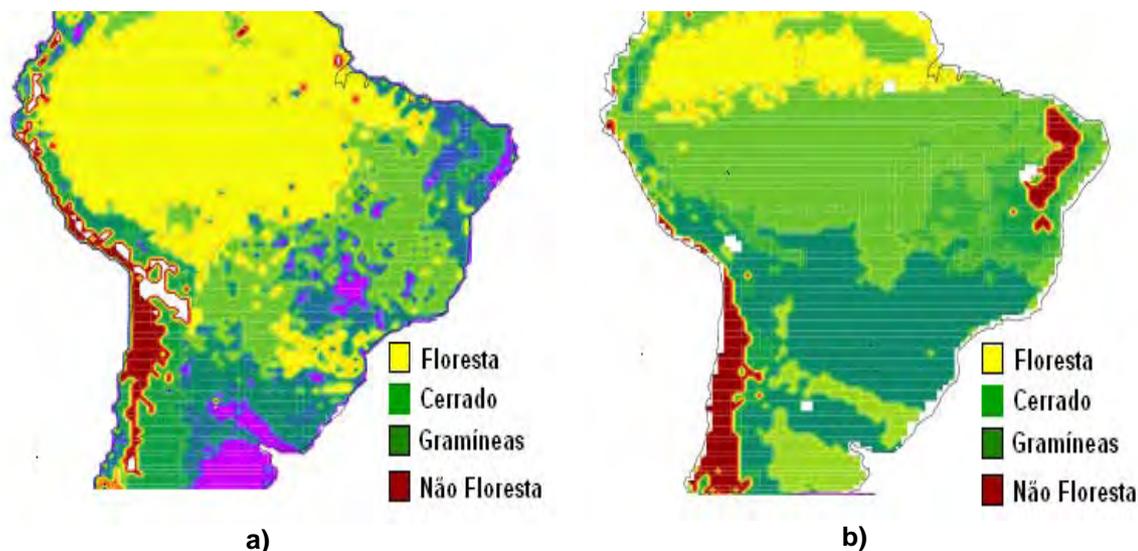
A ferramenta utilizada para a realização dos cálculos foi a linguagem de programação Fortran, dentro de um ambiente Linux. A entrada dos dados de temperatura máxima ( $T_{\text{máx}}$ ), umidade relativa mínima ( $UR_{\text{mín}}$ ) e precipitação (Prec) foram extraídas das saídas dos modelos em uma base diária.

A segunda fase do processo consiste na aplicação das equações de risco para as variáveis de entrada  $T_{\text{máx}}$ ,  $UR_{\text{mín}}$  e prec, ainda na base diária; o que totalizou aproximadamente 43800 arquivos somando as duas épocas: atual e de aquecimento global. Devido à dificuldade em mostrar o índice de Setzer (IS) na base diária, optou-se por sua apresentação a partir da climatologia mensal com dados diários.

## 5.2 MUDANÇA NA VEGETAÇÃO

Há décadas intriga a comunidade científica o desafio da investigação sobre as alterações globais, particularmente em prever o futuro da distribuição de vegetação. Essa questão de uma possível ocorrência da mudança na vegetação numa determinada região e seus impactos em relação ao clima, seja por ação natural ou antropogênica da floresta, pode causar um grande impacto sobre o clima, não só local, mas também regional e global (CHARNEY *et al.*, 1977; SUD E FENESSY, 1982 e 1984; XUE E SHUKLA, 1993 e 1996; DIRMEYER E SHUKLA, 1996; OYAMA, 2002; COOK E VIZY, 2008). Uma avaliação das conseqüências climáticas decorrentes de modificações de vegetação natural inclui, dentre outros fatores, o entendimento das condições atmosféricas e de superfícies. Por exemplo, caso ocorra a “savanização” da Amazônia, em que implicaria este impacto em relação ao risco de fogo na floresta Amazônica?

Estudos recentes como os de COOK e VIZY (2008), baseados num modelo regional de clima acoplado a um modelo de vegetação potencial, propõem para o final do século XXI uma redução de cerca de 70% da floresta amazônica (ombrófila densa) para cerrado (semi-decídua). Esta distribuição atual e futura da floresta amazônica e outros biomas (COOK E VIZY, 2008) é mostrado nas Figuras 5.1a, b. Como o índice de Setzer utiliza a vegetação como função de entrada, calcula-se este índice assumindo-se estes dois cenários de vegetação.



**Figura 5.1:** a) Distribuição da vegetação atual na América do Sul, b) Distribuição da vegetação prevista para o futuro na América do Sul.

Fonte: Cook e Vizy (2008).

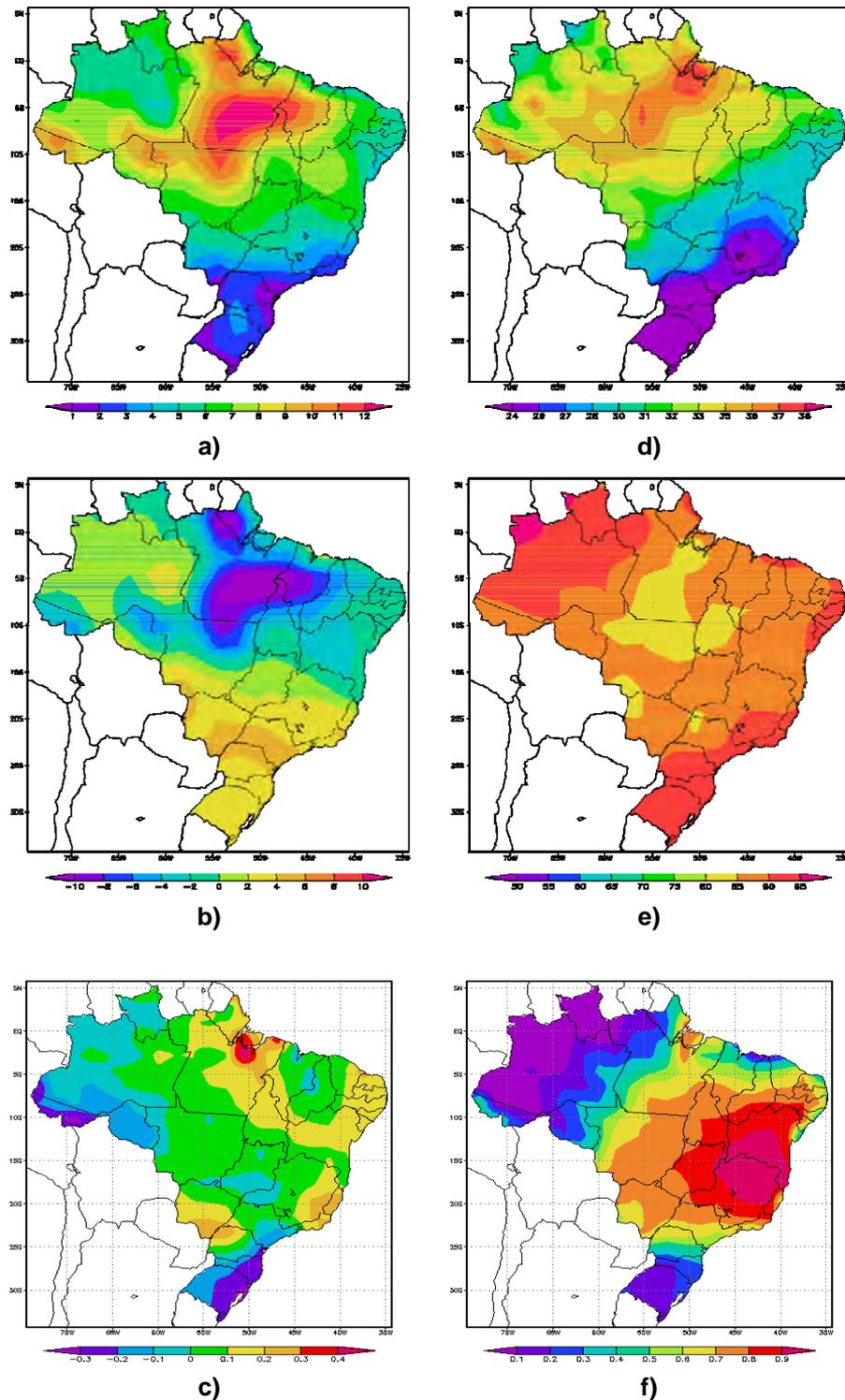
Três avaliações são feitas: a primeira investiga o risco de fogo tendo como base o clima e vegetação atual (Fig. 5.1a). A segunda análise parte do clima futuro (2080-2100) e não se considera as mudanças na vegetação, utilizando a distribuição de biomas como o atual. O terceiro cálculo é feito usando as simulações propostas para o futuro de clima e vegetação como para o cenário futuro, em que a vegetação de floresta (ombrófila densa) muda para cerrado (semi-decídua), e áreas de cerrados se transformarão em gramíneas (não floresta) conforme Figura 5.1b.

### **5.3 ANÁLISES DO ÍNDICE DE SETZER ( IS )**

Similarmente às análises do Índice de Haines, no que segue é feita uma investigação da favorabilidade atmosférica à ocorrência de queimadas. Essa análise é feita tendo como base os fatores de risco que constituem o Índice de Setzer (IS): o fator de temperatura máxima ( $T_{\text{máx}}$ ), o fator de umidade ( $UR_{\text{mín}}$ ) e o índice de secura (PSE), que é função do tipo de vegetação e da precipitação acumulada em 11 períodos.

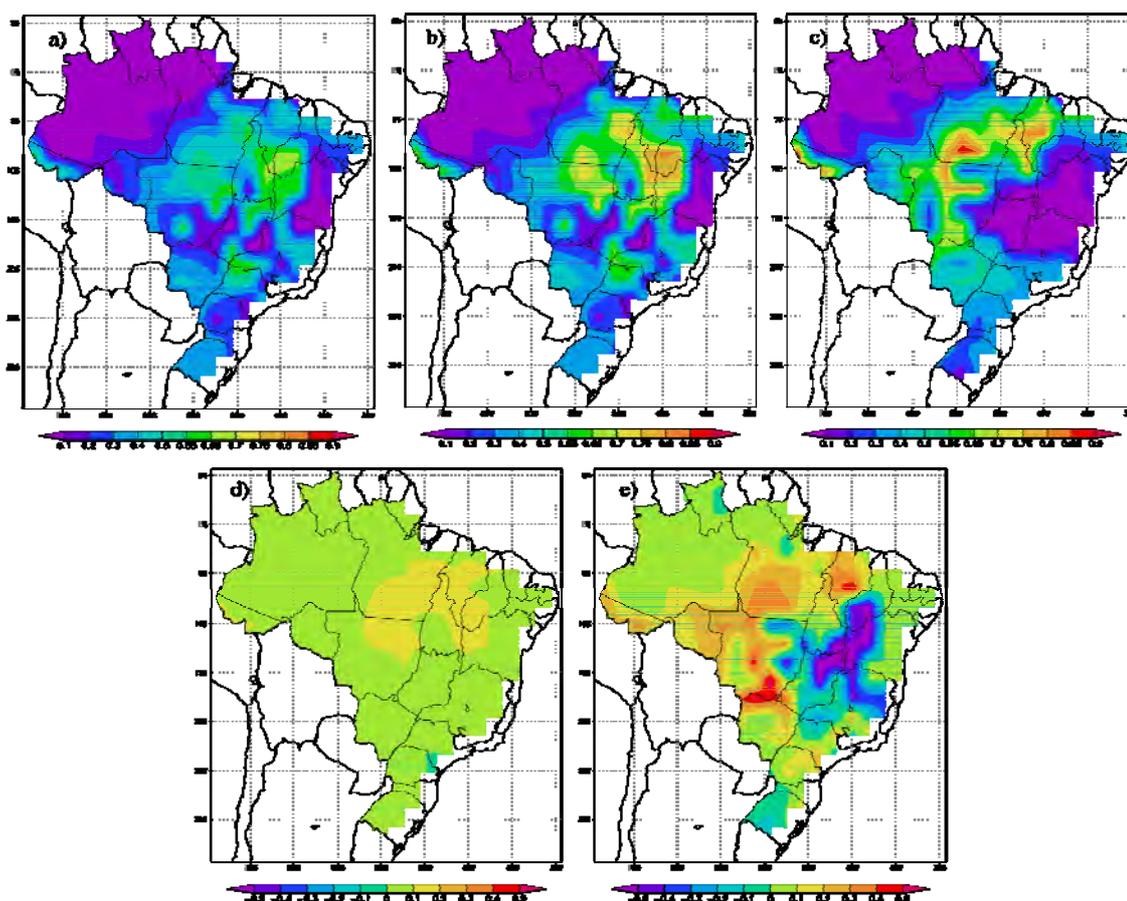
#### **5.3.1 Análise para o mês de junho**

Inicialmente é feita uma avaliação do risco de queimadas para o mês de junho a partir do clima atual e futuro como simulado pelo ECHAM5, tendo como base o cenário A1B do IPCC. Nessa primeira análise assume-se que a vegetação no final do século será a mesma que no período atual. A análise é feita a partir das diferenças entre o clima futuro e atual, tendo como variáveis a temperatura máxima, umidade relativa mínima e o período de secura (PSE). Estas variáveis, portanto, são as bases do Índice de Setzer (IS). As anomalias de  $T_{\text{máx}}$  claramente mostram um aquecimento de cerca de  $10^{\circ}\text{C}$  (Fig. 5.2a) para a região centro-norte do Brasil, que é acompanhado por uma queda na UR sob condições de aquecimento global em comparação ao período atual (Fig. 5.2b). Observa-se também que o índice de precipitação se intensifica indicando um período maior de estiagem (Fig. 5.2c). Obviamente estas condições climáticas anômalas favorecem condições de risco de fogo maiores quando comparadas aos valores sob condições atuais. Isto pode ser visto na Figura 5.3b. Para condições futuras de aquecimento global os estados do Mato Grosso, Pará e Bahia serão ainda mais propícios às queimadas de grandes proporções.



**Figura 5.2:** a) Anomalia da Tmáx entre a simulação de clima futuro e vegetação atual e o presente para junho; b) o mesmo que (a) para URmín e c) para o PSE, d), e), f) mostra a distribuição espacial da Tmáx, URmín e PSE com simulações futuras de clima e vegetação para junho.

A Figura 5.3c mostra uma análise similar. Todavia, nesse caso usam-se os dados de vegetação como previsto por Cook e Vizy (2008) mostrado na Figura 5.1b. Devido à ausência da vegetação amazônica (floresta), existe uma intensificação do PSE (Fig. 5.2f) que é função do tipo de vegetação. Logo a presença do cerrado induz um aumento do PSE e, posteriormente uma redefinição do IS ou risco de fogo. É também notável que a região que vai desde a Bahia até o norte de Minas Gerais passa a apresentar um baixo risco de queimadas (Fig 5.3e). Essa área, em condições futuras, será coberta por gramíneas e arbustos, ao passo que sob condições atuais o cerrado e a caatinga são os biomas predominantes.

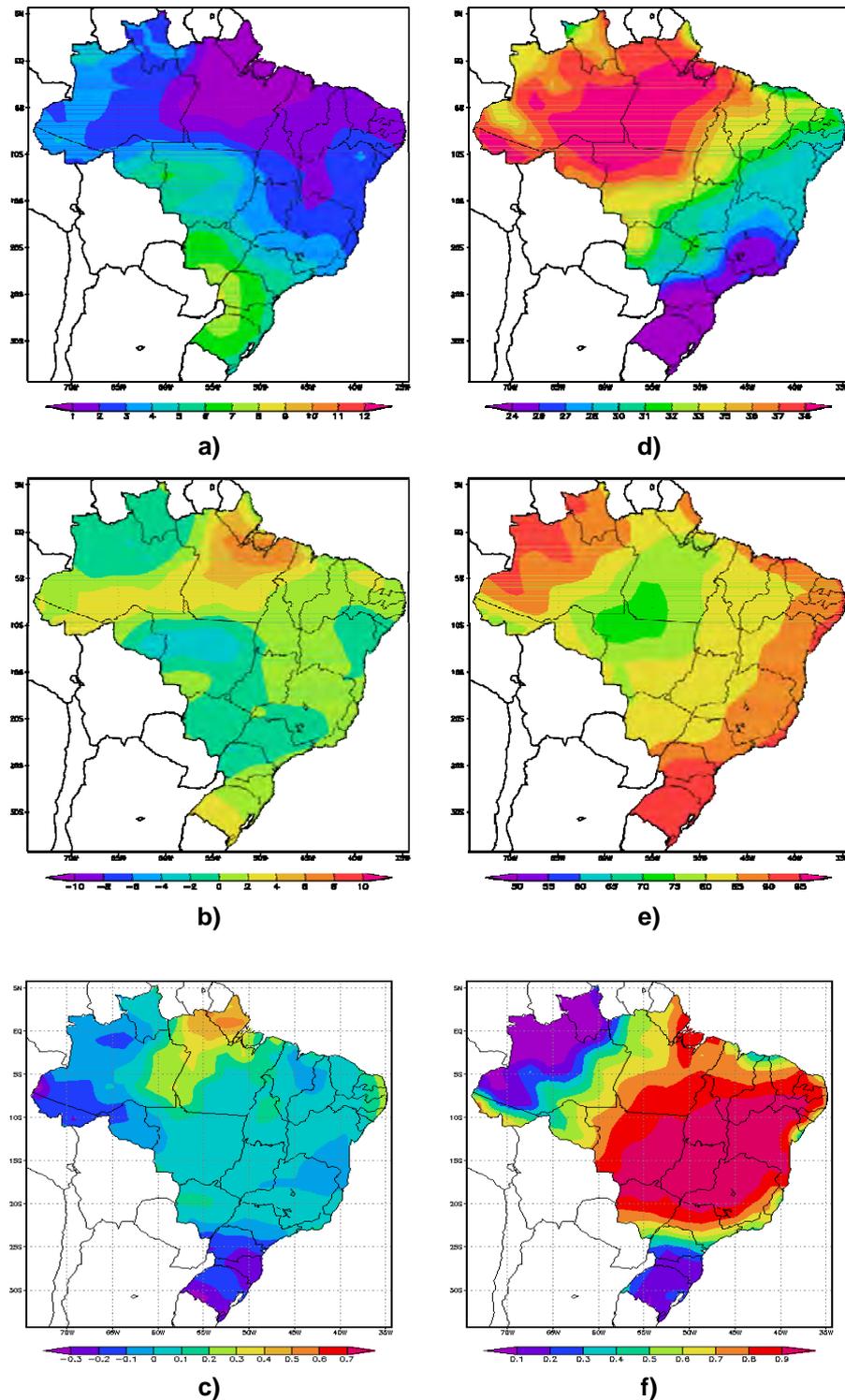


**Figura 5.3:** a) Índice de Setzer (IS) para o clima e vegetação atual em junho; b) IS para o clima futuro e vegetação atual em junho; c) IS para simulações futuras de clima e vegetação em junho; d) são as anomalias entre b) e a); e) são as anomalias entre c) e b).

### 5.3.2 Análise para o mês de julho

Durante o mês de julho nota-se uma intensificação das condições suscetíveis a queimadas em relação ao mês de junho (Fig. 5.4), embora as anomalias de temperatura entre o período futuro e o atual sejam menores. (Fig. 5.4a e 5.2a).

O calculo do IS (risco de fogo) mostra uma maior abrangência da área com maior risco de queimadas principalmente no norte do Mato Grosso para as condições de vegetação atual e clima futuro (Fig. 5.5a). Todavia, em relação ao mês de junho, o mês de julho mostra um menor IS no oeste da Bahia e sul do Piauí. Isto deve estar relacionado às menores anomalias de temperatura e do PSE (Fig 5.4a, c). Quando se inclui a vegetação futura (Fig. 5.5c), os maiores valores de IS predominam no estado de Rondônia. Quando comparado ao IS calculado para o presente (Fig. 5.5a), o que pode ser melhor visualizado pelo campo das anomalias (Fig. 5.5c), tem-se que em boa parte do Brasil central a troca da vegetação atual pela vegetação futura, induz a uma redução do risco de fogo. Por outro lado, na parte oeste do Brasil (Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Roraima) pode-se esperar um aumento no risco de queimadas.



**Figura 5.4:** a) Anomalia da Tmáx entre a simulação de clima futuro e vegetação atual e o presente para julho; b) o mesmo que (a) para URmín e c) para o PSE, d), e), f) mostra a distribuição espacial da Tmáx, URmín e PSE com simulações futuras de clima e vegetação para julho.

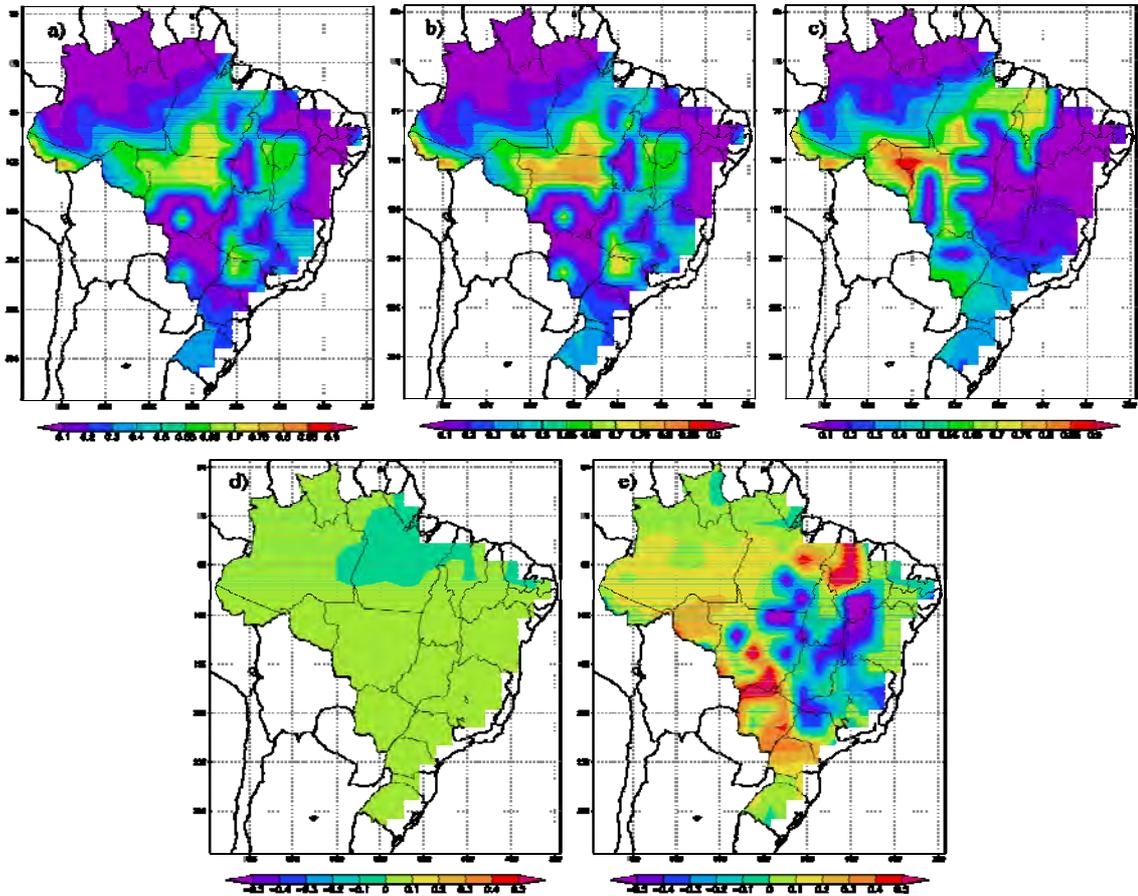
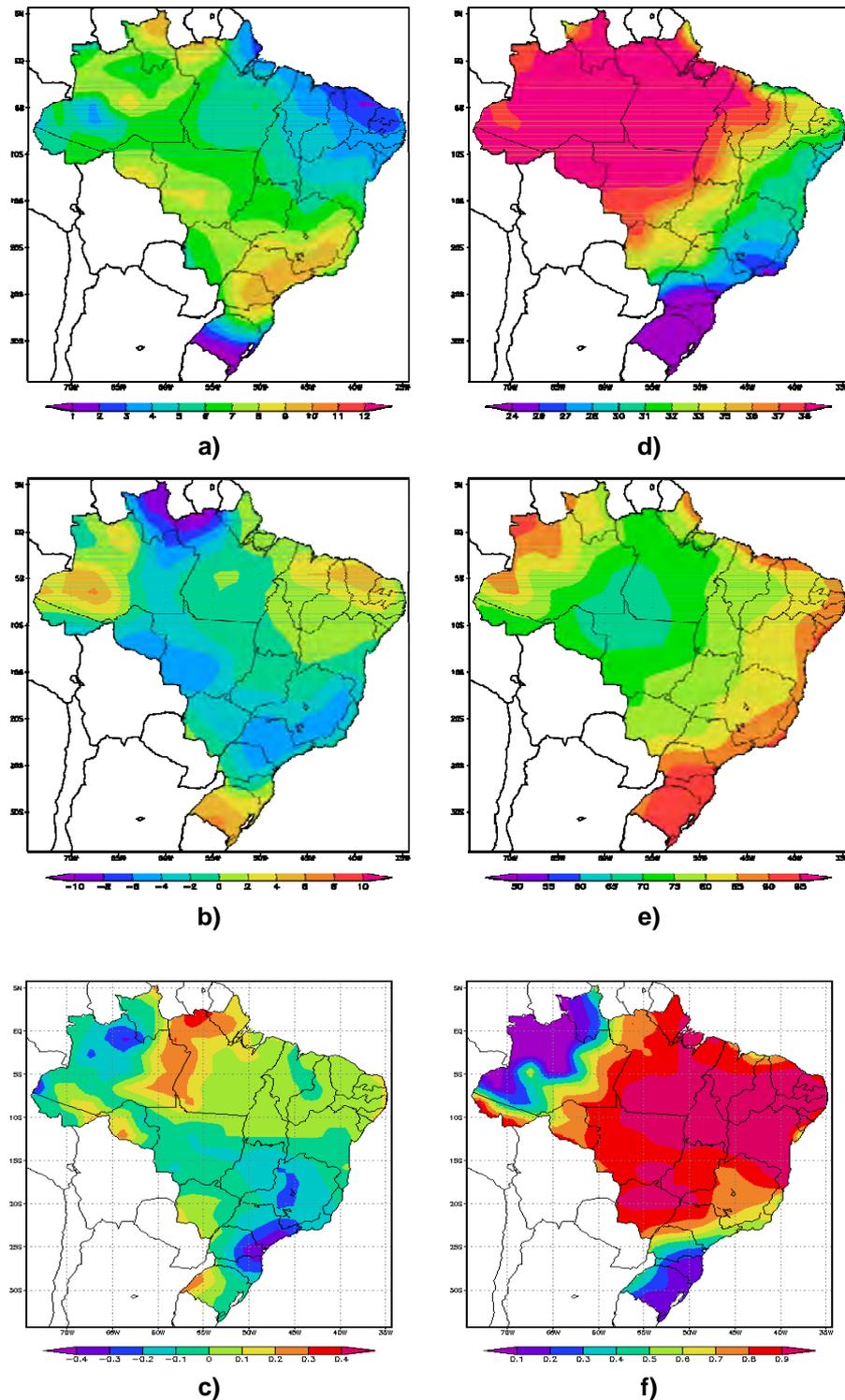


Figura 5.5: a) IS para o clima e vegetação atual em julho; b) IS para o clima futuro e vegetação atual em julho; c) IS para simulações de clima e vegetação em julho; d) são as anomalias entre b) e a); e) são as anomalias entre c) e b).

### **5.3.3 Análise para o mês de agosto**

De acordo com as Figura 4.8a, b que apresentam as distribuições dos focos de queimadas de agosto para os anos de 2006 e 2007, nota-se que o norte do Mato Grosso, Rondônia e sul/leste do Pará, são as áreas com maior predomínio de queimadas. De fato, é sobre estas regiões que se encontram os maiores valores de  $T_{máx}$ , os menores valores de  $UR_{mín}$ , assim como o período de Secura (PSE) é mais intenso (Fig. 5.6a, b,c).

A avaliação do IS (Fig. 5.7a), calculado a partir das condições climáticas atuais, acena para a existência de risco crítico sobre os estados supra-citados. A análise para condições de aquecimento global mostra uma intensificação ainda maior da zona crítica ao uso do fogo (Fig. 5.7b). Ao se incluir a vegetação prevista para as últimas décadas do século XXI, tem-se uma migração da área mais favorável à queima. Sob essas condições, o IS máximo passa a abranger a parte norte do Pará, leste do Amazonas e Rondônia. É importante notar que estas áreas, em particular o noroeste do Pará, não apresentam, sob condições atuais, um grande número de queimadas, por ser ainda uma área de mata fechada com pouca presença humana. A Figura 5.7e mostra as anomalias entre o risco atual e o risco proposto com base no clima e vegetação futura. Nota-se uma intensificação considerável no risco de fogo, em especial no estado do Amazonas e noroeste do Pará. Isto se deve à conversão da floresta nativa em cerrado, que é a vegetação proposta pelo cenário futuro. Por outro lado, a presença de gramíneas, substituindo o cerrado, diminui o IS no Mato Grosso e sul do Pará.



**Figura 5.6:** a) Anomalia da Tmáx entre a simulação de clima futuro e vegetação atual e o presente para agosto; b) o mesmo que (a) para URmín e c) para o PSE, d), e), f) mostra a distribuição espacial da Tmáx, URmín e PSE com simulações futuras de clima e vegetação para agosto.

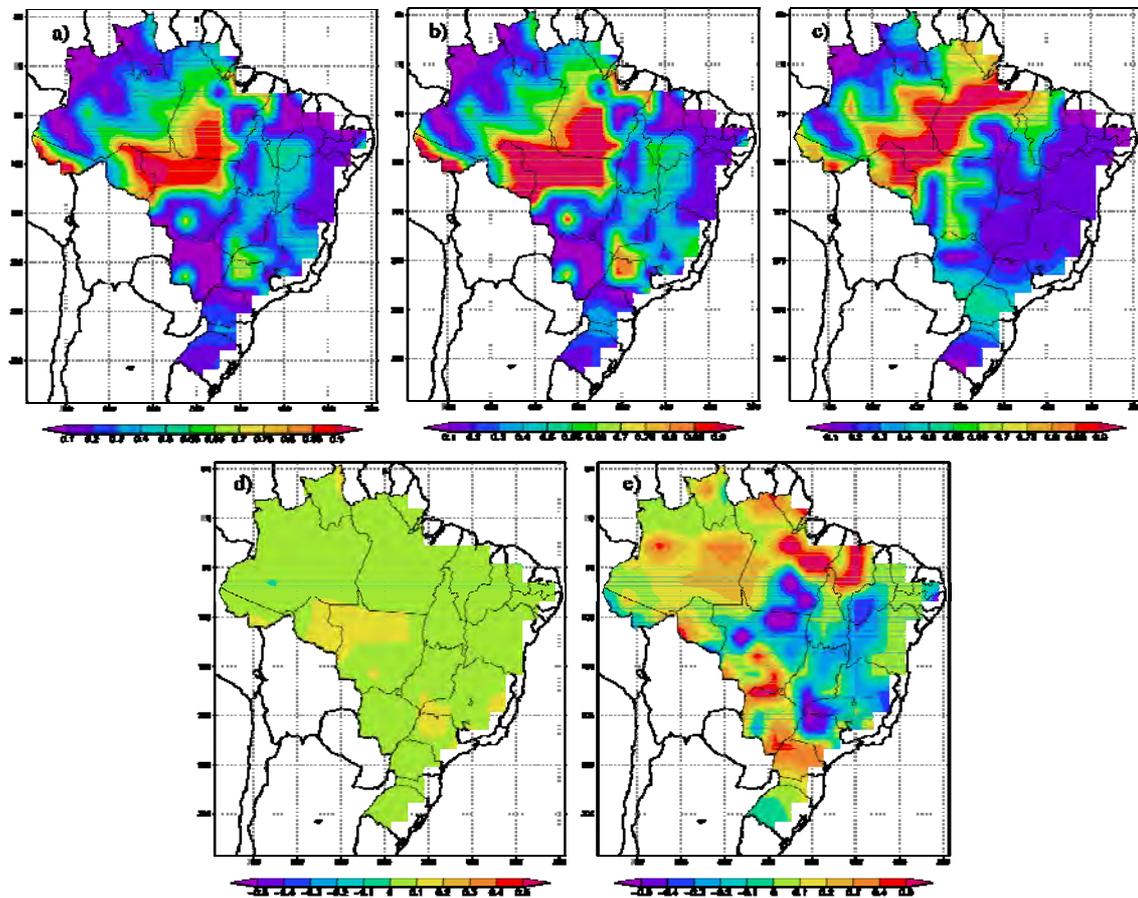
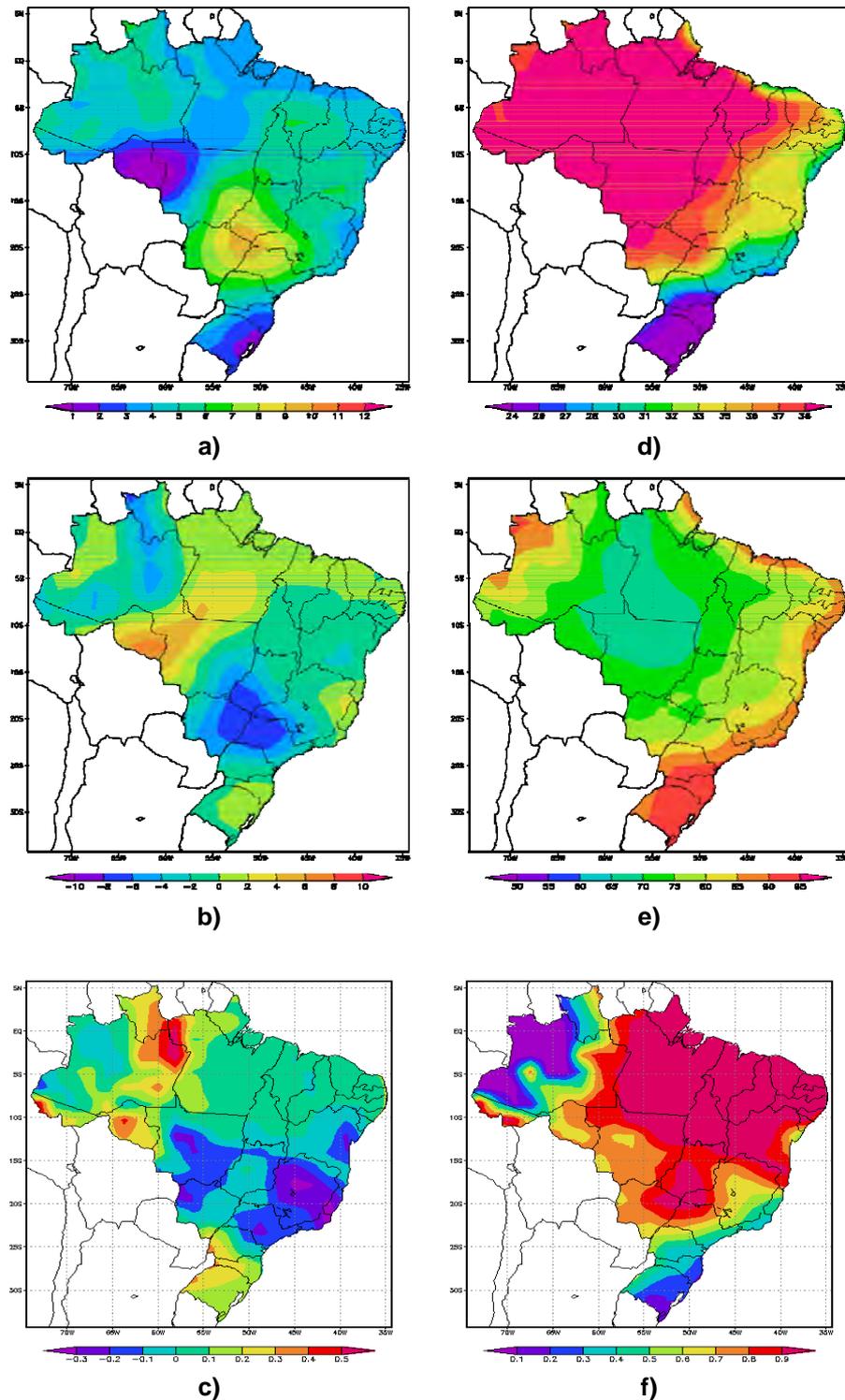


Figura 5.7: a) Índice de Setzer (IS) para o clima e vegetação atual em agosto, b) IS para o clima futuro e vegetação atual em agosto, c) IS para simulações futuras de clima vegetação em agosto; d) são as anomalias entre b) e a); e) são as anomalias entre c) e b).

#### 5.3.4 Análise para o mês de setembro

A evolução das condições climáticas ao longo do ano proporciona considerável mudança nos padrões/distribuições dos campos de T<sub>máx</sub>, UR<sub>mín</sub> e PSE. No mês de setembro, a condição dominante para o estabelecimento do IS é a distribuição de precipitação, ou o PSE (Fig. 5.8c). É importante salientar que as condições associadas com T<sub>máx</sub> e UR<sub>mín</sub>, em particular no leste do Amazonas são também importantes.

A região centro-sul do Brasil apresenta uma característica ímpar no sentido que as maiores anomalias de T<sub>máx</sub> (Fig. 5.8a) e mínimas de UR<sub>mín</sub> (Fig. 5.8b) não são suficientes para produzir uma região de nível crítico do IS. O risco de fogo calculado para as condições atuais (Fig. 5.9a) confirma as áreas de risco máximo no Mato Grosso e Pará, já mostrando um IS que é caracterizado por um nível moderado. Com o uso dos dados climáticos previsto para o futuro (Fig. 5.9b), o IS se mantém sobre as mesmas áreas, porém com maiores valores, caracterizando o nível crítico. Para o mês de setembro o emprego da vegetação prevista causa uma redução do IS, exceto no extremo norte do Pará (Fig. 5.9c).



**Figura 5.8:** a) Anomalia da T<sub>máx</sub> entre a simulação de clima futuro e vegetação atual e o presente para setembro; b) o mesmo que (a) para U<sub>Rmín</sub> e c) para o PSE, d), e), f) mostra a distribuição espacial da T<sub>máx</sub>, U<sub>Rmín</sub> e PSE com simulações futuras de clima e vegetação para setembro.

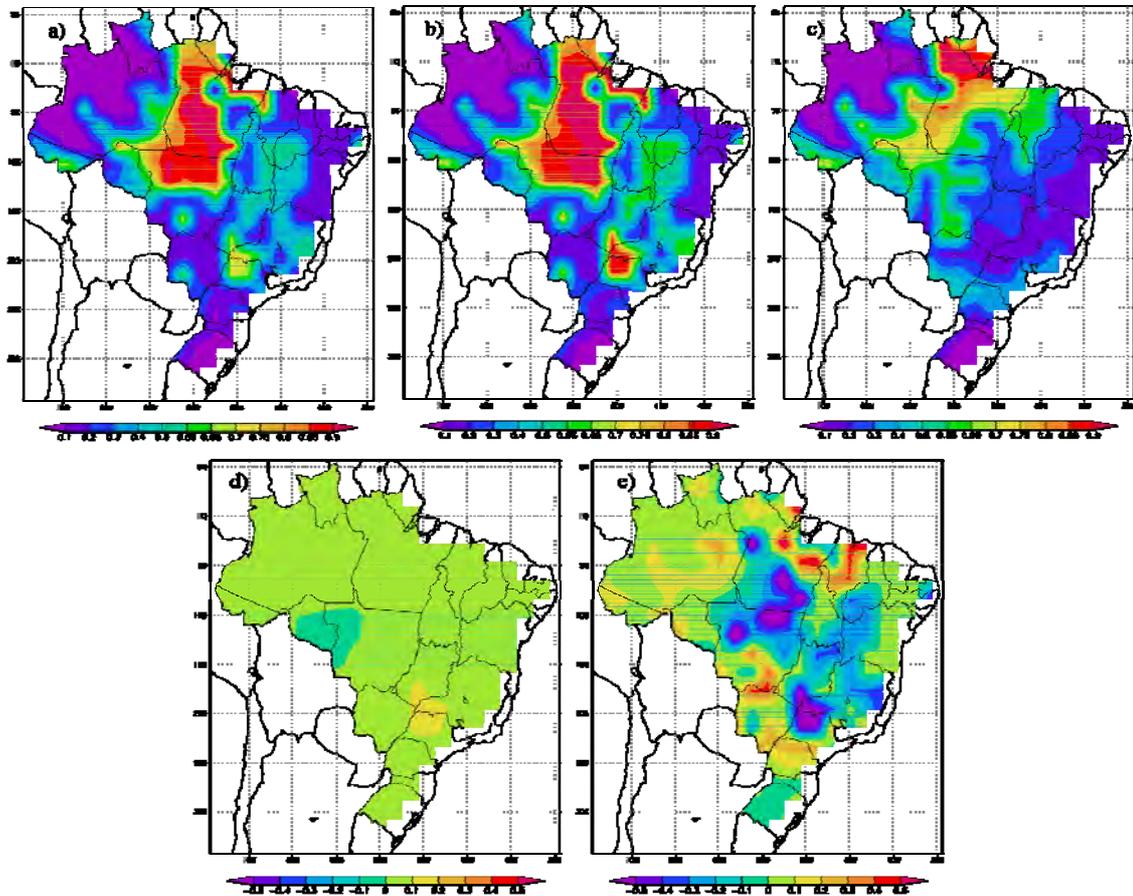
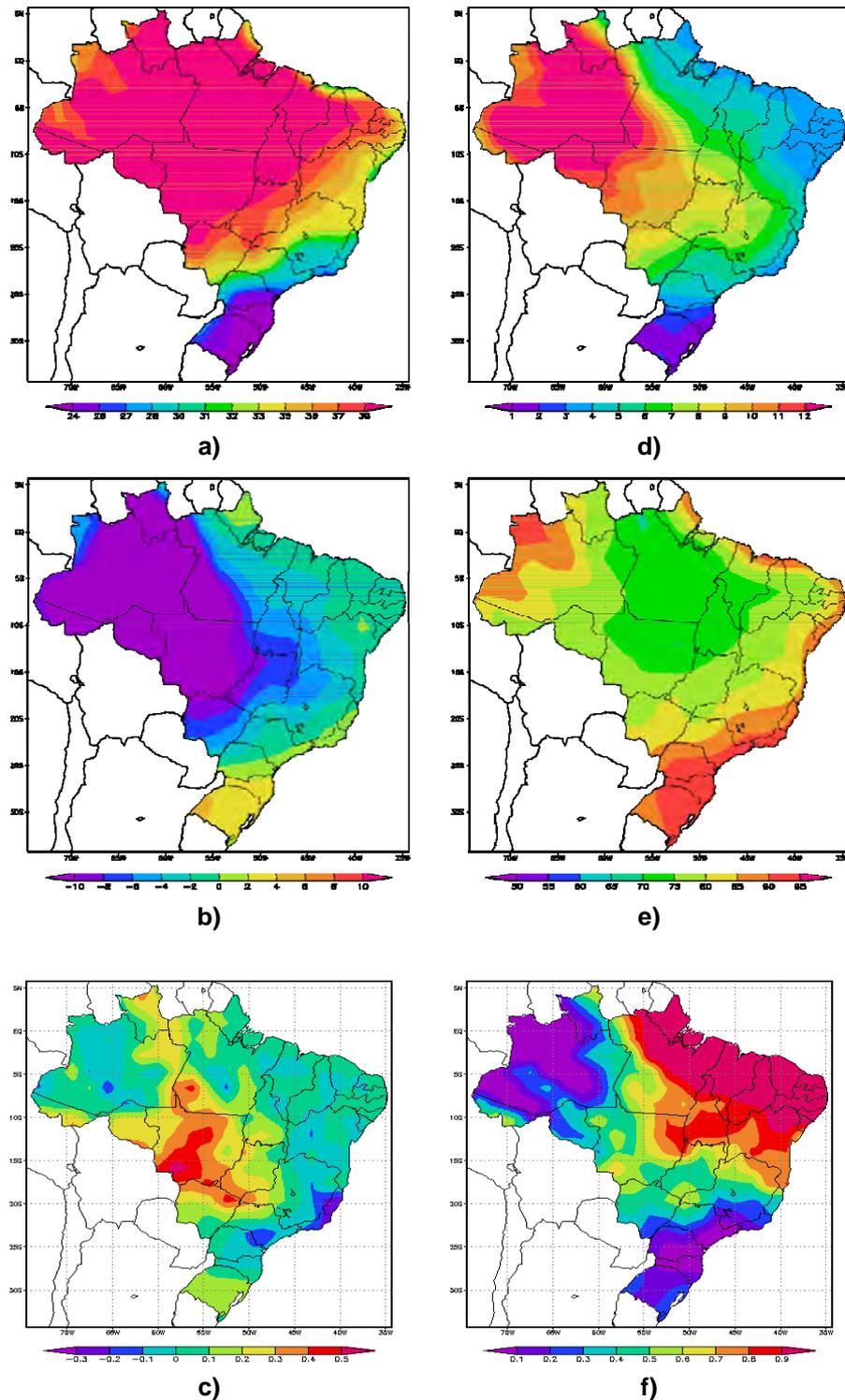


Figura 5.9: a) Índice de Setzer (IS) para o clima e vegetação atual para setembro, b) IS para o clima futuro e vegetação atual para setembro, c) IS para simulações futuras de clima e vegetação para setembro; d) são as anomalias entre b) e a); e) são as anomalias entre c) e b).

### **5.3.5 Análise para o mês de outubro**

Com o início do período chuvoso, na maior parte do Brasil, as condições atmosféricas mais favoráveis à queima se localizam no extremo norte do País (Fig. 5.10). É nessa região que durante esse período tem-se o maior número de queimadas (Fig. 4.19a, b). A análise do IS segue, com razoável precisão, às anomalias de  $T_{\text{máx}}$ ,  $UR_{\text{mín}}$  e PSE (Fig. 5.11). Observa-se valores crítico do IS unicamente na parte norte do estado do Pará. É importante notar que, embora existam queimadas principalmente no Maranhão no mês de outubro, como mostrado nas Figuras 4.19a, b o IS não apresenta risco considerável.



**Figura 5.10:** a) Anomalia da Tmáx entre a simulação de clima futuro e vegetação atual e o presente para outubro; b) o mesmo que (a) para URMín e c) para o PSE, d), e), f) mostra a distribuição espacial da Tmáx, URMín e PSE com simulações futuras de clima e vegetação para outubro.

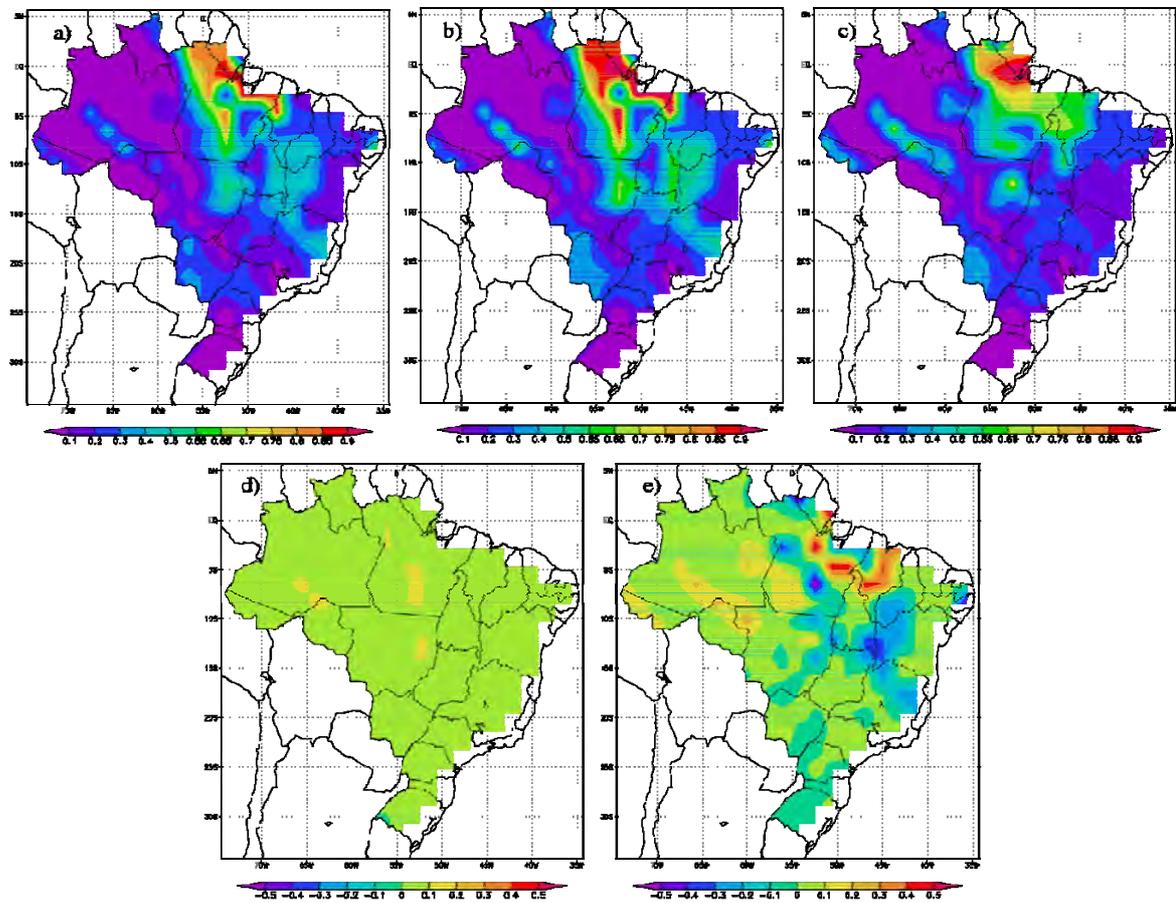


Figura 5.11: a) Índice de Setzer (IS) para o clima e vegetação atual em outubro, b) IS para o clima futuro e vegetação atual em outubro, c) IS para simulações futuras de clima e vegetação em outubro; d) são as anomalias entre b) e a); e) são as anomalias entre c) e b).

## **Capítulo 6**

### **6.0 CONCLUSÕES**

Neste trabalho realizou-se um estudo sobre possíveis impactos climáticos no risco de queimadas no Brasil, por meio de simulações numéricas de longo prazo, com o uso do Modelo de Circulação Geral Acoplado Oceano-Atmosfera ECHAM5/MPI-OM, em condições climáticas atuais e de aquecimento global. Para a validação dos resultados do ECHAM5 utilizou-se os dados de reanálises do NCEP. As análises climáticas, para os dados do ECHAM5 e NCEP, mostraram que o modelo representa relativamente bem o período atual em termos de temperatura, precipitação e umidade relativa, já que o mesmo consegue capturar os padrões climatológicos dominantes, em particular sobre a região Amazônica. Sobre a região central do Brasil, o modelo tende a superestimar a temperatura e a precipitação, e subestimar a umidade relativa.

Com base nas análises do risco de queimadas propostos pelo Índice de Haines (IH) e Índice de Setzer (IS), detectou-se que as principais áreas de risco de queimadas sob condições atuais concentram-se na região centro-oeste e norte do Brasil para os meses de junho a outubro, principalmente no centro-norte do Mato Grosso, com pico máximo no mês de agosto.

A comparação entre o IH e o IS mostra que o IH apresenta um menor índice de risco de queimadas, em comparação ao IS. Os índices também diferem em termos de regiões mais propensas às queimadas de grande porte.

O cálculo do IS, a partir de dois tipos de vegetação, um de acordo com as condições atuais e outro como proposto para o futuro em um cenário de aquecimento global, mostra que o IS futuro é extremamente sensível a condição imposta pela vegetação, no sentido que as áreas que tiveram a substituição da floresta por cerrado, apresentaram um maior risco de queimadas. Por outro lado, áreas onde o cerrado foi substituído por gramíneas tiveram IS reduzido. Isto mostra que, de acordo com as condições atmosféricas anômalas previstas para o futuro, pode-se esperar condições extremamente favoráveis ao desenvolvimento de queimadas de grande porte, principalmente na região Amazônica e no centro-norte do Mato Grosso. Com base nos resultados apresentados, pode-se ainda sugerir que a substituição da floresta amazônica por cerrado, propiciará um aumento na suscetibilidade atmosférica a queimadas.

Sabe-se que a maioria das previsões das condições climáticas e atmosféricas devido às mudanças globais, são produzidas pela extrapolação de estudos locais e de curta duração para cenários globais e de longo prazo. Estes são, todavia, fontes de incertezas e imprecisões. As interações dos elementos climáticos

ocorrem de forma complexa e estão associadas às projeções dos diferentes modelos de circulação geral da atmosfera, que por sua vez diferem substancialmente nos seus resultados. A depender do cenário econômico usado (por exemplo: A2, A1B, B2, B1), as previsões de temperatura, precipitação e umidade variam tanto em magnitude como em suas distribuições espaciais. Logo os resultados apresentados que são inteiramente dependentes dos campos atmosféricos anteriormente citados, estão também associados a incertezas.

Em adição, os fatores socioeconômicos e culturais atuais podem diferir completamente no futuro, fazendo com que apesar da atmosfera estar em condições de queima, o número de queimadas pode ser extremamente reduzido, devido às mudanças no nível antrópico das queimadas.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGEE, J.K. Fire and pine ecosystems, in Ecology and biogeography of Pinus (ed. D.M. Richardson), **Cambridge University Press**, Cambridge, pp. 193-218, 1998.
- ANDREAE, M.O. Biomass burning: Its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate, in **Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications**, editado por. Levine, J.S., pp. 3-21, 1991. MIT Press, Cambridge, Mass.
- ANDREAE, M.O., ATLAS, E., CACHIER, H., COFER, W.R., HARRIS, G.W., HELAS, G., KOPPMANN, R., LACAUX, J.-P., WARD, D.E. Trace gas and aerosol emissions from savanna fires. **Biomass Burning and Global Change**, edited by J.S. Levine, pp. 278-295, 1996a, MIT Press, Cambridge, Mass.
- ANDREAE, M.O., ATLAS, E., HARRIS, G.W., HELAS, G., KOPPMANN, MAENHAUT., W., MANÕ, S., POLLOCK, W.H., RUDOLPH, J., SCHAEFFE, D., SCHEBESKE, G., WELLING, M. Methyl halide emissions from savanna fires in Southern Africa. **Journal Geophys Res.**, v. 101, pp. 23603-23601, 1996b.
- ANDREAE, M.O., ROSENFELD, D., ARTAXO, P., COSTA, A.A., FRANK, G.P., LONGO, K.M., SILVA-DIAS, M.A.F. Smoking rain clouds over the Amazon. **Science**, v. 27, pp. 1337-1342, 2004.
- ASLAN, Z., TOPÇU, S. Seasonal variation of surface fluxes and atmospheric interaction in Istanbul, September, pp. 22-27, 1994. Lisbon, Portugal.
- AZZALI, S.; MENENTI, M. Mapping vegetation-soil-climate complexes in Southern Africa using temporal fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI Data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n 5, pp. 973-996, 2001.
- BATISTA, A.C. Avaliação da queima controlada em povoamentos de *Pinus taeda* L. no norte do Paraná. **Tese de Doutorado**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, (PR), 1995.
- BOND, W.J., VAN WILGEN., B.W. Fire and plants population and community Biology series. **Kluwer Academic Publishers**, New York, 1996.
- BROTAK, T.L., REIFSNYDER, W.E. Predicing major wildfire occurrence. **Fire Management Notes**, v. 38, pp. 5-8, 1977.
- BROWN, I.F., MOULARD, E.M.N.P., NAKAMURA, J., SCHROEDER, W., MALDONADO, M.J.R., Vasconcelos, S.S., Serlhost, D. **Relatório preliminar do mapeamento de áreas de risco para incêndios no leste do Estado do Acre**. (UFAC/FUNTAC). Rio Branco, Brazil, p. 20, 2006b.
- BROWN, I.F., SCHROEDER, W., SETZER., A., MALDONADO, M.J.R., PANTOJA, N., DUARTE, A.F., MARENGO, J. Monitoring fires in Southwestern Amazônia rain forest. EOS, **Transaction American Geophysical Union**, v. 87, n 26, pp. 253-264, 2006a.

- CHARNEY, J.G., QUIRK, W.J., CHOW, S.H., KORNFIELD, J. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 34, pp.1366-1385, 1977.
- COCHRANE, M.A. Fire science for rainforests. **Nature**, v. 42, p. 913-919, 2003.
- COOK, K., VIZY, E.K. Effects of Twenty-First-Century climate change on the Amazon rain forest. **Journal of Climate**, v. 21, n 3, p. 542-560, 2008.
- COSTA, M.H., FOLEY, J.A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO2 concentrations on the climate of Amazonia. **Journal of Climate**, v. 13, pp. 18-34, 2000.
- COSTA, M.H., YANAGI, SILVIA N.M, SOUZA, P.J.O.P., 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, p. L07706, 2007.
- CRUTZEN, P.J., ANDREAE, M.O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, v. 250, pp. 1669-1678, 1990.
- CRUZ, F.W., BURNS, S.J., KARMANN, I., SHARP, W.D., VUILLE, M., CARDOSO, A.O., FERRARI, J.A., DIAS, P.L.S., Jr, O.V. Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. **Nature**, v. 434, pp. 63-66, 2005. doi: 10.1038/nature03365
- DIRMEYER, P.A., SHUKLA, J. The effect on regional and global climate of expansion of the world's deserts. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 122, pp. 451-482. 1996.
- EMERY, W., THOMSON, R. Data analysis methods in physical oceanography. Pergamon Press, **Elsevier Science**, Oxford, p. 643, 1997.
- FEARNSIDE, P.M. Forest management in Amazonia: the need for new criteria in evaluating development Options. **Forest Ecology and Management**, Holanda, v. 27, p. 61-79, 1989.
- FERRAZ-VICENTINI, K.R. História do fogo no cerrado: uma análise palinológica. **Tese de Doutorado**, Universidade de Brasília, (DF), 1999.
- GRIMM, A. M. How do la Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? **Climate Dynamics**, v. 22, n. 2-3, pp. 123-138, 2004.
- HAINES, D.A. A lower atmospheric severity index for wildland fires. **Natl. Wea. Dig.**, v. 13, pp. 23-27, 1988.
- HAINES, D.A., WERTH, J. Haines Index climatology for the Western USA. **Western Region Technical Attachment**, v. 97, p. 17, 1987.
- HAINES, T.K., MARTINEZ., J., CLEAVES., D.A. Influences on prescribed burning activity in the United States national forest system. **International Forest Fire News**, v. 19, pp. 43-46, 1998.

HINES, K.M., BROMWICH, D.H., MARSHALL, G.J. Artificial surface pressure trends in the NCEP-NCAR reanalysis over the Southern Ocean and Antarctica. **Journal of Climate** v. 13, pp. 3940-3952, 2000.

<http://www.kni.ml/~sterl/Essence>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), Climate Change 2007. **The Physical Science Basis.**

JUNGCLAUS, J.H, KEENLYSIDE, N., BOTZET, M., HAAK, H., LUO, J.-J., LATIF, M., MAROTZKE, J., MIKOLAJEWICZ, U., ROECKNER, E. Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM, **Journal of Climate**, v. 19, pp. 3952-3972, 2006.

JUSTINO, F.B, SOUZA, S.S., SETZER, A. Relação entre focos de calor e condições meteorológicas no Brasil. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia.** 2002.

JUSTINO, F.B. The influence of boundary conditions on the Last Glacial Maximum. **Shaker Verlag**, v. 127, p. 16, 2004.

JUSTINO, F.B., TIMMERMANN, A., KREBS, U., SOUZA, E. Synoptic reorganization of atmospheric flow during the Last Glacial Maximum. **Journal of Climate**, v. 18, pp. 2826-2846, 2004.

KALNAY, E., KANAMISTU, M., KISTER, R., COLLINS, W., DEAN, D., GANDIN, L., IREDELL, M., SAHA, S. WHITE, G., WOOLLEN, J., ZHU, Y., CHELLIAN, M., EBISUZAKI, W., HIGGINS, W., JANOWIAK, J., MO, K.C., Ropelewski. C., Wang. J., Leetman, A., Reynolds. R., Jenne, R., Joseph, D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, pp. 437-471, 1996.

KAUFMAN, Y.J., TANRE, D., BOUCHER, O. A satellite view of aerosols in the climate system, **Nature**. 419.6903.215-223, 2002.

KIRCHOFF, V. SCAR-B proceedings, Transec Editorial, INPE, São José dos Campos,(SP), p. 208, 1997.

KLAR, A.E. A água no sistema solo-planta-atmosfera. São Paulo, **Nobel**, p. 408, 1984.

KOCHTUBAJDA, B., FLANNIIGAN, M.D., GYAKYUM, J.R., STEWART, R.E. The influence of atmospheric instability on fire behavior in Northwest Territories. **Symposium on fire and forest Meteorology meeting**, 2001.

KRIKYLA, K., HAMEED, S. Harmonic analysis of the seasonal cycle in precipitation over the United States: a comparison between observations and a general circulation model, **Journal of Climate**, v. 2, pp.1463-1475, 1989.

LATURNER, N., SCHERER, H.W. As queimadas e os incêndios florestais em Mato Grosso. **Revista Geonotas**, v. 8, 2004.

LEMOS, C.F. O Índice de Haines como indicador de desenvolvimento de focos de calor no Brasil através do Modelo Regional Eta. **Tese de Doutorado**, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, (RJ), 2006.

- MARSLAND, S.J., HAAK, H., JUNGCLAUS, J.H., LATIF, M., RÖSKE, F. The Max Planck Institute global ocean/sea-ice model with orthogonal curvilinear coordinates. **Ocean Modell**, v. 5, pp. 91-127, 2003.
- NEPSTAD, D.C., VERÍSSIMO, A., ALENCAR, A., NOBRE, C., LIMA, E., LEFEBVRE, P., SCHLESINGER, P., POTTER, C., MOUTINHO, P., MENDOZA, E., COCHRANE, M., BROOKS, V. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire, **Nature**, v. 398, pp. 505-508, 1999.
- NUNES, J.R.S. FMA<sup>+</sup> - Um novo índice de perigo de incêndios florestais para o Estado do Paraná. **Tese de Doutorado**, Universidade Federal do Paraná, (PR), 2005.
- OLIVEIRA, P.H. O efeito dos aerossóis de queimadas sobre o fluxo de CO<sub>2</sub> na Amazônia. **Dissertação de mestrado**, Universidade de São Paulo, São Paulo, (SP), 2005.
- OYAMA, M.D. Conseqüências climáticas da mudança de vegetação no nordeste brasileiro: um estudo de modelagem. **Tese de doutorado**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, (SP), 2002.
- PAGE, S.E., SIEGERT, F., RIELEY, J.O., BOEHM, H.-D.V., JAYA, A., LIMIN, S. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. **Nature**, v. 420, pp. 61-65, 2002.
- PANOFSKY, H.A., BRIER, G.W. Some applications of statistics to meteorology. Pennsylvania. **University Park**, p. 224, 1968.
- PHILANDER, G. El Niño Southern Oscillation (ENSO) Models. **Encyclopedia of Ocean Sciences**, pp. 827-832, 2001.
- PINTO, L.I.C. Comparação de produtos de precipitação e radiação solar incidente para a América do Sul: dados observados e reanálises. **Tese de Mestrado**, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, (MG), 2007.
- PROCÓPIO, S., ARTAXO, P., KAUFMAN, Y.J. REMER, L.A. SCHAFFER, J.S., HOLBEN, B.N. Multiyear analysis of Amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. **Geophysical Research letters**, v. 31, n 3, 2004. Art. Nº. L03108.
- RAMANATHAN, V., CRUTZEN, P.J., KEIL, J.T., ROSENFELD, D. Atmosphere: aerosols, climate, and the hydrological cycle. **Science**, v. 294(5549), pp. 2119-2124, 2001.
- RIBEIRO, G.A., BONFIM, M,V.R. Incêndio florestal versus queima controlada. **Revista Ação Ambiental**, ano II, n 12, pp. 8-11, 2000.
- RIBEIRO, G.A.; SOARES, R.V. Caracterização do material combustível florestal e efeitos da queima controlada sobre sua redução em um povoamento de *Eucalyptus viminalis*. **Cerne**, Lavras, v. 4, n 1, pp. 57-72, 1998.
- ROECKNER, E., BÄUML, G., BONAVENTURA, L., BROKOPF, R., ESCH, M., GIORGETTA, M., HAGEMANN, S., KIRCHNER, I., KORNBLUEH, L., MANZINI, E., RHODIN, A., SCHLESE, U. SCHULZWEIDA, U., TOMPKINS, A. The

- atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description. Max Planck Institute for Meteorology Rep. 349, 127 pp. [available from MPI for Meteorology, Bundesstr. v. 53, p. 20146, 2003. Hamburg, Germany].
- SALDARRIAGA, J.G., WEST, D.C. Holocene fires in the northern amazon basin. **Quaternary Research**, v. 26, pp. 358-366, 1986
- SALGADO-LABOURIAU, M.L., FERRAZ-VICENTINI, K.R. Fire in the cerrado 32,000 years ago. **Current Research in the Pleistocene**, v. 11, pp. 85-87, 1994.
- SANFORD, R.L., SALDARRIAGA, J.G., CLARK, K.E., UHL, C., HERRERA, R. **Science**, pp. 277-358, 1985.
- SETZER, A., PEREIRA, M.C., PEREIRA Jr, A.C. O uso de satélites NOAA na detecção de queimadas no Brasil. **Climanálise**, v. 7, n 8, pp. 40-53, 2002.
- SETZER, A., SISMANOGLU, R.A. Queimadas no Brasil. **Climanálise Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, CPTEC/INPE, v. 21, n. 01, p. 1, 2006.
- SISMANOGLU, R.A., SETZER, A., JUSTINO, F., LIMA, W.F.A. Avaliação inicial do desempenho do risco de fogo gerado no CPTEC. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2002.
- SUD, Y.C., FENNESSY, M.J. A study of the influence of surface albedo on July circulation in semi-arid regions using the GLAS GCM. **Journal of Climatology**, v. 2, pp.105-125, 1982.
- SUD, Y.C., FENNESSY, M.J. Influence of evaporation in semi-arid regions on the july circulation: a numerical study. **Journal of Climatology**, v. 4, pp.383-398, 1984.
- VERA, C., SILVESTRI, G., LIEBMANN, B., GONZALEZ, P. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n 13, 2006. doi:10.1029/2006GL025759.
- WHITMORE, T.C. An introduction to tropical rain forests. **Oxford University Press**. Oxford, 1990.
- WILKS, D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction. San Diego, California, **Academic Press**, p. 467, 1995.
- WINKLER, J.A., POTTER, B., WILHELM, D., SHADBOLT, R., BIAN, X., PIROMSOPA, K. A climatology of the Haines Index for North America derived from NCEP/NCAR reanalysis fields. Sixth Fire and Forest Meteorology Symposium, **American Meteorological Society**, 2005.
- XUE, Y., SHUKLA, J. The influence of land surface properties on sahel climate. Part I: Desertification. **Journal of Climate**, v. 6, pp. 2232-2245, 1993.
- XUE, Y., SHUKLA, J. The influence of land surface properties on sahel climate. Part II: Aforestation. **Journal of Climate**, v. 9, pp. 3260-3275, 1996.
- YAMASOE, M., VON RANDOW, C., MANZI, A., SCHAFFER, J., ECK, T., HOLBEN, B. Effect of smoke on the transmissivity of photosynthetically active radiation inside the canopy. **Atmospheric Chemistry Physics Discuss**, 5550-5934, 2005.