

RAQUEL COUTO EVANGELISTA

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DE  
EUCALIPTO EM DUAS REGIÕES DO BRASIL**

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

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2006**

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

T

E92i  
2006

Evangelista, Raquel Couto, 1980-  
Impacto das mudanças climáticas na produtividade de  
eucalipto em duas regiões do Brasil / Raquel Couto  
Evangelista. – Viçosa : UFV, 2006.  
xii, 48f. : il. ; 29cm.

Viçosa.

Orientador: Aristides Ribeiro.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de

Referências bibliográficas: f. 47-48.

1. Mudanças climáticas. 2. Climatologia. 3. Eucalipto -  
Crescimento - Modelos matemáticos. I. Universidade  
Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 551.6

RAQUEL COUTO EVANGELISTA

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DE  
EUCALIPTO EM DUAS REGIÕES DO BRASIL**

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: 11 de agosto de 2006.

---

Prof. Julio César Lima Neves  
(Co-Orientador)

---

Prof. José Antônio Marengo Orsini  
(Co-Orientador)

---

Prof. Luiz Cláudio Costa

---

Fernando Palha Leite

---

Prof. Aristides Ribeiro  
(Orientador)

*Aos meus amados pais, PEDRO e SÔNIA, que por meio  
de carinho e perseverança me mostraram o  
caminho da vida. Meu muito obrigado.*

**DEDICO.**

*Ao meu esposo Murilo por todo amor. Aos meus  
sobrinhos Victoria, Pedro Lucas e Dante, pela  
inocência e doçura.*

**OFEREÇO.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me guiado até aqui, por ter me sustentado e me dado força para superar as dificuldades e vencer os obstáculos da vida, por ter se manifestado de formas variadas, me dando a paz que excede todo entendimento.

Aos meus pais que me ensinaram os maiores valores da vida e sempre me apoiaram.

Ao meu amado esposo, que nos momentos difíceis sempre esteve ao meu lado, e mesmo a distância mostrou-me todo seu amor, carinho e cumplicidade.

A minha querida sogra Diva e meu querido sogro José Baesso.

Aos meus amados irmãos e cunhados Luciana, Gustavo, Márcia, Luciano, Mau e Tati.

Ao professor e orientador, Aristides Ribeiro, pela dedicação, pela paciência, pela amizade e, principalmente, pela confiança em mim depositada, sempre me incentivando e contribuindo com suas valiosas sugestões durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos conselheiros, professores Júlio e Marengo, pelas idéias e sugestões.

Aos demais professores do curso pelos ensinamentos passados e ao Mariano pela colaboração.

A Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola pelo apoio durante a realização do curso.

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

A Primeira Igreja Batista de Viçosa, por todo apoio e carinho.

As minhas queridas amigas Cris, Ana, Karla, Eli, Paula, Veri, Shirlene, Jaque e Rê.

Aos amigos e colegas da Meteorologia e Engenharia Agrícola Alexandre, Danilo, José de Paulo, Ranieri, Rosa, Welliam, Wesley, Jonathas, Evaldo, Ronaldo, Sady, José Luiz, Chris e Kelly.

A todos que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a realização e concretização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

RAQUEL COUTO EVANGELISTA, filha de Pedro Evangelista Filho e Sônia Elisabete Couto Evangelista, natural de Vitória, Espírito Santo, nasceu no dia 09 de agosto de 1980.

Em abril de 1999, iniciou o curso de graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa, o qual concluiu em julho de 2004.

Em agosto de 2004, iniciou o curso de mestrado em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, MG, submetendo-se à defesa de tese em agosto de 2006.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>viii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1. As Mudanças Climáticas.....	4
2.1.1. Cenários de Mudanças Climáticas.....	6
2.2. O Modelo 3-PG.....	8
2.2.1. Estrutura do Modelo 3-PG.....	9
2.2.2. Dados de entrada .....	14
2.2.3. Saídas do 3-PG .....	14
2.2.4. Produção de biomassa .....	14
2.2.5. Alocação de biomassa .....	14
2.2.6. Mortalidade de tronco.....	15
2.2.7. Balanço de água no solo .....	15
2.2.8. Características do povoamento.....	15
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>16</b>
3.1. Dados Climáticos.....	20
3.1.1. Downscaling do Modelo Climático CCSR/NIES.....	20
3.1.2. Dados Climáticos Observados.....	21
3.1.3. Tratamento dos Dados Climáticos.....	21
3.2. Análise de Sensibilidade.....	22
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>23</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>45</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>47</b>

## LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	Estrutura conceitual do SRES cenários A1, A2, B1 e B2, adaptado do IPCC (2005).	7
Figura 2	Descrição dos cinco submodelos do 3-PG.	13
Figura 3	Área de estudo compreendendo o norte do Estado do Espírito Santo e sul do Estado da Bahia.	16
Figura 4	Área de estudo compreendendo a região Centro-Leste de Minas Gerais.	16
Figura 5	Comportamento sazonal da temperatura máxima (tmx, °C), temperatura mínima (tmn, °C), precipitação (prec, mm) e radiação (rad, MJm <sup>-2</sup> por dia) no período de 1961-1990 dos dados do CRU, CCSR/NIES e INMET em São Mateus – ES e Caravelas – BA, (a) tmx em São Mateus, (b) tmx em Caravelas, (c) tmn em São Mateus, (d) tmn em Caravelas, (e) prec em São Mateus, (f) prec em Caravelas, (g) rad em São Mateus e (h) rad em Caravelas.	25
Figura 6	Comportamento sazonal dos dados do CRU, CCSR/NIES e INMET no período de 1961-1990 na localidade de Governador Valadares, (a) temperatura máxima (°C), (b) temperatura mínima (°C), (c) precipitação (mm) e (d) radiação (MJ m <sup>-2</sup> por dia).	26
Figura 7	Anomalias na Região I, cenário A2, (a) temperatura máxima (°C) 2011-2040, (b) temperatura máxima (°C) 2041-2070, (c) temperatura máxima (°C) 2071-2100, (d) temperatura mínima (°C) 2011-2040, (e) temperatura mínima (°C) 2041-2070, (f) temperatura mínima (°C) 2071-2100, (g) precipitação (mm/mês) 2011-2040, (h) precipitação (mm/mês) 2041-2070 e (i) precipitação (mm/mês) 2071-2100.	28
Figura 8	Anomalias na Região I, cenário B2, (a) temperatura máxima (°C) 2011-2040, (b) temperatura máxima (°C) 2041-2070, (c) temperatura máxima (°C) 2071-2100, (d) temperatura mínima (°C) 2011-2040, (e) temperatura mínima (°C) 2041-2070, (f) temperatura mínima (°C) 2071-2100 (g) precipitação (mm por mês) 2011-2040, (h) precipitação (mm por mês) 2041-2070 e (i) precipitação (mm por mês) 2071-2100.	29
Figura 9	Anomalias na Região II, cenário A2, (a) temperatura máxima (°C) 2011-2040, (b) temperatura máxima (°C) 2041-2070, (c) temperatura máxima (°C) 2071-2100, (d) temperatura mínima (°C) 2011-2040, (e) temperatura mínima (°C) 2041-2070, (f) temperatura mínima (°C) 2071-2100 (g) precipitação (mm por mês) 2011-2040, (h) precipitação (mm por mês) 2041-2070 e (i) precipitação (mm por mês) 2071-2100.	31

Figura 10	Anomalias na Região II, cenário B2, (a) temperatura máxima (°C) 2011-2040, (b) temperatura máxima (°C) 2041-2070, (c) temperatura máxima (°C) 2071-2100, (d) temperatura mínima (°C) 2011-2040, (e) temperatura mínima (°C) 2041-2070, (f) temperatura mínima (°C) 2071-2100 (g) precipitação (mm por mês) 2011-2040, (h) precipitação (mm por mês) 2041-2070 e (i) precipitação (mm por mês) 2071-2100.	32
Figura 11	Incremento médio anual (IMA, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> por ano) no “clima atual” (CRU 1961-1990) simulado para Região I.	33
Figura 12	Incremento médio anual (IMA, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> por ano) da Região I no cenário A2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.	34
Figura 13	Incremento médio anual (IMA, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> por ano) da Região I no cenário B2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.	35
Figura 14	Porcentagem de variação do IMA futuro em relação ao IMA atual para Região I no cenário A2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.	36
Figura 15	Porcentagem de variação do IMA futuro em relação ao IMA atual para Região I no cenário B2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.	37
Figura 16	Incremento médio anual (IMA, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> por ano) no “clima atual” (CRU 1961-1990) simulado para Região II.	38
Figura 17	Incremento médio anual (IMA, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> por ano) da Região II no cenário A2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.	39
Figura 18	Incremento médio anual (IMA, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> por ano) da Região II no cenário B2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.	40
Figura 19	Porcentagem de variação do IMA futuro em relação ao IMA atual para Região II no cenário A2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.	41
Figura 20	Porcentagem de variação do IMA futuro em relação ao IMA atual para Região II no cenário B2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.	42
Figura 21	IMA simulado em função da variação dos dados climáticos do CRU (a) temperatura e (b) precipitação.	43

## LISTA DE QUADROS

	Pág.
Quadro 1 Principais parâmetros do modelo 3-PG depois do processo de calibração realizado por Almeida <i>et al.</i> (2004b) na região norte do Espírito.	18
Quadro 2 Principais parâmetros do modelo 3-PG depois do processo de calibração realizado por Silva (2006) na região Centro-Leste de Minas Gerais.	19

## RESUMO

EVANGELISTA, Raquel Couto, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2006. **Impacto das mudanças climáticas na produtividade de eucalipto em duas regiões do Brasil.** Orientador: Aristides Ribeiro. Co-Orientadores: José Antônio Marengo Orsini e Julio César Lima Neves.

As florestas plantadas de eucalipto são as maiores e mais produtivas do Brasil, a alta taxa de crescimento e o ciclo curto são típicos destes sistemas de produção de madeira, portanto torna-se essencial que práticas operacionais e de manejo sejam desenvolvidas para garantir retorno econômico e assegurar a longo-prazo a sustentabilidade destas plantações. A tentativa de estimar o potencial produtivo de uma região, por meio de modelos de crescimento baseados em processos fisiológicos, permite a avaliação dos riscos da variação climática e a identificação de novas áreas aptas ao plantio florestal. Cenários de mudanças climáticas associados a modelos de crescimento baseados em processos, podem ser úteis para identificar os riscos de conseqüências negativas na produtividade futura de florestas plantadas, podendo assim, mitigar os impactos das mudanças climáticas e avaliar meios de adaptação. Desta forma, este trabalho teve como objetivo avaliar os impactos das mudanças climáticas na produção florestal de eucalipto, por meio do modelo de crescimento 3-PG, em duas regiões produtoras: Região I - norte do Espírito Santo e sul da Bahia; e Região II - centro-leste de Minas Gerais. Foram utilizados como dados de entrada de clima no modelo 3-PG, dois cenários de mudanças climáticas (A2 e B2) do modelo climático global CCSR/NIES, para três períodos futuros: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100. Para avaliar os resultados simulados da produtividade futura, utilizou-se como período base a climatologia do banco de dados do CRU, obtendo assim, a produtividade “atual”. Conforme as anomalias geradas, pela diferença entre os valores dos cenários futuros e da climatologia, observou-se aumento nos valores de temperatura máxima e mínima nas duas regiões estudadas e decréscimo nos valores de precipitação em ambas as regiões.

Comprovou-se neste estudo, que as variações futuras na temperatura e precipitação provocaram redução na produtividade de eucalipto nas duas regiões analisadas, sendo que na região do norte do Espírito Santo e sul da Bahia essa redução chegou a 39,7% em 2071-2100 no cenário A2, e no centro-leste de Minas Gerais a redução chegou a 41,7% em 2071-2100 também no cenário A2. Diante dos resultados, concluiu-se que as plantações de eucalipto podem sofrer impactos em sua produtividade, devido às mudanças climáticas, principalmente no que diz respeito às variações na temperatura e na precipitação.

## ABSTRACT

EVANGELISTA, Raquel Couto, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August of 2006. **Climate change impacts on the eucalyptus yield in two areas in Brazil.** Adviser: Aristides Ribeiro. Co-Advisers: José Antônio Marengo Orsini and Julio César Lima Neves.

The planted eucalyptus forests are the bigger and the most productive in Brazil. The high growth rate and the short cycle are intrinsic to this wood production system, making essential the development of management and operational practices that guarantee the economic feed-back and the sustainability of these crops. Attempt to estimate the productive potential of an area, by using growth models based on physiologic methods, permits the risk evaluation of climate changes and identification of new areas capable to grow forests. Climate changes scenarios associated to growth models based on processes can be useful to identify the risks of negative consequences on the future yield of planted forests, and consequently, reduce the impacts of climate changes and evaluate adaptation ways. Thereby, this study had the goal to evaluate climate changes on the forest production of eucalyptus through the growth model 3-PG in two productive areas: Area I - north Espírito Santo and south Bahia; and Area II – mid-east Minas Gerais. Two climate change scenarios (A2 and B2) from the global climatic model CCSR/NIES, for three future periods (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100) were used to feed the model 3-PG with climate data. To evaluate the simulated results of the future yield, was used as a base period the data bank climatology of the CRU, obtaining by that, the current yield. According to the anomalies generated, by the difference between the future scenarios values and the climatology, was observed the rising on the maximum and minimum temperature values on the two studied areas and the decrease of rainfall values in both areas. Has been proved in this study also that, the future variations on temperature and rainfall have caused a reduction on the eucalyptus yield in both analyzed areas, being the reduction on north Espírito Santo and south

Bahia of 39,1% in 2071 – 2100 on A2 scenario, and on mid-east Minas Gerais 36,9% in 2071-2100 also on A2 scenario. Through the results was concluded that the eucalyptus crops can suffer impacts on their yields due to climate changes, mainly referring to temperature and rainfall variations.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo a Sociedade Brasileira de Silvicultura – SBS (2001), o setor florestal brasileiro conta com aproximadamente 4,8 milhões de hectares de florestas plantadas com *pinus*, e eucalipto, sendo que 3,0 milhões de hectares são de plantações de eucalipto.

As florestas plantadas de eucalipto estão distribuídas estrategicamente, em sua maioria, nos estados de Minas Gerais, com maior área plantada, São Paulo, Bahia, Espírito Santo e Rio Grande do Sul.

Originário da Austrália e outras ilhas da Oceania, o eucalipto foi introduzido no Brasil em 1904, com o objetivo de suprir as necessidades de lenha, postes e dormentes das estradas de ferro na região Sudeste. Na década de 50 passa a ser produzido, como matéria prima, para o abastecimento das fábricas de papel e celulose. Apresenta-se como uma espécie vegetal de rápido crescimento e adaptada para as situações edafobioclimáticas brasileira. Durante o período dos incentivos fiscais, na década de 60, sua expansão foi ampliada. Esses incentivos perduraram até meados dos anos 80. Esse período foi considerado um marco na silvicultura brasileira, dado os efeitos positivos que gerou no setor.

As florestas plantadas de eucalipto visam à garantia do suprimento de matéria-prima para as indústrias de papel e celulose, siderurgia a carvão vegetal, lenha, serrados, compensados e lâminas e, painéis reconstituídos (aglomerados, chapas de fibras e MDF - *Medium Density Fiberboard*). O Brasil é o maior produtor mundial de celulose de eucalipto (fibra curta) com cerca de 6,3 milhões de toneladas por ano e com maior índice médio de produtividade florestal (40 m<sup>3</sup> por hectare ao ano) (EMBRAPA, 2005).

O eucalipto oferece diversas vantagens em comparação a outras espécies florestais, inclusive as nativas. Graças ao clima favorável do Brasil e ao avanço alcançado pelas pesquisas e tecnologia florestal, o eucalipto pode ser colhido num prazo de 5 a 7 anos para a produção de celulose, quando atinge até 35 metros de altura. Para a

extração de madeira nobre para a produção de móveis e decoração, o eucalipto é colhido entre os 14 e 16 anos. O eucalipto tem o dobro da produtividade de espécies coníferas plantadas no Brasil e da maioria das árvores nativas.

Apesar da participação das plantações florestais estarem aumentando em todos os segmentos em relação a das florestas nativas, há um fator amplamente discutido que é o chamado “apagão florestal”, ou seja, a oferta de madeira está sendo menor do que a demanda. O setor acredita que com base nas expectativas de crescimento de demanda, haverá uma necessidade de plantio em torno de 630 mil hectares ao ano, ao invés dos 200 mil hectares atuais, e as previsões de médio-prazo são de crescimento nesse diferencial. Segundo Alves (2005), já existe a necessidade de duplicar a área plantada no Estado de Minas Gerais. A preocupação em garantir fornecimento de madeira tem levado indústrias siderúrgicas e de celulose a investirem em mais áreas plantadas, já que a baixa oferta tem elevado o preço do produto em até 75%.

As mudanças de clima que o planeta vem sofrendo representam uma grave ameaça para o setor florestal, as teorias que apontam as atividades humanas, em especial as emissões dos chamados gases de efeito estufa (GEE) em quantidades maiores do que a natureza pode assimilar, como a principal causa das mudanças no clima. Estudos têm demonstrado que mudanças na concentração de dióxido de carbono atmosférico e no clima influenciarão a produção, consumo e comércio internacional de produtos de madeira por meio de efeitos no crescimento das árvores (PEREZ-GARCIA *et al.*, 2002).

Sem as condições favoráveis, os plantios de eucalipto não conseguiriam se desenvolver e atingir a produtividade necessária para alimentar as unidades fabris. Partindo do princípio de que o aquecimento é inevitável faz-se necessário conhecer os fatos, monitorar localmente as mudanças e traçar estratégias que garantam a sustentabilidade do negócio florestal.

Modelos baseados em processos descrevem a produtividade florestal baseada em processos fisiológicos que controlam o crescimento (fotossíntese, alocação de biomassa, respiração, transpiração, nutrição e queda de folhas e galhos). Landsberg e Waring (1997) desenvolveram um modelo de crescimento florestal baseado em processos fisiológicos, intitulado *Physiological Principles for Predicting Growth* (3-PG), considerando as relações fisiológicas variáveis e constantes. O uso de modelos de crescimento como o 3-PG permite a avaliação dos riscos da variação climática e a identificação de novas áreas aptas ao plantio florestal.

A importância econômica do eucalipto é muito grande, pois, seu plantio e beneficiamento geram empregos e divisas comerciais, tendo participação importante no desenvolvimento de grande parte dos setores da economia nas regiões onde é plantado. Todos os números citados anteriormente demonstram a importância do eucalipto para a economia do país e a necessidade de buscarmos sempre a máxima competitividade num mercado altamente disputado.

Este trabalho teve como objetivo analisar os impactos das mudanças climáticas na produtividade futura de eucalipto em duas importantes regiões produtoras do Brasil: região Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia e região Centro-Leste de Minas Gerais.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. As Mudanças Climáticas

O desenvolvimento econômico resultante principalmente do processo industrial ocorrido nos últimos cem anos, e o aumento na utilização de combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão mineral, somados às emissões provenientes de queimadas e da destruição da cobertura vegetal, são as principais fontes de emissão dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera.

Segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT (2006), embora existam ainda muitas dúvidas sobre as conseqüências do processo de acumulação dos GEE na atmosfera, a comunidade científica internacional considera inegável que a evolução desses fenômenos trará profundos impactos ambientais, sociais e econômicos. Entre os mais prováveis, destacam-se:

- Os regimes regionais de chuva podem mudar: Em nível mundial, espera-se que o ciclo hidrológico acelere. Isso significa que choveria mais, mas a chuva evaporaria mais rápido, deixando os solos mais secos em períodos críticos da época de cultivo. Novos ou mais intensos períodos de seca, principalmente nos países mais pobres, poderiam diminuir o fornecimento de água potável até o ponto de ficar ameaçada a saúde pública. Por não terem plena segurança a respeito de contextos regionais, os cientistas não sabem ao certo quais regiões do mundo correm o risco de ficarem mais chuvosas e quais, mais secas. Mas com os recursos hídricos globais já sob grande pressão devido ao rápido crescimento demográfico e a expansão das atividades econômicas, o perigo é evidente.
- As zonas climáticas e agrícolas podem deslocar-se em direção aos pólos: Prevê-se que nas regiões de latitude média, o deslocamento será de 150 a 550 km para um aquecimento de 1-3,5°C. Verões mais secos podem reduzir o rendimento das safras nas regiões de latitude média e é possível que as principais áreas produtoras de grãos de hoje (como as Grandes Planícies dos Estados

Unidos) sofram secas e ondas de calor mais frequentes. As regiões próximas aos pólos das zonas agrícolas de latitude média — o norte do Canadá, a Escandinávia, a Rússia e o Japão, no hemisfério norte, e o sul do Chile e a Argentina, no hemisfério sul — poderiam se beneficiar de temperaturas mais elevadas. Contudo, em algumas regiões, terrenos acidentados e solos pobres impediriam esses países de compensar o rendimento reduzido das áreas mais produtivas atualmente.

- O derretimento de geleiras e a expansão térmica dos oceanos podem elevar os níveis do mar, ameaçando zonas costeiras e pequenas ilhas de baixa altitude: O nível médio global do mar já subiu cerca de 10 a 15 cm no século passado e espera-se que o aquecimento global ocasione um aumento adicional de 15 a 95 cm até o ano 2100 (com uma "melhor estimativa" de 50 cm). As áreas mais vulneráveis seriam as regiões costeiras desprotegidas e densamente povoadas de alguns dos países mais pobres do mundo. Bangladesh, cujo litoral já é propenso a enchentes devastadoras, seria uma possível vítima, da mesma forma que muitos pequenos países insulares, como as Ilhas Maldivas.

Na década de 90, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC avaliou com bases científicas, variações climáticas em relação a possíveis cenários de clima futuro. Essas avaliações vêm sinalizando que as emissões excessivas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) podem provocar mudanças permanentes e irreversíveis no clima do planeta. Estes cenários de emissões e concentrações são usados como forçantes de modelos climáticos globais, com a finalidade de se obter projeções futuras do clima global. Um modelo climático global é uma representação matemática do sistema climático baseado nas propriedades físicas dos seus componentes, suas interações e processos de retroalimentação (*feedback*) (HOUGHTON *et al.*, 1990).

O papel do clima na determinação da distribuição geográfica das espécies no globo tem sido reconhecido desde pelo menos o início do século XVII. Estudos recentes indicam que as mudanças no clima global poderão resultar em mudanças significativas na distribuição dos ecossistemas. As diferenças nesta distribuição resultam, primariamente, das diferenças na temperatura e precipitação médias, causadas pela circulação global da atmosfera. Portanto, uma ameaça séria à integridade dos ecossistemas é o aquecimento global que levará a profundas alterações na atual

composição da biodiversidade, com efeito sobre os produtos e serviços que a natureza oferece gratuitamente à humanidade.

Os impactos adversos projetados pelo IPCC apontam várias conseqüências sobre os ecossistemas naturais, dando uma idéia da vulnerabilidade dos ecossistemas brasileiros. Entre os efeitos podem estar: a redução geral no potencial de produção agrícola na maior parte das regiões tropicais e subtropicais; a disponibilidade reduzida de água em regiões onde já era escassa; o risco maior de enchentes; e maior demanda por refrigeração devido a maiores temperaturas no verão, dentre outros efeitos. Os cenários de mudanças climáticas global podem ser úteis para dar uma visão do futuro, podem ser usados para reduzir o risco de conseqüências negativas no futuro ajudando a identificar importantes impactos por eles projetados.

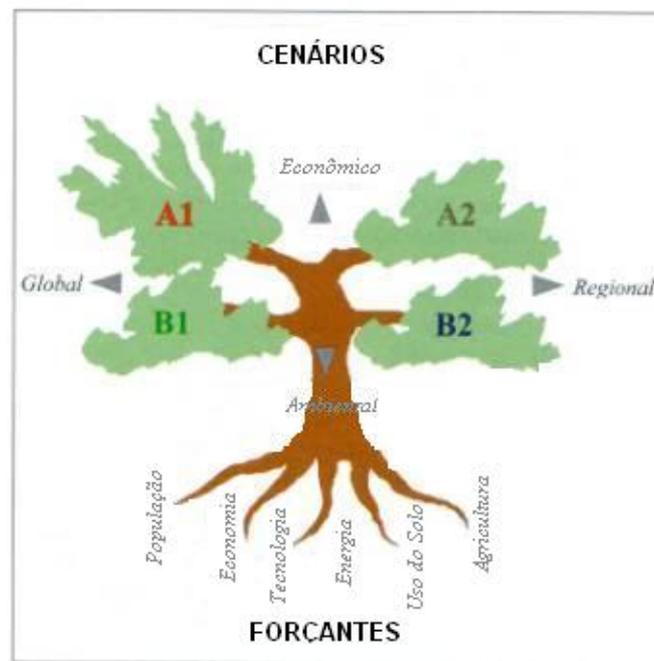
#### 2.1.1. Cenários de Mudanças Climáticas

O IPCC publicou o conjunto de cenários *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) em 2000, para explorar o desenvolvimento futuro no ambiente global, especialmente no que diz respeito à produção de gases de efeito estufa e aerossóis. Os cenários SRES mostram diferentes cenários futuros de mudanças climáticas, denominados de *A1*, *A2*, *B1* e *B2* os quais estão disponibilizados no IPCC. Estes cenários apresentam as seguintes características:

- SRES A1: é o cenário que descreve um mundo futuro onde a globalização é dominante. Neste cenário o crescimento econômico é rápido e o crescimento populacional é pequeno com um desenvolvimento rápido de tecnologias mais eficientes. Os temas subjacentes principais são a convergência econômica e cultural, com uma redução significativa em diferenças regionais e renda per capita. Neste mundo, os indivíduos procuram riqueza pessoal em lugar de qualidade ambiental;
- SRES A2: é o cenário que descreve um mundo futuro muito heterogêneo onde a regionalização é dominante. Existiria um fortalecimento de identidades culturais regionais, com uma ênfase em valores da família e tradições locais. Outras características são um crescimento populacional alto, e menos preocupação em relação ao desenvolvimento econômico rápido;

- SRES B1: é o cenário que descreve uma rápida mudança na estrutura econômica mundial, onde ocorre uma introdução de tecnologias limpas. A ênfase está em soluções globais a sustentabilidade ambiental e social e inclui esforços combinados para o desenvolvimento de tecnologia rápida;
- SRES B2: é o cenário que descreve um mundo no qual a ênfase está em soluções locais à sustentabilidade econômica, social e ambiental. A mudança tecnológica é mais diversa com forte ênfase nas iniciativas comunitárias e inovação social, em lugar de soluções globais.

Na Figura 1 está representado um esquema com as quatro “famílias de cenários”, descrevendo uma possibilidade demográfica, político-econômica, social e tecnológica no futuro.



**Figura 1** - Estrutura conceitual do SRES cenários A1, A2, B1 e B2, adaptado do IPCC (2005).

## 2.2. O Modelo 3-PG

As florestas são sistemas biológicos que estão sempre em mudança, portanto, necessita-se da projeção destas mudanças, para que possa tomar as decisões necessárias, a fim de ser executado um manejo adequado neste ecossistema. As decisões de manejo são baseadas em informações sobre as situações atual e futura dos povoamentos.

A modelagem florestal está intimamente ligada ao manejo das florestas, pois com a condição de se predizer o futuro de um povoamento, é mais fácil manejá-lo e explorá-lo racionalmente, sem que haja agressões ao meio ambiente.

Todo modelo de ecossistema é uma simplificação da realidade, porém a previsão de crescimento de árvores em um povoamento florestal vem sendo tema de grande interesse de profissionais que atuam na pesquisa e na gestão dos recursos florestais. Assim a modelagem é uma ferramenta que ajuda a identificar e sintetizar conhecimentos, identificar gargalos e fronteiras a serem rompidas, projetar e predizer o comportamento diante de diversas condições.

A tentativa de estimar o potencial produtivo florestal, considerando a influência dos fatores determinantes da produtividade, vem sendo perseguida há vários anos. Modelos baseados em processos (MBP) simulam a tendência de crescimento de árvores em termos de mecanismos biofísicos que definem seu crescimento em resposta as condições ambientais e práticas de manejo (LANDSBERG e GOWER, 1997).

Modelos baseados em processos são vistos como ferramenta de manejo na expansão do setor florestal brasileiro podendo: (i) avaliar os riscos da variação e mudanças climáticas na produção e rentabilidade florestal, (ii) estimar a produtividade potencial, (iii) identificar fatores ambientais limitantes no crescimento, (iv) criar programas de manejo (STAPE, 2002).

Dentre os diversos modelos de crescimento florestal existentes, o 3-PG desenvolvido por Landsberg e Waring (1997), é um MBP que utiliza princípios fisiológicos para estimar a produtividade de povoamentos florestais. O 3-PG tem aplicação relativamente simples, necessitando de parâmetros que podem ser obtidos em medidas de campo ou na literatura. O 3-PG foi originalmente proposto com intuito de preencher uma lacuna entre os modelos empíricos, baseados em dados de inventários florestais, e os de balanço de carbono baseados em processos, caracterizando-o como um modelo híbrido que pode ser utilizado de forma mais prática para estimativa da produtividade florestal.

### 2.2.1. Estrutura do Modelo 3-PG

O 3-PG consiste basicamente de cinco submodelos: produção de biomassa; balanço de água no solo; alocação de biomassa entre folhas, raízes e lenho (incluindo galhos e cascas); mortalidade de árvores, e módulo para converter biomassa de tronco em variáveis de interesse para manejo florestal. As variáveis de estado são as folhas, biomassa de tronco e raízes, número de troncos e água disponível no solo. A Figura 2 ilustra a estrutura do 3-PG.

Essencialmente, o 3-PG estima a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (RFFAA) por meio da lei de Beer, considerando que a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) é 50% da radiação solar (RS). A lei de Beer descreve o decréscimo exponencial da luz, ao penetrar verticalmente toda extensão da cobertura vegetal, por meio da seguinte equação:

$$I_Z = I_0 \cdot e^{-k \cdot IAF} \text{ em que,}$$

$I_Z$  = intensidade da radiação a uma determinada altura dentro da cobertura vegetal;

$I_0$  = intensidade de radiação no topo da cobertura vegetal, representa a RFA;

$k$  = coeficiente de extinção ou atenuação, representa o grau de diminuição da radiação no interior da cobertura vegetal, seja por absorção ou espalhamento;

$IAF$  = soma total da superfície foliar, de cima para baixo, até a altura  $Z$ , por unidade de área de solo ( $IAF$  acumulado) (LARCHER, 2000).

Quantificada a RFAA pelo dossel, o 3-PG estima a quantidade de  $CO_2$  fixado por unidade de energia radiante absorvida (fótons), que representa a eficiência quântica do dossel ( $\alpha_C$ ). O valor dessa eficiência de conversão é calculado a partir de um valor de eficiência quântica máxima do dossel ( $\alpha_{CX}$ ) que considera as limitações ambientais impostas pelo déficit de pressão de vapor ( $f_{VPD}$ ), pela temperatura ( $f_T$ ), pelas geadas ( $f_F$ ) e pela disponibilidade hídrica ( $f_A$ ) e nutricional ( $f_N$ ) e pela idade da população ( $f_I$ ).

Essas limitações ambientais são incorporadas ao 3-PG pela multiplicação de moduladores adimensionais, apropriadamente calculados, cujos valores variam de 0 (condições de alta limitação) a 1 (condições sem limitação). Os moduladores que tratam sobre balanço de água no solo ( $f_A$ ), déficit de pressão de vapor ( $f_{DPV}$ ) e idade da população ( $f_I$ ) compõem o chamado modulador fisiológico ( $\phi$ ), definido como:

$$\phi = f_I \min\{f_{DPV}, f_A\}$$

O modulador  $\phi$  atua diretamente no processo fotossintético. Os moduladores  $f_{DPV}$  e  $f_A$  não atuam de forma aditiva ou multiplicativa, e sim, considerando a limitação mais restritiva (modulador de menor valor), ou seja, se a água no solo é mais limitante ao crescimento do que o DPV, então o modulador  $f_A$  atuará limitando o crescimento no período de estimativa considerado (LANDSBERG *et al.*, 2001).

Os outros moduladores  $f_T$ ,  $f_F$  e  $f_N$ , que atuam de forma independente do processo fotossintético, são aplicados multiplicativamente (SANDS & LANDSBERG, 2002). Portanto, a eficiência quântica do dossel é calculada da seguinte forma:

$$\alpha_C = \alpha_{CX} f_T f_F f_N \phi$$

O efeito da fertilidade do solo influencia, indiretamente, a eficiência quântica do dossel, por meio do  $f_N$ , o qual é dependente do nível de fertilidade do solo (FR), que pode variar de 0 (baixa fertilidade) – 1 (sem limitação nutricional). O relacionamento entre o valor de FR e o modulador de fertilidade ( $f_N$ ) é dado por:

$$f_N(FR) = 1 - (1 - f_{N0})(1 - FR)^{n_N}$$

em que,  $f_{N0}$  é o valor de  $f_N$  quando  $FR = 0$  e  $n_N$  é a potência da equação. O valor de FR é obtido empiricamente, baseando-se em características físicas e químicas do solo, e dados sobre crescimento florestal, além da própria experiência do manejador florestal.

Para contornar a dificuldade na determinação de FR, que é utilizado como variável de entrada no modelo 3-PG, vários trabalhos consideram a mesma como variável ajustável (LANDSBERG *et al.*, 2001; LANDSBERG *et al.*, 2003), ou seja, dependendo das condições locais, a mesma pode ser ajustada para possibilitar melhor relacionamento entre os valores observados e aqueles estimados pelo modelo, mantendo-se as outras variáveis de entrada constantes. Landsberg *et al.* (2003) propõem os valores de 0,6 e 1 para  $f_{N0}$  e  $n_N$ , respectivamente.

Após a consideração de todas essas limitações impostas pelo ambiente, por meio dos moduladores, o 3-PG estima o relacionamento entre a produção primária bruta (PPB) e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (RFAA):

$$PPB = \alpha_C RFAA \quad \therefore \quad \alpha_{CX} f_T f_F f_N \phi RFAA$$

A relação entre produção primária líquida (PPL) e PPB equivale a um coeficiente de uso do carbono. Avaliando os fluxos de carbono em 12 localidades com grande variabilidade climática (altitude, precipitação, temperatura), radiação fotossinteticamente ativa (PAR) (1934 – 3030  $\text{mJ/m}^2\text{.ano}$ ) e diferentes espécies dominantes (*Pinus radiata*, *Quercus garryana*, *Alnus rubra*, *Juniperus occidentalis*,

etc), Waring *et al.* (1998) constataram que a relação PPL/PPB foi pouco variável ( $0,47 \pm 0,04$ ). O 3-PG considera um valor fixo em torno de 0,47 para a referida relação, o que elimina a necessidade de cálculos referentes às perdas de carbono por meio da respiração.

A alocação da PPL é realizada primeiramente para as raízes, considerando os moduladores fisiológico ( $\varphi$ ) e nutricional ( $f_N$ ). Além do efeito sobre a  $\alpha_C$ , a fertilidade do solo influencia a alocação de carboidratos para o sistema radicular, por meio da variável “m”, que depende linearmente do valor de FR:

$$m = m_0 + (1 - m_0)FR$$

em que, “ $m_0$ ” será igual a “m” em solos de baixa fertilidade ( $FR = 0$ ). O valor de “m” é incluído em equação empírica que calcula a alocação de carboidratos para as raízes:

$$\eta_R = \frac{\eta_{Rx} \eta_{Rn}}{\eta_{Rn} + (\eta_{Rx} - \eta_{Rn})m\varphi} \quad \text{em que,}$$

$\eta_R$  = coeficiente de alocação para raízes;

$\eta_{Rx}$  = valor máximo do coeficiente de alocação para raízes;

$\eta_{Rn}$  = valor mínimo do coeficiente de alocação para raízes;

$\varphi$  = modulador fisiológico.

Quanto maior a limitação nutricional e ou hídrica ( $\varphi = f_{\min} \{ f_{DPV}, f_A \}$ ), representada por meio dos respectivos moduladores, maior será o coeficiente de alocação de carbono para as raízes ( $\eta_R$ ).

Após a alocação de carbono para as raízes, o modelo calcula a alocação para as folhas e para o tronco (casca, lenho e galhos), por meio de equações alométricas que descrevem a massa de folhas ( $M_F$ ), incluindo a queda de folhas acumulada, e de tronco ( $M_T$ ) em função do diâmetro à altura do peito (DAP) (LANDSBERG & WARING, 1997; SANDS & LANDSBERG, 2002):

$$M_F = a_F DAP^{n_F}$$

$$M_T = a_T DAP^{n_T}$$

Os coeficientes multiplicativos ( $a_F$  e  $a_T$ ) e potenciais ( $n_F$  e  $n_T$ ) relacionados com a  $M_F$  e a  $M_T$  são utilizados para calcular o decréscimo da relação ( $p_{F,T}$ ) entre os coeficientes de alocação de folhas ( $n_F$ ) e de tronco ( $n_T$ ):

$$p_{F,T} = \frac{n_F}{n_T} \left( \frac{dM_F/dDAP}{dM_T/dDAP} \right) = \frac{a_F n_F DAP_F^{(n-1)}}{a_T n_T DAP_T^{(n-1)}} \equiv a_F DAP^{n_p}$$

em que,  $n_p = \ln(p_{F,T} 20 / p_{F,T} 2) / \ln(10)$  e  $a_p = p_{F,T} 2 / 2^{n_p} = p_{F,T} 20 / 20^{n_p}$ . Os valores de  $p_{F,T} 2$  e  $p_{F,T} 20$ , representam a relação  $p_{F,T}(n_F/n_T)$ , para os DAP do tronco de 2 e de 20 cm, respectivamente (SANDS & LANDSBERG, 2002).

O balanço de água no solo é calculado pela diferença entre precipitação (mais irrigação quando aplicada) e a transpiração, calculada usando a equação de Penman-Monteith com o apropriado valor de condutância estomática do dossel ( $g_c$ ), e interceptação da água pelo dossel. A condutância estomática em nível de folha ( $g_s$ ) é calculada baseando-se num valor de condutância estomática máximo ( $g_{smax}$ ), o qual decresce na dependência das limitações impostas pelo ambiente, por meio do modificador fisiológico ( $\phi$ ). O produto entre a  $g_s$  e o IAF, para valores de IAF até 3, resulta no valor da  $g_c$  (LANDSBERG & WARING, 1997; SANDS & LANDSBERG, 2002).

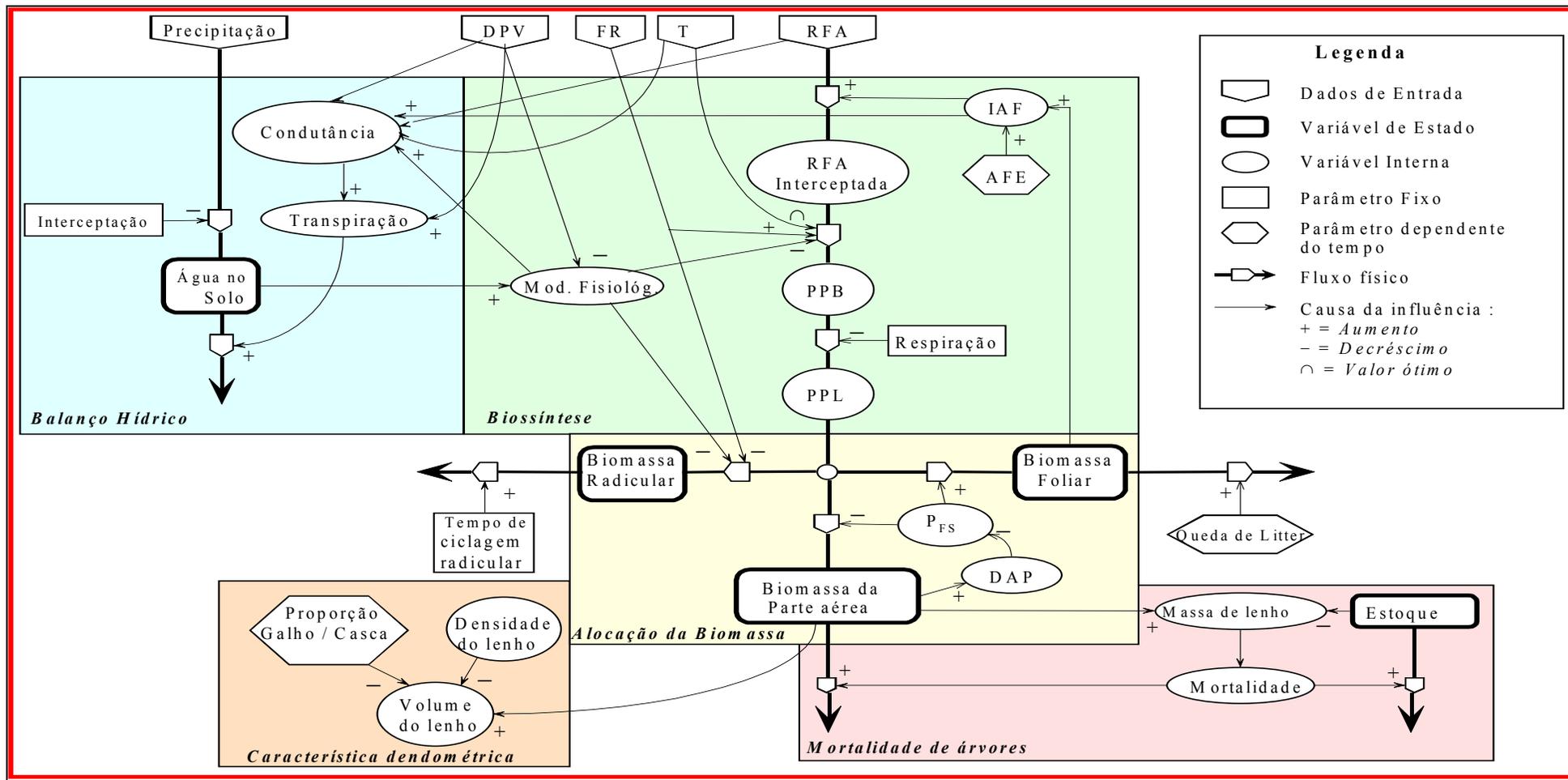


Figura 2 - Descrição dos cinco submodelos do 3-PG.

### 2.2.2. Dados de entrada

As principais variáveis de entrada requeridas pelo modelo 3-PG são:

- Clima: médias mensais da temperatura máxima e mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2}$  por dia), precipitação (mm por mês) e dias de geada por mês.
- Local: latitude, classe de solo, fertilidade e capacidade de retenção de água no solo.
- Planta: população de árvores, biomassa inicial de folha, lenho, raízes e relações alométricas.

### 2.2.3. Saídas do 3-PG

As saídas primárias do 3-PG são as variáveis de estado, e variáveis como evapotranspiração, produção primária bruta (PPB), área foliar específica (AFE), e índice de área foliar do dossel (IAF). O 3-PG também fornece saídas de nível padrão frequentemente usado para o manejo florestal, por exemplo volume de tronco, incremento médio anual (IMA), e diâmetro a altura do peito (DAP). As saídas do 3-PG podem ser valores mensais ou anuais.

### 2.2.4. Produção de biomassa

A radiação interceptada pelo dossel é determinada pelo total de radiação solar que chega no topo do dossel e o índice de área foliar (IAF) por meio da lei de Beer. A produção primária bruta (PPB) é proporcional à radiação fotossinteticamente ativa absorvida. O fator de proporcionalidade, chamado eficiência quântica do dossel, contabiliza os efeitos ambientais por meio da multiplicação de modificadores baseados no déficit de pressão de vapor (DPV), água disponível no solo, temperatura média do ar, dias de geada por mês, nutrição e idade corrente do povoamento. A produção primária líquida (PPL) é uma fração constante da PPB.

### 2.2.5. Alocação de biomassa

A alocação da PPL das raízes é determinada pelas condições de crescimento, que é expressado pela água disponível no solo, DPV e fertilidade do solo. A proporção de PPL alocada as raízes aumenta quando o status nutricional e/ou a água disponível do

solo são baixos. Alocação de biomassa para as folhas, e tronco depende do tamanho médio da árvore (exemplo DAP) de maneira que a alocação para folhas declina e para o tronco aumenta com a idade corrente do povoamento.

#### 2.2.6. Mortalidade de tronco

A probabilidade de morte de árvore dependente da idade é aplicada mensalmente, e é potencialmente modificada pelos fatores de estresse, por exemplo o estresse por água. Mudanças no estoque são também calculados usando a lei *self-thinning* para estimar um limite máximo da média de massa de tronco de uma única árvore para um estoque atual. Se a média de massa de tronco atual é maior que este limite, a população é reduzida para um nível consistente com o limite. Como as árvores suprimidas morrem primeiro é assumido que cada árvore removida tem somente uma fração de biomassa comum das árvores.

#### 2.2.7. Balanço de água no solo

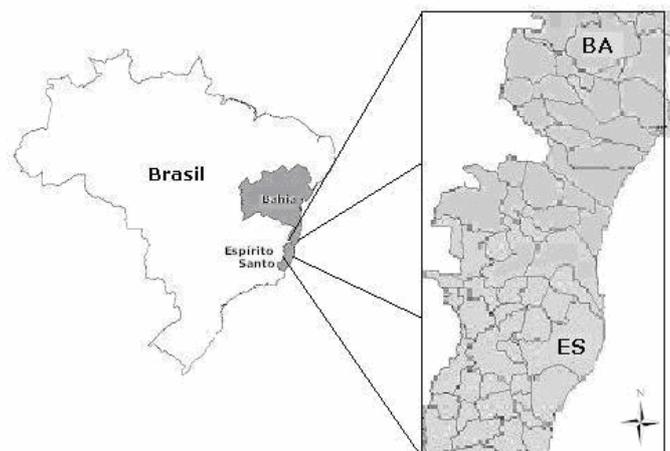
O 3-PG inclui uma única camada no modelo de balanço de água no solo trabalhando num passo de tempo mensal. Precipitação (incluindo irrigação) é balanceada com a evapotranspiração computada usando a equação de Penman-Monteith. A condutância do dossel é determinada por meio do IAF do dossel e da condutância estomática. Ela aumenta com o aumento do IAF até atingir a máxima condutância, e é afetada pelo DPV, água disponível no solo e a idade corrente do povoamento.

#### 2.2.8. Características do povoamento

As características em nível de povoamento como volume de caule, DAP, área basal, e IMA são computadas a partir da biomassa total e do número de troncos. A fração de galhos e cascas e a densidade básica são explicitamente relacionadas com a idade. Relações alométricas em termos de estoque e DAP podem ser usadas para determinar altura do tronco, volume utilizável, etc.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram analisadas duas áreas, a primeira compreende o norte do Espírito Santo e sul da Bahia (Região I), entre as latitudes  $16^{\circ}45'S$  e  $20^{\circ}15'S$  e longitudes  $39^{\circ}15'W$  e  $41^{\circ}15'W$  (Figura 3). A segunda compreende o Centro-Leste de Minas Gerais (Região II), localizada entre as latitudes  $18^{\circ}15'S$  e  $20^{\circ}45'S$  e longitudes  $41^{\circ}45'W$  e  $44^{\circ}15'W$  (Figura 4).



**Figura 3** – Área de estudo compreendendo o norte do Estado do Espírito Santo e sul do Estado da Bahia.



**Figura 4** – Área de estudo compreendendo a região Centro-Leste de Minas Gerais.

A parametrização do 3-PG para condições da Região I, apresentada no Quadro 1, foi realizada por Almeida *et al.* (2004b), em plantações de *Eucaliptus grandis* híbrido no norte do Estado do Espírito Santo, os resultados obtidos na estimativa do incremento médio anual (IMA) pelo 3-PG foram validados e se mostraram satisfatórios.

Para Região II, foi utilizada a parametrização realizada por Silva (2006) de acordo com o Quadro 2, os resultados obtidos foram validados se mostraram satisfatórios. A parametrização foi obtida por meio de um experimento de fertirrigação localizado no município de Belo Oriente, Estado de Minas Gerais, em plantações de *Eucaliptus grandis* e de *E. grandis* x *E. urophylla*.

**Quadro 1** – Principais parâmetros do modelo 3-PG depois do processo de calibração realizado por Almeida *et al.* (2004b) na região norte do Espírito.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Partição folha/lenho para D = 2 cm	pFS2	-	0,7
Partição folha/lenho para D = 20 cm	pFS20	-	0,1
Constante do relacionamento entre massa do stem vs D	stemConst	-	0,045
Potência do relacionamento entre massa so stem vs D	stemPower	-	2,812
Fração máxima da PPL para raízes	pRx	-	0,6
Fração mínima da PPL para raízes	pRn	-	0,1
Taxa de queda de “litter” para t = 0	gammaF0	1/mês	0,0017
Taxa de queda de “litter” para plantios em idade adulta	gammaF1	1/mês	0,13
Idade em que a taxa de queda de “litter” é $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	tgammaF	mês	13
Taxa média de ciclagem radicular	Rttover	1/mês	0,025
Temperatura mínima para o crescimento	Tmin	°C	8
Temperatura ótima para o crescimento	Topt	°C	25
Temperatura máxima para o crescimento	Tmax	°C	36
Valor de $f_N$ quando FR = 0	fN0	-	0,5
Potência de $(1 - FR)$ , na expressão do $f_N$	fNn	-	1
Nível de fertilidade (FR)	FR	-	1
Define a resposta estomática ao déficit de pressão de vapor	CoeffCond	mbar <sup>-1</sup>	0,047
Parâmetro relacionado com a disponibilidade de água no solo	Soil Class	-	cl
Idade máxima do “stand” para computar a idade relativa	MaxAge	Ano	9
Potencia para idade relativa ( $f_{age}$ )	nAge	-	4
Idade relativa igual a 0,5	rAge	-	0,95
Condutância máxima do dossel	MaxCond	m/s	0,021
IAF em que a condutância do dossel é máxima	LAIgcx	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	3
Condutância da camada limite do dossel	BLcond	m/s	0,2
Massa de lenho máxima para cada 1000 árvores/ha	wSx1000	Kg/arv.	180
Área foliar específica para plantios em idade zero	SLA0	m <sup>2</sup> /kg	10,5
Área foliar específica para plantios em idade adulta	SLA1	m <sup>2</sup> /kg	8
Idade na qual a área foliar específica = $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	tSLA	Ano	2,5
Interceptação máxima de água pelo dossel	MaxIntcptn	-	0,15
IAF em que a interceptação de água pelo dossel é máxima	LAImax-Intcptn	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	3
Coefficiente de extinção da RFAA pelo dossel	k	-	0,5
Idade de fechamento do dossel	fullCanAge	Ano	0
Eficiência quântica máxima do dossel	Alpha	-	0,068
Relação PPL/PPB	Y	-	0,47
Fração de galho e casca para plantios em idade inicial (zero)	fracBB0	-	0,3
Fração de galho e casca para plantios em idade adulta	fracBB1	-	0,12
Idade na qual a fração de galhos e casca = $\frac{1}{2}(p_{BB0} + p_{BB1})$	tBB	Ano	5
Densidade básica mínima – plantios em idade inicial (zero)		t/m <sup>3</sup>	0,480
Densidade básica máxima – plantios em idade adulta	rhoMax	t/m <sup>3</sup>	0,520
Idade na qual a densidade básica = $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	tRho	Ano	4

**Quadro 2** – Principais parâmetros do modelo 3-PG depois do processo de calibração realizado por Silva (2006) na região Centro-Leste de Minas Gerais.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Partição folha/lenho para D = 2 cm	pFS2	-	1
Partição folha/lenho para D = 20 cm	pFS20	-	0,09
Constante do relacionamento entre massa do stem vs D	stemConst	-	0,1076
Potência do relacionamento entre massa so stem vs D	stemPower	-	2,51
Fração máxima da PPL para raízes	pRx	-	0,5
Fração mínima da PPL para raízes	pRn	-	0,1
Taxa de queda de “litter” para t = 0	gammaF0	1/mês	0,001
Taxa de queda de “litter” para plantios em idade adulta	gammaF1	1/mês	0,1
Idade em que a taxa de queda de “litter” é $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	tgammaF	mês	12
Taxa média de ciclagem radicular	Rttover	1/mês	0,015
Temperatura mínima para o crescimento	Tmin	°C	8
Temperatura ótima para o crescimento	Topt	°C	25
Temperatura máxima para o crescimento	Tmax	°C	40
Valor de $f_N$ quando FR = 0	fN0	-	0,5
Potência de $(1 - FR)$ , na expressão do $f_N$	fNn	-	1
Nível de fertilidade (FR)	FR	-	1
Define a resposta estomática ao déficit de pressão de vapor	CoeffCond	mbar <sup>-1</sup>	0,04
Parâmetro relacionado com a disponibilidade de água no solo	Soil Class	-	Cl
Idade máxima do “stand” para computar a idade relativa	MaxAge	Ano	9
Potencia para idade relativa ( $f_{age}$ )	nAge	-	4
Idade relativa igual a 0,5	rAge	-	0,95
Condutância máxima do dossel	MaxCond	m/s	0,02
IAF em que a condutância do dossel é máxima	LAIgcx	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	3,33
Condutância da camada limite do dossel	BLcond	m/s	0,2
Massa de lenho máxima para cada 1000 árvores/ha	wSx1000	Kg/arv.	300
Área foliar específica para plantios em idade zero	SLA0	m <sup>2</sup> /kg	17
Área foliar específica para plantios em idade adulta	SLA1	m <sup>2</sup> /kg	8,24
Idade na qual a área foliar específica = $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	tSLA	Ano	0,81
Interceptação máxima de água pelo dossel	MaxIntcptn	-	0,15
IAF em que a interceptação de água pelo dossel é máxima	LAImax-Intcptn	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	3,33
Coefficiente de extinção da RFAA pelo dossel	k	-	0,47
Idade de fechamento do dossel	fullCanAge	Ano	1
Eficiência quântica máxima do dossel	Alpha	-	0,07
Relação PPL/PPB	Y	-	0,47
Fração de galho e casca para plantios em idade inicial (zero)	fracBB0	-	0,79
Fração de galho e casca para plantios em idade adulta	fracBB1	-	0,11
Idade na qual a fração de galhos e casca = $\frac{1}{2}(p_{BB0} + p_{BB1})$	tBB	Ano	1,35
Densidade básica mínima – plantios em idade inicial (zero)		t/m <sup>3</sup>	0,356
Densidade básica máxima – plantios em idade adulta	rhoMax	t/m <sup>3</sup>	0,500
Idade n a qual a densidade básica = $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	tRho	Ano	2,1

O modelo 3-PG foi rodado para cada região de acordo com a respectiva parametrização, em ambas as regiões considerou-se um ciclo de sete anos e plantios com idade inicial de um ano. Também foi considerado que não havia limitação nutricional no solo, ou seja, nível de fertilidade (FR) igual a 1.

### 3.1. Dados Climáticos

As projeções de clima utilizadas neste estudo consistem dos cenários de clima futuro denominado *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) A2 (alta emissão) e B2 (baixa emissão), os quais foram implementados pelo IPCC. Estes cenários de emissões e concentrações de gases de efeito estufa e de aerossóis na atmosfera são usados como forçantes de modelos climáticos globais (GCM) com a finalidade de se obter projeções futuras do clima global (IPCC, 2005). O *Center for Climate System Research/National Institute for Environmental Studie* (CCSR/NIES) é um dos modelos globais que utilizam os cenários de emissões do IPCC para representar o clima futuro. Este é um modelo acoplado oceano-atmosfera, com resolução espectral T21 (aproximadamente 5.6° latitude/longitude), com 20 níveis verticais na parte atmosférica e uma grade horizontal de aproximadamente 2.8° e 17 níveis verticais na parte oceânica (NOZAWA *et al.*, 2001).

#### 3.1.1. Downscaling do Modelo Climático CCSR/NIES

Os modelos de projeção do clima apresentam sérias limitações, uma delas é a capacidade de resolução dos modelos climáticos globais, que são ferramentas de modelagem tradicionalmente utilizadas para a produção de cenários e projeções de mudanças climáticas. Os modelos globais têm uma capacidade de resolução bastante limitada (acima de 300 km, podem-se perder informações importantes). Conseqüentemente, estes modelos não são bons para caracterizar variáveis climáticas em muitas regiões do mundo.

Mesmo sabendo das incertezas geradas por simulações produzidas por cálculos matemáticos, que apresentam problemas ao representar a realidade dos processos físicos como acontece na natureza, a aplicação da técnica de "downscaling" (ou ampliação da resolução) torna-se uma ferramenta importante para o usuário poder utilizar a previsão climática em um nível mais compatível com o seu processo de tomada de decisão. Neste estudo foi realizada uma redução de escala (downscaling) do modelo CCSR/NIES de 5,6° de latitude/longitude para a escala de 0,5° latitude/longitude, por meio de uma técnica simplificada, com o intuito de reproduzir melhor os detalhes climáticos regionais.

Primeiramente reduziu-se a temperatura ao nível do mar, utilizando o procedimento adotado na aviação para obtenção da temperatura em uma altitude

diferente da estação (IAC, 1989). Este método apesar de simplificado apresenta bons resultados, considerando que a temperatura do ar decresce um grau a cada 100 metros a mais de altitude. Uma vez reduzidas ao nível do mar, as temperaturas foram interpoladas para 30' por um processo de interpolação bi-linear, em seguida os valores de temperatura foram convertidos para a latitude dada pela orografia de 30' obtida por meio do modelo digital de elevação gerado pela *Shuttle Radar Topography Mission – SRTM* (GEOWORLD, 2000). Para a precipitação e a radiação solar foi feita apenas a interpolação bi-linear.

### 3.1.2. Dados Climáticos Observados

Para avaliar as projeções dos cenários A2 e B2 dadas pelo downscaling do CCSR/NIES GCM, foi utilizado como período base os dados climáticos médios de 1961-1990 do *Climatic Research Unit* (CRU), climatologia, com resolução de 0,5° de latitude e longitude. A climatologia foi construída a partir da interpolação, em função da latitude, longitude e altitude, de dados observados de estações climatológicas (NEW *et al.*, 1999).

Por meio da climatologia foi possível obter as anomalias dos dados climáticos, fazendo a diferença entre a climatologia e os dados modelados para o futuro.

### 3.1.3. Tratamento dos Dados Climáticos

Foram utilizados neste estudo três períodos de dados médios (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) para cada cenário, A2 e B2, do downscaling do CCSR/NIES GCM. No entanto, antes de implementar os dados no modelo de crescimento 3-PG, procedeu-se a uma correção dos dados modelados para o futuro em relação aos dados observados, como se vê nas equações abaixo:

$$Erro = CCSR/NIES_{Base} - CRU_{Base}$$

$$Correção = CCSR/NIES_{Futuro} - Erro$$

em que,

$CCSR/NIES_{Base}$  - dados do downscaling do CCSR/NIES GCM no período 1961-1990;

$CRU_{Base}$  - dados do CRU no período 1961-1990;

$CCSR/NIES_{futuro}$  - dados do downscaling do CCSR/NIES GCM nos períodos 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100.

As anomalias da temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação, e ainda, o IMA simulado pelo modelo 3-PG foram apresentados em figuras confeccionadas, a partir da utilização de sistemas de informações geográficas.

### 3.2. Análise de Sensibilidade

Com o intuito de investigar a influência dos elementos climáticos, temperatura e precipitação, na resposta do modelo 3-PG na estimativa do IMA, foi realizada uma análise de sensibilidade simplificada, semelhante ao estudo realizado por Esprey *et al.* (2004), variando em  $\pm 30\%$  a temperatura máxima e mínima, concomitantemente, do banco de dados do CRU. O mesmo procedimento também foi realizado para precipitação.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

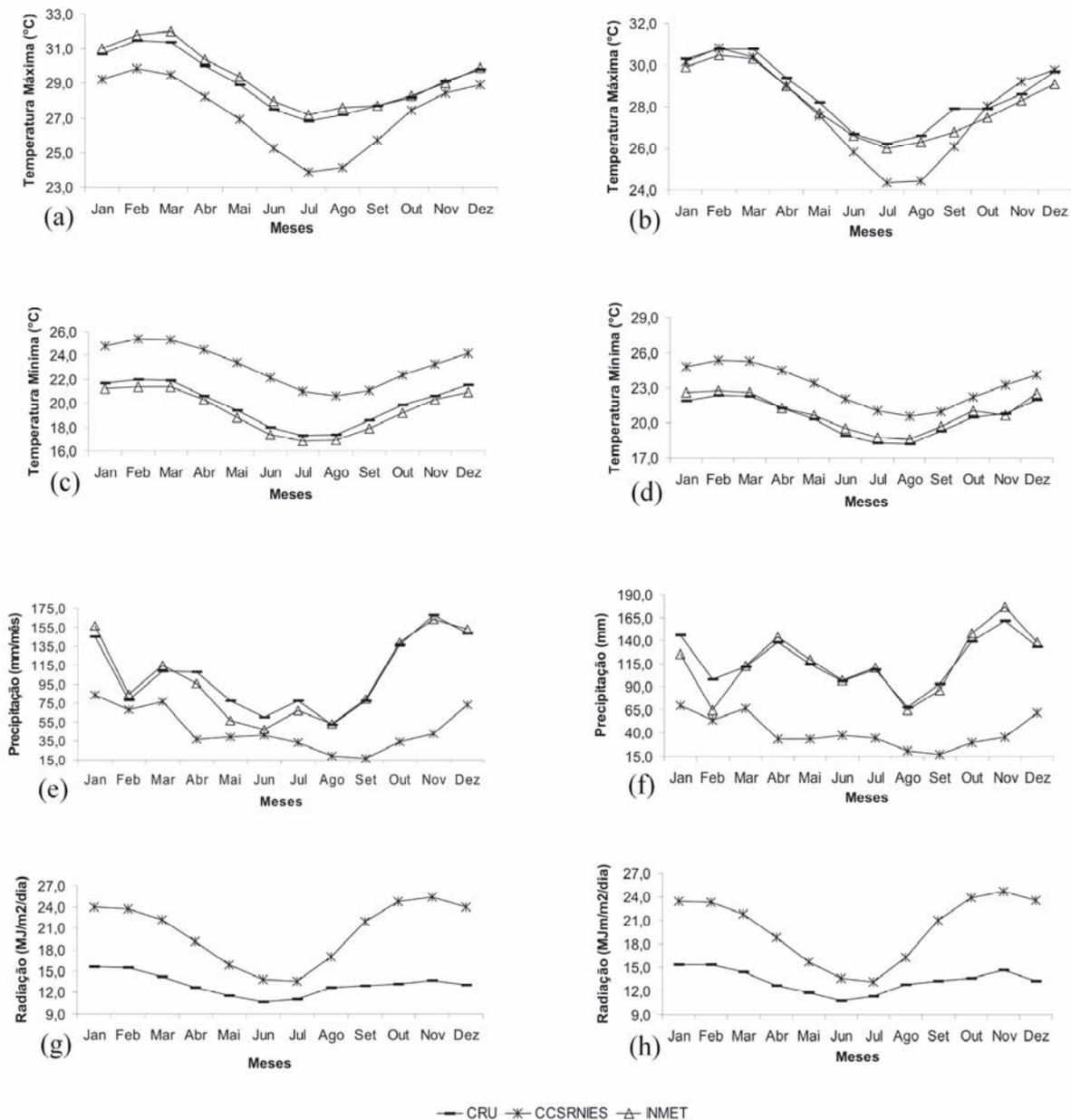
Para verificar o erro nas estimativas do modelo CCSR/NIES, dados simulados para o período 1961-1990 foram comparados aos dados do CRU e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no mesmo período, para duas localidades na Região I (Figura 5) e uma localidade na Região II (Figura 6). Na Região I no norte do Espírito Santo escolheu-se a localidade de São Mateus e no sul da Bahia a localidade de Caravelas. Na Região II escolheu-se a localidade de Governador Valadares.

Conforme as Figuras 5a e 5b os dados de temperatura máxima do CRU, INMET e CCSR/NIES seguiram a mesma tendência, porém o CCSR/NIES subestimou a temperatura máxima em relação aos dados observados em todos os meses do ano para São Mateus (Figura 5a). Para Caravelas (Figura 5b) o CCSR/NIES subestimou os valores da temperatura máxima de janeiro a setembro e superestimou de outubro a dezembro em relação ao CRU, já em relação ao INMET superestimou de janeiro a março e de outubro a dezembro. A temperatura mínima do CRU e do INMET apresentaram bom ajuste nas duas localidades, enquanto o CCSR/NIES superestimou os valores da temperatura mínima durante todos os meses em São Mateus (Figura 5c) e em Caravelas (Figura 5d). A precipitação permaneceu inferior aos dados do CRU e INMET em todos os meses no modelo CCSR/NIES, tanto em São Mateus (Figura 5e) como em Caravelas (Figura 5f). Os valores de radiação solar foram representados somente pelo CRU e CCSR/NIES, já que não havia dados de radiação disponíveis do INMET. O modelo CCSR/NIES superestimou a radiação durante todos os meses em São Mateus e Caravelas, Figuras 5g e 5h, respectivamente.

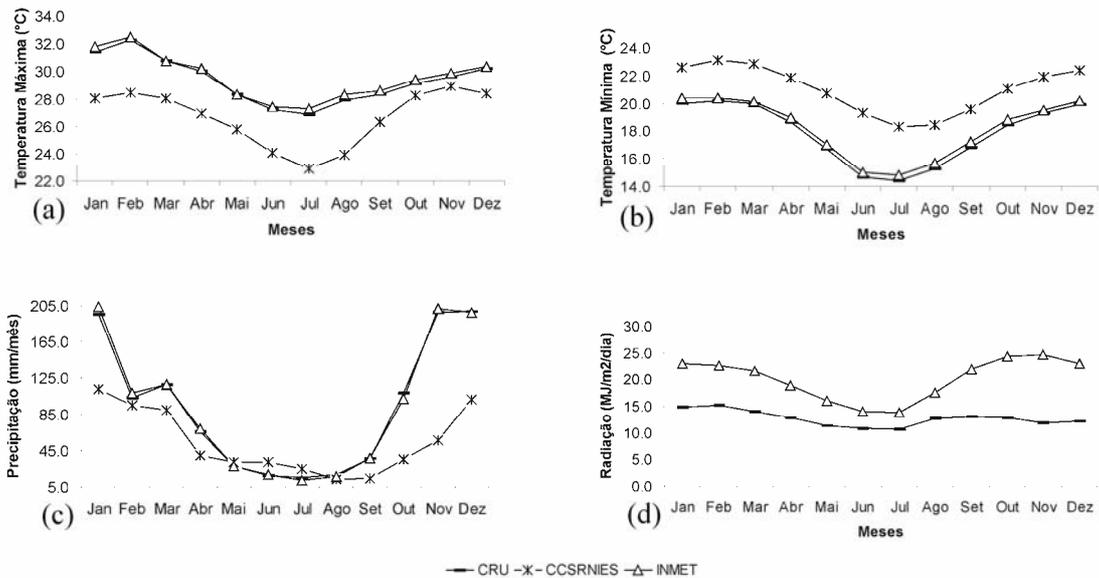
Por meio da Figura 6, é possível observar a variação sazonal da temperatura máxima e mínima, precipitação e radiação na localidade de Governador Valadares (Região II). Os valores de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação do INMET e CRU apresentaram um bom ajuste, já o modelo CCSR/NIES subestimou os valores de temperatura máxima (Figura 6a) e precipitação (Figura 6c), e

superestimou os de temperatura mínima (Figura 6b), quando comparados ao INMET e CRU. A radiação solar foi representada somente para o CRU e CCSR/NIES, já que não havia dados de radiação disponíveis do INMET. O modelo CCSR/NIES superestimou a radiação solar em relação ao CRU, principalmente nos meses mais quente do ano (Figura 2d).

A falta de ajuste dos dados do CCSR/NIES em relação aos dados do CRU e INMET já era esperada, por ser um modelo global, não representando bem as características de uma região, a partir dos resultados discutidos anteriormente verificou-se a necessidade de se fazer a correção dos dados modelados pelo CCSR/NIES em relação aos dados observados do CRU, antes de serem usados como entrada no modelo de crescimento de eucalipto 3-PG.



**Figura 5** – Comportamento sazonal da temperatura máxima ( $t_{mx}$ , °C), temperatura mínima ( $t_{mn}$ , °C), precipitação ( $prec$ , mm) e radiação ( $rad$ ,  $MJm^{-2}$  por dia) no período de 1961-1990 dos dados do CRU, CCSR/NIES e INMET em São Mateus – ES e Caravelas – BA, (a)  $t_{mx}$  em São Mateus, (b)  $t_{mx}$  em Caravelas, (c)  $t_{mn}$  em São Mateus, (d)  $t_{mn}$  em Caravelas, (e)  $prec$  em São Mateus, (f)  $prec$  em Caravelas, (g)  $rad$  em São Mateus e (h)  $rad$  em Caravelas.



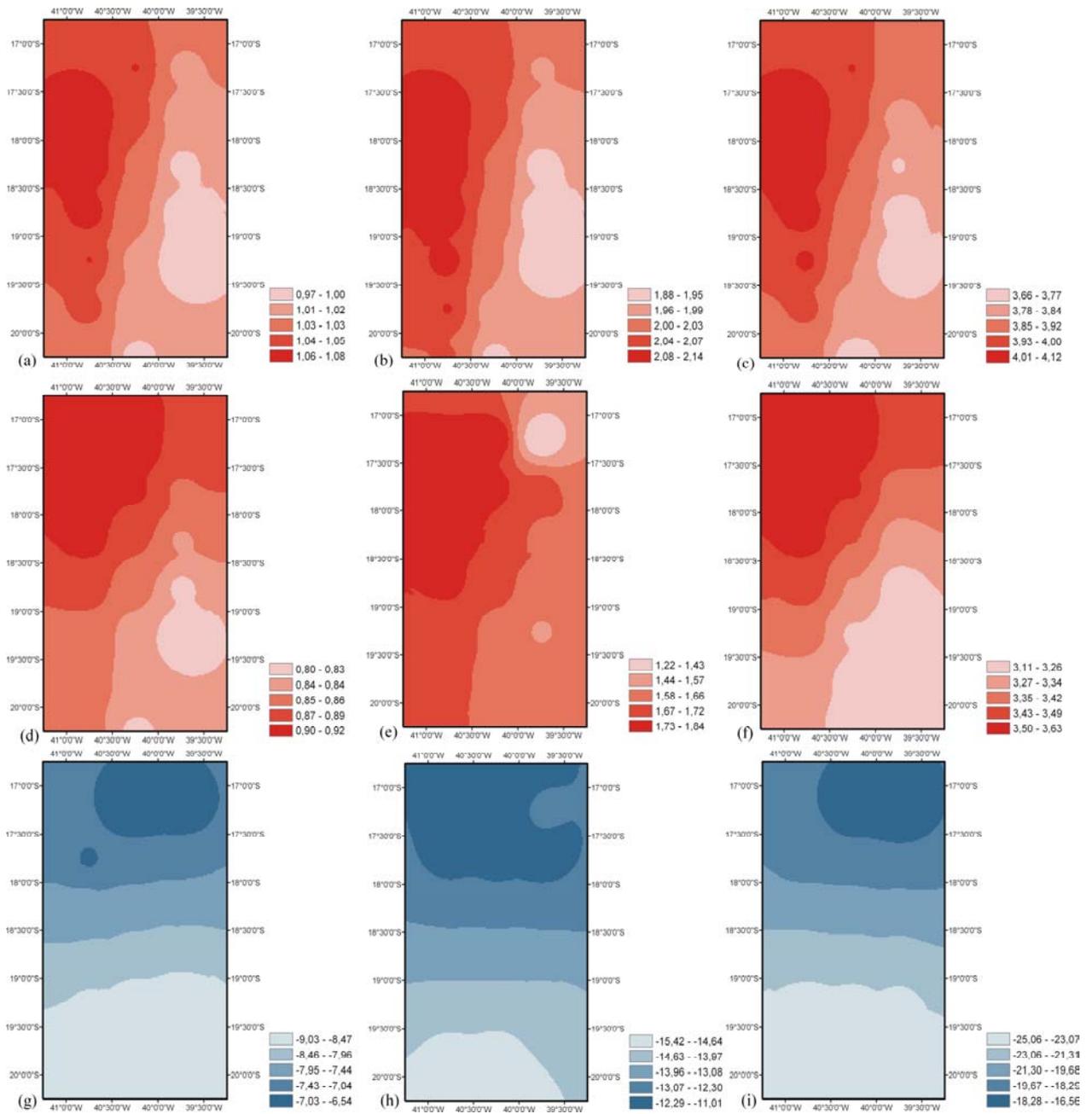
**Figura 6** – Comportamento sazonal dos dados do CRU, CCSRNIES e INMET no período de 1961-1990 na localidade de Governador Valadares, (a) temperatura máxima (°C), (b) temperatura mínima (°C), (c) precipitação (mm) e (d) radiação (MJ m<sup>-2</sup> por dia).

Foram gerados mapas de anomalia da temperatura máxima, mínima e precipitação das regiões de estudo, a anomalia é o desvio da climatologia, ou seja, a diferença de cada período futuro (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100) em relação ao período base (CRU 1961-1990) para cada cenário, as Figuras 7 e 8 representam os mapas de anomalia da Região I e as Figuras 9 e 10 representam a Região II. Observa-se que as temperaturas máxima e mínima estão aumentando em todos os períodos e cenários, porém os períodos do cenário B2 aumentam menos que os do cenário A2, o que já era esperado por ser um cenário mais otimista em relação ao A2. Não foram apresentadas as anomalias da radiação solar, pois os valores encontrados do modelo CCSRNIES estavam muito próximos aos valores do CRU, após o tratamento dos dados.

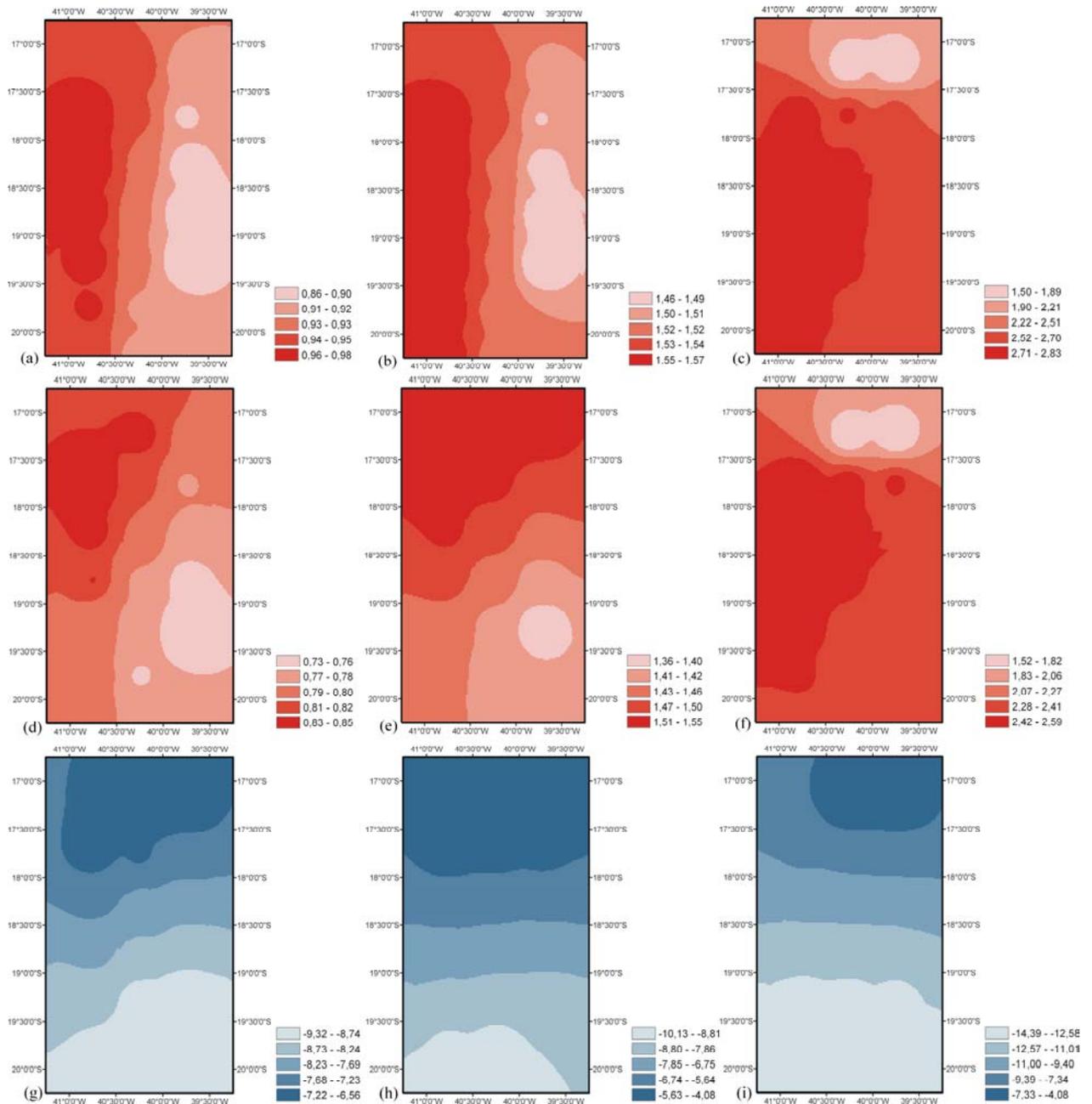
No cenário A2 da Região I, a temperatura máxima apresentou aumento no período 2011-2040 entre 0,97 e 1,08°C, no período 2041-2070 entre 1,88 e 2,14°C e no período 2071-2100 entre 3,66 e 4,12°C, de acordo com as Figuras 7a, 7b e 7c, respectivamente. A temperatura mínima apresentou aumento entre 0,80 e 0,92°C em 2011-2040, entre 1,22 e 1,84°C em 2041-2070 e 3,11 e 3,63°C em 2071-2100, Figuras 7d, 7e e 7f, respectivamente. Observa-se tendência de diminuição nos valores da precipitação, no cenário A2, nos três períodos analisados, apresentando diminuição dos valores ao sul da área e aumento em direção ao norte da área. Nota-se um decréscimo da

precipitação entre 6,54 e 9,03 mm em 2011-2040 (Figura 7g), entre 11,01 e 15,42 mm em 2041-2070 (Figura 7h) e entre 16,56 e 25,06 mm em 2071-2100 (Figura 7i).

No cenário B2 da Região I, observam-se aumentos da temperatura máxima entre 0,86 e 0,96°C em 2011-2040 (Figura 8a), 1,46 e 1,57°C em 2041-2070 (Figura 8b) e 1,50 e 2,83°C em 2071-2100 (Figura 8c). A temperatura mínima também apresentou aumentos no cenário B2, entre 0,73 e 0,85°C em 2011-2040, entre 1,36 e 1,55°C em 2041-2070 e entre 1,52 e 2,59°C em 2071-2100 Figuras 8d, 8e e 8f, respectivamente. Como no cenário A2, o cenário B2 também apresentou queda nos valores da precipitação em todos os períodos. Os valores de precipitação decresceram entre 6,56 e 9,32 mm em 2011-2040 (Figura 8g), entre 4,08 e 10,13 mm em 2041-2070 (Figura 8h) e entre 4,08 e 14,39 mm em 2071-2100 (Figura 8i).



**Figura 7** – Anomalias na Região I, cenário A2, (a) temperatura máxima (°C) 2011-2040, (b) temperatura máxima (°C) 2041-2070, (c) temperatura máxima (°C) 2071-2100, (d) temperatura mínima (°C) 2011-2040, (e) temperatura mínima (°C) 2041-2070, (f) temperatura mínima (°C) 2071-2100, (g) precipitação (mm/mês) 2011-2040, (h) precipitação (mm/mês) 2041-2070 e (i) precipitação (mm/mês) 2071-2100.



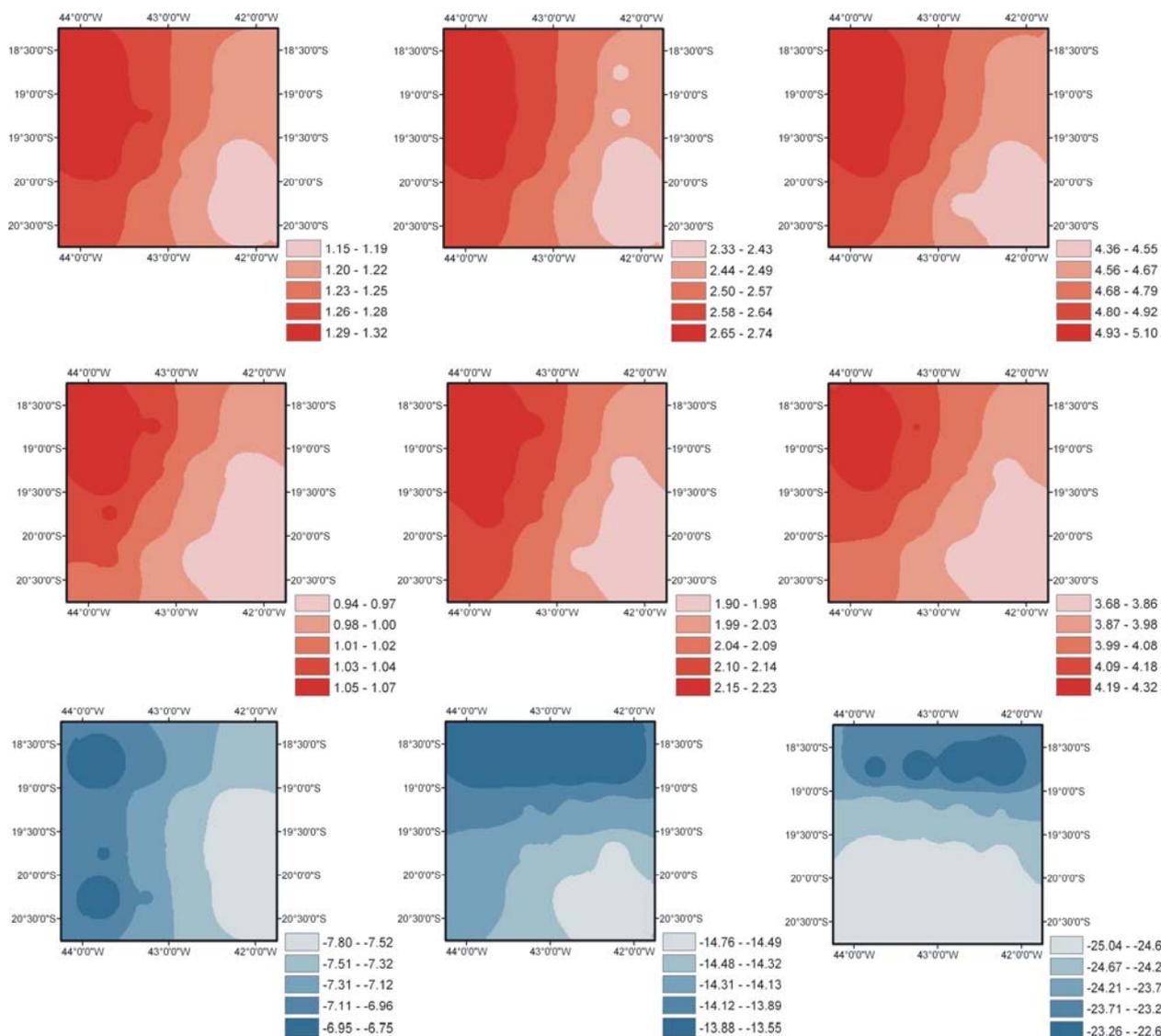
**Figura 8** – Anomalias na Região I, cenário B2, (a) temperatura máxima (°C) 2011-2040, (b) temperatura máxima (°C) 2041-2070, (c) temperatura máxima (°C) 2071-2100, (d) temperatura mínima (°C) 2011-2040, (e) temperatura mínima (°C) 2041-2070, (f) temperatura mínima (°C) 2071-2100 (g) precipitação (mm por mês) 2011-2040, (h) precipitação (mm por mês) 2041-2070 e (i) precipitação (mm por mês) 2071-2100.

Conforme as Figuras 9a, 9b e 9c, respectivamente, observa-se aumento da temperatura máxima na Região II, no cenário A2, entre 1,15 e 1,32°C (2011-2040), entre 2,33 e 2,74°C (2041-2070) e entre 4,36 e 5,10°C (2071-2100). A temperatura mínima apresentou aumento no cenário A2 entre 0,94 e 1,07°C em 2011-2040, entre 1,90 e 2,23°C em 2041-2070 e 3,68 e 4,32°C em 2071-2100, Figuras 9d, 9e e 9f, respectivamente. Os valores da precipitação diminuíram em toda área nos três períodos

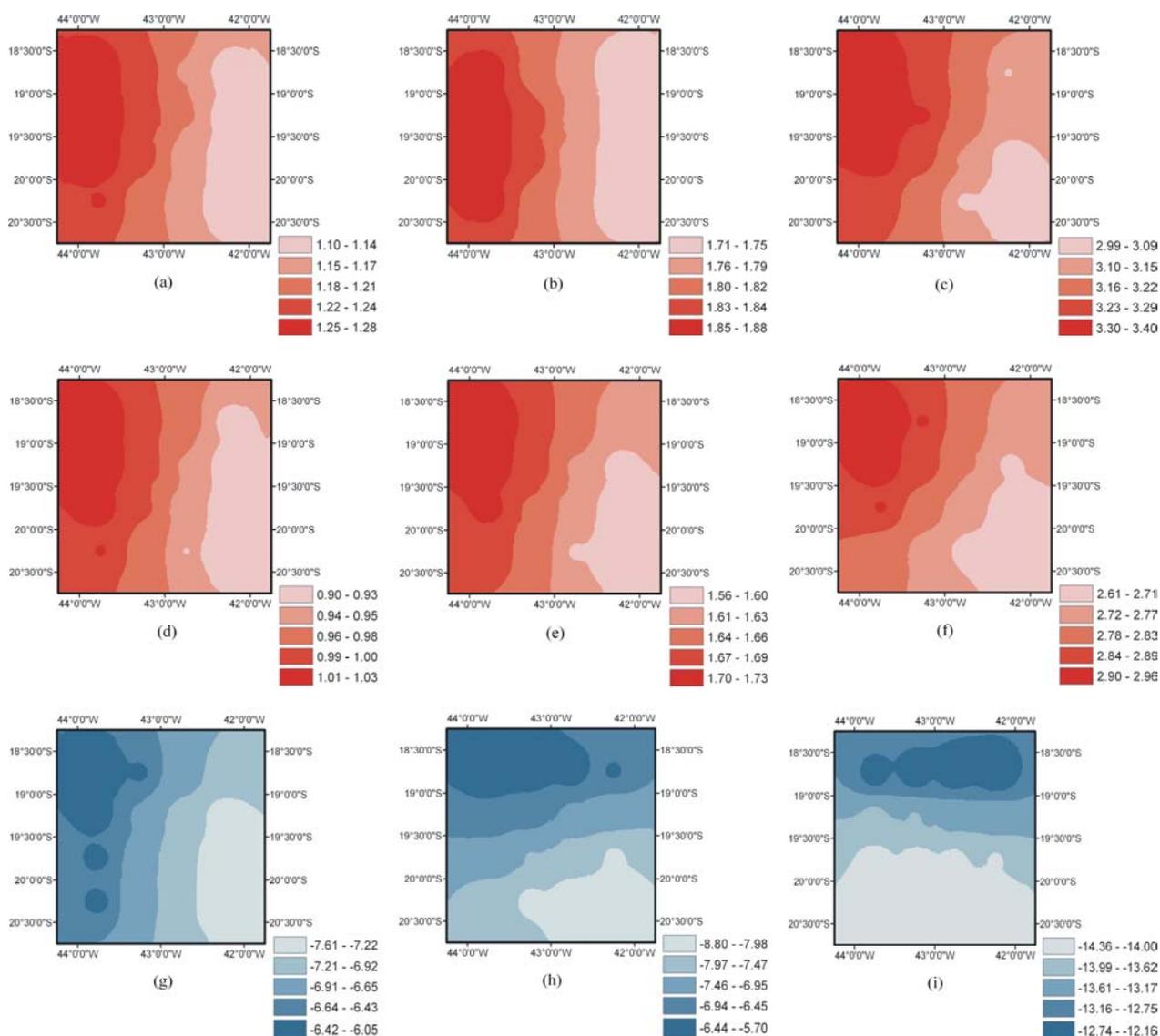
analisados, apresentando decréscimos entre 6,75 e 7,80 mm em 2011-2040 (Figura 9g), entre 13,55 e 14,76 mm em 2041-2070 (Figura 9h) e entre 22,62 e 25,04 mm em 2071-2100 (Figura 9i).

No cenário B2, a Região II apresentou aumentos na temperatura máxima entre 1,10 e 1,28°C em 2011-2040 (Figura 10a), entre 1,71 e 1,88°C em 2041-2070 (Figura 10b) e entre 2,98 e 3,40°C em 2071-2100 (Figura 10c). A temperatura mínima também apresentou aumentos, sendo os valores entre 0,90 e 1,03°C em 2011-2040, entre 1,56 e 1,73°C em 2041-2070 e entre 2,61 e 2,96°C em 2071-2100, Figuras 10d, 10e e 10f, respectivamente. Tanto no cenário A2 como no B2 as temperaturas máxima e mínima apresentaram aumentos, sendo que o aquecimento tende a ser maior a oeste, diminuindo em direção a leste. O cenário B2 da Região II também apresentou diminuição nos valores da precipitação nos três períodos analisados, com decréscimo de valores entre 7,61 e 6,05 mm em 2011-2040 (Figura 10g), entre 5,70 e 8,80 mm em 2041-2070 (Figura 10h) e entre 12,16 e 14,36 mm em 2071-2100 (Figura 10i).

Os resultados das projeções de clima utilizadas neste estudo mostraram a possibilidade de impactos climáticos significativos principalmente no período de 2071-2100, tanto cenário A2 como no B2. Soares e Marengo (2004), estudando a variação do clima na América Sul também observaram aumentos nos valores de temperatura para os cenários A2 e B2 até 2099.



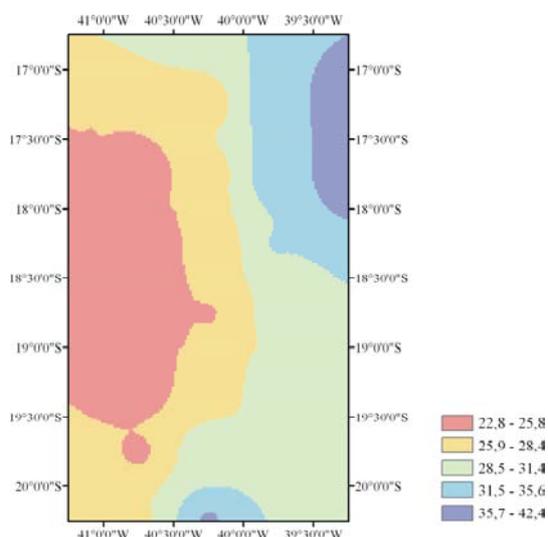
**Figura 9** – Anomalias na Região II, cenário A2, (a) temperatura máxima (°C) 2011-2040, (b) temperatura máxima (°C) 2041-2070, (c) temperatura máxima (°C) 2071-2100, (d) temperatura mínima (°C) 2011-2040, (e) temperatura mínima (°C) 2041-2070, (f) temperatura mínima (°C) 2071-2100 (g) precipitação (mm por mês) 2011-2040, (h) precipitação (mm por mês) 2041-2070 e (i) precipitação (mm por mês) 2071-2100.



**Figura 10** – Anomalias na Região II, cenário B2, (a) temperatura máxima (°C) 2011-2040, (b) temperatura máxima (°C) 2041-2070, (c) temperatura máxima (°C) 2071-2100, (d) temperatura mínima (°C) 2011-2040, (e) temperatura mínima (°C) 2041-2070, (f) temperatura mínima (°C) 2071-2100 (g) precipitação (mm por mês) 2011-2040, (h) precipitação (mm por mês) 2041-2070 e (i) precipitação (mm por mês) 2071-2100.

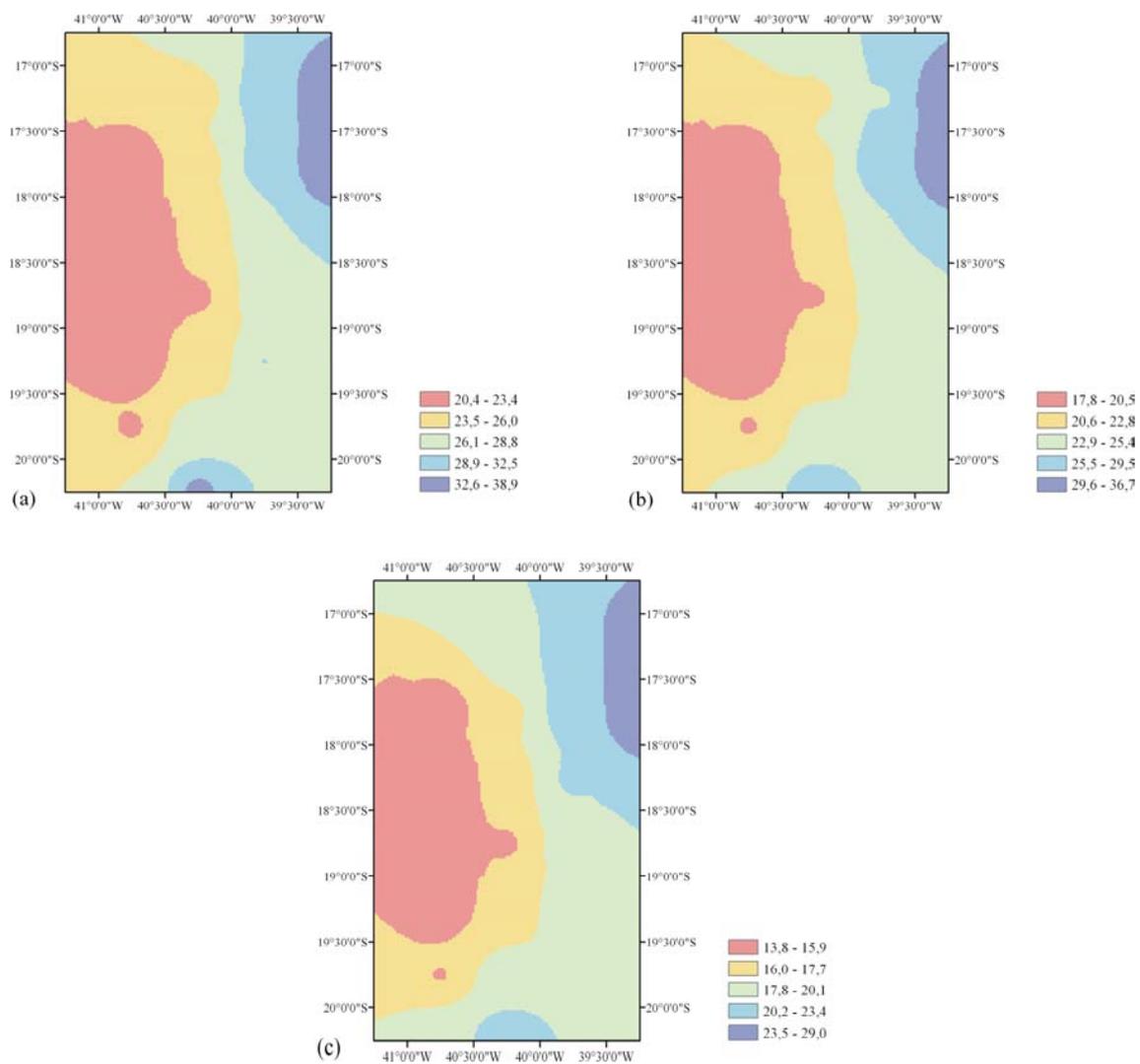
Para estimar a produtividade do eucalipto no clima atual, utilizou-se o banco de dados do CRU no período base 1961-1990. A Figura 11 representa a estimativa do incremento médio anual (IMA) na Região I para o clima atual, com valores variando entre 22,8 e 42,4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano. Almeida *et al.* (2004a) encontraram em áreas experimentais com plantações de eucalipto, valores de IMA observados de 23,7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano na região de Pastinho (Aracruz) e 40,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> na região de Santana (São Mateus), ambos no estado do Espírito Santo. Valores de IMA simulados pelo modelo 3-PG para dois clones distintos, num ciclo de seis anos, apresentou valor médio de 42,0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano no norte do Espírito Santo (ALMEIDA *et al.*, 2004b). A simulação do

3-PG com a utilização da climatologia do CRU para representar o clima atual e a parametrização de Almeida *et al.* (2004b), mostrou-se eficiente, apresentando valores próximos aos valores reais, o modelo também representou a distribuição espacial da produtividade de acordo com a realidade, mostrando que as áreas mais produtivas estão localizadas a leste da região.

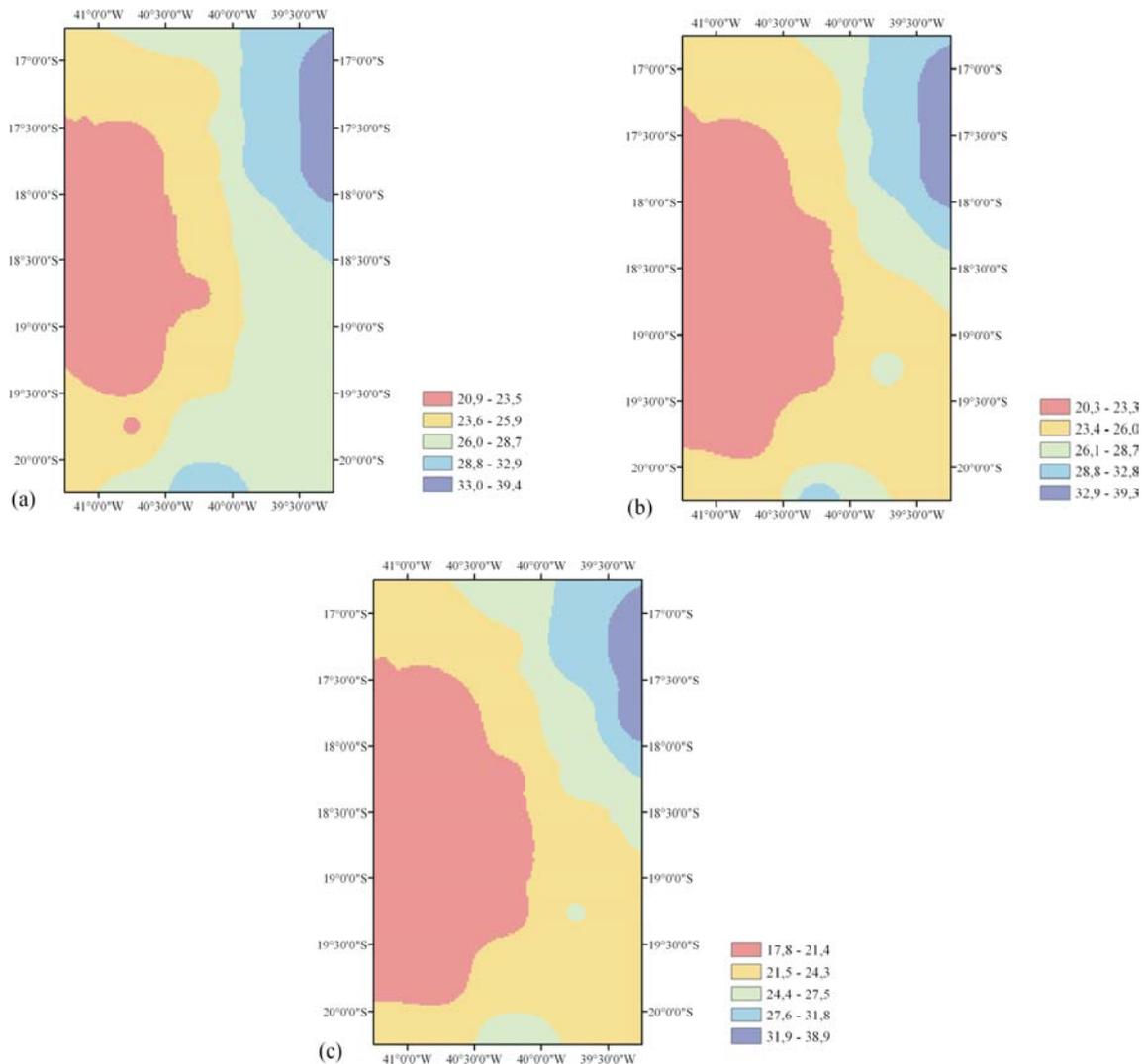


**Figura 11** – Incremento médio anual (IMA, m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano) no “clima atual” (CRU 1961-1990) simulado para Região I.

Nas Figuras 12a, 12b e 12c estão representados os valores de incremento médio anual no cenário A2 para Região I, os valores variaram entre: 20,4 e 38,9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano (2011-2040); 17,8 e 36,7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano (2041-2070); 13,8 e 29,0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano (2071-2100). Já nas Figuras 13a, 13be e 13c, estão representados os valores de incremento médio anual no cenário B2 para Região I apresentando os valores entre: 20,9 e 39,4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano (2011-2040); 20,3 e 39,3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano (2041-2070); 17,8 e 38,9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano (2070-2100).

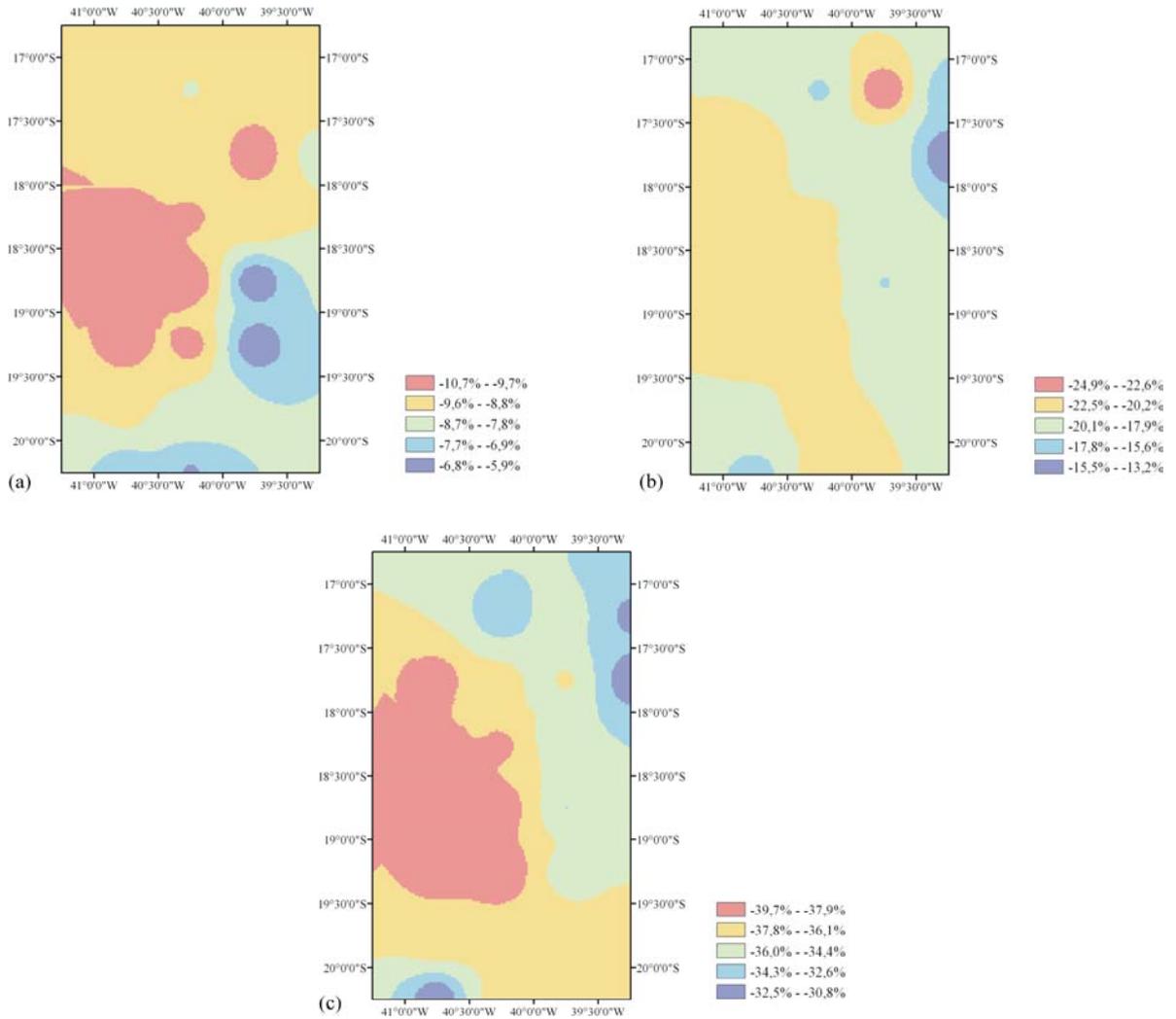


**Figura 12** – Incremento médio anual (IMA,  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  por ano) da Região I no cenário A2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.

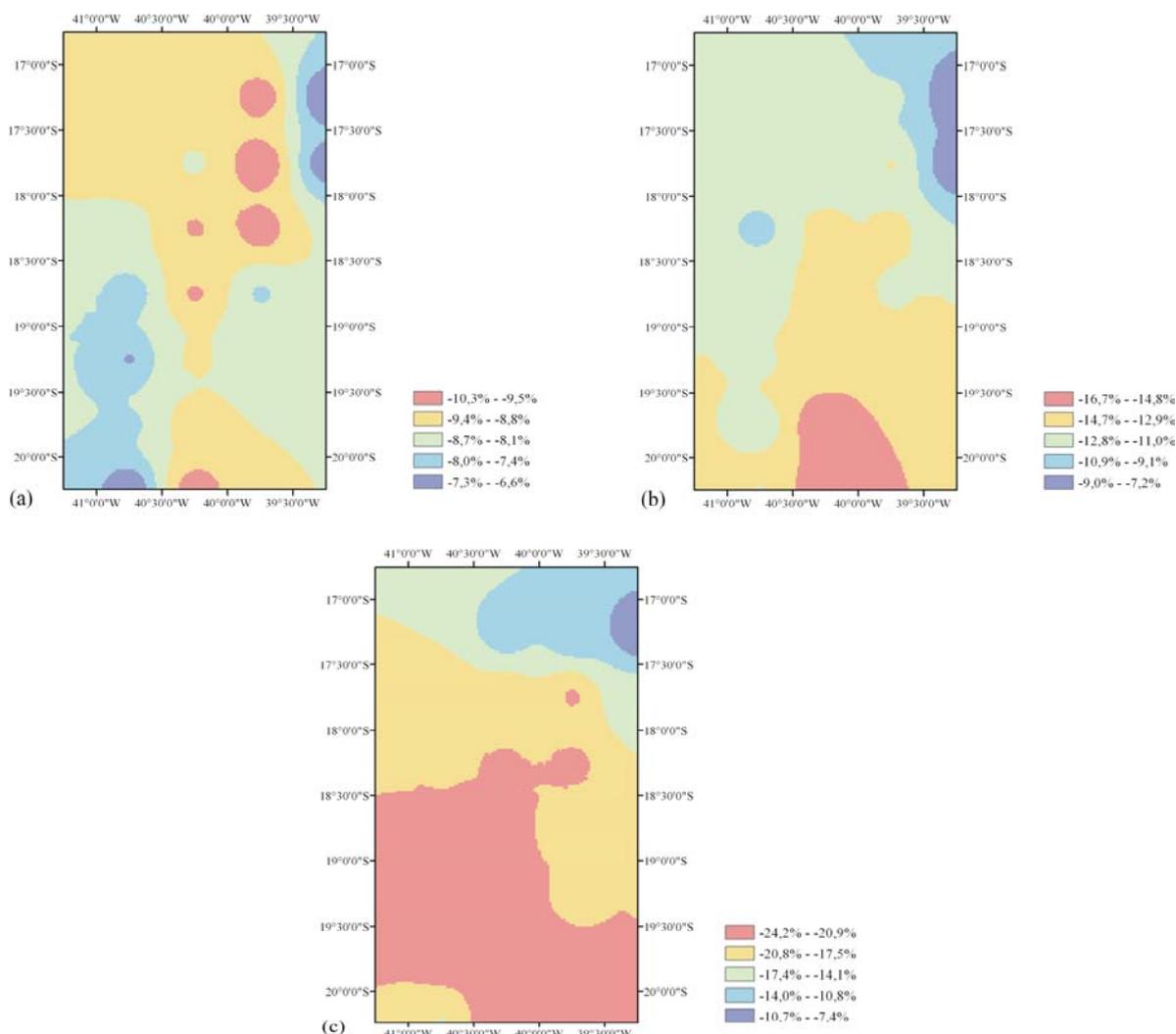


**Figura 13** – Incremento médio anual (IMA,  $m^3 ha^{-1}$  por ano) da Região I no cenário B2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.

Ao se comparar os valores do IMA estimado para períodos futuros com os valores estimados no clima atual, observa-se um decréscimo na produtividade de eucalipto em toda Região I. As Figuras 14 e 15 representam a porcentagem de variação do IMA estimado pelos cenários de mudanças climáticas em relação ao IMA estimado no clima atual. Para o cenário A2, de acordo com a Figura 14a o IMA apresenta um decréscimo entre 5,9 e 10,7% em 2011-2040, na Figura 14b observa-se um decréscimo entre 13,2 e 24,9% em 2041-2070 e na Figura 14c o decréscimo no IMA varia entre 30,8 e 39,7% para 2071-2100. O IMA futuro em relação ao IMA atual no cenário B2 apresentou redução nos valores nos três períodos analisados, de acordo com a Figura 15. Em 2011-240 o decréscimo no IMA variou entre 6,6 e 10,3% (Figura 15a), em 2041-2070 ocorreu um decréscimo entre 7,2 e 16,7% e em 2071-2100 o IMA apresentou decréscimo entre 7,4 e 24,2%.

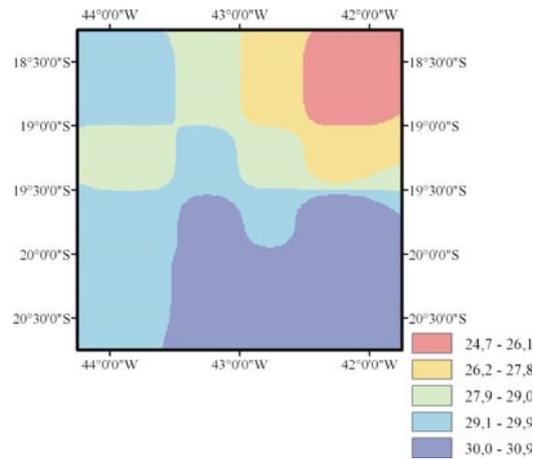


**Figura 14** – Porcentagem de variação do IMA futuro em relação ao IMA atual para Região I no cenário A2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.



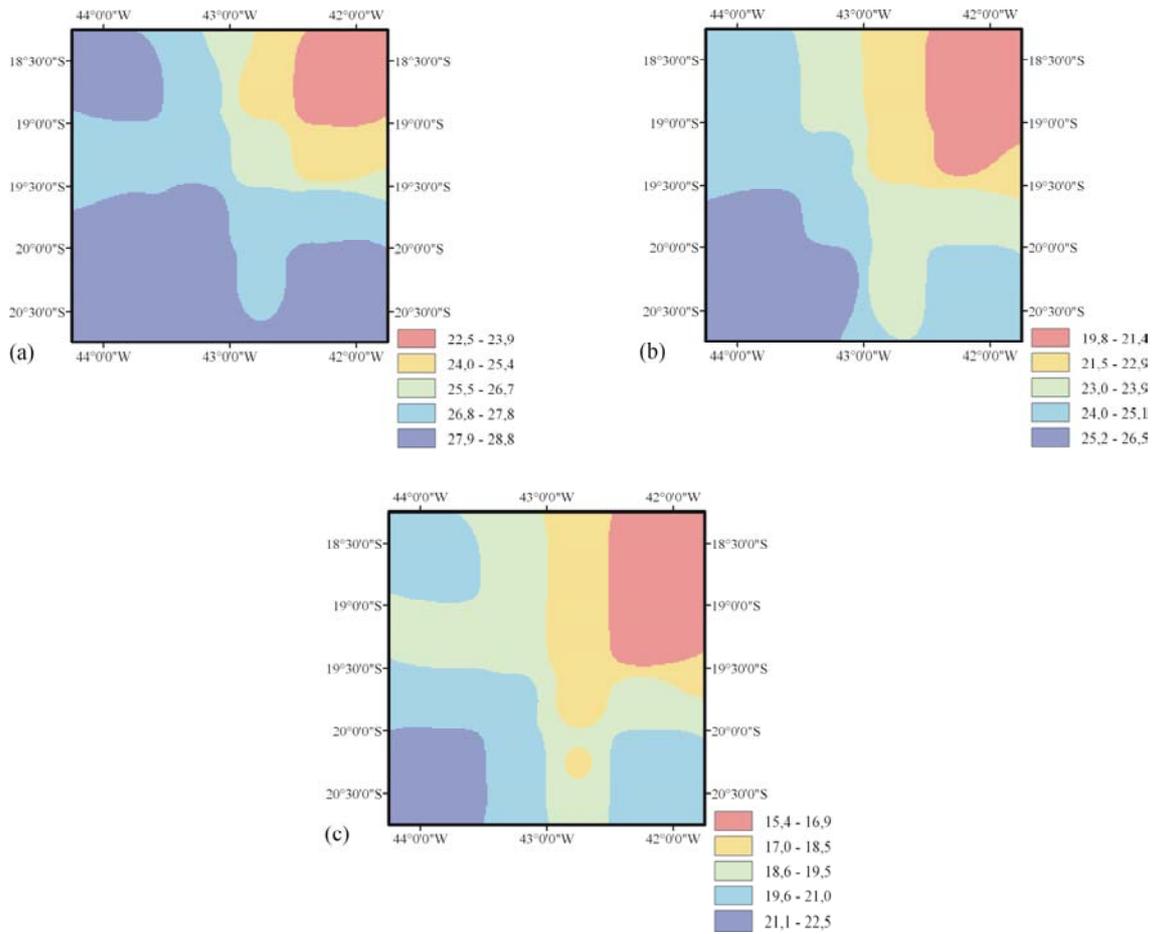
**Figura 15** – Porcentagem de variação do IMA futuro em relação ao IMA atual para Região I no cenário B2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.

Na Figura 16 está apresentado a produtividade do eucalipto na Região II, para o clima atual foi estimada por meio do banco de dados do CRU no período base 1961-1990, assim como a Região I, servindo de comparação para as estimativas da produtividade no clima futuro. Os valores do IMA variaram entre 24,7 e 31,0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano. Silva (2006), em estudo pontual na mesma área do presente trabalho, encontrou valores observados de IMA variando entre 28,6 e 42,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e valores de IMA simulados pelo 3-PG variando entre 30,4 e 42,1 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano, ambos com o eucalipto em idade de 7 anos. Observa-se que os valores simulados neste estudo são menores que os valores encontrados por Silva (2006), porém é importante ressaltar que além da diferença dos dados climáticos utilizados em cada estudo, a análise especializada do presente estudo diminui a precisão na estimativa do IMA.

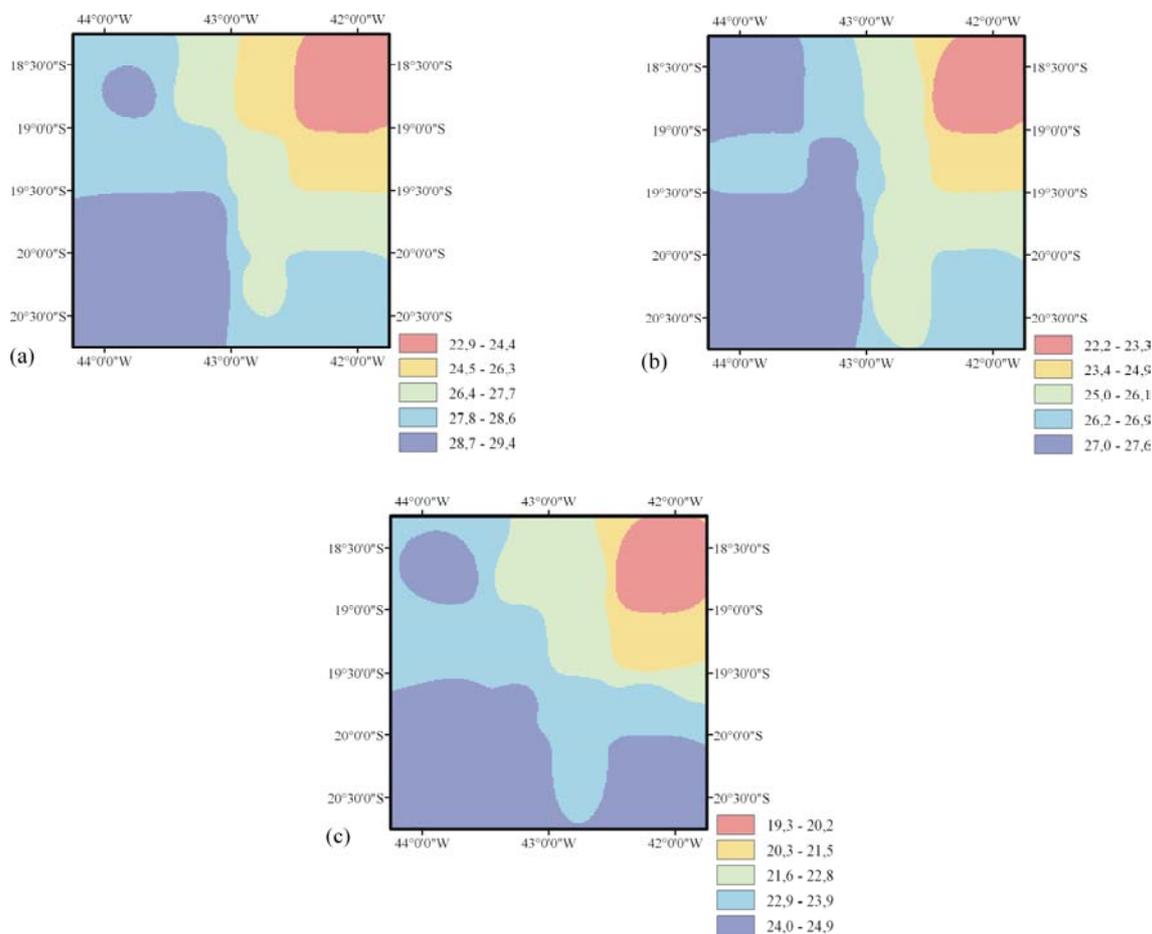


**Figura 16** – Incremento médio anual (IMA, m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano) no “clima atual” (CRU 1961-1990) simulado para Região II.

Nas Figuras 17a, 17b e 17c estão representados os valores de incremento médio anual no cenário A2 para a Região II. O valor de IMA encontrado no período de 2011-2040 variou entre 22,5 e 28,8 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano, no período de 2041-2070 variou entre 19,8 e 26,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano e no período de 2071-2100 variou entre 15,4 e 22,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano. As Figuras 18a, 18b e 18c representam os valores de incremento médio anual no cenário B2. O IMA variou entre 22,9 e 29,4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano em 2011-2040, entre 22,2 e 27,6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano em 2041-2070 e entre 19,3 a 24,9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por ano em 2071-2100.

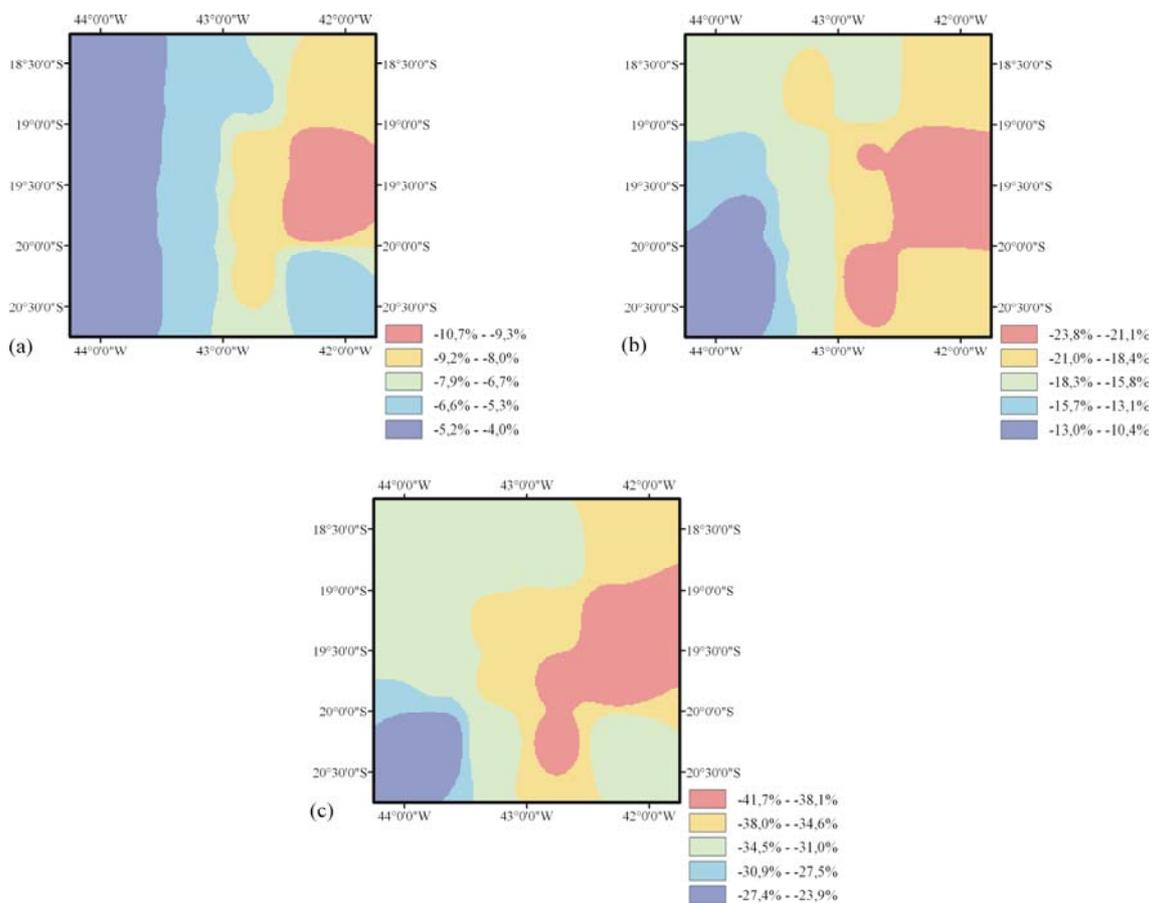


**Figura 17** – Incremento médio anual (IMA,  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  por ano) da Região II no cenário A2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.

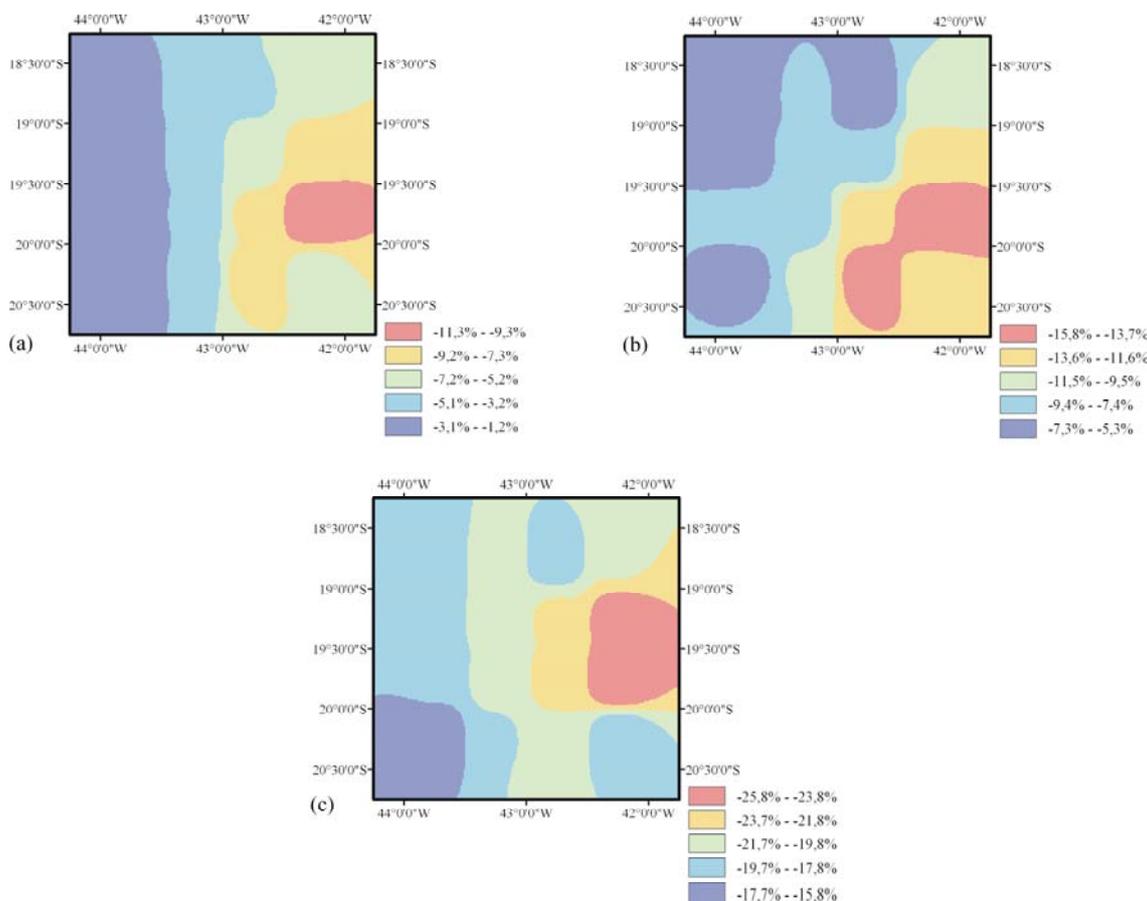


**Figura 18** – Incremento médio anual (IMA,  $m^3 ha^{-1}$  por ano) da Região II no cenário B2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.

Por meio das Figuras 19 e 20, é possível visualizar a porcentagem de variação do incremento médio anual estimado pelos cenários de mudanças climáticas (A2 e B2) em relação ao incremento médio anual estimado pelo “clima atual” (dados do CRU) para Região II. O incremento médio anual apresentou decréscimo no cenário A2 em toda região estudada, de acordo com a Figura 19a o IMA teve seu valor reduzido entre 4,0 e 10,7% em 2011-2040, conforme a Figura 19b o valor do IMA foi reduzido entre 10,4 e 23,8% em 2041-2070 e em 2071-2100 ocorreu uma redução no valor do IMA entre 23,9 e 41,7% (Figura 19c). No cenário B2 também ocorreu redução nos valores do IMA nos três períodos analisados. Na Figura 20a verifica-se um decréscimo no IMA entre 1,2 e 11,3% em 2011-240, na Figura 20b o decréscimo no IMA varia entre 5,3 e 15,8% em 2041-2070 e entre 15,8 e 25,8% em 2071-2100 (Figura 20c).



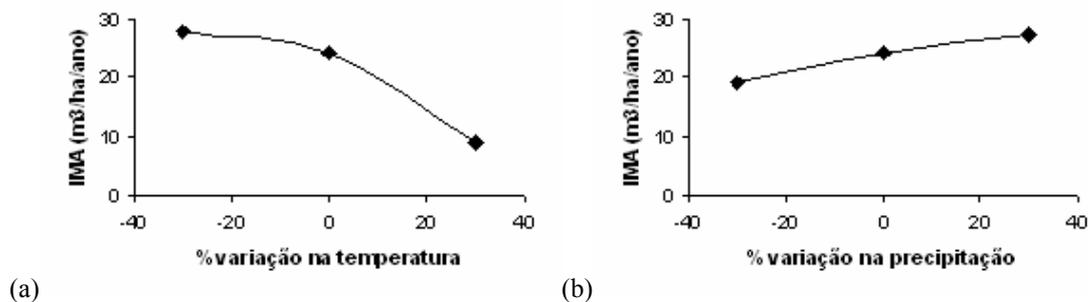
**Figura 19** – Porcentagem de variação do IMA futuro em relação ao IMA atual para Região II no cenário A2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.



**Figura 20** – Porcentagem de variação do IMA futuro em relação ao IMA atual para Região II no cenário B2, (a) 2011-2040, (b) 2041-2070, (c) 2071-2100.

As Figuras 21a e 21b apresentam a análise de sensibilidade do IMA aos fatores climáticos, temperatura (máxima e mínima) e precipitação, observa-se que o decréscimo da temperatura e o acréscimo da precipitação aumentam os valores do IMA e o acréscimo da temperatura e o decréscimo da precipitação diminuíram os valores do IMA. O aumento da temperatura produz um decréscimo nos valores do IMA maior que o decréscimo produzido pela redução da precipitação, o que não é surpreendente já que a temperatura afeta todas as reações bioquímicas da fotossíntese e o aumento da temperatura geralmente excede a temperatura ótima de crescimento, o modelo 3-PG considera a temperatura como um modificador que limita a eficiência quântica do dossel, conseqüentemente, limitando a produção bruta. Outro fator limitante da produtividade das plantas é a disponibilidade de água, assim se explica o decréscimo do IMA em relação ao decréscimo da precipitação, o estresse hídrico tem vários efeitos sobre o crescimento, um dos quais é a limitação da expansão foliar que por sua vez afeta a eficiência quântica do dossel. Esprey *et al.* (2004), rodando o modelo 3-PG para plantações de eucalipto na África do Sul observaram que o volume de tronco ( $m^3 ha^{-1}$ )

apresentou pouca variação à disponibilidade de água no solo, mostrando que o modelo 3-PG é pouco sensível a disponibilidade de água do solo. Nesse mesmo estudo o volume de tronco ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) diminuiu com o acréscimo da temperatura e com o decréscimo da precipitação, comportamento semelhante ao IMA do presente estudo.



**Figura 21** – IMA simulado em função da variação dos dados climáticos do CRU (a) temperatura e (b) precipitação.

Neste estudo observou-se que as mudanças climáticas simulada pelo modelo global CCSR/NIES, principalmente na temperatura e na precipitação, causaram redução na produtividade futura do eucalipto expressa pelo IMA. As alterações nas variáveis temperatura e precipitação atuaram no modelo de crescimento 3-PG dentro do processo fotossintético, a temperatura de forma direta e a precipitação de forma indireta (água disponível no solo), que são incorporadas no modelo de crescimento 3-PG por meio de moduladores que limitam a produção. As perdas de produtividades futuras estimadas poderiam ser ainda maiores, já que com o aumento da temperatura, maior seria a respiração de manutenção, fato não considerado pelo modelo, que atribui valor fixo para taxa de respiração, no caso 47% da produção primária bruta. Entretanto, deve-se lembrar que o aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera causa além do aquecimento (efeito radioativo) o efeito fisiológico, que por sua vez aumenta a fotossíntese e a eficiência no uso da água, pois com aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera as plantas fecham parcialmente os estômatos, reduzindo a condutância estomática e a evapotranspiração. Portanto, seria de grande importância incluir o efeito de fertilização do  $\text{CO}_2$  no modelo de crescimento de eucalipto para obtenção de resultados mais próximos do real.

Apesar dos modelos climáticos globais convergirem para uma tendência de aumento da temperatura, há ainda, muita incerteza com relação às possíveis mudanças na precipitação e quanto às modificações na frequência de extremos climáticos (secas, geadas, tempestades severas, vendavais, granizo etc). Diante da incerteza dos modelos

não é possível prever a verdadeira magnitude das perdas de produtividade do eucalipto, mas sabe-se que as mudanças climáticas estão ocorrendo e que alterações na produtividade do eucalipto serão inevitáveis.

## 5. CONCLUSÕES

Os dados do modelo climático global CCSR/NIES, apresentou variações em relação aos dados observados do CRU e INMET no período de 1961-1990, mostrando que a baixa resolução dos modelos globais não representam bem a realidade climática de pequenas regiões. Necessitando de correções antes de serem usados na estimativa da produtividade de eucalipto em pequenas regiões.

As temperaturas máxima e mínima aumentaram nas regiões estudadas, apresentando maiores valores no período 2071-2100 no cenário A2. A precipitação decresceu nas regiões estudadas em todos os períodos e cenários.

O modelo de crescimento 3-PG mostrou-se sensível na estimativa do IMA com a variação da temperatura e precipitação, apresentando redução no IMA quando ocorreram altas temperaturas e baixos valores de precipitação.

A produtividade de eucalipto futura apresentou redução em seus valores, mostrando a vulnerabilidade dos sistemas florestais à variação climática.

O modelo de crescimento 3-PG associado aos dados de mudanças climáticas, mostrou-se útil na projeção da produtividade futura de eucalipto. Tais projeções são importantes para que se possam mitigar os impactos no setor florestal causados pelas mudanças no clima.

Deve-se considerar um grau de incerteza no futuro cenário climático do planeta e em particular no Brasil. Isto se deve principalmente as diferenças observadas nas saídas dos modelos climáticos globais, onde modelos com iguais concentrações dos gases de efeito estufa, prevêm por vezes diferentes climas regionais.

Existe a necessidade de novos estudos que utilizem modelos climáticos regionais na estimativa da produtividade futura de eucalipto, e que investiguem as conseqüências da variação climática na fisiologia de crescimento florestal.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, A.C.; Landsberg, J.J.; Sands, P.J.; Ambrogi, M.S.; Fonseca, S.; Barddal, S.M. e Bertolucci, F.L. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in fast growing Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management.**, 193: p.167–177, 2004a.

Almeida, A.C.; Landsberg, J.J. e Sands, P.J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing Eucalyptus grandis plantations. **Forest Ecology and Management.**, 193: p.179-195, 2004b.

Alves, R. Área plantada é só metade da procura. **Estado de Minas**, Economia, p. 17, 28 de abril de 2005.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Tabela da área plantada de eucalipto no Brasil. Disponível em: <[http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/tabela\\_area\\_plantada.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/tabela_area_plantada.htm)>. Acesso em 20 de agosto 2005.

Esprey, L.J., Sands, P.J. e Smith, C.W. Understanding 3-PG using a sensitivity analysis. **Forest Ecology and Management.** 193: p.235-250, 2004.

GeoWorld – Apr 2000. Endeavour Maps the World in Three Dimensions. Disponível em: <<http://www.geoplance.com/gw/2000/0400/0400tec.asp>>. Acesso em 20 de março de 2003.

HOUGHTON, J.T.; JENKINS, G.J.; EPHRAUMS, J.J. Ephraums (eds.). Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. **World Meteorological Organization and United Nations Environmental Program.** Cambridge University Press. Cambridge, p.365. 1990.

IAC - Instituto de Aviação Civil. Piloto Privado: Avião. Rio de Janeiro, 1: p.246, 1989.

IPCC - PAINEL INTERNACIONAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Special Report on Emissions Scenarios. Disponível em: <[http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/ddc\\_envdata.html](http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/ddc_envdata.html)> Acesso em 17 de junho 2005.

Larcher, W. **Ecofisiologia vegetal.** RiMa. São Carlos. 531p. 2000.

Landsberg, J.J.; Waring, R.H. & Coops, N.C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. **Forest Ecology and Management,** 172: p.199-214, 2003.

Landsberg, J.J.; Johnsen, K.H.; Albaugh, T.J.; Allen, H.L. & McKeand, S.E. Applying 3-PG, a simple process-based model designed to produce practical results, to data from loblolly pine experiments. **Forest Science**, p.47:43-51, 2001.

Landsberg, J.J. e Gower, S.T. Applications of physiological ecology to forest management. Academic Press, San Diego, CA, 1997. 354p.

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

MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. Um guia para iniciantes. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/3886.html>>. Acesso em 01 de maio de 2006.

New, M., Hulme, M. e Jones, P.D. Representin4g twentieth century space-time climate variability. Part 1: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. **Journal of Climate**, 12: p.829-856, 1999.

Nozawa, T., Emori, S., Numaguti, A., Tsushima Y., Takemura, T., Nakajima, T. e Abe-Ouchi, A. e Kimoto, M. Projections of future climate change in the 21st century simulated by the CCSR/NIES CGCM under the IPCC SRES scenarios. **Present and Future of Modeling Global Environmental Change: Toward Integrated Modeling**, Eds., T. Matsuo and H. Kida, p. 15-28, 2001.

Perez-Garcia, J.; Joyce, L. A.; McGuire, A. D.; Xiao, X. Impacts of Climate Chance on the Global Forest Sector. **Climatic Change**. v. 54, p.439-461, 2002.

Sands, P.J. e Landsberg, J.J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, 163: p.273-292, 2002.

Silva, G.G.C.da. Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes. UFV, 84p, 2006. **Tese de Doutorado**.

Soares, W. e Marengo, J.A. Utilização de projeção dos cenários SRES de modelos globais do IPCC na caracterização de temperatura sobre a América do Sul ao longo do século XXI. II Conferência Regional sobre Mudanças Globais: América do Sul. **Anais**. São Paulo, 2005.

Stape, J. L. Production Ecology of Clonal *Eucalyptus* Plantations in Northeastern Brazil. Fort Collins, Colorado. 2002. **Tese de Doutorado**, p. 225.

Waring, R.H. Landsberg, J.J. & Williams, M. Net primary production of forest: a constant fraction of gross primary production? **Tree Physiology**, 18: p.129-134, 1998.