

NILTON JUNIOR LOPES RASCON

**MODELAGEM ECOFISIOLÓGICA DO DESENVOLVIMENTO DO  
EUCALIPTO NA AMAZÔNIA**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2012

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

T

R223m  
2012

Rascon, Nilton Junior Lopes, 1984-  
Modelagem ecofisiológica do desenvolvimento do  
eucalipto na Amazônia / Nilton Junior Lopes Rascon. –  
Viçosa, MG, 2012.  
xiii, 78f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Aistides Ribeiro.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 72-78

1. Ecofisiologia vegetal. 2. Eucalipto - Desenvolvimento.  
3. Reflorestamento - Modelos matemáticos. 4. Florestas -  
Administração. 5. Amazônia. I. Universidade Federal de  
Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 630.2815

NILTON JUNIOR LOPES RASCON

**MODELAGEM ECOFISIOLÓGICA DO DESENVOLVIMENTO DO  
EUCALIPTO NA AMAZÔNIA**

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: 10 de fevereiro de 2012.



Welliam Chaves Monteiro da Silva



Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza



Aristides Ribeiro  
(Orientador)

A Deus.

Em especial, à minha mãe, pela força e pela perseverança,  
pois sem ela jamais teria conseguido alcançar meus objetivos.

A toda minha família, pelo apoio constante.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela proteção e pela força para superar cada obstáculo que surgiu em minha vida.

À minha mãe Socorro, pelo carinho, pela atenção, pelo apoio, pelo incentivo e pelo sacrifício para que eu tivesse condições de conseguir alcançar meus objetivos e conseguisse chegar até aqui.

A toda minha família, em especial ao meu irmão Nildon, meu pai Nilton, minhas tias Cristina e Raimunda, minha vó Izabel e meus primos Jonatas, Alexander e Amanda, pelo apoio e pelo carinho.

A Apollo, pela parceria e pela companhia nos momentos de descontração.

Aos meus amigos de Viçosa, em especial ao pessoal da “SOPA”, André, Robson, Yhasmin, Aline, Daniela, Mariano, Welliam, Mariana e Roziane, pela ótima acolhida em Viçosa e pela ajuda em inúmeros momentos.

A Paulo Jorge, grande amigo e professor que me ofereceu a oportunidade para que eu pudesse realizar este curso de mestrado.

Ao professor Aristides, pela orientação, pela paciência, pela compreensão, pela amizade e pelo total apoio que sempre oferece aos seus orientados.

À Graça, secretária de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, sempre atenta para nossas desatenções e pela disposição em ajudar sempre.

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

A Jari Celulose, nas pessoas de Odilávio, Regiane, Kátia, Vânia, pela disponibilização da infra-estrutura material e pessoal para a coleta de dados.

A todos que, de alguma forma, tiveram uma parcela de contribuição na realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. O modelo 3-PG .....	10
2.1.1. Assimilação de carboidrato (produção de biomassa) .....	11
2.1.2. Alocação de biomassa/carbono.....	14
2.1.3. Mortalidades das árvores ou evolução do número de árvores .....	16
2.1.4. Balanço de água no solo .....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1. Área de estudo.....	19
3.2. Caracterização edáfica das regiões de estudo .....	19
3.3. Mudanças propostas ao modelo .....	23
3.3.1. Transpiração.....	23
3.3.2. Balanço hídrico.....	28
3.4. Parametrização do 3-PG .....	30

3.4.1. Levantamento dos dados de biomassa .....	30
3.4.2. Equações alométricas .....	31
3.4.3. Densidade básica da madeira .....	32
3.4.4. Disponibilidade de água no solo .....	32
3.4.5. Dados e parâmetros do clima .....	33
3.5. Calibração do 3-PG .....	34
3.6. Validação do 3-PG.....	34
3.7. Avaliação das estimativas do modelo .....	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	37
4.1. Caracterização climática das regiões do estudo.....	37
4.2 Parametrização.....	40
4.2.1. Equações alométricas .....	41
4.2.2. Densidade da madeira e fração de galhos e casca do stem .....	43
4.2.3. Atributos do solo .....	46
4.3. Calibração.....	47
4.4. Validação .....	53
4.4.1. Modificações no 3-PG .....	57
4.5. Diferenças de produtividade entre as regiões Felipe e Pilão .....	63
5. CONCLUSÕES .....	71
REFERÊNCIAS.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Recomendação de adubação para os plantios de eucaliptos praticados pela empresa ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).....	22
Tabela 2 - Equações ajustadas <sup>1</sup> , entre altura (m), matéria seca de stem ( $\text{kg planta}^{-1}$ ), em função do DAP (cm).....	42
Tabela 3 - Equações ajustadas para densidade de madeira e fração de galhos e cascas (FGC) em função da idade das árvores.....	44
Tabela 4 - Principais parâmetros do modelo-3PG com as parametrizações realizadas por Sands e Landsberg (2002), Stape (2004), Silva (2006), Borges (2009) e por Rascon (2012) neste trabalho .....	48
Tabela 5 - Médias mensais para eficiência quântica do dossel ( <i>Alpha</i> ), modulador de DPV ( <i>fDPV</i> ), modulador de água no solo ( <i>fSW</i> ) modulador fisiológico ( <i>PhysMod</i> ) coeficiente de partição para raiz e stem ( <i>pR</i> , <i>pS</i> ) e evapotranspiração para o modelo proposto e original na região de Felipe.....	61

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da área plantada com eucalyptus no estado do Pará (2005-2010).....	2
Figura 2 - Representação gráfica do modelo 3-PG adaptado por Silva (2006).	11
Figura 3 - Localização das áreas de estudos, bem como a representação do relevo através de imagem de radar SRTM com resolução espacial de 90 metros. ....	20
Figura 4 - Médias mensais de temperaturas mínima ( $T_n$ ), média ( $T_m$ ) e máxima ( $T_x$ ) do ar na região de Felipe.....	38
Figura 5 - Médias mensais de temperaturas mínima ( $T_n$ ), média ( $T_m$ ) e máxima ( $T_x$ ) do ar das regiões Pilão. ....	38
Figura 6 - Variação da média mensal dos totais diários de irradiação solar global das regiões de Felipe e Pilão. ....	40
Figura 7 - Médias mensais de DPV das regiões de Felipe e Pilão.....	41
Figura 8 - Relações alométricas entre biomassa lenhosa acima do solo e diâmetro à altura do peito (DAP).....	43
Figura 9 - Variação da densidade da madeira em função da idade das árvores. ....	44
Figura 10 - Variação da fração de galhos e casca do Stem em função da idade das árvores. ....	46
Figura 11 - Correlação entre os dados de volume, DAP e altura total observado e simulado pelo modelo proposto (A, C, E) original (B, D, F) para a região de Felipe, após a calibração. ....	51

Figura 12 - Correlação entre os dados de volume, DAP e altura total observado e simulado pelo modelo proposto (A, C, E) original (B, D, F) para a região de Pilão, após a calibração. ....	52
Figura 13 - Correlação entre os dados de volume, DAP e altura total observado e simulado pelo modelo proposto (A, C, E) original (B, D, F) para a região de Felipe, após a validação. ....	55
Figura 14 - Correlação entre os dados de volume, DAP e altura total observado e simulado pelo modelo proposto (A, C, E) original (B, D, F) para a região de Pilão, após a validação. ....	56
Figura 15 - Comportamento da média mensal da evapotranspiração calculada pelo modelo original e pelo modelo proposto.....	57
Figura 16 - Valores mensais do armazenamento de água no solo simulados pelos modelos proposto e original e da capacidade de água disponível pelo modelo proposto na região de Felipe.....	60
Figura 17 - Médias mensais dos moduladores de água no solo (fSW) e de DPV (fDPV) para a região de Felipe considerando os modelos proposto e original. ....	62
Figura 18 - Estimativas do volume total simuladas pelo modelo proposto para as regiões de Felipe e Pilão.....	64
Figura 19 - Estimativas do padrão de comportamento da condutância do dossel simuladas pelo modelo proposto para as regiões de Felipe e Pilão. ....	66
Figura 20 - Estimativas do padrão de comportamento da Eficiência do Uso da Água (EUA) simuladas pelo modelo proposto para as regiões de Felipe e Pilão. ....	67
Figura 21 - Estimativas do padrão de comportamento do Índice de Área Foliar (IAF) simuladas pelo modelo proposto para as regiões de Felipe e Pilão. ....	69

## RESUMO

RASCON, Nilton Junior Lopes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2012. **Modelagem ecofisiológica do desenvolvimento do eucalipto na Amazônia**. Orientador: Aristides Ribeiro.

Nos últimos anos, os plantios florestais têm apresentado uma considerável expansão por todo o Brasil, a exemplo do sul do Rio Grande do sul, sul da Bahia, Mato Grosso do Sul, Piauí, Tocantins, Maranhão, diversas sub-regiões dos Estados de Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina, além do estado do Pará. No Pará, a expansão dos plantios florestais vem ocorrendo de forma bastante intensa, com pouco mais de 200 mil hectares já plantados, sendo 148 mil hectares com eucalipto, dos quais 60 mil hectares plantados no Projeto Jari em plena floresta amazônica (ABRAF, 2011). Neste contexto, o estado, se mostra como um grande pólo de expansão dos reflorestamentos no Brasil, e por ser ainda uma atividade relativamente recente no Pará, necessita de pesquisas no setor voltadas para o desenvolvimento dos plantios nessas novas áreas, para que essa expansão ocorra de forma responsável. Diante dessa realidade, os sistemas de tomada de decisão florestal ou silvicultural, que têm como variáveis de entrada dados climáticos, são cada vez mais essenciais no planejamento das atividades florestais. Dentre estes se destaca a modelagem ecofisiológica de desenvolvimento de floresta plantada, uma ferramenta útil ao

planejamento estratégico para implantação e condução de plantios florestais. Assim, é essencial o aperfeiçoamento de ferramentas que possam contribuir para o planejamento e desenvolvimento do setor de florestas plantadas em algumas áreas do estado do Pará. Portanto, esse trabalho teve como objetivo geral estudar e desenvolver o conhecimento sobre modelagem ecofisiológica como um aspecto estratégico e um instrumento imprescindível para uma gestão florestal responsável na região amazônica. Especificamente o objetivo foi: a) alterar a escala temporal do cálculo do submodelo do balanço hídrico de mensal (modelo original) para diário (modelo proposto), bem como realizar mudanças no tratamento de seus componentes evapotranspiração e déficit de pressão de vapor (DPV); b) parametrizar, calibrar e validar o modelo 3-PG em algumas áreas da região amazônica para plantio de eucalipto. As mudanças realizadas no modelo proposto produziram um pequeno ganho na eficiência da estimativa dos valores (volume, DAP, altura) em relação ao modelo original, entretanto, as modificações propostas nesse trabalho reduziram o empirismo do modelo proposto, por terem melhorado o rigor físico no tratamento dos processos que envolvem o balanço hídrico (déficit de pressão de vapor e evapotranspiração). Os modelos proposto e original, apresentaram boa capacidade de extrapolação e descreveram com boa precisão os padrões de crescimento do eucalipto em termos de volume, altura e DAP. Verificou-se também um melhor ajuste/ganho pelo modelo proposto. Em relação às áreas estudadas verificou-se que os maiores níveis de abertura estomática em decorrência da maior disponibilidade de água no solo vinculado a maior precipitação, maiores taxas de radiação e maiores áreas de interceptação de energia radiante em função de maior IAF conferiram aos plantios da região de Felipe condições mais favoráveis para a realização de taxas elevadas de fotossíntese que no final do processo se traduzem em maior produtividade.

## ABSTRACT

RASCON, Nilton Junior Lopes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2012. **Modelling ecophysiological development eucalyptus in the Amazon.** Adviser: Aristides Ribeiro.

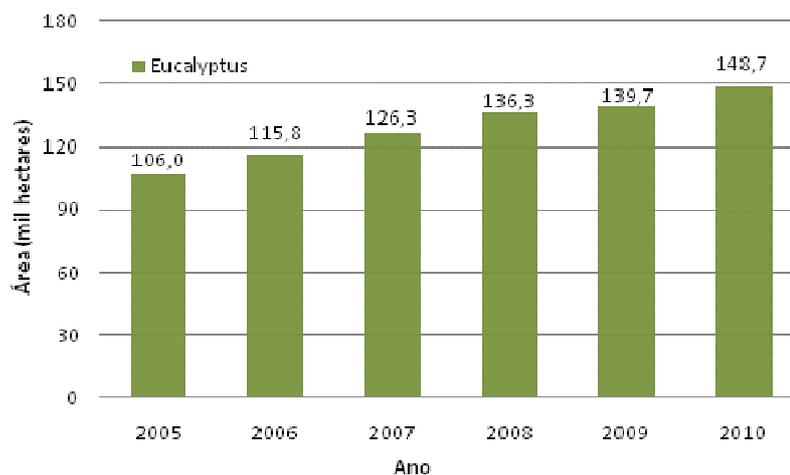
In recent years, the plantations are expanding throughout Brazil, as in the southern Rio Grande do Sul, southern Bahia, Mato Grosso do Sul, Piauí, Tocantins, Maranhão, several sub-regions of Minas Gerais, Parana and Santa Catarina, and the state of Pará. Faced with this also comes the need for research aimed at the development of plantations in these new areas. In Pará, the expansion of forest plantations is occurring quite intense, is about just over 200,000 hectares already planted 148,000 hectares of eucalyptus, of 60,000 hectares planted in full Jari Project in the Amazon rainforest. In this context, the state appears as a major center of expansion of forest plantations in Brazil, and is still a relatively recent activity in Pará, industry research needs facing the region. Given this reality, the systems of decision-making forestry or forestry, which are input variables and climatic, are increasingly essential in the planning of forest activities. Among these stands out ecophysiological modeling development of planted forest, a useful tool for strategic planning for deployment and conduct of forest plantations. It is therefore essential improvement tools that can contribute to the planning and development of planted forest sector in some areas of the state of Pará. Therefore, this study aimed to study and develop the general knowledge of ecophysiological

modeling as a strategic and an essential tool for responsible forestry management in the Amazon region. Specifically the objective was: a) change the time scale of the sub-model calculation of the monthly water balance (original model) to daily (proposed model), as well as make changes in the treatment of evapotranspiration and its components vapor pressure deficit (VPD); b) parameterize, calibrate and validate the model 3-PG in some areas of the Amazon to plant eucalyptus trees. Changes made in the proposed model produced a small gain in efficiency of the estimated values (volume, DBH, height) in the original model, however the changes proposed in this work because they have improved the physical rigors of the treatment processes that involve the water balance (vapor pressure deficit and evapotranspiration) reduced the empiricism of the proposed model. The original model proposed and showed good ability to extrapolate and described with good accuracy the patterns of growth in terms of volume, height and DBH. There was also a best fit by the model proposed. In summary the highest levels of stomatal opening due to higher soil water availability linked to higher precipitation, higher rates and larger areas of radiation interception of radiant energy due to higher IAF gave the plantations in the region of more favorable conditions for Felipe achieving high rates of photosynthesis at the end of the process translate into higher productivity.

## **1. INTRODUÇÃO**

Segundo dados da Sociedade Brasileira de Silvicultura – SBS (2008), nos últimos anos, os plantios florestais tem apresentado uma crescente expansão por todo o Brasil, a exemplo do sul do Rio Grande do sul, sul da Bahia, Mato Grosso do Sul, Piauí, Tocantins, Maranhão, diversas sub-regiões dos Estados de Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina, além do estado do Pará. Os principais parâmetros considerados pelas empresas para a expansão dos plantios florestais incluem questões como preços de terras, topografia, política de governos dos estados comprometida, qualidade dos solos, precipitação, déficit hídrico e temperaturas, dentre outros, que possam indicar os melhores níveis de produtividade das espécies de interesse a serem plantadas. Diante disso surge também a necessidade de pesquisas voltadas para o desenvolvimento dos plantios nessas novas áreas.

No Pará, a expansão dos plantios florestais vem ocorrendo de forma bastante intensa, são cerca de pouco mais de 200 mil hectares já plantados, sendo 148 mil hectares só com eucalipto (Figura 1), dos quais 60 mil hectares plantados no Projeto Jari em plena floresta amazônica (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTADORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF, 2011).



Fonte: ABRAF (2011).

Figura 1 - Evolução da área plantada com eucalyptus no estado do Pará (2005-2010).

O Projeto Jari nasceu em 1967, devido aos ideais visionários de Daniel Keith Ludwig com a finalidade de realizar um projeto de reflorestamento na região Norte. O projeto Jari é um dos maiores empreendimentos já realizados na região onde esta inserida amazônica, que transformou essas áreas em importante pólo de desenvolvimento florestal.

Atualmente na região do Jari vivem cerca de 100.000 habitantes, distribuídos pelas cidades de Laranjal do Jari (Amapá), Vitória do Jari (Amapá) e Almeirim (Pará), comprovando que o complexo do Jari é responsável pelo desenvolvimento econômico e social nessa região.

No ano de 2000, a então Jari Celulose passou a ser controlada pelo Grupo Orsa, em 2009 a empresa se junta a um conglomerado de outras empresas do setor florestal e passa a ser chamada de Jari Celulose, Papel e Embalagens S.A., uma sociedade anônima de capital fechado instalada em uma área de 1,7 milhões de hectares na Floresta Amazônica sendo sua sede no distrito de Monte Dourado município de Almeirim, estado do Pará. A companhia atua integralmente no mercado brasileiro de papel e celulose, sendo a maior exportadora de celulose do estado, com um volume de vendas próximo a 347 mil toneladas em 2010, vendendo a maior parte de sua produção para a Europa, Ásia e Brasil.

Em 2007, antes da crise financeira mundial, os produtores mundiais venderam 12,8 milhões de toneladas de celulose eucalipto branqueada. A Jari respondeu por 3% desse volume, com vendas totais 364 mil toneladas, gerando um faturamento bruto de cerca de US\$ 244,4 milhões, segundo o Relatório de Sustentabilidade do Grupo Orsa.

Por outro lado as regiões sul e sudeste do estado do Pará concentram cerca de 88 mil hectares de florestas plantadas com eucalipto (ABRAF, 2011), esses plantios florestais surgem como uma alternativa viável de desenvolvimento, contribuindo para geração de emprego e renda nessas áreas, e principalmente reduzem a pressão do desmatamento sobre as florestas naturais no restante da Amazônia.

Quando uma atividade econômica passa para a legalidade, indissociavelmente suas responsabilidades ambientais se tornam mais rígidas, em comparação ao que era feito antes. Assim, a produção de carvão vegetal oriunda de plantios florestais, na medida em que for representando um maior percentual na produção de ferro gusa, tenderá à redução das pressões sobre florestas nativas ou em regeneração que ainda são usadas para conversão em carvão e abastecimento da indústria siderúrgica no Pará. Segundo a ABRAF, 55% da produção de carvão vegetal para a siderurgia ainda é proveniente de florestas nativas.

Com o avanço desses plantios muitos empregos são gerados, sejam em função de arrendamentos de terras para o plantio pelas próprias empresas, seja pela atividade de fomento, no qual o empreendedor se compromete com a compra da produção, além de oferecer assistência técnica ao pequeno produtor, sejam aqueles diretamente ligados as empresas. Segundo dados do Cadastro Geral de Empregados e Desempregados do Ministério do Trabalho e Emprego (BRASIL, 2011), em 2010 estima-se que o setor de floresta plantada apresenta cerca de 640 mil empregos diretos e 1,5 milhão em indiretos no Brasil.

Nas regiões sul e sudeste do estado, está localizado parte do Pólo Siderúrgico de Carajás, o segundo maior exportador nacional de ferro gusa com uma demanda alta de carvão vegetal, o que vem levando nos últimos anos a consolidação das florestas energéticas no estado do Pará. Nessas áreas a produção florestal convertida em carvão, lenha e energia destina-se tanto ao

consumo industrial quanto doméstico, entretanto o consumo industrial responde por cerca de 90% de tudo que é produzido (ABRAF, 2011).

Dessa forma, o Pará, se mostra como um grande pólo de expansão dos plantios florestais no Brasil, e por ser ainda uma atividade relativamente recente no estado, necessita de pesquisas no setor voltadas para a região.

Diante desse contexto, os sistemas de tomada de decisão florestal ou silvicultural, que têm como variáveis de entrada dados climáticos, são cada vez mais essenciais no planejamento das atividades florestais. Dentre estes se destaca a modelagem ecofisiológica de desenvolvimento de floresta plantada, uma ferramenta útil ao planejamento estratégico para implantação e condução de plantios florestais.

Com os avanços no desenvolvimento de modelos capazes de simular o crescimento e a produtividade de florestas comerciais, esses modelos vêm deixando de ser uma ferramenta somente de planejamento para serem usados também em nível de manejo florestal. Entretanto, verifica-se a necessidade de melhorar a base de dados climáticos que alimentam esses modelos, bem como adaptá-los às peculiaridades ambientais e ao manejo que é desenvolvido pelas empresas, como é o caso do modelo 3-PG – Physiological Principles Predicting Growth (LANDSBERG; WARING, 1997).

Uma das vantagens desse modelo está no fato de permitir o acompanhamento do desenvolvimento de variáveis de importância para o gerenciamento florestal (IAF, IMA, Volume, DAP, Altura, Área basal, etc.) em nível de região devido à possibilidade de sua alimentação com dados climáticos gerados de forma contínua pelas estações meteorológicas espalhadas em campo.

Os trabalhos realizados com o 3-PG no Brasil têm alcançado bons resultados, sendo aplicado em diversas condições ambientais: No litoral norte da Bahia (STAPE et al., 2004), na região de Aracruz, litoral norte do Espírito Santo (ALMEIDA et al., 2004), na região de Paracatu, oeste de Minas Gerais (TSUKAMOTO FILHO et al., 2004), na região de Curvelo e Itacambira em Minas Gerais (BORGES, 2009), entre o norte do Espírito Santo e Sul da Bahia (BAESSO et al., 2010), no Sudoeste do Mato Grosso (BEHLING, 2009), na região do rio doce em Minas Gerais (SILVA, 2006; SILVA, 2007), e na região do Guaíba no Rio Grande do Sul (LONDERO, 2010).

Na região amazônica, porém estes são praticamente inexistentes, sendo um dos principais problemas a falta de informações e tecnologias adaptadas para esta região. Por mais que se tenha conseguido grandes avanços no ajuste do modelo 3-PG no Brasil, ainda não se conhece o desempenho do modelo na região amazônica.

Diante dessa realidade, surge a necessidade de pesquisas voltadas para o desenvolvimento dos plantios florestais nessas novas fronteiras agrícolas, uma vez que o reflorestamento é uma atividade relativamente recente na região amazônica, necessitando, portanto, de estudos para o pleno sucesso do eucalipto na região.

Assim, é essencial o aperfeiçoamento de ferramentas que possam contribuir para o planejamento e desenvolvimento do setor de florestas plantadas em algumas áreas da região amazônica.

Nesse contexto, foi testada a seguinte hipótese: melhorar o rigor físico no tratamento da evapotranspiração, déficit de pressão de vapor e balanço hídrico, pode conferir ao modelo 3-PG maior precisão em suas simulações na região amazônica.

Assim, esse trabalho teve como objetivo geral estudar e desenvolver o conhecimento sobre modelagem ecofisiológica como um aspecto estratégico e um instrumento imprescindível para uma gestão florestal responsável na região amazônica. Especificamente o objetivo foi:

- Alterar a escala temporal do cálculo do submodelo do balanço hídrico de mensal (modelo original) para diário (modelo proposto), bem como realizar mudanças no tratamento de seus componentes evapotranspiração e déficit de pressão de vapor (DPV);
- Parametrizar, calibrar e validar o modelo 3-PG para plantios de eucalipto em algumas áreas da região amazônica;
- Avaliar o desempenho dos modelos original e proposto para observar a capacidade de extrapolação dos mesmos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os modelos são ferramentas importantes para sintetizar o conhecimento científico, bem como para melhorar a compreensão sobre a ecologia de culturas. Modelo é uma abstração, uma representação física e simplificada de sistemas reais são ferramentas úteis para redução do tempo e do custo da experimentação de campo.

Uma das vantagens da utilização de modelos na resolução de problemas está na capacidade destes em estimar valores do sistema que representa. Devido à complexidade do crescimento e desenvolvimento dos vegetais, o modelo não considera a totalidade dos processos e variáveis envolvidas no crescimento das culturas, ou seja, o modelo é uma simplificação da realidade.

De modo geral, a modelagem pode ser entendida como a construção de uma representação matemática de sistemas biológicos, que incorporam conhecimentos sobre mecanismos fisiológicos e ecológicos por meio de algoritmos preditivos. (JOHNSEN et al., 2001; GOMES; VARRIALE, 2004).

A modelagem da produção de bens madeireiros tem se apoiado tradicionalmente nos chamados modelos empíricos, ou determinísticos. Estes métodos buscam relações lineares ou não-lineares entre a variável dependente de interesse e as variáveis independentes. Esses modelos empíricos ajustados para as condições locais são sito-específicos, impossibilitando extrapolação ou

simulações para outras condições diferentes das utilizadas no estabelecimento do modelo. (ALVARES, 2011).

Stape (2002) relata que os modelos empíricos de crescimento e rendimento para a estimativa da produção florestal apresentam as seguintes limitações: (i) não podem ser utilizados para estimar a produtividade em paisagens não-florestal, (ii) em curto prazo, esses modelos são insensíveis às variações climáticas interanuais, o que pode afetar dramaticamente a produção final das florestas de rotação de curta duração devido a um ou mais anos terem baixas condições de crescimento, e (iii) as mudanças nas práticas de manejo entre rotações podem alterar as relações empíricas.

Por outro lado, Alvares (2011) aponta que os modelos baseados em processos possuem capacidade preditiva espacial e temporal, e se devidamente calibrados e validados, podem fornecer estimativas confiáveis. Stape (2002) mostra que os principais objetivos no uso desses modelos são o de (i) avaliar os riscos da variação e mudanças climáticas na produção florestal, (ii) estimar a produtividade potencial e atingível, (iii) identificar fatores ambientais limitantes ao crescimento, (iv) criar programas de manejo florestal e (v) avaliar a produtividade florestal em longo prazo.

Dessa forma para entender os processos que governam o crescimento das plantas, faz-se necessário o uso dos chamados modelos ecofisiológicos. Segundo Landsberg (1986), esses modelos pressupõem a existência de um sistema cujos compartimentos são relacionados através de processos físicos ou biológicos, os quais são alicerçados em teorias físicas e ecológicas.

Diversos modelos baseados em processos ecofisiológicos têm sido idealizados para estimar a produtividade de povoamentos florestais como o Maestro (WANG; JARVIS, 1990), o Forest-BCG (RUNNING; GOWER, 1991), o Biomass (McMURTRIE et al., 1992), o PnET (ALBER; FEDERER, 1992) e o Tregov (WEINSTEIN et al., 1991). Esses modelos são essencialmente ferramentas de pesquisa e ainda têm de ser simplificado o suficiente para garantir o interesse de uso pelos pesquisadores florestais, tais modelos apresentam obstáculos para uma devida utilização prática, em virtude da complexidade dos processos fisiológicos envolvidos, e, conseqüentemente, da grande quantidade de informações e parametrização cuidadosa para que eles possam ser executados (LANDSBERG; WARING, 1997).

Diante disso, é que surge o modelo ecofisiológico 3-PG, apesar de ser classificado como modelo processual, é relativamente simples no que se refere aos parâmetros de inicialização de solo e clima, tornando-o prático. Este fato aliado à disponibilidade do código do programa, à grande abundância de bibliografia e aos bons resultados faz com que esse modelo seja o mais utilizado no setor florestal.

O desempenho do 3-PG em estimar a produtividade de florestas comerciais de eucalipto e de pinus tem sido avaliado em países como a Austrália (COOPS et al., 1998b; TICKLE et al., 2001; SANDS; LANDSBERG, 2002; LANDSBERG et al., 2003), Nova Zelândia (WHITEHEAD et al., 2002), EUA (COOPS et al., 2000b; COOPS; WARING, 2001a e 2001b), Portugal (ALEXANDRE, 2009) e África do Sul (DYE, 2001). No Brasil, o desempenho do 3-PG tem sido avaliado a partir de dados obtidos em plantios de empresas florestais situadas nos Estados da Bahia (STAPE, 2002; STAPE et al., 2004) e do Espírito Santo (ALMEIDA et al., 2003; ALMEIDA et al., 2004a e 2004b), além da região da bacia do Rio Doce em Minas Gerais (SILVA, 2006; SILVA, 2007) e do cerrado de Minas Gerais (BORGES, 2009) etc.

Silva (2006) parametrizou o modelo 3-PG para o *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, na região centro leste de Minas Gerais, utilizando dados de um experimento fertirrigado, a biomassa de folhas, o índice de área foliar, a biomassa de lenho, o DAP e o IMA, nos três primeiros anos de simulação, foram estimados com precisão pelo modelo 3-PG. Silva (2007), usando as parametrizações de Silva (2006), realizou ajustes nos módulos dos balanços hídricos e de energia, e verificou que as alterações permitiram uma melhora no tratamento dos processos, de forma que a ferramenta computacional de simulação se mostra capaz de diferenciar a produtividade não apenas entre diferentes regiões, como já fazia o modelo original, mas permite diferenciação intra-regiões.

Em pesquisa conduzida usando um modelo de crescimento e produção de uso comum na área florestal proposto por Sullivan e Clutter (1972), além do 3-PG, Stape (2002) simulou o crescimento de eucalipto em um experimento de fertirrigação realizado na Bahia, durante dois anos de oscilação climática, principalmente com relação à precipitação. Nesse trabalho, o autor concluiu que o modelo 3-PG apresentou melhor desempenho estatístico na simulação

da produtividade quando comparado ao outro modelo tendo como referencia os dados medidos em campo. Dessa forma, foi demonstrada a sensibilidade do modelo 3-PG às variações nos fatores ambientais determinantes da produtividade (radiação solar, temperatura, água e nutrientes).

Ao avaliar a capacidade do modelo 3-PG de se ajustar a uma ampla variação de dados de crescimento florestal, em plantios experimentais e comerciais, na África, Austrália e norte da Europa, Landsberg et al. (2003) concluíram que em todos os casos foi possível simular com boa precisão os dados observados. Os resultados mostraram que o 3-PG é confiável, podendo ser usado para prever o crescimento florestal em áreas ainda não exploradas comercialmente e para determinar a produtividade em áreas já plantadas.

Alexandre (2009) desenvolveu um trabalho para determinar valores dos parâmetros do modelo 3-PG para a espécie *Pinus pinaster* em Portugal. De forma geral, os parâmetros encontrados produziram no modelo resultados razoáveis na simulação da biomassa aérea. Em outra pesquisa, BORGES (2009) demonstrou que a parametrização e calibração realizadas no modelo 3-PG para regiões de cerrado de Minas Gerais foram eficientes, tornando o 3-PG eficaz para simular o crescimento de florestas de eucalipto. Nesse último trabalho, a parametrização e calibração do modelo 3-PG em nível local promoveram melhorias no desempenho do modelo e resultaram em estimativas mais acuradas do crescimento de plantios de eucalipto, demonstrando também, a necessidade de cautela ao se utilizar as parametrizações para áreas diferentes das quais foram geradas.

Baesso et al. (2010) avaliaram o impacto das mudanças climáticas na produtividade do *Eucalyptus grandis* numa região situada entre os estados do Espírito Santo e Bahia. Os resultados indicaram que as mudanças futuras (anos 2071 a 2100) no clima provocaram decréscimos na produtividade dos plantios de *Eucalyptus grandis*, chegando a apresentar uma redução de até 40%, demonstrando a vulnerabilidade das florestas plantadas à variação climática. A conclusão dos autores foi que o modelo de crescimento 3-PG associado a simulações de mudanças climáticas mostrou-se útil na projeção da produtividade futura do eucalipto.

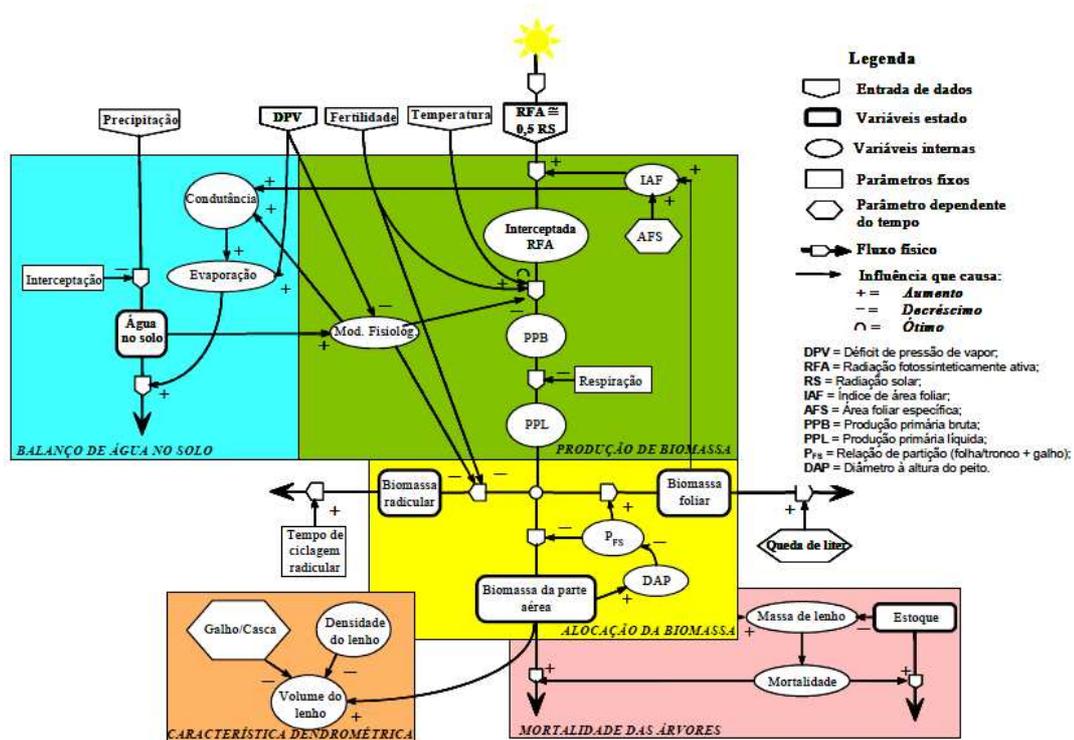
## 2.1. O modelo 3-PG

O 3-PG denominado de Physiological Principles Predicting Growth (Princípios Fisiológicos de Predição do Crescimento) é um modelo desenvolvido por Landsberg e Waring (1997). Ele prevê o desenvolvimento de um povoamento, a disponibilidade de água no solo ao longo do tempo e a transpiração com uma periodicidade mensal. Calcula também variáveis de interesse para o planejamento florestal como o índice de área foliar, a área basal, o diâmetro quadrático médio além do volume por hectare e o incremento médio anual. Como variáveis primárias de resposta são obtidas a produtividade primária líquida e a alocação de carbono para as folhas, tronco e raízes etc.

Requer, como dados climáticos, normais climatológicas de radiação solar, temperatura mínima e máxima do ar e precipitação. No entanto aceita também valores médios mensais dessas variáveis.

Os dados de entrada do povoamento que o modelo necessita são os valores iniciais de biomassa de folhas, “*stem*” e raízes. Outros dados iniciais também são necessários como latitude, índice de fertilidade e o valor máximo de água que o solo pode conter. O modelo apresenta também parâmetros genéricos, ou seja, aqueles conhecidos da ecologia da espécie e relativamente constantes e também obtidos de literatura.

O 3-PG consiste basicamente de cinco submodelos: produção de biomassa; alocação de biomassa entre folhas, raízes e lenho (incluindo galhos e cascas); mortalidade de árvores; balanço de água no solo e um módulo para converter biomassa em variáveis de interesse para manejo florestal (Figura 2).



Fonte: Adaptado de Silva (2006).

Figura 2 - Representação gráfica do modelo 3-PG adaptado por Silva (2006).

### 2.1.1. Assimilação de carboidrato (produção de biomassa)

Essencialmente para o cálculo da produtividade primária bruta  $[P_G(t_{DM}ha^{-1})]$ , o 3-PG considera que a radiação fotossinteticamente ativa incidente  $[PAR \text{ ou } \phi_P (mol m^{-2})]$  é 50% da radiação solar global  $[Rg \text{ ou } Q(MJm^{-2}d^{-1})]$ , entretanto nem toda radiação PAR incidente é absorvida pelo dossel das árvores. Assim o 3-PG estima a Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida pelo Dossel  $[RFAA \text{ ou } \phi_{Pa} (mol m^{-2})]$  por meio da lei de Beer. A lei de Beer descreve o decréscimo exponencial da luz, ao penetrar nas copas das árvores em toda a extensão da cobertura vegetal (equação 1). Ela também é uma forma simplificada para calcular a quantidade de Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida (RFAA).

$$I_z = I_0 \cdot e^{-K \cdot IAF} \quad (1)$$

em que  $I_z$  é a intensidade da radiação a uma determinada altura do dossel;  $I_0$ , a intensidade de radiação no topo das copas, representada pela PAR;  $K$ , o coeficiente de extinção ou atenuação, que representa o grau de diminuição da radiação no interior do dossel, seja por absorção ou espalhamento; IAF, a soma total da superfície foliar, de cima para baixo até a altura  $Z$ , por unidade de área de solo (IAF acumulado) (LARCHER, 2000).

Depois de quantificada a RFAA, o 3-PG estima a quantidade de  $CO_2$  fixado por unidade de energia radiante absorvida (fótons), que representa a eficiência quântica do dossel [ $\alpha_c (mol mol^{-1})$ ], pressupondo que cada 1 MJ de radiação solar é equivalente a 2,3 mol de PAR. O valor dessa eficiência de conversão é calculado a partir de um valor de eficiência quântica máxima do dossel [ $\alpha_{cX}(mol mol^{-1})$ ]. Dessa forma, a quantidade de radiação utilizada na biossíntese é controlada pelas limitações ambientais incorporadas ao 3-PG pela multiplicação de moduladores adimensionais, apropriadamente calculados, cujos valores variam de 0 (condições de extrema limitação) a 1 (condições sem limitação). Esses moduladores são o déficit de pressão de vapor ( $f_{DPV}$ ), a temperatura ( $f_T$ ), dias de geadas ( $f_F$ ), idade da população ( $f_I$ ) e disponibilidades hídrica ( $f_{SW}$ ) e nutricional ( $f_N$ ).

Os moduladores que se referem ao balanço de água no solo ( $f_{SW}$ ), déficit de pressão de vapor ( $f_{DPV}$ ) e idade da população ( $f_I$ ) compõem o chamado modulador fisiológico ( $\varphi$ ), definido pela equação 2.

$$\varphi = f_I \min. \{f_{DPV}, f_{SW}\} \quad (2)$$

O modulador  $\varphi$  atua diretamente no processo fotossintético. Os moduladores  $f_{DPV}$  e  $f_{SW}$  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  $f_{SW}$  atuará limitando o crescimento no período de estimativa considerado (LANDSBERG et al., 2001). Os 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 pode ser calculada pela equação 3.

$$\alpha_C = \alpha_{CX} f_T f_F f_N \varphi \quad (3)$$

O efeito da fertilidade do solo influencia indiretamente a eficiência quântica do dossel, por meio do modulador  $f_N$ , o qual é dependente do nível de fertilidade do solo  $FR$ , podendo variar de 0 (baixa fertilidade) a 1 (sem limitação nutricional). A relação entre o valor de  $FR$  e o modulador de fertilidade  $f_N$  é dado pela equação 4.

$$f_N(FR) = 1 - [(1 - f_{N0}) \cdot (1 - f_{N0})^{nfN}] \quad (4)$$

em que  $f_{N0}$  é o valor de  $f_N$  quando  $FR$  for igual a zero;  $nfN$ , a potência da equação.

O valor de  $FR$  é obtido empiricamente, baseando-se em características físicas e químicas do solo e em dados sobre crescimento florestal.

Para contornar a dificuldade na determinação de  $FR$ , que é utilizado como variável de entrada no 3-PG, alguns trabalhos consideram a mesma como variável ajustável (LANDSBERG et al., 2001; LANDSBERG et al., 2003), ou seja, dependendo das condições locais, esta variável pode ser ajustada para possibilitar melhor relação entre os valores observados e estimados, mantendo-se as outras variáveis de entrada constantes. Landsberg et al. (2003) propõem valores de 0,6 e 1 para  $f_{N0}$  e  $nfN$ , respectivamente. Após a consideração de todas essas limitações impostas pelo ambiente, por meio dos moduladores, o 3-PG estima a relação entre a produção primária bruta ( $P_G$ ) e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (RFAA) por meio da equação 5.

$$P_G = \alpha_C \cdot RFAA \alpha_{CX} \cdot f_T \cdot f_F \cdot f_N \cdot \varphi \cdot RFAA \quad (5)$$

O modelo considera que, com relação à biomassa vegetal, em cada 1 g de matéria seca existe 0,5 g de carbono, sendo assim em cada 1 mol de carbono fixado são gerados 24 g de matéria seca vegetal, uma vez que a massa molar do carbono é igual a 12 g, dessa forma as considerações dos

fatores de conversão de unidade, a  $P_G$  é expressa em  $t/ha$  de matéria seca vegetal.

A relação entre a produção primária líquida ( $P_N$ ) e a  $P_B$  equivale a um coeficiente de uso de carbono. Observa-se que essa relação ( $P_B/P_N$ ) varia pouco e fica compreendida na faixa entre 0,45 e 0,05 para uma gama de variedade de florestas conforme citados por Landsberg e Waring (1997). O 3-PG considera o valor de 0,47 para a referida relação, que é ajustável de acordo com as características dos plantios, o que elimina a necessidade de cálculos referentes às perdas de carbono por meio da respiração. Para Landsberg e Waring (1997), o erro que se comete ao adotar esse intervalo de valores para o relacionamento ( $P_B/P_N$ ) muito provavelmente é menor do que resultaria do cálculo da respiração.

### **2.1.2. Alocação de biomassa/carbono**

No processo de fotossíntese ocorrido nas folhas, os produtos gerados são transportados para diferentes partes das árvores e usados tanto na respiração de manutenção quanto na respiração de crescimento (material estrutural).

Landsberg e Waring (1997) mencionam que na distribuição da biomassa oriunda da produção primária líquida ( $P_N$ ), primeiramente calcula-se a quantidade alocada para o crescimento e renovação das raízes finas, seguindo duas generalizações de alocação de carbono em árvores:

- Há uma significativa correlação inversa entre o crescimento do fuste e a fração da  $P_N$  alocada para as raízes;
- A maior fração de  $P_N$  é alocada para raízes finas (entre 25% e 60%), de acordo com as condições ambientais fiquem mais restritivas.

Esses argumentos são respaldados através do conceito de equilíbrio funcional na determinação da proporção raízes/parte aérea.

A alocação de biomassa para as raízes é determinada pelas condições de ambientais de crescimento. O modelo 3-PG utiliza os moduladores ambientais ( $f_{SW}$ ,  $f_{DPV}$ ,  $f_N$ ) para simular as restrições ambientais. Assim, a fertilidade do solo, além de influenciar a eficiência quântica máxima do dossel,

influencia também a alocação de biomassa para o sistema radicular, por meio da variável  $m$ , que depende da taxa de fertilidade do solo.

$$m = m_0 + (1 - m_0)FR \quad (6)$$

em que  $m_0$  corresponde ao valor de  $m$  em solos de baixa fertilidade ( $FR = 0$ ).

O valor  $m$  é incluído na equação empírica que calcula a alocação de biomassa para as raízes para determinar os efeitos da fertilidade do local nas taxas de alocação.

$$n_R = \frac{n_{Rx}n_{Rn}}{n_{Rn} + (n_{Rx} - n_{Rn})m\varphi} \quad (7)$$

em que  $n_R$  é o coeficiente de alocação para raízes;  $n_{Rx}$ , máximo valor do coeficiente de alocação para as raízes;  $n_{Rn}$ , mínimo valor do coeficiente de alocação para as raízes;  $\varphi$ , modulador fisiológico.

Considerando o equilíbrio funcional da planta, quanto maior for a limitação hídrica e, ou nutricional representada pelos seus respectivos moduladores, maior será o coeficiente de alocação de biomassa para as raízes ( $n_R$ ).

A alocação de biomassa para as folhas ( $n_F$ ) e “stem” ( $n_S$ ) também varia com as condições de crescimento e depende do tamanho médio das árvores, de tal maneira que  $n_F$  diminui e  $n_S$  aumenta com a idade dos povoamentos. Landsberg e Waring (1997) determinaram no 3-PG, que a partição da biomassa da parte aérea ( $n_F$  e  $n_S$ ) esta baseada em relacionamentos alométricos em função do diâmetro médio [ $B$  (cm)]. O diâmetro é determinado a partir da biomassa do tronco ( $w_S$ ) ao nível do povoamento, que é dividida pelo atual número de árvores, e invertendo a relações alométrica entre  $w_S$  e  $B$ . Assim a razão de partição entre biomassa de folhas e stem ( $pFS = n_F/n_S$ ) é também uma função alométrica do diâmetro.

$$w_S = a_S B^{n_S} \quad (8)$$

em que  $a_S$  e  $n_S$  são parâmetros ajustados.

$$pFS = a_p B^{n_p} \quad (9)$$

em que  $a_p$  e  $n_p$  são parâmetros obtidos com base nas equações 10 e 11.

$$n_p = \frac{\ln(pFS_{20}/pFS_2)}{\ln(20/2)} \quad (10)$$

$$a_p = \frac{pFS_2}{2^{n_p}} \quad (11)$$

em que  $pFS_2$  é a partição de biomassa folha/stem para  $B = 2 \text{ cm}$ ;  $pFS_{20}$ , a partição de biomassa folha/stem para  $B = 20 \text{ cm}$ .

A alocação de biomassa para stem ( $n_s$ ) é calculado com base na equação abaixo.

$$n_s = \frac{(1-n_R)}{1+pFS} \quad (12)$$

A alocação de biomassa para as folhas ( $n_f$ ) é obtida subtraindo valor dos coeficientes de alocação de biomassa de raiz e stem.

$$n_f = 1 - n_R - n_s \quad (13)$$

### 2.1.3. Mortalidades das árvores ou evolução do número de árvores

Uma das informações mais valiosas para fins econômicos é o volume final de madeira de fuste, considerando-se a mortalidade durante o período. Para obter essas alterações no número de árvores dos plantios ao longo dos anos, o 3-PG utiliza um submodelo derivado da lei dos 3/2 ou autodesbaste e taxas de crescimento do tronco.

Um limite superior ( $W_{sx}(\text{Kg árvore}^{-1})$ ) da biomassa de troncos ( $w_s$ ) é calculado para um determinado valor de densidade do plantio ( $N$ ). A lei do autodesbaste é parametrizada por uma estimativa de  $W_{sx}$  para a árvore média em plantios em autodesbaste. Se em dado momento a biomassa de fuste da árvore média é maior que  $W_{sx}$ , a população é reduzida até um número

consistente com  $W_{Sx}$ . Quando há remoção de árvores assume-se que não ocorre perda de folhas, ou seja, isso simula o fato de que as árvores que morrerem são normalmente as mais fracas e menores e com muito poucas folhas (SANDS; LANDSBERG, 2002).

$$w_{Sx} = w_{Sx1000} \left( \frac{1000}{N} \right)^{3/2} \quad (14)$$

em que  $w_{Sx1000}$  é a máxima massa de caule por árvore (1.000 árvores/hectare).

#### 2.1.4. Balanço de água no solo

O balanço hídrico é um sistema de contabilização da água do solo, em que a variação do armazenamento, num intervalo de tempo, representa o balanço entre as entradas e saídas de água do local considerado (SILVA, 2007).

O 3-PG inclui um modelo simples de balanço hídrico, que trabalha em base de tempo mensal. A precipitação mensal (mais irrigação) é balanceada contra a evapotranspiração mensal calculada utilizando a equação de Penman-Monteith (LANDSBERG; GOWER, 1997). A interceptação do dossel é uma percentagem da chuva que varia em função do IAF e a água em excesso no solo é perdida como escoamento superficial.

$$ASW = ASWi + Rain + \left( 100 * \frac{applIrrig}{12} \right) - EvapoTransp \quad (15)$$

em que  $ASW$  é a disponibilidade de água no solo;  $ASWi$ , a disponibilidade de água no solo imediatamente anterior;  $Rain$ , a precipitação;  $applIrrig$ , a irrigação, quando houver; e  $EvapoTransp$ , a evapotranspiração.

Para calcular a evapotranspiração, o modelo 3-PG usa a fórmula abaixo.

$$Evaptransp = Transp + RainIntcptn \quad (16)$$

em que *Transp* é a transpiração; *RainIntcptn*, a interceptação da chuva pelo dossel.

$$Transp = \left( \frac{e20 * netRAD + (rhoAir * lambda * (0,000622) * gBL)}{(1 + e20 + (gBL / gC))} \right) \quad (17)$$

em que *e20* é a pressão de saturação de vapor com T a 20°C (2,2 KPa); *netRAD*, o balanço de radiação ( $MJ m^{-2} dia^{-1}$ ); *gBL*, a camada limite de condutância constante (0,2 m s<sup>-1</sup>); *gC*, a condutância do dossel (m s<sup>-1</sup>); *rhoAir*, a densidade do ar [ $1,2(kg/m^3)$ ]; e *lambda*, o calor latente de vaporização da água [ $(J/kg)24600000$ ].

O balanço de radiação é calculado pelo modelo de acordo com a equação abaixo:

$$netRad = Q_a + Q_b * \left( Q * 10^6 / h \right) \quad (18)$$

em que *Q<sub>a</sub>* é -90; *Q<sub>b</sub>*, 0,8; *Q*, radiação solar global incidente ( $MJ m^{-2} dia^{-1}$ ); *h*, comprimento do dia.

O comprimento o dia calculado pelo 3-PG leva em consideração o 15° dia do mês, uma vez que o modelo simula em base mensal.

A interceptação da chuva pelo dossel é dada pela equação abaixo:

$$RainIntcptn = Rain * MaxIntcptn * Minimum \left( 1, \frac{LAI}{LAI_{maxIntcptn}} \right) \quad (19)$$

em que *Rain* é a precipitação; *MaxIntcptn*, a máxima proporção de precipitação evaporada pelo dossel (0,15); *LAI*, o índice de área foliar; *LAI<sub>maxIntcptn</sub>*, o índice de área foliar para a máxima interceptação da precipitação.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Área de estudo**

O estudo foi conduzido em plantios florestais clonais híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* pertencentes à Jari Celulose, Papel e Embalagens S/A, localizada entre os Estados do Pará (oeste) e Amapá (sul) (Figura 3). A região de Felipe possui 11.600 hectares e está localizada no município de Laranjal do Jari no extremo sul do estado do Amapá. Já a região de Pilão possui uma área de 3.500 hectares de plantios de eucaliptos e localiza-se no município de Almerim ao centro norte do estado do Pará, região conhecida como Calha Norte do rio Amazonas. Foram escolhidas essas duas regiões da empresa, buscando representar a variação de produtividade e climática que ocorrem nas áreas de plantios.

#### **3.2. Caracterização edáfica das regiões de estudo**

Todas as informações constantes nessa seção foram fornecidas pela empresa e reflete estudos que vem sendo desenvolvidos ao longo de anos de pesquisas.

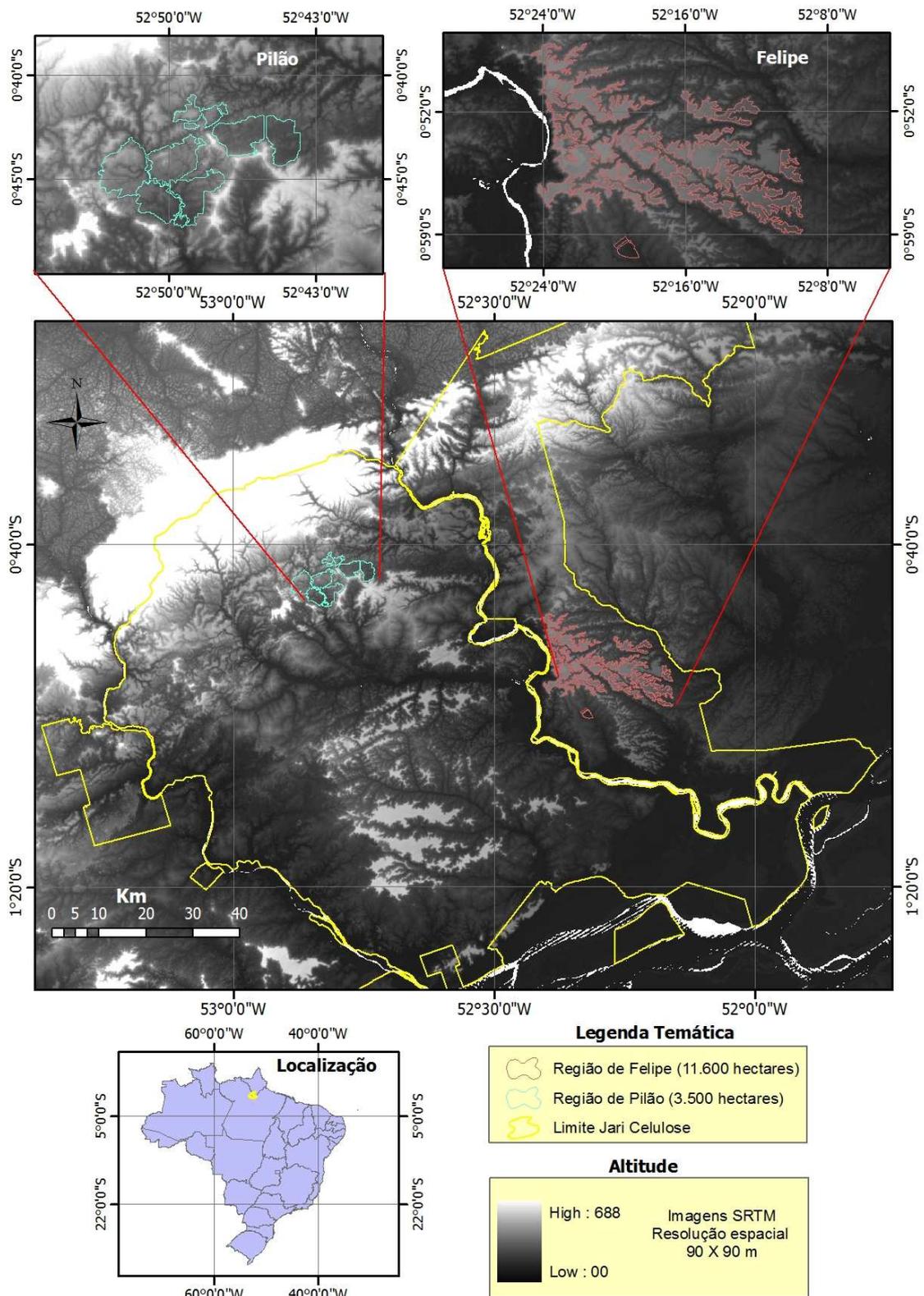


Figura 3 - Localização das áreas de estudos, bem como a representação do relevo através de imagem de radar SRTM com resolução espacial de 90 metros.

As plantações florestais da empresa estão implantadas sobre 52 tipos de solos, pertencentes a quatro formações geológicas: Barreiras, Curuá, Diabásio Penatecaua e Trombetas (NOGUEIRA, 2005). A ampla variedade de solos dentro de uma mesma sub-bacia do Amazonas é substancialmente atribuída às características de heterogeneidade dos sedimentos geológicos que os formaram e moldaram, sendo predominantemente determinados pelo relevo (BAUCH et al., 2004).

Ao analisar a distribuição das classes de solos em toda a área da empresa, os latossolos amarelos e os argissolos vermelho-amarelos são majoritários. A ocorrência de outros tipos de solo é expressa em menor quantidade pela terra roxa estruturada, os plintossolos e os cambissolos.

Diante dessa ampla variedade de tipos de solos, foram definidas as Unidades de Manejo com base no levantamento semi-detalhado de solos.

Os critérios utilizados para sua definição foram baseados nas propriedades físico-químicas desses solos. Com base na avaliação dessas propriedades foram definidas quatro Unidades de Manejo, sendo que a região de Felipe é classificada como solos pertencentes à Unidade de Manejo 1 e a região de Pilão como pertencentes à Unidade de Manejo 2.

A Unidade de Manejo 1 é composta por solos muito argilosos e profundos, localizados principalmente nas regiões denominados de Planalto, Felipe e Bauxita. Nesses locais o relevo predominante é plano, facilitando a mecanização para o preparo do solo. Os altos teores de argila desses solos podem dificultar a expansão do sistema radicular do eucalipto. Por esse motivo tem-se recomendado profundidades maiores de subsolagem nesses solos para favorecer a expansão das raízes.

A Unidade de Manejo 2 é composta por solos muito argilosos, localizados nas regiões denominadas de Pacanari, Pilão e Nova Vida. Os solos componentes dessa Unidade, também são muito argilosos e possuem fertilidade natural maior que os da Unidade 1, por serem de formação geológica diferente, tendo sido esse critério determinante para que fossem separados da Unidade de Manejo 1 e inseridos numa Unidade de Manejo própria. As considerações feitas a respeito dos altos teores de argila são as mesmas da Unidade de Manejo 1, porém em alguns tipos de solo da Unidade 2 não é

possível a subsolagem profunda devido à existência de impedimento físico (pedregosidade).

A região de Felipe localiza-se exclusivamente numa extensa camada de latossolos amarelos com relevo pouco ondulado. Esses solos são profundos de caráter álico e suas principais limitações decorrem de forte acidez, alta saturação com alumínio extraível e baixa fertilidade química natural. Nessa região a prática de calagem é maior quando comparada à região de Pilão (Tabela 1) e objetiva a neutralização do efeito tóxico do alumínio para as plantas e também o fornecimento de cálcio ou magnésio.

Tabela 1 - Recomendação de adubação para os plantios de eucaliptos praticados pela empresa (kg ha<sup>-1</sup>)

Unidade de manejo	Textura	Antes do plantio		Após o plantio			
		FNR Arad	Calcário (PRNT=95%)	0-20 dias	60-90 dias	10-12 meses	18-24 meses
				NPK 6-30-6	NPK 15-00-30	NPK 15-00-30	NPK 15-00-30
1	Muito argilosa	421	700	150	113	113	113
2	Muito argilosa	421	600	100	100	100	100

Para Ferreira (1988), uma das características mais marcantes dos latossolos amarelos é a coesão (duro ou tenas) manifestada entre os horizontes A e B, entretanto tornam-se friáveis (dissolvidos) quando úmidos.

A região de Felipe apresenta um elevado índice pluviométrico, mas com um período seco bem definido o que confere a manifestação da coesão nos solos dessa região. Esse fato é evidenciado pela recomendação da profundidade da subsolagem que nessas áreas são maiores.

Por sua vez, a região de Pilão está localizada numa área de relevo um pouco mais ondulado que a região de Felipe e com predominância de cambissolos álicos e algumas pequenas manchas de Latossolos Una Concrecionário Álico.

Os cambissolos álicos dessa região, são solos pouco desenvolvidos com horizonte B incipiente, apresentam os teores de saturação por alumínio altos, o que lhes confere caráter álico, além de serem solos muito profundos com textura muito argilosa.

Os Latossolos Una Concrecionários Álico da região de Pilão, se caracterizam por serem muito argilosos de acidez alta e com presença de pedregosidade, além de profundidade menor.

A definição de Unidades de Manejo foi realizada visando fornecer orientações específicas para cada uma delas, no que se refere ao preparo de solo e a recomendação de adubação.

Para o preparo de solo o teor de argila foi fator de maior relevância na definição da profundidade de subsolagem, pois teores mais elevados de argila dificultam o crescimento das raízes, dessa forma em virtude da Região de Pilão e Felipe apresentarem solos com teores de argila similares, elas tiveram as mesmas recomendações para profundidade de subsolagem de 90 a 100 cm.

Para a definição das adubações a empresa utiliza dados do monitoramento nutricional que realiza, os resultados desse monitoramento mostram que a fertilidade dos solos da região de Felipe é menor que a Região de Pilão, em consequência disso a recomendação de adubação na região de Felipe é maior, conforme mostra Tabela 1.

Resumidamente as características edáficas entre as regiões de Felipe e Pilão são bastante parecidas, fato esse observado por estarem em Unidades de Manejo muito próximas sendo apenas diferenciadas pelo nível de fertilidade natural que é maior na Região de Pilão. O manejo do solo nas duas regiões também reflete essa proximidade, com uma leve diferença na recomendação da adubação, já que na região de Felipe a recomendação é um pouco maior (Tabela 1).

### **3.3. Mudanças propostas ao modelo**

#### **3.3.1. Transpiração**

Silva (2007), observando as limitações que o modelo apresentava no tratamento do balanço de energia, do cálculo do DPV, da evapotranspiração e

do balanço hídrico sugeriu em seu estudo uma nova abordagem para o cálculo dessas variáveis.

No presente trabalho seguiu-se a mesma idéia proposta por Silva (2007), existindo, porém, outras modificações que se julgaram pertinentes para dar mais praticidade ao modelo, além de lhe conferir melhorias nas estimativas, mas sem deixar de representar as interações ecofisiológicas que conduzem o crescimento da planta.

Para a estimativa da transpiração foi utilizada a equação de Penman-Monteith (1965), em escala diária, que inclui os componentes aerodinâmicos e os do balanço de energia em escala diária (equação 20).

No modelo 3-PG, o DPV é tratado somente em função da temperatura do ar. Foi feita uma correção em que o DPV torna-se função da temperatura do ar e da umidade relativa do ar (equação 26).

$$ET = \frac{\frac{\Delta R_n + \frac{M' \rho_a C_p DPV}{r_a}}{\Delta + \gamma \left( 1 + \left( \frac{CanCond FCRS}{r_a} \right) \right)}}{\lambda} \quad (20)$$

em que  $ET$  é a transpiração do dossel ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $\lambda$ , o fluxo de calor latente de evaporação ( $\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ );  $\Delta$ , a declividade da curva de pressão de saturação de vapor ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $R_n$ , o saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $M'$ , o fator de conversão diário = 86400;  $\rho_a$ , a densidade absoluta do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $\gamma$ , o coeficiente psicrométrico ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $C_p$ , o calor específico a pressão constante,  $1.013 \cdot 10^{-3} \text{ MJ Kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $(e_s - e_a) = DPV$ , o déficit de pressão de vapor ( $\text{kPa}$ );  $r_a$ , a resistência aerodinâmica ( $\text{s m}^{-1}$ );  $CanCond$ , a condutância do dossel da planta calculado pelo 3-PG ( $\text{s m}^{-1}$ );  $FCRS$ , o fator de correção da resistência de superfície.

Os parâmetros da equação 20 foram obtidos de acordo com as equações abaixo:

$$\Delta = \frac{4098 \left[ \left( 0,6108 \left( \frac{17,27 T}{T+237,3} \right) \right) \right]}{(T+237,3)^2} \quad (21)$$

em que  $T$  é a temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta$ , a declividade da curva de pressão de vapor de saturação ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

$$\rho_a = 3,486 \frac{P}{T_{Kv}} \quad (22)$$

em que  $R$  é a constante específica do gás =  $287 \text{ (J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$ .

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 Z'}{293} \right)^{5,26} \quad (23)$$

em que  $P$  é a pressão atmosférica (KPa);  $Z'$ , a altitude.

$$T_{Kv} = T_K \left( 1 - 0,378 \frac{e_a}{P} \right)^{-1} \quad (24)$$

em que  $T_{Kv}$  é a temperatura virtual (K); e  $T_K$ , a temperatura absoluta em Kelvin (K).

$$T_K = t(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad (25)$$

em que  $t(^{\circ}\text{C})$  é a temperatura em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$$DPV = e_s - e_a \quad (26)$$

em que DPV é o déficit de pressão de vapor (KPa).

$$e_a = e_s \left( \frac{UR}{100} \right) \quad (27)$$

em que  $e_a$  é a pressão atual de vapor (kPa);  $UR$ , a umidade relativa do ar média.

$$e_s(T) = 0,6168 \exp \left( \frac{17,27T}{T+237,3} \right) \quad (28)$$

em que  $e_s$  é a pressão de vapor de saturação (kPa).

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} * 10^{-3} = 0,00163 \frac{P}{\lambda} \quad (29)$$

em que  $\lambda$  é o fluxo de calor latente de evaporação ( $\text{MJ kg}^{-1}$ );  $\varepsilon$ , a relação peso molecular de vapor de água/ar seco = 0,622.

$$\lambda = 2,501 - (2,361 * 10^{-3}) t \quad (30)$$

em que  $t(^{\circ}\text{C})$  é a temperatura em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{Z_m - d_v}{Z_{0m}}\right] \ln\left[\frac{Z_h - d_v}{Z_{0h}}\right]}{K^2 U_z} \quad (31)$$

em que  $r_a$  é a resistência aerodinâmica ( $\text{s m}^{-1}$ );  $Z_m$ , a altura de medição da velocidade do vento.

$$d_v = \left(\frac{2}{3}\right) Hc \quad (32)$$

$$Z_{0m} = 0,123 Hc \quad (33)$$

$$Z_{0h} = 0,1 Z_{0m} \quad (34)$$

em que  $d_v$  é o deslocamento do plano zero do perfil do vento (m);  $Z_{0m}$ , o parâmetro de rugosidade para “momentum” (m);  $k$ , a constante de Von Kármán (0,41);  $U_z$ , a velocidade do vento a uma altura  $Z$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) (se  $U_z \leq 0,41$ , então  $U_z = 0,41$ );  $Z_h$ , a altura de medição da umidade do ar;  $Z_{0h}$ , o parâmetro de rugosidade para calor sensível e vapor d’água (m).

Para a determinação da resistência de superfície, foi utilizado um fator de correção para simular a conversão de condutância do dossel, gerada pelo 3-PG, em resistência para ser usada na equação de Penman-Monteith (1965), entretanto seguindo a mesma lógica do 3-PG, ou seja, o déficit de pressão de vapor, a disponibilidade de água no solo e a idade dos povoamentos são considerados fatores que afetam a condutância estomática. Sands e Landsberg (2002), ao explicarem o funcionamento do 3-PG, relatam que a condutância do

dossel [ $gC$  (m/s)] é determinada a partir de uma condutância estomatal nominal escalado pelo modulador idade ( $f_I$ ) e pelo menos um dos modificadores do ambiente  $f_{SW}$  e  $f_{SW}$  (água no solo e déficit de pressão de vapor, respectivamente), e aumenta com o aumento do IAF do dossel até um máximo de condutância do dossel [ $gC_x$  (m/s)], conforme equação 35.

$$CanCond = MaxCond * PhysMod * Minimum \left( 1, \frac{LAI}{LAI_{gCx}} \right) \quad (35)$$

em que  $CanCond$  ( $gC$ ) é a condutância do dossel;  $MaxCond$  ( $gC_x$ ), a máxima condutância do dossel ( $0,02 \text{ m s}^{-1}$ );  $PhysMod$ , o modificador fisiológico;  $IAF$ , o índice de área foliar

Diferentemente do proposto por Silva (2007), foi implementada no 3-PG para melhorar o saldo de radiação a rotina de cálculos apresentada abaixo:

$$Rn = BOC - BOL \quad (36)$$

em que  $BOC$  é o balanço de ondas curtas; e  $BOL$ , o balanço de ondas longas.

$$BOC = (1 - albedo) * Rg \quad (37)$$

em que  $Rg$  é a radiação solar global ( $\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ ); e  $Albedo$ , 0,18.

$$BOL = - 4,903 * 10^{-9} \left( \frac{Tmax^4 + Tmin^4}{2} \right) (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left( 1,35 \frac{Rg}{Rso} - 0,35 \right) \quad (38)$$

em que  $Tmax^4$  é a temperatura absoluta máxima durante o período de 24 h;  $Tmin^4$ , a temperatura absoluta mínima durante o período de 24 h;  $Rg/Rso$ , a radiação relativa de onda curta (deve ser limitado de forma que  $Rg/Rso \leq 1$ );  $Rg$ , a radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ); e  $Rso$ , a radiação de céu claro ( $\text{MJm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ).

$$Rso = \left( 0,75 + \frac{2z}{100000} \right) Ra \quad (39)$$

em que  $z$  é a elevação da estação sobre o nível do mar (m); e  $Ra$ , a radiação solar no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ).

$$Ra = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [w_s \text{Sen}(\varphi) \text{Sen}(\delta) + \text{Cos}(\varphi) \text{Cos}(\delta) \text{Sen}(w_s)] \quad (40)$$

em que  $G_{sc}$  é a constante solar,  $0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min.}^{-1}$ ;  $d_r$ , o inverso da distância relativa terra sol;  $w_s$ , o ângulo horário do pôr-do-sol, (equação 42) [rad.];  $\delta$ , latitude [rad.]; e  $\varphi$ , a declinação solar [rad.].

$$ws = \text{arcCos} [-\text{Tan}(\varphi) \text{Tan}(\delta)] \quad (41)$$

$$d_r = 1 + 0,0033 \text{Cos} \left( \frac{2\pi}{365} J \right) \quad (42)$$

$$\varphi = 0,409 \text{Sen} \left( \frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right) \quad (43)$$

em que  $J$  é o número do dia do ano entre 1 (1° de janeiro) e 365 (31 de dezembro).

### 3.3.2. Balanço hídrico

No balanço hídrico foi implementado o mesmo submodelo descrito por Silva (2007), entretanto em base diária, o qual foi acoplado ao modelo 3-PG.

Segundo o autor, o balanço de água é calculado para a camada de solo que contém as raízes, cujo volume varia em função do estágio de crescimento das plantas. Definida a profundidade do sistema radicular, têm-se o volume de controle e a quantidade máxima de água possível de ser retirada para as plantas. Nesse volume de controle, a variação da quantidade de água armazenada no solo será dada pela contabilização da entrada e saída de água, conforme equação 44.

$$ARM_i = ARM_{i-1} + P_{th} - ICV - PPerc - ET \quad (44)$$

em que  $ARM_i$  é o armazenamento de água no dia  $i$  (mm);  $ARM_{i-1}$ , o armazenamento de água no dia anterior (mm);  $P_{th}$ , a precipitação total no dia

(mm);  $ICV$ , o total interceptado de água da chuva pelo dossel (mm);  $PPerc$ , a percolação na camada útil do solo onde se encontram as raízes no dia  $i$  (mm); e  $ET$ , a transpiração no dia  $i$  (mm).

A interceptação da cobertura vegetal foi estimada segundo Lima e Leopoldo (1999), conforme equação descrita abaixo.

$$ICV = P_{th} * 0,12 \quad (45)$$

A percolação de água foi estimada de acordo com a equação 46.

$$PPerc = ARM_{i-1} - CAD \quad (46)$$

A profundidade efetiva do sistema radicular (PSR) deve considerar uma secção de solo em que, pelo menos, 80% do sistema radicular da cultura estejam contidos nesta, dependendo da cultura e da profundidade do solo na área (SALASSIER, 2005).

$$CAD = DTA * PSR \quad (47)$$

em que  $CAD$  é a capacidade de água disponível no solo (mm);  $DTA$ , a disponibilidade total de água no solo ( $\text{mm m}^{-1}$  de solo); e  $PSR$ , a profundidade efetiva do sistema radicular (cm).

A disponibilidade de água no solo foi calculada por meio da equação 48.

$$DTA = \left( \frac{CCamp - PmPer}{10} * da \right) \quad (48)$$

em que  $CCamp$  é a umidade do solo no ponto de capacidade de campo (% em peso);  $PmPer$ , a umidade do solo no ponto de murcha permanente (% em peso);  $da$ , a densidade aparente do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

A profundidade efetiva do sistema radicular foi estimada de acordo com a equação 50 descrita por Facco (2004) para a região do Rio Doce, entretanto a profundidade do sistema radicular foi limitada ao máximo de 2,5 metros.

$$PSR = 287,31 * (1 - \exp(-0,195 * Idp))^{1,022} \quad (49)$$

em que  $Idp$  é a idade da planta (anos).

### 3.4. Parametrização do 3-PG

A parametrização de um dado modelo se refere à obtenção do ajuste de relacionamentos e, ou, de equações matemáticas, que descrevem o comportamento de determinadas variáveis, por meio da utilização de dados medidos em campo (SANDS; LANDSBERG, 2002). A parametrização do 3-PG foi obtida ajustando os valores de parâmetros do modelo para dar bons ajustes dos dados de saída com a série temporal observada do volume por hectare, DAP e altura.

#### 3.4.1. Levantamento dos dados de biomassa

As coletas de dados foram realizadas em duas campanhas com o auxílio da equipe de campo da Jari Celulose. Foram contemplados plantios jovens (plantios entre 11 e 15 meses de idade) e adultos (plantios entre 47 e 60 meses idade) referentes aos clones 2567, 2645, 2646 e 3296. O critério de seleção desses materiais genéticos considerou a importância em termos de área plantada na empresa, pois eles correspondem a cerca de 80% do que foi plantado em 2010.

Nas campanhas, foi realizado levantamento de dados de biomassa inicial e final dos compartimentos do eucalipto (folhas, galhos, cascas, troncos, raízes), dados para calcular a densidade básica da madeira, dados dendrométricos como altura das árvores, diâmetro a altura do peito (DAP) e profundidade do sistema radicular.

Para a determinação da biomassa inicial de folhas, “stem” e raízes ( $W_F$ ,  $W_S$  e  $W_R$ ) e em idade adulta acima e abaixo do solo dos clones selecionados, foram derrubadas três árvores com DAP em torno da média. Após o corte, as folhas, galhos, cascas, troncos e raízes de cada árvore foram separados e pesados (matéria fresca), foram também medidos a altura total e a altura até o diâmetro de 5 cm. Com relação a biomassa de raízes foram

coletadas tanto as finas quanto as lenhosas de cada planta. Para a estimativa do peso da matéria seca desses componentes após a homogeneização, uma amostra de cada uma das repetições foi retirada e pesada (matéria fresca) e enviada para o laboratório da Jari para ser colocada para secar em estufa com circulação forçada de ar a 65°C, até atingir peso constante. A partir do peso da matéria fresca total de cada compartimento e da relação média entre o peso da matéria seca e fresca de cada amostra, foi obtido o peso da matéria seca total dos respectivos compartimentos para cada árvore derrubada.

### 3.4.2. Equações alométricas

Com os levantamentos dos dados dendrométricos após a derrubada das árvores foi possível ajustar equações alométricas que descrevem a relação entre DAP (diâmetro a altura do peito) e biomassa de stem (tronco com casca e galhos). A partir dos dados do Inventário Florestal Contínuo da empresa foi possível também ajustar as relações alométricas entre altura total (H) e o diâmetro a altura do peito (DAP), propostos por Landsberg e Waring (1997), equações 51 e 52, respectivamente.

$$W_{Stem} = a_s DAP^{n_s} \quad (50)$$

$$H = aH DAP^{nHB} \quad (51)$$

em que  $a_s$  e  $aH$  são coeficientes multiplicativos ajustados; e  $n_s$  e  $nHB$ , coeficientes potenciais ajustáveis.

Para avaliar a variação da densidade da madeira e fração de galhos e casca em relação à biomassa da parte aérea excluindo as folhas (FGC), em função da idade dos povoamentos, foram ajustados modelos não lineares, propostos por Sands e Landsberg (2002), utilizando o software SigmaPlot 11.0. Os modelos foram ajustados considerando os materiais genéticos em conjunto, de modo a obter uma equação geral para cada característica avaliada e região. Esse ajuste foi feito para modelar o comportamento da densidade da madeira e fração de galhos e cascas em relação à biomassa da parte aérea excluindo folhas.

$$Y = b_1 + (b_0 - b_1) \exp \left( -0,69315 \left( \frac{\text{idade}}{t} \right)^n \right)^1 \quad (52)$$

em que  $Y$  é a variável correspondente (densidade ou FGC);  $b_0$ , o valor da variável na idade inicial do povoamento;  $b_1$ , o valor da variável na idade final do povoamento;  $t$ , a idade no qual a variável corresponde a  $\frac{1}{2}(b_0 - b_1)$ ;  $n$ , a potência ajustável.

### 3.4.3. Densidade básica da madeira

Para a determinação da densidade da madeira ( $\rho$ ) foram retirados três discos de aproximadamente 2 cm de espessura das posições 0, 50 e 100% da altura comercial, de cada uma das árvores derrubadas, sendo o valor da densidade para cada árvore dado pela média dos valores de densidade encontrados nas três posições.

Para a determinação da densidade básica da madeira, as amostras não regulares de lenho (cunha) foram imersos em água até sua saturação total. As determinações volumétricas das amostras de lenho foram realizadas por balanças hidrostáticas com leitura de 0,1 g de precisão.

Após a determinação dos volumes das cunhas, elas foram colocadas em estufa de circulação e renovação de ar a 105°C e pesadas em balança com leitura de precisão de 0,01g para a determinação do seu peso seco.

A densidade em idade inicial ( $\rho_{Min}$ ) e adulta ( $\rho_{Max}$ ) de cada cunha foi determinada pela razão entre o peso seco e o volume saturado.

$$Rho = \frac{P_o}{V_U} \quad (53)$$

em que  $P_o$  é o peso seco em estufa (g); e  $V_U$ , o volume saturado (cm<sup>3</sup>).

### 3.4.4. Disponibilidade de água no solo

Durante a coleta dos dados de biomassa, foram coletadas cinco amostras de solo na linha de plantio e outras cinco amostras nas entrelinhas de plantio nas profundidades de 0 a 30, 30 a 60 e 60 a 80 cm. Essas amostras

foram utilizadas para as análises físicas do solo (curva de retenção de água e densidade aparente do solo), pelo método da câmara de pressão (Richards, 1965) no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Retiraram-se amostras, de estrutura deformada, usando trado metálicos com 15 cm de altura por 5 cm de diâmetro. Todas as amostras foram acondicionadas, em sacos plásticos devidamente identificados até o processamento.

Para o estabelecimento da disponibilidade da água no solo, foi determinada a tensão da água no solo e a umidade do solo. Estabeleceu-se a capacidade de campo, a umidade correspondente a 0,3 BAR e o ponto de murcha permanente a 15 BAR (câmara de pressão de Richards).

### **3.4.5. Dados e parâmetros do clima**

O planejamento da rede de estações meteorológicas é fundamental para que a variabilidade temporal e espacial das variáveis de tempo e clima sejam bem amostradas, fornecendo dados fiéis às variações naturais para as diferentes áreas de plantio.

Os dados meteorológicos utilizados na simulação do 3-PG compreendem os anos de 2005 a 2010 e foram disponibilizados pela empresa Jari Celulose, Papel e Embalagens S/A que dispõe de duas estações meteorológicas automáticas e seis pluviômetros automáticos.

Como havia falhas nas séries de dados meteorológicos da rede de estações da empresa, recorreu-se aos dados de reanálise estimados para realizar o preenchimento das falhas.

O projeto Reanálise 2 NCEP-DOE usa o estado da arte da reanálise para realizar previsões de dados meteorológicos, usando informações climáticas desde o ano de 1979 que envolve a recuperação de dados de superfície terrestre, navio, radiossonda, aviões, satélites e outros dados com controle de qualidade.

Para tanto foi realizado uma redução de escala (*downscaling*) para as coordenadas geográficas de cada estação meteorológica seguindo a metodologia descrita por Silva e Ribeiro (2010).

### **3.5. Calibração do 3-PG**

A calibração é o processo através do qual os valores dos parâmetros são ajustados de forma que o modelo se aproxime dos dados reais (ZEIGLER et al., 2000). Essa etapa envolve efetuar a simulação com o modelo e comparar os resultados estimados com os valores reais medidos.

Durante a calibração, os valores de alguns parâmetros e, ou, variáveis não medidos durante a execução do trabalho de campo são alteradas de modo a diminuir o desvio entre os valores estimados e os medidos, obtendo-se assim a melhoria do ajuste do modelo (BORGES, 2009).

Para se obter resultados satisfatórios, o processo de atribuição de parâmetros seguiu a metodologia proposta por Sands (2004). Começou-se a atribuir valores aos parâmetros que foram obtidos por medição direta, ou que assumissem valores padrões para a espécie, em seguida os valores dos parâmetros que se obtém através de modelação. Por fim, os parâmetros que não são possíveis de se obter dados por medição direta foram ajustados de forma a otimizar os valores estimados em relação aos valores medidos. Este procedimento final exige um conhecimento profundo sobre os limites de variação dos parâmetros para que estes não percam seu sentido biológico.

Todos os parâmetros do 3-PG podem ser alterados de modo a alterar os resultados do modelo, mas é fundamental que se use valores padrões disponíveis em literatura ou em estudos para a região que se pretende calibrar, pois se houver muita flexibilidade na atribuição dos valores, fica difícil determinar quais os fatores que estão de fato alterando o crescimento e as diferenças observadas.

Nesse trabalho a calibração do modelo proposto foi feita utilizando às informações de volume de madeira por hectare ( $m^3 ha^{-1}$ ), altura das árvores (m) e DAP (cm) da base de dados de inventário florestal.

### **3.6. Validação do 3-PG**

O processo de validação pode ser definido como sendo a comparação de resultados do modelo com dados obtidos de observações, a partir de um

conjunto de dados independente, ou seja, dados diferentes dos utilizados no processo de calibração.

As estimativas de volume, altura e DAP obtidas pelo modelo (original e proposto) parametrizado e calibradas foram comparadas com dados independentes do inventário florestal contínuo da empresa Jari Celulose. Papel e Embalagens S/A de modo a avaliar o desempenho dos modelos original e proposto para observar a capacidade de extrapolação dos mesmos.

### 3.7. Avaliação das estimativas do modelo

Para cada conjunto de dados observados/estimados para as etapas de calibração e validação foi avaliado a eficiência do modelo original e proposto ao simular o dado medido.

Na etapa de calibração e validação o desempenho do modelo foi verificado por meio das seguintes medidas estatísticas que são amplamente utilizadas no setor florestal: coeficiente de determinação ( $r^2$ ), raiz do erro quadrático médio (RMSE) erro percentual (RMSE%), e o Índice de Concordância de Willmott (d).

O RMSE fornece uma informação em relação à dispersão dos dados, ou seja, o grau de espalhamento obtido na correção entre os valores estimados e observados.

O índice de concordância de Willmott (d) mede o grau em que os dados estimados (P) se aproximam dos dados observados (O). Este índice varia de zero a um, sendo zero para nenhuma concordância e um, quando há concordância perfeita.

O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) descreve a proporção da variância total dos dados observados que pode ser explicada pelo modelo. Os valores de  $r^2$  variam de zero a um, quanto mais próximo de um melhor o ajuste. Porém, essa estatística não é muito adequada para medir desempenho de modelos, pois ela é altamente sensível a valores espúrios (*outliers*).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (54)$$

$$RMSE \% = \frac{RMSE}{\bar{O}_i} * 100 \quad (55)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)} \quad (56)$$

$$r^2 = \left( \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (57)$$

em que  $O_i$  são valores observados;  $P_i$ , valores estimados;  $\bar{O}_i$ , média dos valores observados.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Caracterização climática das regiões do estudo**

Ao longo desse trabalho a temperatura média anual na região de Felipe foi de 28°C, sendo os meses mais quentes entre setembro e novembro com média de 30°C e os meses entre março e abril apresentando as temperaturas com médias de 27°C (Figura 4). A umidade relativa do ar apresentou um valor médio de 72% com máximo de 77% entre os meses de abril a maio e mínimo de 65% verificado nos meses de setembro e outubro.

A precipitação total média anual foi de 2.271 mm, o ano de 2008 foi o mais chuvoso com precipitação total de 2.545 mm, e o ano de 2006 apresentou o total anual de 2.083 milímetros. O período mais chuvoso para a região de Felipe durante o período de estudo compreendeu os meses de abril a maio, enquanto os meses com menores índices pluviométricos foram os compreendidos entre setembro e novembro, sendo outubro o mais seco.

Na região de Pilão a temperatura média anual (Figura 5) foi de 27°C, sendo os meses mais quentes entre outubro e novembro com média de 29°C e os meses de fevereiro a julho com as menores temperaturas com médias de 26°C (Figura 5). A umidade relativa do ar apresentou um valor médio de 90% com máximo de 98% entre os meses de abril a maio e mínimo de 78% nos meses de setembro e novembro.

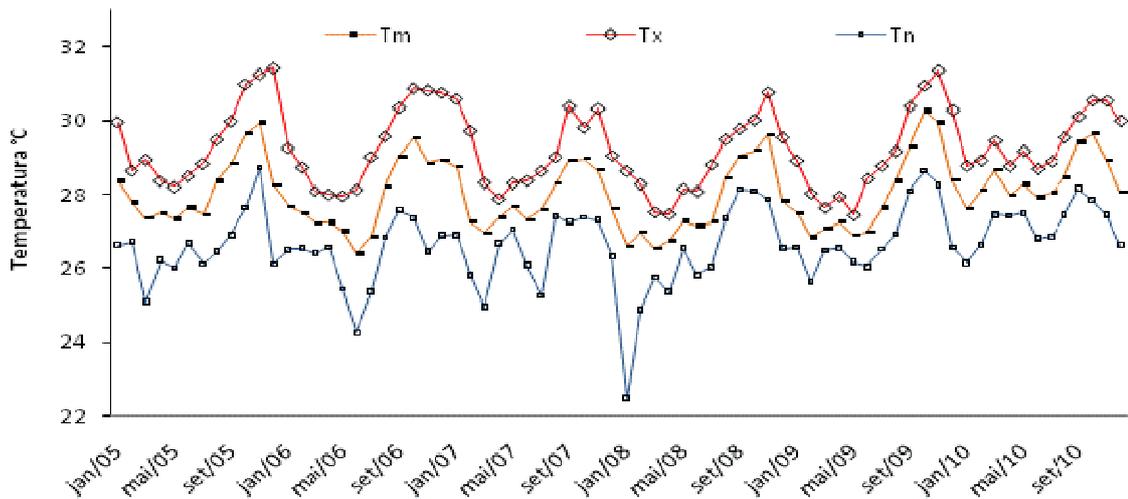


Figura 4 - Médias mensais de temperaturas mínima (Tn), média (Tm) e máxima (Tx) do ar na região de Felipe.

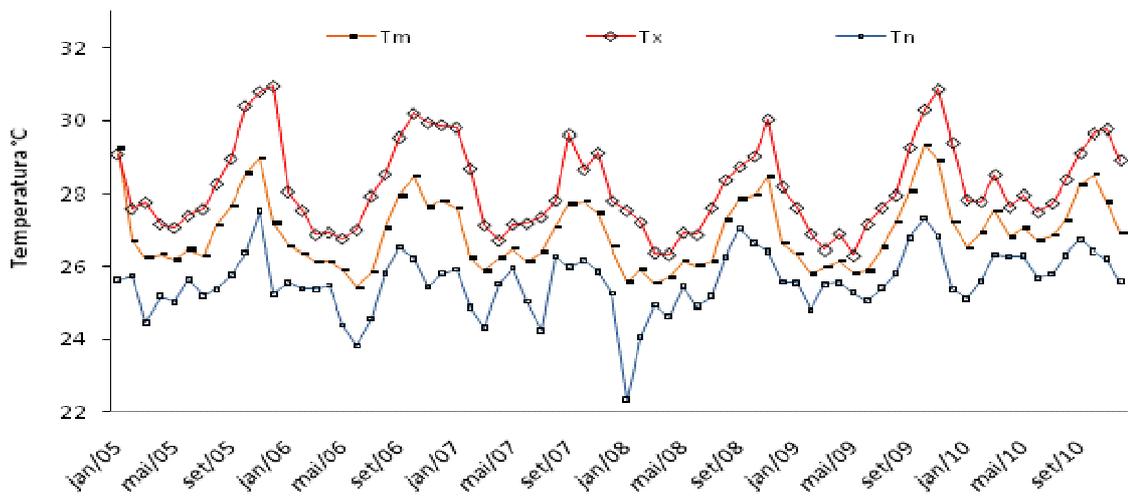


Figura 5 - Médias mensais de temperaturas mínima (Tn), média (Tm) e máxima (Tx) do ar das regiões Pilão.

A precipitação média anual foi de 1.955 mm, o ano de 2007 foi o mais chuvoso com precipitação total de 2.454 mm, e o ano de 2005 o que ocorreu a menor precipitação com total de 1.414 mm. O período de março a maio compreendeu os meses de maior precipitação para a região de Pilão durante o período de estudo, enquanto os meses com menores índices pluviométricos foram entre setembro e novembro, sendo outubro o mais seco.

Ao analisar a série histórica dos dados de temperatura foi possível observar que ocorre uma pequena variação da condição térmica ambiental entre as duas regiões estudadas, provavelmente em virtude da diferença de altitude das regiões.

A região de Felipe localiza-se a uma altitude média de 140 m e apresenta a maior temperatura média mensal ( $28^{\circ}\text{C}$ ), enquanto Pilão, com altitude média de 200 m, apresenta média mensal pouco menor ( $27^{\circ}\text{C}$ ). Com relação à amplitude térmica as duas regiões não apresentaram nenhuma diferença com relação a essa variável climática permanecendo  $2,6^{\circ}\text{C}$  em média para ambas as regiões.

A região de Pilão apresenta menores valores médios de irradiância solar global quando comparado a região de Felipe (Figura 6). Esse fato pode estar relacionado à maior frequência de presença de nebulosidade, ocasionada pela maior umidade nessa área. Observa-se na região de Pilão uma maior frequência na formação de densa neblina no final da noite, perdurando durante as primeiras horas do dia, principalmente nos meses de maior regime pluviométricos que praticamente coincidem com os meses de maiores umidades. Na região de Felipe essa nebulosidade também ocorre, entretanto a frequência e a duração são menores quando comparados com a região de Pilão.

Observa-se que os totais de chuva não explicam, por si só, a variação na irradiância solar global isso pode ser constatado quando se compara as intensidades pluviométricas entre Pilão e Felipe, ou seja, mesmo Felipe apresentado maiores regimes pluviométrico possui também maior irradiância solar global. Isso implica que a variação e intensidade da nebulosidade além de estar relacionada com a chuva pode estar relacionada principalmente com as características do relevo.

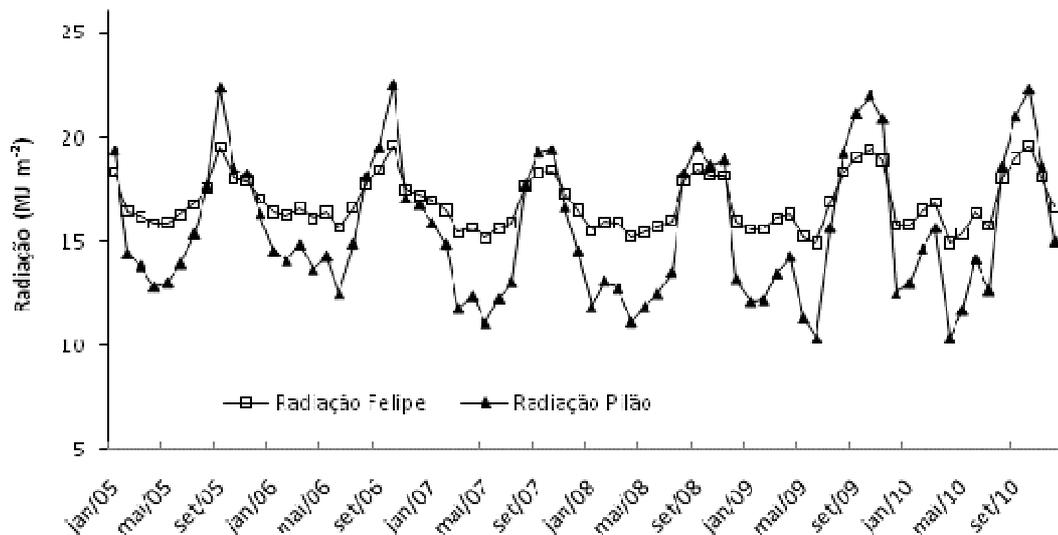


Figura 6 - Variação da média mensal dos totais diários de irradiação solar global das regiões de Felipe e Pilão.

A região de Felipe foi a que apresentou o maior déficit de pressão de vapor (DPV), em razão das maiores temperaturas do ar (Figura 7). Ao comparar as regiões, verificou-se que o DPV tem o mesmo comportamento das temperaturas, ou seja, quanto maior a temperatura da localidade, maior o DPV, devido à variação exponencial da pressão de saturação de vapor de água com o aumento da temperatura do ar. Dessa forma, Felipe tem, em média, um DPV de 10,5 mBar, enquanto que Pilão apresenta menor valor de DPV, 4,0 mBar.

#### 4.2 Parametrização

A parametrização do 3-PG para os dados observados dos plantios de eucalipto foi um processo gradual. O objetivo foi oferecer um conjunto de valores de parâmetros que proporcionassem bons ajustes para todas as observações disponíveis de volume total ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ), altura (m), diâmetro a altura do peito (DAP cm).

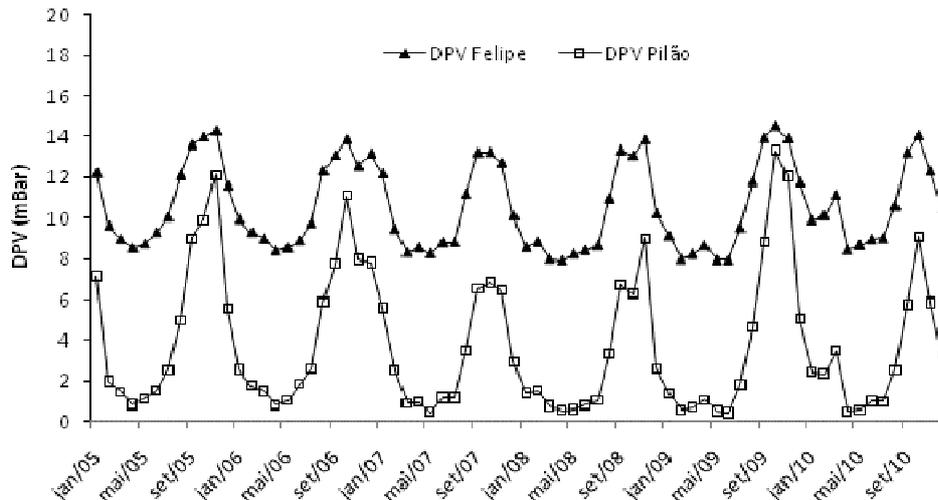


Figura 7 - Médias mensais de DPV das regiões de Felipe e Pilão.

Para ser iniciado, o modelo requer para o primeiro ano dados de biomassa de raiz, folha e stem, dessa forma usaram-se os valores de 2,65, 2,92 e 9,76 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente os quais foram medidos em plantios com idade média de um ano.

#### 4.2.1. Equações alométricas

As equações alométricas que relacionam a altura total, a matéria seca de stem (galho+casca+lenho) com o DAP, estão apresentados na Tabela 2.

As equações ajustadas apresentaram boa correlação entre as variáveis testadas, com valores do coeficiente de determinação bem próximos para ambos os locais (Altura total X DAP), além de gerarem erros muito próximos independente do local.

Tabela 2 - Equações ajustadas<sup>1</sup>, entre altura (m), matéria seca de stem (kg planta<sup>-1</sup>), em função do DAP (cm).

Região	Equação	n	r <sup>2</sup>	r	RMSE	Constante	Potência
<b>Altura</b>							
Pilão	H = 1,17 dap <sup>1,10</sup>	128	0,84	0,92	1,15	1,17	1,10
Felipe	H = 1,06 dap <sup>1,14</sup>	220	0,78	0,88	1,18	1,06	1,14
<b>Stem</b>							
Geral	Stem = 0,018 dap <sup>3,14</sup>	24	0,99	1,00	3,50	0,018	3,14

<sup>1</sup> Modelo:  $y = a_n(\text{dap})^n$ , em que y é a variável de interesse (H, Stem); n, o número de observações considerado para o ajuste da equação; r, o coeficiente de correlação; r<sup>2</sup>, o coeficiente de determinação; e RMSE, a raiz quadrada do erro médio quadrático.

A Figura 8 mostra a biomassa de stem como função do DAP para dados de biomassa referente a quatro clones de eucaliptos. Estes dados foram combinados, e os parâmetros alométricos  $a_s = 0,018$  e  $n_s = 3,14$  geraram um bom ajuste ( $r^2 = 0,99$ ), resultado este um pouco melhor que os obtidos por Londero (2011) em trabalho conduzido na região do Guaíba no estado do Rio Grande do sul onde obteve um  $r^2$  de 0,96 com coeficientes  $a_s = 0,017$  e  $n_s = 3,07$ . Isso sugere que a relação entre a biomassa de “stem” e o DAP é perfeita, com pequena alteração nos coeficientes da equação mesmo para condições climáticas distintas.

Através destas equações, expressas na Tabela 2, foram obtidos os seguintes parâmetros: constante de relacionamento entre altura e DAP ( $a_H$ ), potência de relacionamento entre altura e DAP ( $n_{HB}$ ), constante de relacionamento entre stem e DAP ( $a_s$ ) e potência de relacionamento entre stem e DAP ( $n_s$ ), usados no modelo 3-PG.

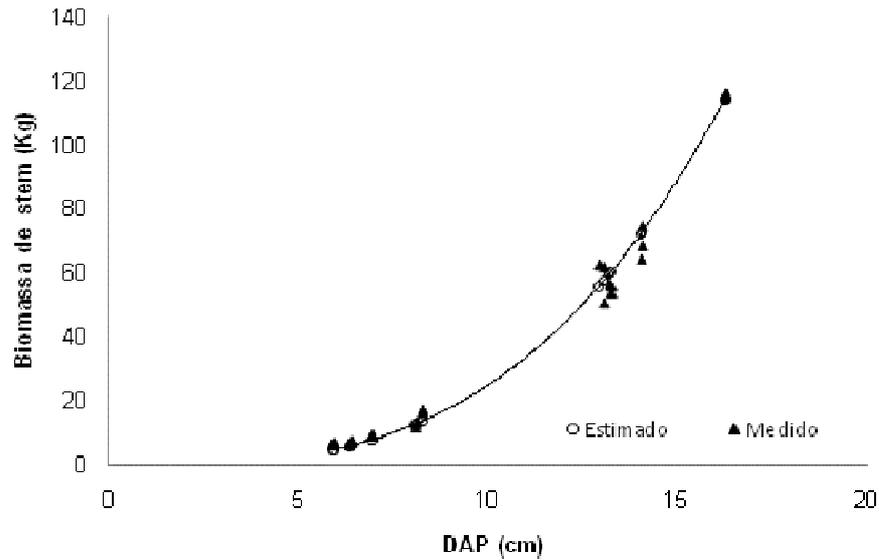


Figura 8 - Relações alométricas entre biomassa lenhosa acima do solo e diâmetro à altura do peito (DAP).

#### 4.2.2. Densidade da madeira e fração de galhos e casca do stem

Com o objetivo de simular o comportamento da densidade da madeira com a idade dos plantios foram ajustadas as equações não lineares mostradas na Tabela 3.

A partir da média entre as densidades encontradas nos clones considerados nesse trabalho, foi possível chegar ao maior valor da densidade de madeira de  $0,455 \text{ t m}^{-3}$  e a menor densidade de  $0,380 \text{ t m}^{-3}$ . Borges (2009) no seu trabalho desenvolvido para o cerrado mineiro encontrou valores de densidade em idade inicial muito próximo ( $0,382 \text{ t m}^{-3}$ ) ao encontrado no presente estudo.

Tabela 3 - Equações ajustadas para densidade de madeira e fração de galhos e cascas (FGC) em função da idade das árvores

Região	Equação	n	r <sup>2</sup>	RMSE
<b>Densidade (t/m<sup>3</sup>)</b>				
Geral	$D = 0,455 + (0,380-0,455) \text{EXP}(-0,69315 (\text{idade}/1,2)^{4,5})$	8	0,79	0,012
<b>FGC (kg/kg)</b>				
Geral	$\text{FGC} = 0,14 + (0,3-0,14) \text{EXP}(-0,69315 (\text{idade}/1,2)^3)$	8	0,91	0,016

D(t/m<sup>3</sup>), FGC (kg kg<sup>-1</sup>) e idade (anos); n, número de observações considerado para o ajuste da equação; r<sup>2</sup>, coeficiente de determinação; e RMSE, erro médio quadrado.

Em relação ao padrão da variação da densidade da madeira em função da idade, foi observado que ocorre um aumento gradual no valor da densidade com o avanço da idade do povoamento, sendo esta mesma tendência encontrada por outros autores como Sands e Landsberg (2002), Stape et al. (2004), Almeida et al. (2004b), Silva (2006), Borges (2009) e Londero (2011). O modelo que relaciona densidade com a idade se ajustou bem, apresentando um coeficiente de determinação de 0,79, entretanto observa-se que o modelo superestima o valor da densidade nas idades iniciais conforme mostra a Figura 9.

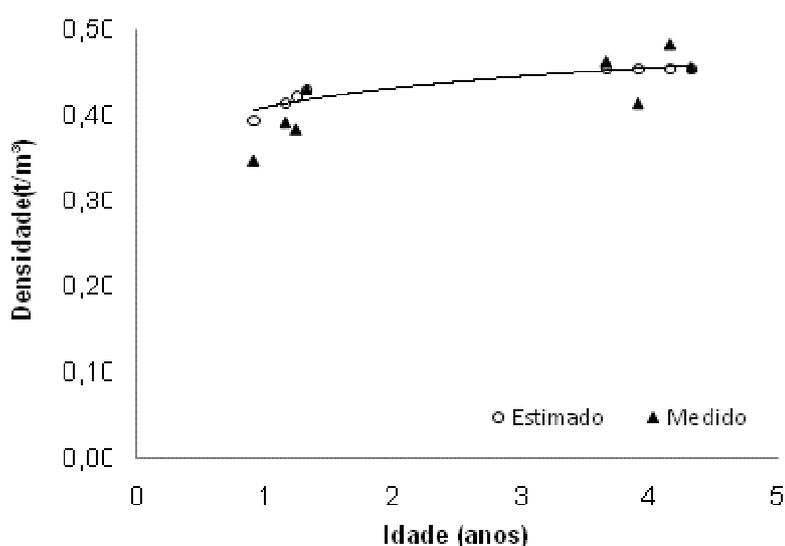


Figura 9 - Variação da densidade da madeira em função da idade das árvores.

A variação da fração de galhos e cascas do stem com a idade está descrita por meio da equação apresentada na tabela 3. Para se chegar ao valor das frações nas idades iniciais e finais, foi também considerada a média entre as frações de galhos e cascas do stem calculado nos clones considerados nesse estudo, assim a fração inicial de galhos e cascas foi de  $0,30 \text{ kg kg}^{-1}$  e a fração de galhos e cascas do stem final foi de  $0,14 \text{ kg kg}^{-1}$ . Sands e Landsberg (2002) encontraram valores iniciais e finais para fração de galhos e cascas do stem de  $0,75 \text{ kg kg}^{-1}$  e  $0,15 \text{ kg kg}^{-1}$ , respectivamente. Borges (2009) encontrou valores iniciais e finais de  $0,59 \text{ kg kg}^{-1}$  e  $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$ , por sua vez Londero (2011) encontrou valores iniciais e finais de  $0,29 \text{ kg kg}^{-1}$  e  $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$ , respectivamente, que são valores próximos aos calculado para a região do presente estudo.

Os valores iniciais de FGC possuem valores mais altos, uma vez que nestas idades a maior fração da parte aérea dos eucaliptos é composta por galhos e folhas, tendendo a diminuir com a idade do povoamento à medida que há um aumento da matéria seca do fuste na parte aérea. (LONDERO, 2011), essa tendência esta sempre presente nos trabalhos que envolvem a parametrização do 3-PG.

A equação que relaciona a FGC com a idade ( $r^2 = 0,91$ ) teve melhor ajuste quando comparado à equação que relaciona densidade e a idade ( $r^2 = 0,79$ ), apresentando também uma pequena tendência nas idades iniciais. Diferentemente da equação que relaciona a densidade e idade, a equação que relaciona FGC e idade subestima os valores iniciais de FGC, conforme mostra a Figura 10.

Essas tendências encontradas na variação da densidade e FGC nas idades iniciais se devem aos parâmetros de inicialização que foram usados para simular o 3-PG, ou seja, o modelo é iniciado com dados altos de biomassa, densidade e FGC, já que foram calculados para plantios com idade entre 11 e 16 meses.

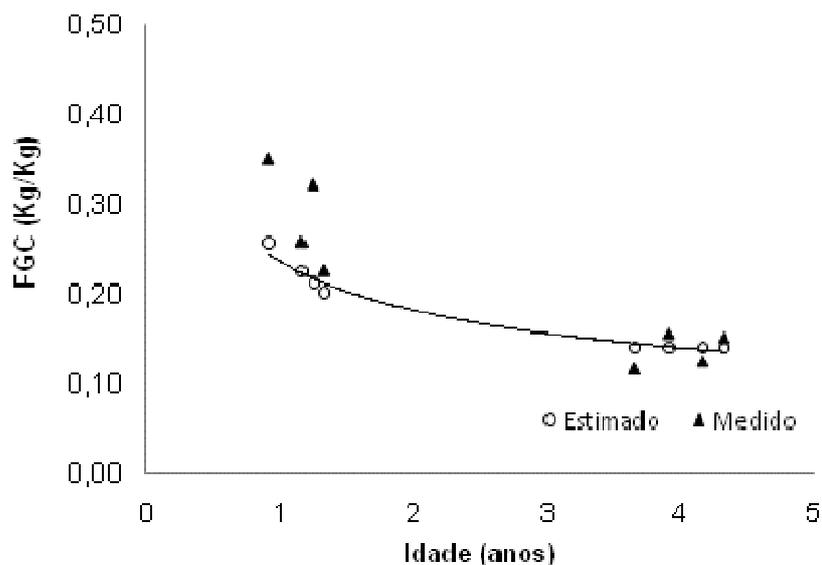


Figura 10 - Variação da fração de galhos e casca do Stem em função da idade das árvores.

#### 4.2.3. Atributos do solo

As características do solo entram no modelo 3-PG por meio de duas variáveis, na classe do solo (*Soil Class*), relacionada com a parte física do solo, e na taxa de fertilidade do solo (FR), na qual é atribuído um valor de zero a “um” para as condições químicas, sendo zero para baixas condições e “um” para condições adequadas.

Com relação à parte física do solo, as análises mostraram que a densidade aparente do solo na região de Felipe foi de  $1,3 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$  para uma Capacidade de Campo (%) de 36,46 e Ponto de Murcha (%) de 32,13, que conferiram um DTA de  $112 \text{ (mm m}^{-1}\text{ de solo)}$ . Como já mencionado na Seção 3.2, os solos das duas regiões são argilosos, dessa forma foi atribuído o parâmetro “L” (Loam) muito argiloso para ambas as regiões.

Vale ressaltar que no modelo 3-PG, segundo Menezes (2005), há falta de sensibilidade quanto às características físicas do solo, uma vez que a influência da classe textual ocorre por meio de simples constantes associadas ao modificador de água no solo.

Em relação à fertilidade, como a empresa realiza processos específicos de adubação para cada unidade de manejo, considerou-se ambas as regiões sem limitação nutricional, atribuindo-se o valor 1 (um) para o modulador de fertilidade do solo.

Silva (2006) relata que a maioria dos trabalhos relacionados ao 3-PG não define com clareza a obtenção de FR, e as revisões feitas neste trabalho também não encontraram estudos que mostrassem de forma efetiva a obtenção desse parâmetro. Sands e Landsberg (2002) no estudo de parametrização do *Eucalyptus Globulus* na Austrália consideraram FR=1 para os plantios que foram fertilizados, mesmo procedimento adotado nesse trabalho.

### **4.3. Calibração**

Os valores dos parâmetros do modelo 3-PG usados neste trabalho são mostrados na Tabela 4. No processo de calibração para que as estimativas do modelo se ajustassem melhor na região de Pilão, os parâmetros pFS20 e gammaFx tiveram seus valores aumentados em relação a região de Felipe.

As Figuras 11 e 12 apresentam a comparação entre os valores simulados e observados de volume, altura e DAP após o processo de calibração do modelo, tanto para a versão original quanto para a versão proposta.

Durante a calibração, observa-se que as simulações com o modelo proposto apresentaram uma pequena subestimativa para a variável volume, tendendo, porém, a se aproximar dos dados reais em idades finais, além de mostrar um leve superestimativa para as variáveis DAP e altura. O modelo original, por outro lado, superestimou todas as variáveis analisadas (volume, altura e DAP), com tendência de se afastar mais dos dados reais em idade avançadas.

Tabela 4 - Principais parâmetros do modelo-3PG com as parametrizações realizadas por Sands e Landsberg (2002), Stape (2004), Silva (2006), Borges (2009) e por Rascon (2012) neste trabalho

Parâmetros padrões do 3-PG	Nome	Unidades	Sands e Landsberg (2002)	Stape (2004)	Silva (2006)	Borges (2009)	Rascon (2012)
<b>Partição de biomassa e rotatividade</b>							
<i>Relações alométricas e partições</i>							
Partição folha:lenho para D=2cm	pFS2	-	1	0,096	1	1,64	1
Partição folha:lenho para D=20cm	pFS20	-	0,15	0,034	0,9	0,15	0,035/0,037
Constante de relacionamento entre massa de caule e diâmetro	StemConst	-	0,095	0,065	0,1076	0,02	0,018
Potência de relacionamento entre massa de caule e diâmetro	StemPower	-	2,4	2,68	2,51	3,11	3,14
Fração máxima de PPL para as raízes	pRx	-	0,8	0,8	0,5	0,5	0,8
Fração mínima de PPL para as raízes	pRn	-	0,25	0,20	0,10	0,10	0,1
<i>Serrapilheira e renovação de raiz</i>							
Taxa de queda de serrapilheira para plantios em idades adultas	gammaFx	1/month	0,027	0,07	0,1	0,07	0,07/0,1
Taxa de queda de serrapilheira para plantios t=0	gammaF0	1/month	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Idade em que a taxa de serrapilheira tem seu valor médio	tgammaF	month	12	4	12	4	14
Taxa média de ciclagem radicular	Rttover	1/month	0,015	0,015	0,015	0,025	0,015
<b>PPB e modificadores da condutância</b>							
<i>Modificador de temperatura (fT)</i>							
Temperatura mínima para crescimento	Tmin	deg.°C	8,5	8	8	8	15
Temperatura ótima para crescimento	Topt	deg.°C	16	25	25	25	25
Temperatura máxima para crescimento	Tmax	deg.°C	40	40	40	40	40
<i>Modificador de água no solo (fSW)</i>							
Déficit na proporção de umidade f=0,5	Swconst	-	999	999	999		999
Potência no déficit de proporção de umidade	Swpower	-	9	9	9		9
<i>Efeitos da fertilidade</i>							
Valor de m quando FR=0	m0	-	0	0	0	0	0
Valor de fNutr quando FR=0	fN0	-	1	0,5	0,5	0,5	0,5
Potência de (1-FR) em fNutr	fNn	-	0	1	1	1	1

Continua...

Tabela 4, Continuação

Parâmetros padrões do 3-PG	Nome	Unidades	Sands e Landsberg (2002)	Stape (2004)	Silva (2006)	Borges (2009)	Rascon (2012)
<i>Modificador de Idade (fAge)</i>							
Máxima idade padrão usada no modificador	MaxAge	years	50	50	50	9	9
Potencia da idade relativa em função da idade	nAge	-	4	4	4	4	4
Idade relativa para fAge=0,5	rAge	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
<i>Mortalidade de caule e self-thinning</i>							
Taxa de mortalidade para t grande	gammaNx	%year	0	0	0		0
Taxa de mortalidade de sementes (t=0)	gammaN0	%year	0	0	0		0
Idade em que a taxa de mortalidade tem seu valor médio	tgammaN	year	2	2	2		2
Forma de resposta da mortalidade	ngammaN	-	1	1	1		1
Máxima massa de caule por árvore 1.000 árvores hectares <sup>-1</sup>	wSx100	kg tree <sup>-1</sup>	300	300	300	300	300
Potência na regra <i>self-thinning</i>	thinPower	-	1,5	1,5	1,5		1,5
Fração média perdida de biomassa de folhas em árvores-simples por morte destas	mF	-	0	0	0		0
Fração média perdida de biomassa de raiz em árvores-simples por morte destas	mR	-	0,2	0,2	0,2		0,2
Fração média perdida de biomassa de caule em árvores-simples por morte destas	mS	-	0,2	0,2	0,2		0,2
<b>Estrutura do dossel e processos</b>							
<i>Área foliar específica</i>							
Área foliar específica para plantios em idade 0	SLA0	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	11	11	17	13,74	11
Área foliar específica para plantios em idade aduta	SLA1	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	4	8,5	8,24	7,56	8,5
Idade em que a área foliar específica = (SLA <sub>0</sub> + SLA <sub>1</sub> )/2	tSLA	years	2,5	2,5	0,81	1,23	0,81
<i>Interceptação da luz</i>							
Coefficiente de extinção da PAR pelo dossel	K		0,5	0,4	0,47	0,5	0,47
Idade de fechamento do dossel	fullCanAge	years	0	1,5	1	2	3
Proporção máxima de precipitação interceptada pelo dossel	MaxIntcptn	-	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
LAI em que ocorre a máxima interceptação da precipitação	LAImaxIntcptn	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	0	0	3,33	3,33	3,33
<i>Produção e respiração</i>							
Eficiência quântica do dossel	alpha	molC mol <sup>-1</sup> PAR <sup>-1</sup>	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07
Relação PPL/PPG	Y	-	0,47	0,5	0,47	0,05	0,47

Continua...

Tabela 4, Continuação

Parâmetros padrões do 3-PG	Nome	Unidades	Sands e Landsberg (2002)	Stape (2004)	Silva (2006)	Borges (2009)	Rascon (2012)
<i>Condutância</i>							
Máxima condutância do dossel	MaxCond	m s <sup>-1</sup>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
LAI para máxima condutância do dossel	LAIgcx	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
Define a resposta estomática ao DPV	CoeffCond	1/mBar			0,4	0,0324	0,04
Condutância na camada limite do dossel	Blcond	m s <sup>-1</sup>	0,2	0,2	0,2	0,22	0,2
<b>Madeira e produtividade padrão</b>							
<i>Fração de ramo e casca (FracBB)</i>							
Fração de ramo e casca para plantios em idade inicial 0	fracBB0	-	0,75	0,75	0,79	0,59	0,3
Fração de ramo e casca para plantios em idade adulta	fracBB1	-	0,15	0,15	0,11	0,19	0,14
Idade em que a fração de ramo e casca é =(fracBB <sub>0</sub> + fracBB <sub>1</sub> )/2	tBB	years	2	2	1,35	2,17	1,2
<i>Densidade básica</i>							
Densidade básica para árvores jovens	rhoMin	t m <sup>-3</sup>			0,356	0,382	0,38
Densidade básica para árvores adultas	rhoMax	t m <sup>-3</sup>	0,45	0,45	0,5	0,505	0,455
Idade em que a densidade básica = (rhoMin + rhoMax)/2	tRho	years	4	4	2,1	2,264	1,2
<i>Atura do caule</i>							
Constante de relacionamento entre altura e DAP	aH	-	0,6	0,6	0,6	0,67	1,064/1,17
Potência de relacionamento entre altura e DAP	nHB	-	1,2	1,2	1,2	1,27	1,137/1,10
Potência de <i>stocking</i> na relação volume do caule	nHN	-	0	0	0	0	0

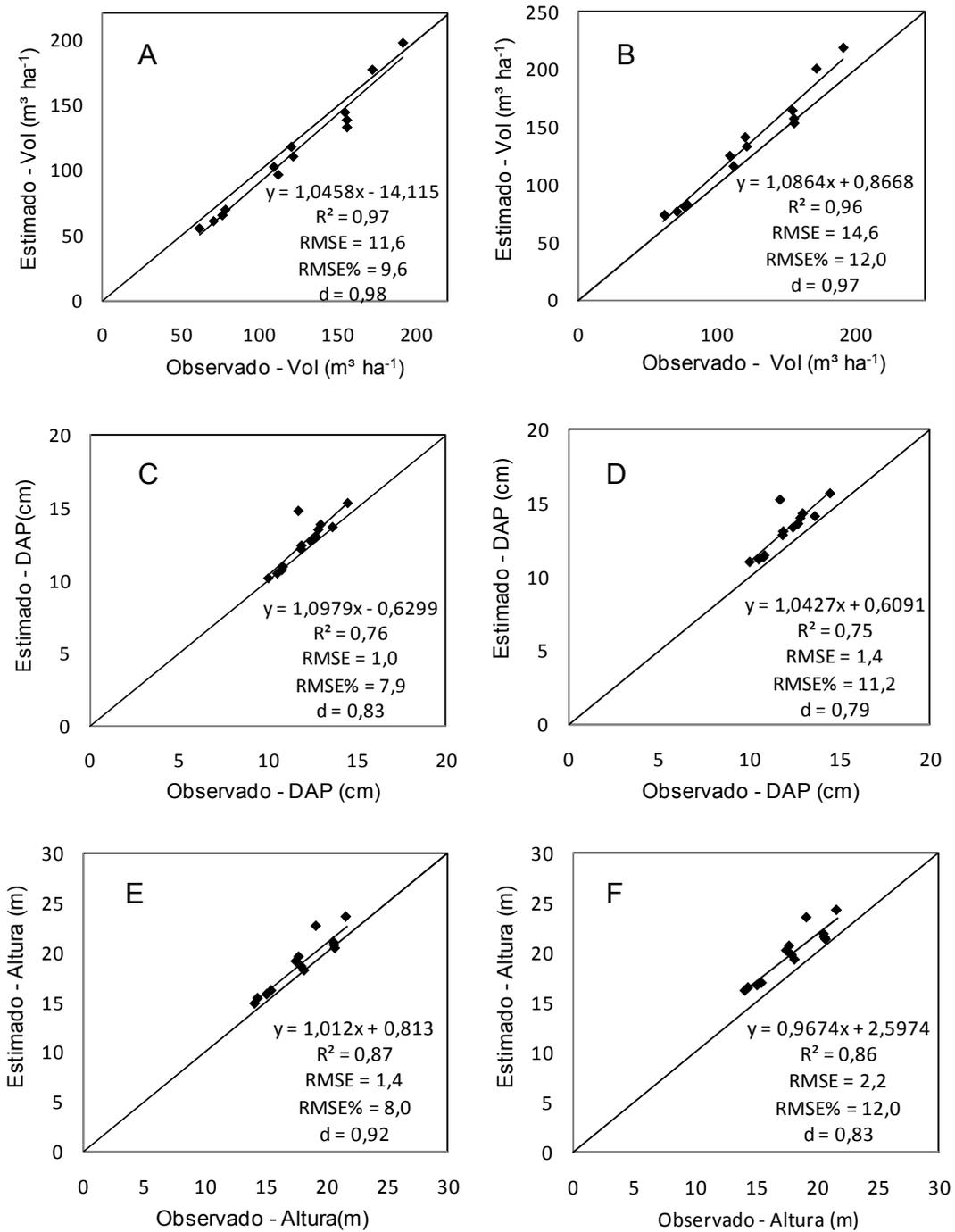


Figura 11 - Correlação entre os dados de volume, DAP e altura total observado e simulado pelo modelo proposto (A, C, E) original (B, D, F) para a região de Felipe, após a calibração.

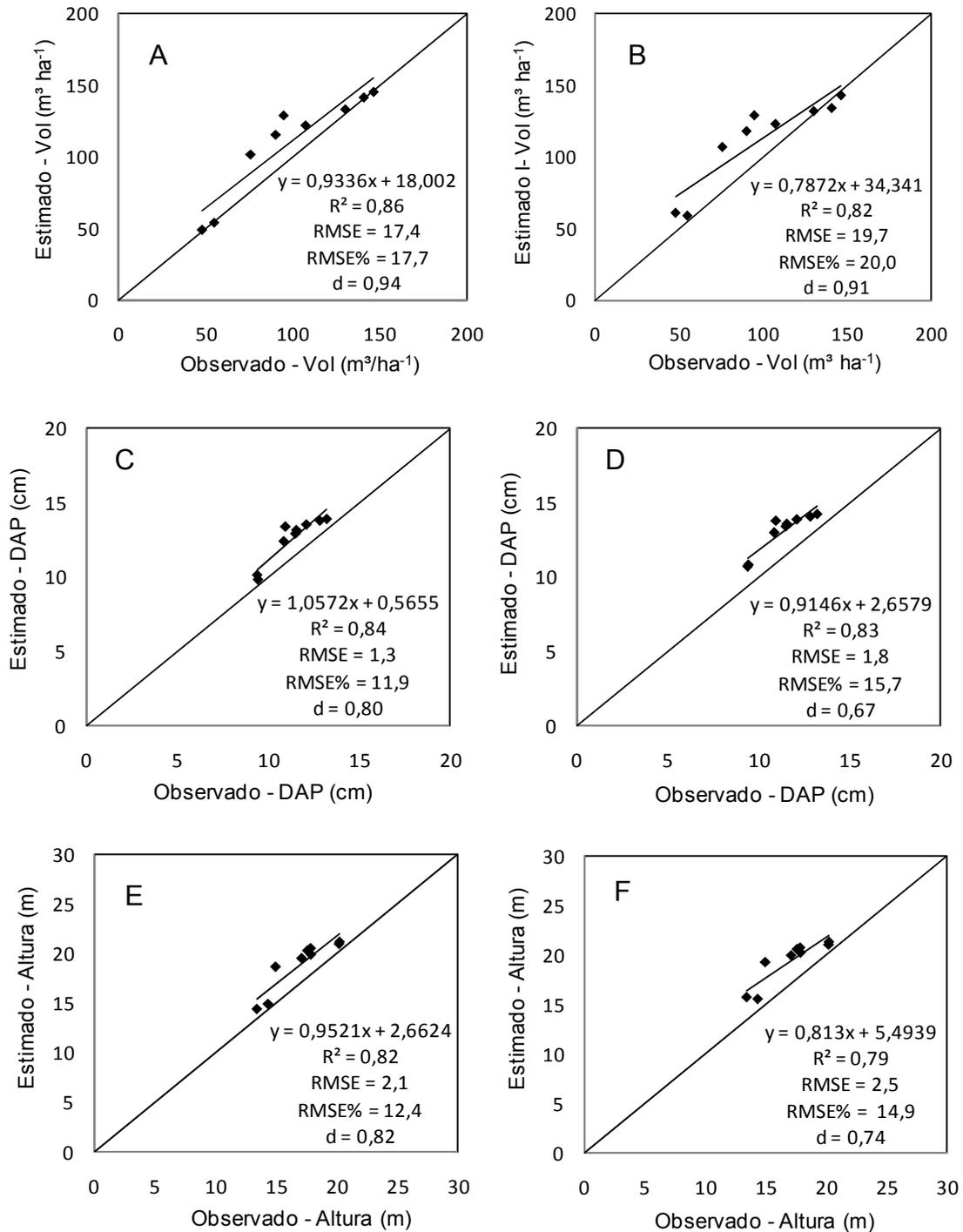


Figura 12 - Correlação entre os dados de volume, DAP e altura total observado e simulado pelo modelo proposto (A, C, E) original (B, D, F) para a região de Pilão, após a calibração.

Os valores das estatísticas gerados na comparação (Figuras 11 e 12) mostram que o modelo proposto de modo geral apresenta melhor desempenho, com maiores coeficientes de determinação, erros menores e maiores índices de concordância para as variáveis analisadas, em relação ao modelo original. Apesar do melhor desempenho estatístico, a diferença entre ambos os modelos não são significativas, sugerindo que a versão modificada melhorou timidamente as simulações.

Na região de Felipe (Figura 11), o modelo proposto reduziu o erro (RMSE) na simulação do volume de 14,6 para 11,6 ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ), na simulação da altura total de 2,2 para 1,4 (m) e na simulação do DAP de 1,4 para 1 (cm).

Em relação à região de Pilão, o modelo proposto apresentou maiores índices de concordância de willmott para volume (0,94), altura (0,82) e DAP (0,80), em comparação ao modelo original que apresentou 0,91 0,74 e 0,67 para volume, altura e DAP, respectivamente.

Em relação ao erro (RMSE), foi verificado para essa região no modelo proposto valores de 17,4 ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ), 2,1 (m) e 1,3 (cm) para volume, altura e DAP, respectivamente, enquanto que o modelo original apresentou maiores valores 19,7 ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ), 2,5 (m) e 1,8 (cm) para volume, altura e DAP, respectivamente.

#### **4.4. Validação**

Para avaliar a capacidade de extrapolação dos modelos (original e proposto) e a precisão das estimativas de crescimento gerados por eles para plantios aos quais ele não foi calibrado, compararam-se as estimativas obtidas pelos modelos para dados de parcelas próximas e independentes das que foram usadas nas etapas anteriores.

A comparação entre as estimativas e os dados observados de ambos os modelos de volume, DAP e altura no processo de validação assim como suas estatísticas são apresentadas nas Figuras 13 e 14. Observa-se que tanto o modelo proposto quanto o modelo original superestimam os valores das variáveis altura e DAP nas duas regiões, onde o modelo proposto o que apresenta menor superestimativa.

De modo geral, os resultados obtidos nessa etapa de validação mostraram que o conjunto de parâmetros calculados e ajustados nas etapas de parametrização e calibração permitiu ao modelo proposto reproduzir ao longo do tempo um pouco melhor que o modelo original, os padrões de crescimento dos plantios de eucaliptos naquela região da Amazônia.

Comparando os ajustes do modelo proposto entre as regiões estudadas, observa-se que as estimativas para volume se ajustaram melhor na região de Felipe apresentando um erro máximo de (RMSE%)  $\pm 10,5\%$  e índice de concordância de willmott (d) de 0,97 contra um erro de  $\pm 22,9\%$  e índice de concordância willmott (d) de 0,91 para a região de Pilão.

Com relação à variável altura, observa-se que a eficiência do modelo proposto na estimativa tanto para a região de Pilão quanto para a região de Felipe foram semelhantes, apresentando o mesmo RMSE 2,2 (m) e índice de concordância (d) 0,82, sendo, porém, mais preciso na região de pilão ( $r^2 = 0,89$ ) do que na região de Felipe ( $r^2 = 0,75$ ).

A variável DAP apresentou ajuste pouco melhor na região de Pilão, com erros de (RMSE%)  $\pm 12,7\%$ , índice de concordância de willmott (d) de 0,76 e coeficiente de determinação de ( $r^2$ ) 0,78, enquanto que a região de Felipe apresentou erros pouco maiores (RMSE = 13,2%) e índice de concordância (d = 0,69) e coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,40$ ) menores.

Diante dos resultados mostrados, observa-se que tanto o modelo proposto quanto o modelo original, apresentaram boa capacidade de extrapolação e descreveram com relativa precisão os padrões de crescimento em termos de volume, altura e DAP, com desempenho um pouco melhor constatado pelo modelo proposto. Entretanto devido aos elevados erros nas estimativas do modelo proposto (maiores que 10%), mesmo sendo menores, que os erros apresentados pelo modelo original, sugere-se que o uso do modelo proposto deva ser feito levando-se em consideração esses parâmetros de erros. Assim, ele poderá ser usado satisfatoriamente para questão de planejamento florestal, sendo, no entanto, inviável seu uso como ferramenta de manejo em virtude dos elevados erros.

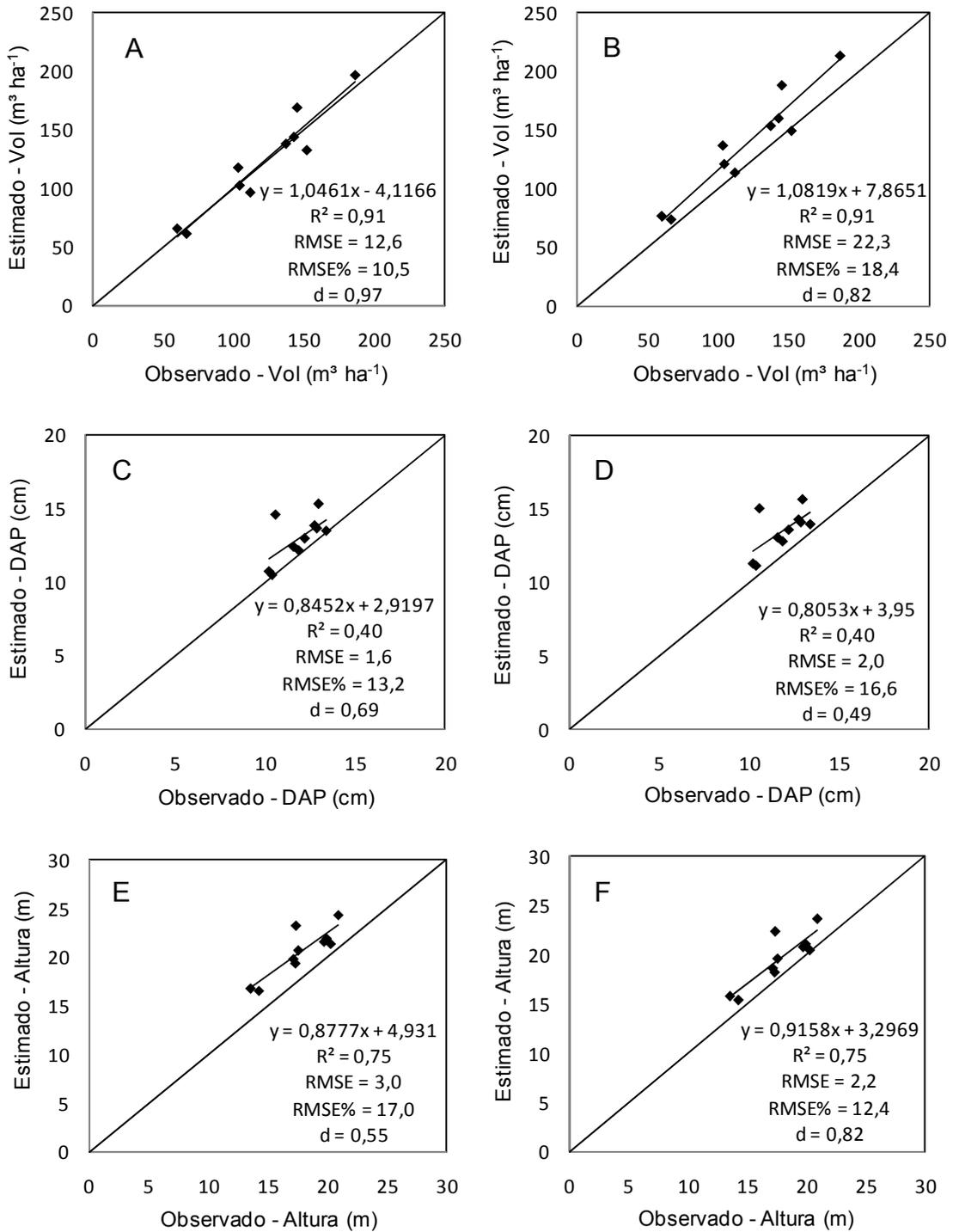


Figura 13 - Correlação entre os dados de volume, DAP e altura total observado e simulado pelo modelo proposto (A, C, E) original (B, D, F) para a região de Felipe, após a validação.

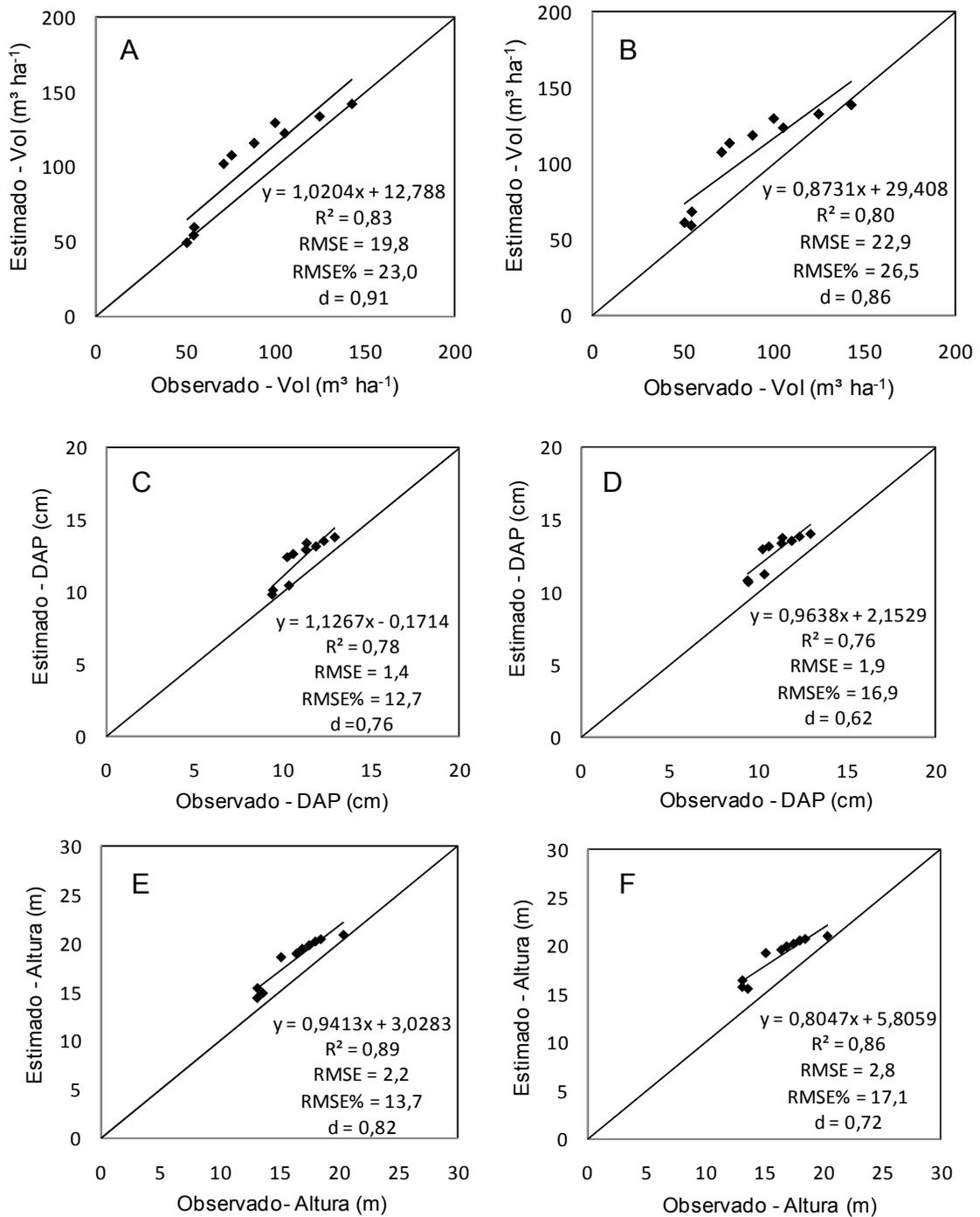


Figura 14 - Correlação entre os dados de volume, DAP e altura total observado e simulado pelo modelo proposto (A, C, E) original (B, D, F) para a região de Pilão, após a validação.

#### 4.4.1. Modificações no 3-PG

Para explicar os motivos que levaram a pequena melhoria nas estimativas do modelo proposto é preciso recorrer à estrutura de funcionamento do modelo 3-PG que tenta simular as interações ecofisiológicas que ocorrem na planta. Para isso foram analisados alguns coeficientes de saída do 3-PG para a região de Felipe, onde o modelo proposto se ajustou melhor ao volume.

A Figura 15 mostra o comportamento médio mensal da transpiração comparando o modelo proposto e o modelo original. Observa-se que no modelo proposto, a intensidade da evapotranspiração é maior entre os meses de junho a janeiro, mas um pouco abaixo do modelo original entre os meses de fevereiro a maio. Os totais médios anuais deixam mais claro essa diferença, com cerca de 1.118 mm estimados pelo modelo proposto e 935 mm do modelo original para uma precipitação média de 2.271 mm.

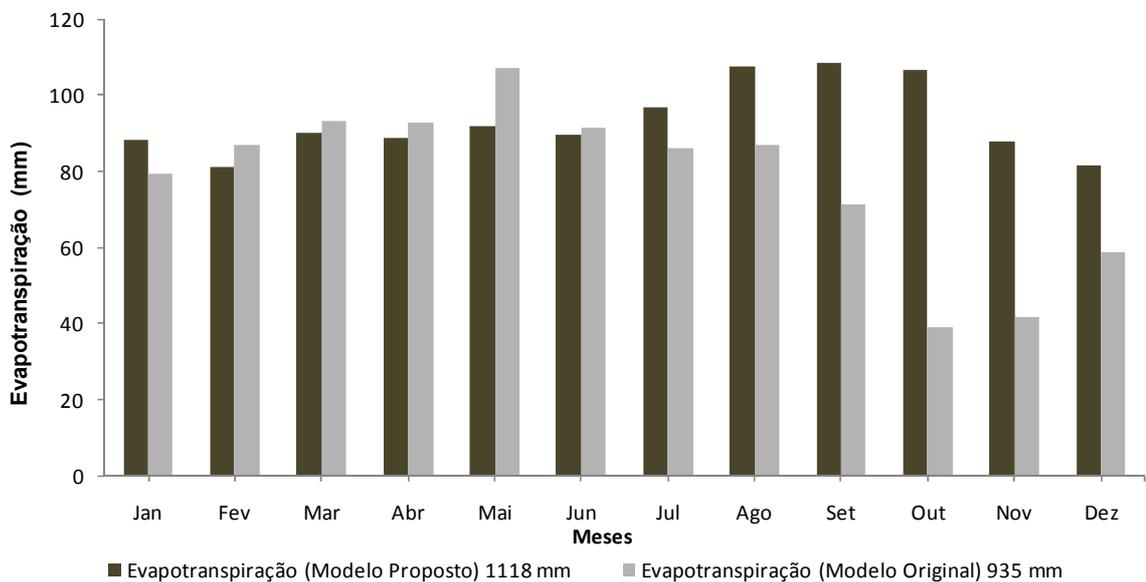


Figura 15 - Comportamento da média mensal da evapotranspiração calculada pelo modelo original e pelo modelo proposto.

É importante mencionar que o modelo original considera como evapotranspiração a equação de Penman-Monteith simplificada somado a uma porcentagem da chuva interceptada pelo dossel que varia com o IAF. Por esse motivo nos meses de menor índice pluviométrico a evapotranspiração no modelo original é reduzida em relação ao modelo proposto, uma vez que o coeficiente de interceptação da chuva pelo dossel presente no modelo original perde seu efeito. A evapotranspiração média anual considerando apenas a equação simplificada de Penman-Monteith é de 594 mm uma diferença de 341 mm, ou seja, uma redução de 36%.

Cabe mencionar, que essas modificações proporcionaram ao modelo proposto simular a evapotranspiração seguindo a sazonalidade observada na região amazônica diferentemente do que ocorre com o modelo original.

Dessa forma, observa-se que o modelo proposto apresenta totais de evapotranspiração superior aos do modelo original, mesmo comportamento encontrado por Silva (2007) na região do rio doce em Minas Gerais. Segundo o autor essa diferença pode ser explicada pelo fato de o modelo proposto calcular a ET com maior rigor no processo físico.

Silva (2007) ressalta também que o modelo original usa no cálculo da evapotranspiração a equação de Penman-Monteith (1965), com algumas simplificações, em que a condutância aerodinâmica é dada como um parâmetro fixo, além de não contemplar o balanço de radiação e efetuar seus cálculos em base mensal. No cálculo da evapotranspiração pelo modelo proposto é utilizada a equação de Penman-Monteith (1965), que inclui os componentes aerodinâmicos e do balanço de radiação, sendo os cálculos efetuados em base diária e integrados para valor mensal, para alimentar o módulo de crescimento do modelo.

Em estudos na região, a evapotranspiração média obtida em diferentes ecossistemas florestais na Amazônia chegou a 3,12 mm dia<sup>-1</sup> na Reserva de Cuiaras (MALHI et al., 2002) no Amazonas e a 3,6 mm dia<sup>-1</sup> na Flona de Caxiuanã no Pará (SOUZA FILHO et al., 2005).

No presente trabalho observou-se que o modelo proposto estimou uma evapotranspiração média anual de 1.118 mm tendo como média diária de 3,19 mm para uma precipitação média anual de 2.271 mm, já o modelo original teve

como média anual de evapotranspiração 935 mm e como média diária 2,6 mm sob o mesmo regime pluviométrico.

A comparação dos dados de evapotranspiração estimados por ambos os modelos com os diversos trabalhos desenvolvidos na região amazônica nos permite afirmar que a evapotranspiração calculada com as modificações introduzidas neste estudo se aproxima mais do real quando comparado com as estimativas do modelo original.

No modelo proposto à base de cálculo do balanço hídrico foi mudada para a escala diária, diferentemente do calculado por Silva (2007) que foi em base horária e do 3-PG original que é calculado em base mensal. Essa mudança proposta por Silva (2007) buscou contemplar a distribuição desuniforme no tempo da chuva e da evapotranspiração e, conseqüentemente, no balanço hídrico.

O 3-PG original considera uma capacidade máxima de armazenamento (CAD) fixa de 100 mm para o cálculo do balanço hídrico em diferentes idades e solos. Como o cálculo do balanço hídrico empregado no modelo original tem base mensal, acaba por prejudicar a estimativa do déficit hídrico em menores períodos, uma vez que tende a distribuir, de forma homogênea, o total de chuva observado em um determinado mês, o que não condiz na maioria dos casos com a realidade

A Figura 16 mostra o comportamento da CAD e a variação do armazenamento de água simulados pelos modelos original e proposto na região de Felipe.

Silva (2007) em seu trabalho verificou que a capacidade máxima de armazenamento de água no solo variava com a idade do eucalipto devido a CAD variar em função do desenvolvimento do sistema radicular. No presente trabalho, a Figura 16 ilustra esse mesmo comportamento, pelo fato de ter sido introduzida no modelo proposto, uma equação que simula o crescimento do sistema radicular em função da idade da planta. Diferentemente do que ocorre com a CAD simulado pelo modelo original em que o máximo alcançado é de 100 mm.

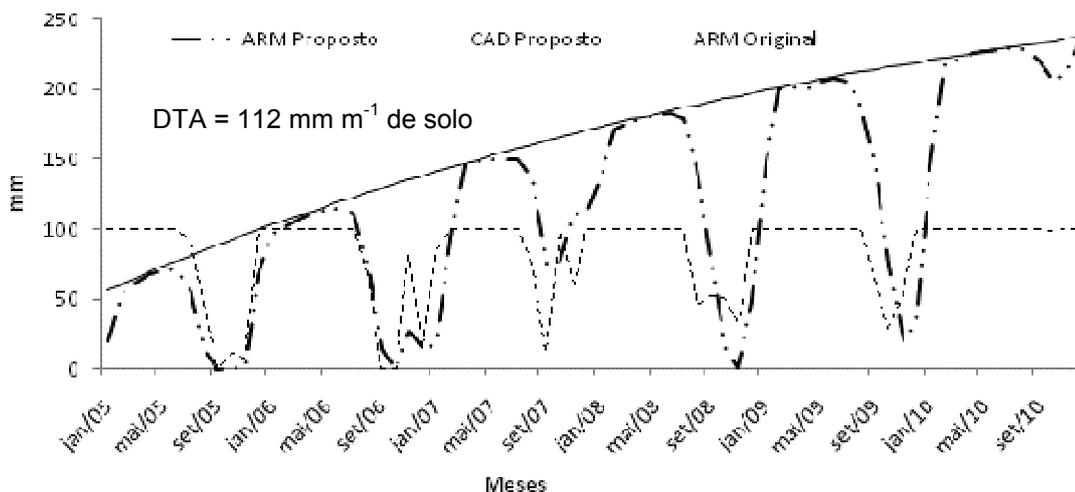


Figura 16 - Valores mensais do armazenamento de água no solo simulados pelos modelos proposto e original e da capacidade de água disponível pelo modelo proposto na região de Felipe.

Como mencionado anteriormente, no modelo proposto foi mudado o tratamento no cálculo da evapotranspiração, DPV e também o balanço hídrico. Essa mudança no modelo proposto fez com que ocorresse uma diminuição do valor do modulador fisiológico ( $f_{SW}$ ) conforme mostrado na Tabela 5.

O tratamento do DPV foi modificado, enquanto o modelo original considera apenas a temperatura para o cálculo do DPV, o modelo proposto considera para o cálculo além da temperatura também a umidade relativa do ar. Essa mudança teve impacto no modulador de DVP que no modelo original em média foi menor que no modelo proposto, embora nesse último o tratamento físico seja mais adequado.

Observa-se na Figura 17, que o modulador de DPV ( $f_{DPV}$ ) apresentou maiores valores no modelo proposto, sendo, portanto menos limitante ao longo dos meses do ano em comparação com o modulador de água no solo ( $f_{SW}$ ) que apresentou maior magnitude e maior limitação em maior número de meses do ano.

Diferentemente do modelo proposto, no modelo original, o modulador de DPV é mais limitante ao longo dos meses do ano em comparação com o modulador de água no solo.

Tabela 5 - Médias mensais para eficiência quântica do dossel (*Alpha*), modulador de DPV ( $f_{DPV}$ ), modulador de água no solo ( $f_{SW}$ ) modulador fisiológico (*PhysMod*) coeficiente de partição para raiz e stem (*pR*, *pS*) e evapotranspiração para o modelo proposto e original na região de Felipe.

Parâmetros	Modelo original	Modelo proposto
<i>Alpha</i>	0,043	0,040
$f_{DPV}$	0,794	0,892
$f_{SW}$	0,817	0,742
<i>PhysMod</i>	0,620	0,608
<i>pR</i>	0,188	0,216
<i>pS</i>	0,766	0,736

Como no cálculo do modulador fisiológico (*PhysMod*) estão envolvidos ambos os moduladores ( $f_{DPV}$  e  $f_{SW}$ ) observam-se que as mudanças realizadas no cálculo do DPV ocasionou um aumento no  $f_{DPV}$  e as mudanças realizadas no cálculo da evapotranspiração e balanço hídrico ocasionaram uma diminuição no  $f_{SW}$ , dessa forma as mudanças realizadas fizeram com que uma anulasse o efeito da outra. Entretanto a magnitude produzida pelo efeito do  $f_{SW}$  estabelecido no modelo proposto foi relativamente maior que no modelo original, fato esse comprovado pelo menor valor médio do modulador fisiológico (*PhysMod*) apresentado pelo modelo proposto (0,608) e maior no modelo original (0,620).

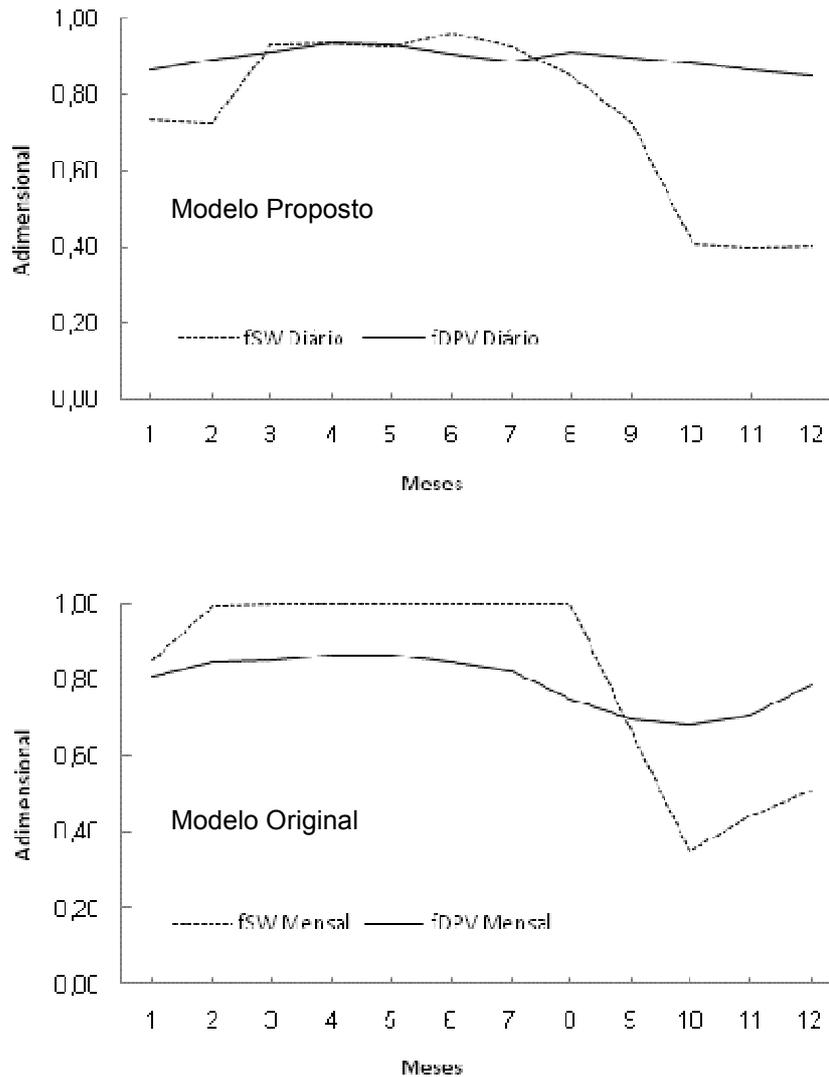


Figura 17 - Médias mensais dos moduladores de água no solo ( $f_{sw}$ ) e de DPV ( $f_{DPV}$ ) para a região de Felipe considerando os modelos proposto e original.

Baseado no equilíbrio funcional do vegetal o modelo simula que quanto maior for à limitação imposta por fatores relacionados ao solo maior será a taxa de alocação de assimilados alocados para as raízes de modo a compensar com o aumento de superfície radicular e assim melhorar a absorção de água pelo vegetal.

Almeida et al. (2004b) observaram que plantios de eucalipto com maior valor de matéria seca de raiz tendem a apresentar menor produtividade de

matéria seca da parte aérea, mesmo comportamento encontrado por Borges (2009).

Nesse sentido, cabe mencionar que o modulador fisiológico na estrutura do modelo 3-PG também influencia na taxa de alocação de biomassa entre os compartimentos da planta, esse comportamento é demonstrado pelo maior valor médio do coeficiente de alocação de assimilados para as raízes apresentado pelo modelo proposto ( $pR = 0,216$ ) em relação ao original ( $pR = 0,188$ ). Como ocorreu maior alocação de assimilados para as raízes no modelo proposto, a tendência foi a diminuição na alocação de assimilados para a parte aérea do vegetal.

Esse comportamento foi verificado, pois a alocação de biomassa para o stem (galhos + cascas + fuste) foi menor no modelo proposto ( $pS = 0,67$ ), já que apresentou maior coeficiente de alocação para as raízes em comparação com o modelo original ( $pS = 0,70$ ), que apresentou menor coeficiente de alocação para as raízes.

Por fim, como as mudanças realizadas no modelo proposto levaram a uma pequena diminuição no valor do modulador fisiológico (*PhysMod*), já explicado anteriormente, essa variação para baixo causou maior penalização na eficiência quântica do dossel (*Alpha*) gerando uma diminuição na produção de biomassa. Somado a isso, ocorreu também uma maior alocação de assimilados para as raízes e diminuição na alocação de biomassa para a parte aérea conferindo ao modelo proposto uma estimativa dos dados de volume, DAP e altura com valores pouco menores do que o modelo original, o que lhe proporcionou uma redução da diferença entre os dados medidos e observados.

É importante mencionar que as mudanças realizadas no modelo proposto produziram um ganho pequeno na eficiência da estimativa dos valores em relação ao modelo original, entretanto, as mudanças propostas nesse trabalho reduziram o empirismo e conferiram um rigor físico mais adequado ao modelo proposto.

#### **4.5. Diferenças de produtividade entre as regiões Felipe e Pilão**

Os dados dos inventários florestais da empresa Jari Celulose mostram que a região de Pilão apresenta uma produtividade ligeiramente menor que a

região de Felipe (Figura 18). A idéia desse tópico foi usar o modelo proposto validado e avaliar como as características edafoclimáticas podem estar afetando a diferença de produtividade entre as regiões. De acordo com o modelo, a produtividade (volume total por hectare) em Felipe é superior em 21  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  do que a registrada em Pilão. Segundo Johnsen et al. (2001), o potencial produtivo de determinada floresta pode ser obtido por meio da modelagem ecofisiológica, uma vez que incorporam conhecimentos sobre mecanismos fisiológicos e ecológicos por meio de algoritmos preditivos.

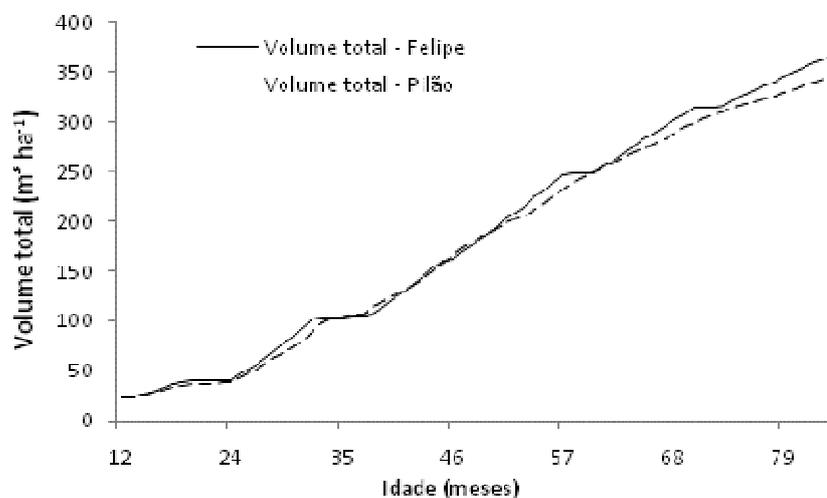


Figura 18 - Estimativas do volume total simuladas pelo modelo proposto para as regiões de Felipe e Pilão.

Segundo Carneiro et al. (2008a), vários fatores controlam as interações entre o sistema solo-planta-atmosfera em plantios de eucalipto, dentre os quais se destacam os fatores fisiológicos e as condições ambientais. As principais variáveis ambientais que controlam as trocas gasosas entre o dossel vegetal e a atmosfera são: irradiância solar, disponibilizando energia para o processo de evaporação e transpiração; temperatura do ar, controlando o déficit de pressão de vapor entre a cavidade estomatal e a atmosfera; disponibilidade de água no solo, que regula a abertura estomática e conseqüentemente, o processo de

difusão do vapor de água entre a cavidade estomatal e a atmosfera, podendo afetar a produtividade

Para Landsberg e Gower (1997), três fatores ambientais predominantes controlam a condutância estomática da copa, a intensidade de luz, o déficit de pressão de vapor e a quantidade de água nas folhas que esta intimamente ligada a disponibilidade de água no solo.

Segundo Almeida e Landsberg (2003), o déficit de pressão de vapor pode ter efeito direto na produtividade da planta, pois elevados valores podem ocasionar a diminuição do grau de abertura dos estômatos (menor condutância do dossel) e reduzir, com isso, as taxas de fotossíntese, ocasionando a diminuição da produção de fotoassimilados e conseqüentemente o crescimento do vegetal. Entretanto a disponibilidade de água no solo pode também afetar a abertura estomática e conseqüentemente o crescimento do eucalipto.

No presente trabalho, comparando as características climáticas das regiões de Felipe e Pilão, observou-se que provavelmente a disponibilidade de água no solo foi o fator que mais afetou o grau de abertura estomática.

Segundo Carneiro et al. (2008a), a transpiração das plantas é função, sobretudo, do estoque de água disponível no solo regulando a abertura estomática e conseqüentemente, o processo de difusão do vapor de água entre a cavidade estomatal e a atmosfera.

Almeida e Soares (2003) observaram que a redução da disponibilidade de água no solo ocasionava redução na condutância estomática do eucalipto, demonstrando, assim, a capacidade que o eucalipto tem para exercer o controle estomático com o suprimento de água no solo.

A Figura 7 na seção 4.1 mostra que o déficit de pressão de vapor (DPV) apresenta valores mais elevados e menor amplitude de variação na região de Felipe, contrastando com a região de Pilão que apresenta menores valores de DPV e maior amplitude de variação ao longo do ano. Observa-se que mesmo a região de Felipe apresentando maiores valores de DPV que a região de Pilão, ainda assim é a região de maior produtividade.

Na seção 4.1 foi mostrado também que a região de Felipe apresenta maior disponibilidade de água, uma vez que detinha maior precipitação que a região de Pilão, em média cerca de 316 mm a mais de chuva na região de Felipe. Observa-se que a maior disponibilidade de água em Felipe favoreceu a

abertura estomática mesmo com maiores valores de DPV, ou seja, quando há água disponível, o eucalipto consegue manter os estômatos abertos, mesmo quando os valores de DPV são elevados (Figura 19). Na região de Pilão, o comportamento foi o inverso, considerando seus baixos valores de DPV, que em teoria poderiam favorecer a abertura dos estômatos, observou-se que a condutância estomática foi menor, provavelmente influenciada pela menor disponibilidade de água no solo (Figura 19).

Dessa forma, os plantios de eucalipto de Pilão apresentando menor condutância do dossel, passam menos tempo com os estômatos abertos absorvendo CO<sub>2</sub> para a fotossíntese, acarretando diminuição na produção de biomassa.

Diante desses resultados simulados, observa-se que a condutância do dossel nas plantações de eucalipto nessa região da Amazônia foram mais sensíveis as variações na disponibilidade de água no solo do que as variações no déficit de pressão de vapor.

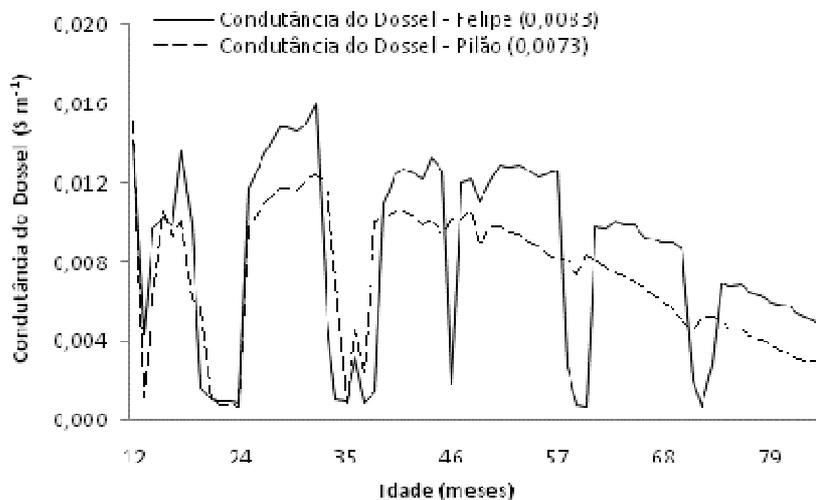


Figura 19 - Estimativas do padrão de comportamento da condutância do dossel simuladas pelo modelo proposto para as regiões de Felipe e Pilão.

O uso mais eficiente da água está diretamente atrelado ao tempo de abertura estomática, pois, enquanto a planta absorve, a água é perdida para o ambiente por evapotranspiração, seguindo uma corrente de potenciais hídricos (PEREIRA-NETTO, 2002).

A eficiência de uso da água (EUA) na produção de madeira para as duas regiões estudadas também foi analisada. Segundo Silva (2007), a EUA pode ser entendida como a eficiência com que a vegetação utiliza água para seu crescimento, ou a quantidade de matéria seca produzida por unidade de massa de água transpirada.

A Figura 20 mostra que os plantios de eucalipto da região de Pilão de modo geral apresentam maior eficiência de uso da água em relação aos plantios da região de Felipe. Esse comportamento demonstra a capacidade que o eucalipto tem para se adaptar as condições hídricas do local, uma vez que usando menor quantidade de água, os plantios de eucalipto na região de Pilão conseguiram em termos relativos produzir maiores quantidades de matéria seca.

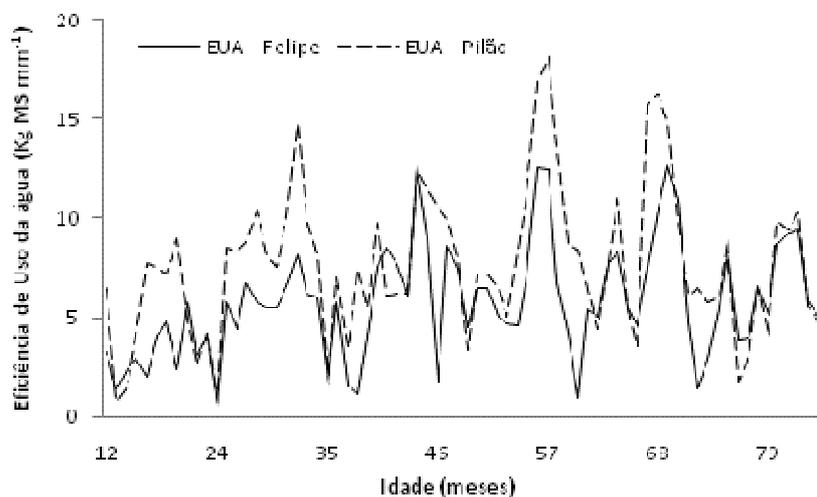


Figura 20 - Estimativas do padrão de comportamento da Eficiência do Uso da Água (EUA) simuladas pelo modelo proposto para as regiões de Felipe e Pilão.

Stape e Gomes (1996), em estudos sobre a influência dos estresses hídrico e nutricional no crescimento de plantios de eucalipto no Nordeste do Brasil, verificaram que a produtividade variava bastante, sendo superior nos locais com maior precipitação. Esse comportamento foi observado entre as regiões estudadas, pois Felipe com maior precipitação que Pilão apresentou maior produtividade.

Silva (2006) relata que a disponibilização dos recursos de água e, ou, de nutrientes contribuem de forma diferenciada para o incremento na produção de biomassa. Em relação à fertilidade do solo, como a empresa realiza a correção da acidez e faz adubação considerando as peculiaridades de cada região, provavelmente esse fator nutricional não foi o mais determinante na diferença de produtividade entre as regiões estudadas.

Entretanto, como em Pilão ocorrem solos concrecionários (pequenas áreas), muito provavelmente essa característica pode estar afetando os plantios nessa região, uma vez que solos dessa natureza (pedregosos) dificultam o crescimento do sistema radicular e prejudicam a absorção de água e nutrientes pelo vegetal, contribuindo para a menor produtividade nessa região.

Segundo Pezzopane (2001), a influência do relevo pode modificar a disponibilidade de radiação de acordo com o grau de inclinação e face de exposição do terreno, provocando aumento ou diminuição da energia disponível para a biossíntese.

Silva (2007) demonstrou em seu trabalho na bacia do rio doce em Minas Gerais que as regiões que apresentaram maior disponibilidade de radiação foram aquelas com maior produtividade, mesmo comportamento encontrado no presente trabalho. Na seção 4.1, observa-se que a região de Felipe apresenta maior disponibilidade de radiação que em Pilão, portanto, maior quantidade de energia para biossíntese e conseqüentemente maior produtividade.

A fixação de carbono pelas plantas depende da interceptação da radiação e sua conversão em energia química, portanto, o IAF pode ser considerado um parâmetro indicativo de produtividade de uma floresta (FAVARIN et al., 2002). Paiva (2009) relata que a variação na intensidade e

duração da radiação incidente, pode gerar distintas respostas do IAF do dossel, tornando importante essa quantificação.

A Figura 21 corrobora as afirmativas de Favarin et al. (2002) e Paiva (2009). Observa-se que o IAF variou entre as regiões provavelmente em resposta a disponibilidade de radiação, apresentando maiores valores nas áreas mais produtivas e menores valores nas regiões menos produtivas, Felipe e Pilão respectivamente. Quanto maior for o IAF, maior será a área de interceptação de energia radiante, sendo maior também a conversão em energia química, consequentemente maior fotossíntese e produção.

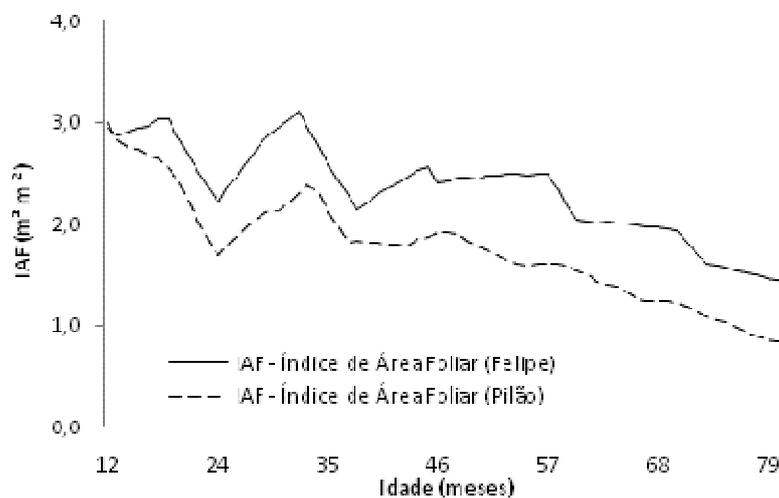


Figura 21 - Estimativas do padrão de comportamento do Índice de Área Foliar (IAF) simuladas pelo modelo proposto para as regiões de Felipe e Pilão.

Em síntese, os maiores níveis de abertura estomática em decorrência da maior disponibilidade de água no solo vinculado a maior precipitação, maiores níveis de radiação e maior superfície de interceptação de energia radiante em função de maior IAF conferiram aos plantios da região de Felipe condições mais favoráveis para a realização de taxas elevadas de fotossíntese que no final do processo se traduzem em maior produtividade. Cabe mencionar que a região de Pilão por possui pequenas áreas com solos pedregosos

provavelmente contribuíram para menor expansão do sistema radicular dos plantios, o que dificulta a absorção de água e nutrientes prejudicando o processo fotossintético sendo mais um elemento que ajuda a explicar a menor produtividade nessa região.

## 5. CONCLUSÕES

As alterações realizadas no modelo proposto produziram um ganho pequeno na eficiência da estimativa do volume, DAP e altura em relação ao modelo original. Entretanto as modificações propostas nesse trabalho por terem melhorado o rigor físico no tratamento dos processos que envolvem o balanço hídrico (déficit de pressão de vapor e evapotranspiração) reduziram o empirismo do modelo proposto.

Os modelos proposto e original, apresentaram boa capacidade de extrapolação e descreveram com boa precisão os padrões de crescimento em termos de volume, altura e DAP. Verificou-se também um melhor ajuste/ganho pelo modelo proposto.

As melhores condições ambientais em termos de maiores taxas de radiação e precipitação, somada ao maior Índice de Área Foliar observadas na região de Felipe, contribuíram significativamente para a realização de níveis elevados de fotossíntese que no final do processo se traduziu em maior produtividade nessa região.

## REFERÊNCIAS

ALBER, J.D.; FEDERER, C.A. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. **Ecologia**, v. 92, p. 463-474, 1992.

ALEXANDRE, M.M. **Calibração do modelo 3-PG para povoamentos de pinheiro bravo (*Pinus Pinaster*) em Portugal**. 2009. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

ALMEIDA, A.C.; LANDSBERG, J.J. Evaluating methods of estimating global radiation and vapor pressure deficit using a dense network of automatic weather stations in coastal Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 118, p. 237-250, 2003.

ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V. Comparação entre o uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, p. 159-170, 2003.

ALMEIDA, A.C.; MAESTRI, R.; LANDSBERG, J.J.; SCOLFORO, J.R.S. Linking process-based and empirical forest models in Eucalyptus plantations in Brazil. In: AMARO, A.; TOMÉ, M. (Eds.). **Modelling forest systems**. Wallingford, UK: CABI, 2003. p. 63-74.

ALMEIDA, A.C.; LANDSBERG, J.J.; SANDS, P.J.; AMBROGI, M.S.; FONSECA, S.; BARDDAL, S.M.; BERTOLUCCI, F.L. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in fast growing Eucalyptus plantations. **For. Ecol. Manage.**, v. 193, p. 167-177, 2004a.

ALMEIDA, A.; LANDBERG, L.; SANDS, P.J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 179-195, 2004b.

ALVAREZ, D.C. **Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de Eucalyptus no sul do Estado de São Paulo**. 2011. 279 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTADORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário 2011, ano base 2010**. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 10 jan. 2012.

BAESSO, R.C.; RIBEIRO, A.; SILVA, M.P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 335-344, 2010.

BAUCH, R.E.; KIKUCHI, M.Y.; PIRES, J.S.R. **Avaliação de certificação do Manejo das plantações florestais da Jari celulose S.A. do Estado do Pará e Amapá Brasil**. Scientificcertification Systems, 2004.

BORGES, J.S. **Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais**. 2009. 77 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **CAGED – Cadastro Geral de Empregados e Desempregados**. Disponível em: <<http://www.portal.mte.gov.br/caged>>. Acesso em: 12 jan. de 2012.

CARNEIRO, R.L.C.; RIBEIRO, A.; HUAMAN, C.A.M.; LEITE, F.P.; SEDIYAMA, G.C.; BARROS, N.F. Consumo de água em plantios de eucalipto - Parte 1: Determinação da condutância estomática em tratamentos irrigados e não irrigados. **Revista Árvore**, v. 32, p. 1-10, 2008.

COOPS, N.C.; WARING, R.H. Assessing forest growth across southwestern Oregon under a range of current and future global change scenarios using a process model, 3-PG. **Global Change Biology**, v. 7, p. 15-29, 2001a.

COOPS, N.C.; WARING, R.H. Estimating maximum potential site productivity and site water stress of the Eastern Siskiyou Mountains of southwestern Oregon using a satellite driven process model, 3-PGS. **Can. J. For. Res.**, v. 31, p. 143-154, 2001b.

COOPS, N.C.; WARING, R.H.; LANDSBERG, J.J. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy productivity. **For. Ecol. Manage.**, v. 104, p. 113-127, 1998a.

COOPS, N.C.; WARING, R.H.; LANDSBERG, J.J. The development of a physiological model (3-PGS) to predict forest productivity using satellite data. In: NABUURS, G.; NUUTINEN, T.; BARTELINK, H.; KOORHONEN, M. (Eds.). Forest scenario modelling for ecosystem management at landscape level. **EFI Proceedings**, p. 173-191, 1998b.

COOPS, N.C.; WARING, R.H.; LANDSBERG, J.J. Estimation of potential forest productivity across the Oregon transect using satellite data and monthly weather records. **Int. J. Remote Sens.**, 2000.

DYE, P.J. Modelling growth and water use in four *Pinus patula* stands with the 3-PG process-based model. **S. Afr. For. J.**, v. 191, p. 53-63, 2001.

FACCO, A.G. **Modelagem e simulação geospacial da variação dos componentes do balanço hídrico para plantios de eucalipto em áreas de relevo ondulado na bacia do rio doce, Minas Gerais**. 2004. 89 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FAVARIN, J.L.; DOURADO NETO, D.; GARCIA Y GARCIA, A.; VILA NOVA, N.A.; FAVARIN, M.G.G.V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 769-773, 2002.

FERREIRA, M.M. **Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos brasileiros**. 1988. 79 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

GOMES, A.G.; VARRIALE, M.C. **Modelagem de ecossistema: uma introdução**. 2.ed. Santa Maria: UFSM, 2004. 503 p.

JOHNSEN, K.; SAMUELSON, L.; TESKEY, R.; McNULTY, S.; FOX, T. Process models as tools in forestry research and management. **For. Sci.**, v. 47, p. 2-8, 2001.

KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 77, n. 3, p. 437-471, 1996.

LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. **Applications of physiological ecology to forest management**. San Diego: Academic Press, 1997. 344 p.

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

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**, v. 47, p. 43-51, 2001.

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. **For. Ecol. Manage.**, v. 172, p. 199-214, 2003.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. 531p.

LIMA, P.R.A.; LEOPOLDO, P.R. Interceptação de chuva por mata ciliar na região central do Estado de São Paulo. **Energia na Agricultura**, v. 14, n. 3, p. 25-35, 1999.

LONDERO, E.K. **Calibração do modelo 3-PG para *Eucalyptus saligna* Smith na região de Guaíba**. 2011. 68 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

MALHI, Y.R.; PEGORARO, E.; NOBRE, A.D.; PEREIRA, M.G.P.; GRACE, J.; CULF, A.D.; CLEMENT, R. The energy and water dynamics of a central Amazonian rain Forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 10, 2002.

McMURTRIE, R.E.; COMINS, H.N.; KIRSCHBAUM, M.U.F., WANG, Y.P. Modifying existing forest growth models to take account of effects of elevated CO<sub>2</sub>. **Australian Journal Botanic**, v. 40, p. 657-677, 1992.

MENEZES, A.A. **Produtividade do eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo**. 2005. 98 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environmental. **Symp. Soc. Expl. Biol.**, p. 205-234, 1965.

NOGUEIRA, C.A.S. **Estado nutricional e produtividade de plantios de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* submetidos a diferentes níveis de adubação no vale do Rio Jari, Pará e Amapá**. Brasília: Ministério da Educação/Universidade Federal Rural da Amazônia, 2005.

PAIVA, Y.G. **Estimativa do índice de área foliar por métodos óticos e sensoriamento remoto para calibrar modelo ecofisiológico em plantios de eucalipto em áreas de relevo ondulado**. 2009. 62 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PEREIRA-NETTO, A.B. Crescimento e desenvolvimento. In: WACHOWICZ, C.M.; CARVALHO, R.I.N. (Eds.). **Fisiologia vegetal - produção e pós-colheita**. Curitiba: Champagnat, 2002. p. 17-42.

PEZZOPANE, J.E.M. **Caracterização microclimática, ecofisiológica e fitossociológica em uma floresta estacional semidecidual secundária, em Viçosa, MG**. 2001. 240 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

RICHARDS, L.A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. (Eds.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 128-152.

RUNNING, S.W.; GOWER, S.T. FOREST-BGC, A general model of Forest ecosystem processes for regional applications, II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. **Tree Physiology**, v. 9, p. 147-160, 1991.

SALASSIER, B. et al. **Manual de irrigação**. 7.ed. Viçosa: UFV, 2005. 611 p.

SALATI, E.; DALL'OLIO, A.; MATSUI, E.; GAT, J.R. Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study. **Water Resource Research**, v. 15, n. 5, p. 1250-1258, 1979.

SANDS, P.J. **Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data collection and parameter assignment**: project B4 - modeling productivity and wood quality. Hobart, Australia: Cooperative Research Centre for Sustainable Production Forestry, 2004.

SANDS, P.J.; LANDSBERG, J.J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, v. 163, p. 273-292, 2002.

SILVA, G.G.C. **Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em reposta à disponibilidade de água e nutrientes**. 2006. 116 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, W.C.M. **Modelagem dos balanços de radiação e de água e simulação do crescimento do eucalipto na Bacia do Rio Doce**. 2007. 104 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, M.P.; RIBEIRO, A. Redução de escala de simulações de mudanças climáticas para uso em agrometeorologia In: CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA AGRICOLA, 6, 2010, Chillán. **Anales...** CIIACH, 2010.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. **Fatos e números do Brasil florestal**. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2012.

SOUZA FILHO, J.D.C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M.H.; COHEN, J.C. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 223-229, 2005.

STAPE, J.L. **Production ecology of clonal eucalyptus plantations in northesastern Brazil**. 2002. 225 p. Tese (Doutorado) – Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

STAPE, J.L.; GOMES, A.N. Influência dos estresses hídricos e nutricionais no crescimento de plantios de eucaliptos no nordeste do Brasil. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 10, 1996, Águas de Lindóia. **CD-ROM...** Águas de Lindóia, 1996.

STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; BINKLEY, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 219-234, 2004.

SULLIVAN, A.D.; CLUTTER, J.L. A simultaneous growth and yield model for loblolly pine. **Forest Science**, Washington, v. 18, p. 76-86, 1972.

TICKLE, P.K.; COOPS, N.C.; HAFNER, S.D. Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using the spatial model, 3-PG spatial. **For. Ecol. Manage.**, v. 152, p. 275-291, 2001.

TSUKAMOTO FILHO, A.A.; COUTO, L.; NEVES, J.C.L.; PASSOS, C.A.M.; SILVA, M.L. Fixação de carbono em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. **Agrossilvicultura**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 29-41, 2004.

WANG, Y.P.; JARVIS, P.G. Description and validation of an array model - MAESTRO. **Agric. For. Meteorol.**, v. 51, p. 257-280, 1990.

WEINSTEIN, D.A.; BELOIN, R.M.; YANAI, R.D. Modeling changes in red spruce carbon balance and allocation in response to interacting ozone and nutrient stresses. **Tree Physiology**, v. 9, p. 127-146, 1991.

WHITEHEAD, D.; HALL, G.M.J.; WALCROFT, A.S. et al. Analysis of the growth of rimu (*Dacrydium cupressinum*) in South Westland, New Zealand, using process-based simulation models. **Int. J. Biometeorol.**, v. 46, p. 66-75, 2002.

WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Lancaster, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

ZEIGLER, B.P.; PRAEHOFER, H.; GON KIM, T. **Theory of modeling and simulation-integrating discrete event and continuous complex dynamic systems**. London: Academic Press, 2000. 510 p.

ZHANG, H.; GATES, R.S.; COLLIVER, D.G. Turing machine approach to solve psychrometric attributes. **Transactions of the ASAE**, v. 40, n. 3, p. 823-831, 1997.