Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Aprimoramentos, teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de *Eucalyptus* no nordeste do estado de São Paulo

Cristiane Camargo Zani de Lemos

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2012

Cristiane Camargo Zani de Lemos
Engenheiro Florestal

Aprimoramentos, teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de *Eucalyptus* no nordeste do estado de São Paulo

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LUIZ STAPE**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP

Lemos, Cristiane Camargo Zani de
Aprimoramentos, teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de *Eucalyptus* no nordeste do estado de São Paulo / Cristiane Camargo Zani de Lemos. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.
175 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Ecofisiologia 2. Eucalipto 3. Fertilidade do solo 4. Florestas - Produtividade 5. Índice de área foliar 6. Sistema de Informação Geográfica I. Título

CDD 634.9734
L557a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

À Deus por sempre iluminar o meu caminho.
Aos meus pais Lúcia e Zani pelo amor e ensinamento:
"A maior arma do homem é o seu conhecimento".
Ás minhas irmãs Juliana e Carolina pela eterna amizade e companheirismo.
Ao meu esposo e amado Gabriel que sempre me apoiou na loucura que é a minha vida.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela estrutura e qualidade de ensino oferecida.

À FAPESP e ao IPEF, pelo apoio financeiro e concessão de bolsa de estudos nos primeiros anos de doutorado direto.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Luiz Stape, por ter me trazido ao mundo da pesquisa em Modelagem e Ecofisiologia, mostrando a grandiosidade e complexidade que é o crescimento de uma árvore. Pelos seus ensinamentos e orientações, essenciais para meu desenvolvimento científico.

À International Paper do Brasil, que me forneceu desde a graduação em Engenharia Florestal ao doutorado, subsídios técnicos e financeiros direcionados ao mundo da pesquisa florestal, sempre me orientando em busca de respostas no mundo científico aos problemas florestais cotidianos, nas pessoas de Luis Fernando Silva e Adriano Almeida.

Aos professores da ESALQ Luiz Roberto Angelocci e Luciana Duques, aos pesquisadores da Embrapa Floresta Rosana Higa e Marcos Wreger e ao pesquisador do CIRAD Jean Paul Laclau por todo o conhecimento e auxílio prestado para a execução desta tese.

Aos meus amigos de trabalho da Pesquisa e Desenvolvimento Florestal, Carla Garcia, Flávio Augusto, Narciso Cardoso, Sebastião Oliveira; aos profissionais do Geoprocessamento que me ajudaram muito na execução do zoneamento da produtividade: João Morato, Thiago Freitas, Pedro Costa; aos amigos do planejamento e inventário, pelas longas discussões sobre modelos de crescimento e densidade da madeira: Karla Weber e José Rodrigo Banhara; à Danielli Arruda pelas cobranças mensais do progresso do projeto “Modelagem Ecofisiólogia”, o qual parte deste resultou nesta tese; à equipe de campo que sempre alegre e prestativa ajudou-me em minhas coletas: Jair Gabriel, Airton Guilherme e Élcio Reis; e ao antigo estagiário, hoje um profissional, Renato Meulman, pelo apoio nas coletas de dados.

Ao pesquisador do IPEF/ FPC Clayton Alvares, que me auxiliou no uso das ferramentas de Sistema de Informação Geográfica, tornando possível o zoneamento da produtividade.

Ao Omar Carrero, Rodrigo Hakamada e Jose Alvarez pelas discussões sobre modelos, modelagem e parcelas gêmeas, que ajudaram muito no progresso desta pesquisa.

Aos amigos do Laboratório de Ecofisiologia Florestal e Silvicultura (LEFS), Juliana Biruel, Marina Gentil, Ana Paulo Ferez, Otávio Campoe, Ana Heloísa Marrich, Jose Henrique Bazani, Rafaela Carneiro e Estela Foltran, pelo conhecimento, ajuda e apoio ao longo dos meus anos de jornada no doutorado. À Carolina Zoéga (Boidéia) e Raíssa Cortes (Dako) pela moradia, suporte, atenção, companheirismo e ensinamento propocionados ao longo de uma fase deste trabalho desenvolvida na North Carolina State University.

Aos amigos do Grupo Florestal Monte Olimpo (GFMO), Associação de Ex-Integrantes do Grupo Florestal Monte Olimpo (AEI- GFMO), Forest Productivity Cooperative (FPC) e Instituto de Pesquisa Florestal (IPEF).

Aos meus tios Ricardo, Maria José, Silas, Maria Helena e Rolf pela atenção e preocupação com o andamento desta tese.

Ao casal Sérgio Ferreira Mendes e Juliana Zani Mendes pelo auxílio na elaboração e correção dos capítulos. À minha irmã Carolina Zani pelas risadas proporcionadas nos momentos mais tensos.

Ao meu marido Gabriel pelo apoio e companherismo nos estudos de finais de semana.

Aos meus pais José Zani Filho e Maria Lucia C. Zani por todo apoio, orientação e incentivo aos estudos ao longo de toda a minha vida.

Aos grandes amigos da vida Bruno Lima (Tamp's), Marina Sinício (Lula), Natália Canova (K-nola), Lauren Silva (Hill), Priscila Credendio, Leandro Credendio, Paula Oliveira, Luciana Valentino e Carmem Soto, pessoas que me deram força nesta fase da minha vida e me fazem uma pessoa mais feliz a cada dia. Ao Kléber Augusto alegria do meu dia-a-dia.

Em fim, a todos que, de alguma maneira, fizeram parte de minha vida e contribuíram para que eu chegasse até aqui.

SUMÁRIO

RESUMO 11

ABSTRACT 13

1 INTRODUÇÃO 15

1.1 Revisão Bibliográfica 19

1.1.1 Evolução da produtividade do *Eucalyptus* no Estado de São Paulo 19

1.1.2 Estimativa de crescimento e produtividade florestal 22

1.1.3 Modelo ecofisiológico 3-PG e processos fisiológicos 24

1.1.3.1 Assimilação de carbono 26

1.1.3.2 Alocação de carbono 30

1.1.3.3 Mortalidade das árvores 34

1.1.3.4 Balanço hídrico do solo 35

1.1.3.5 Conversão da biomassa nas variáveis de interesse de manejo 37

1.1.4 Espacialização do modelo 3-PG 37

1.1.5 Pontos de melhorias do modelo 3-PG 40

1.1.5.1 Balanço hídrico 41

1.1.5.2 Queda de folhedo 41

1.1.5.3 Fertilidade do solo 42

Referências 43

2 APRIMORAMENTO DO MODELO 3-PG QUANTO À DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO E TAXA DE QUEDA DE FOLHEDO DO EUCALIPTO 53

Resumo 53

Abstract 53

2.1 Introdução 54

2.2 Desenvolvimento 58

2.2.1 Material Método 58

2.2.1.1 Caracterização do Projeto Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity (BEPP) 58

2.2.1.2 Área de estudo 59

2.2.1.3 Delineamento experimental 59

2.2.1.4 Dados dendrométricos, índice de área foliar e queda de folhedo 61

2.2.1.5 Parametrização e calibração do modelo 63

2.2.1.6 Modelo 3-PG – Balanço hídrico e taxa de queda de folhedo 69

2.2.1.7 Aprimoramento do modelo 3-PG para retenção máxima de água 70

2.2.1.8 Aprimoramento do modelo 3-PG para queda de folhedo 71

2.2.2 Resultados e Discussões 72

2.2.2.1 Caracterização do crescimento florestal 72

2.2.2.2 Aprimoramento do modelo 3-PG para retenção máxima de água no solo 75

2.2.2.3 Caracterização da dinâmica foliar 81

2.2.2.4 Aprimoramento do modelo 3-PG para queda de folhedo 84

2.3 Conclusão 90

Referências 90

3 APRIMORAMENTOS DO MODIFICADOR DE FERTILIDADE DO SOLO DO MODELO 3-PG . 97

Resumo 97

Abstract 97

3.1 Introdução 98

3.2 Desenvolvimento 101

3.2.1 Material e Métodos 101

3.2.1.1 Caracterização do Projeto Parcelas Gêmeas de Inventário (PPGI) 101

3.2.1.2 Área de estudo 102

3.2.1.3 Material genético 105

3.2.1.4 Análise do crescimento e resposta à fertilização 105

3.2.1.4.1 Medições dendrométricas e Índice de Área Foliar 105

3.2.1.4.2 Análise das variáveis químicas e físicas do solo 109

3.2.1.4.3 Cálculo do crescimento das árvores e da resposta a fertilização 109

3.2.1.5 Calibração e Validação do modelo 3-PG 110

3.2.1.5.1 Parametrização 111

3.2.1.5.2 Dados de entrada 111

- Variáveis climáticas 111

- Variáveis edáficas 113

- Variáveis biométricas 113

3.2.1.5.3 Análise estatística 113

3.2.2 Resultados e Discussão 113

3.2.2.1 Análise de crescimento das árvores em resposta à fertilização 113

3.2.2.1.1 Análise da resposta à fertilização por critério de estratificação 118

3.2.2.2 Calibração e Validação do modelo ecofisiológico 3-PG 120

3.2.2.2.1 Calibração modelo 3-PG parcelas manejo intensivo 120

3.2.2.2.2 Validação modelo 3-PG tratamento manejo intensivo 127

3.2.2.2.3 Calibração modelo 3-PG nas parcelas controle e determinação do modificador fertilidade do solo 129

3.2.2.2.4 Validação modelo 3-PG tratamento controle e modificador fertilidade do solo 134

3.3 Conclusão 136

Referências 137

4 ZONEAMENTO DA PRODUTIVIDADE E DETERMINAÇÃO DAS RESTRIÇÕES AO CRESCIMENTO DO *EUCALYPTUS* PLANTADOS NO NORDESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO 141

Resumo 141

Abstract 141

4.1 Introdução 142

4.2 Desenvolvimento 144

4.2.1 Material e Método 144

4.2.1.1 Área de estudo 144

4.2.1.2 Modelo 3-PGIS 145

4.2.1.3 Dados de entrada do modelo 3-PG 145

4.2.1.4 Parametrização do modelo 3-PG 151

4.2.1.5 Validação do modelo 3-PG 153

4.2.1.6 Fatores limitantes do crescimento florestal 154

4.2.2 Resultados e Discussões 155

4.2.2.1 Validação da produtividade estimada pelo modelo 3-PG..... 155

4.2.2.2 Produtividade e restrições ao crescimento no nordeste do estado de São Paulo 158

4.2.2.3 Fatores limitantes do crescimento florestal 162

4.3 Conclusão 165

Referências..... 166

5 CONCLUSÕES GERAIS 171

RESUMO

Aprimoramentos, uso e teste do modelo 3-PG em plantios clonais de Eucalyptus na região nordeste do estado de São Paulo

O 3-PG (**P**hysiological **P**rinciples in **P**redicting **G**rowth) é o modelo ecofisiológico mais difundido no setor florestal para a predição de crescimento de florestas. Este modelo estima o crescimento florestal com base na radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel, convertida em carboidratos, e alocada nos compartimentos da floresta (folhas, tronco, galhos e raízes), fundamentados na dinâmica dos processos biológicos e suas interações com o clima e solo. No entanto, após quase 15 anos de existência do 3-PG unido a evolução em pesquisa florestal, é possível detectar alguns pontos no modelo com potencialidade para aprimoramento. O objetivo geral desta tese foi aprimorar o modelo 3-PG e aplicá-lo no zoneamento da produtividade em florestas de *Eucalyptus* plantadas no nordeste do estado de São Paulo. Os objetivos específicos foram: i) aprimorar o modelo para retenção máxima de água no solo; ii) para queda de folhedo; iii) calibrar e validar o modelo 3-PG usando os pares de parcelas gêmeas; iv) determinar o modificador de fertilidade (FR) do 3-PG usando análise química do solo; v) zonear a produtividade real estimada do *Eucalyptus* no nordeste do estado do São Paulo; vi) determinar os fatores de restrição da produtividade nestas áreas. Para tanto, utilizou-se de dois projetos de pesquisas instalados na empresa International Paper do Brasil: projeto BEPP (Brasil *Eucalyptus* Produtividade Potencial) e projeto "Parcelas Gêmeas de Inventário". O projeto BEPP foi utilizado para o aprimoramento do modelo em relação à retenção de água e queda de folhedo. Para tanto, utilizou-se de dois tratamentos: o tratamento fertilizado irrigado e o tratamento controle (fertilização tradicional sem irrigação). A quantidade máxima de água no solo adotada pelo modelo, antes considerada como um valor constante, passou a variar segundo a dinâmica de crescimento e exploração do sistema radicular. Esta modificação melhorou a estimativa de biomassa do tronco. No aprimoramento do modelo para a queda de folhedo, ajustou-se quatro modelos: linear; logístico; não lineares e modelo combinado. Todos proporcionaram melhores estimativas da taxa de queda de folhedo do que a função atualmente adotado pelo 3-PG com destaque para o modelo combinado, o qual representou duas fases da queda de folhedo: antes e após o fechamento do dossel. Usando os 113 pares de parcelas gêmeas, verificou-se que 63% responderam à fertilização após 48 meses de instalação do experimento, com ganho médio de 12% em produtividade. Com estas parcelas gêmeas foi possível calibrar e validar o modelo 3-PG para a produtividade atingível e real, com adequada precisão. O FR foi correlacionado à somas de bases do solo (Ca, Mg e K), as quais explicaram as maiores respostas à fertilização, sendo possível determinar uma equação para este modificador. Após a calibração e validação e adequações do modelo foi possível zonear a produtividade real do nordeste do estado de São Paulo. O déficit de pressão de vapor e água no solo foram os fatores que mais limitaram o crescimento do *Eucalyptus* nesta área.

Palavras-chave: Produtividade florestal; Modelagem ecofisiologica; Sistema de informação geográfica; Índice de area foliar; Queda de folhedo; Fertilidade do solo; *Eucalyptus*

ABSTRACT

Improvements, test and use the 3-PG model in *Eucalyptus* clonal plantation in northeast of São Paulo state

The 3-PG (**P**hysiological **P**rinciples in **P**redicting Growth,) is the most widespread ecophysiological model in the forest sector to predict the forest growth. It is driven by intercepted radiation with the maximum canopy quantum efficiency, which is limited by the temperature, vapour pressure deficit, available soil water, stand age and site fertility, assimilating the carbon into the forest; supported by physical and ecophysiological processes. However, after almost 15 years of development and use, associated by new scientific knowledge in forest research, some improvement in this model can be done, such as: soil water content and litterfall rate. The objectives of this thesis were improve the 3-PG model and zone the real productivity of *Eucalyptus* plantation in northeast of São Paulo State. The specifics objectives were: i) improve the 3-PG model regarding water soil content; ii) regarding litterfall; iii) calibrate and validate the 3-PG model using the twin-plot experimental design; iv) determine the fertilization modifier (FR) using soil chemical analysis; v) zoning the real productivity for *Eucalyptus* plantation in northeast of São Paulo State; and vi) determine the main growth constraints. Aiming these objectives, two main research projects were used: BEPP project (Brasil *Eucalyptus* Produtividade Potencial) and the "Twin-plot of inventory". The BEPP was used to improve the 3-PG model for water soil content and litterfall. Two treatments were used: fertilized plus rainfed and extra fertilized plus irrigation. The water soil content had a constant value and was replaced by a dynamic value, changing with root growth and exploratiion depth with the age. This modification improved the stem biomass production estimatives by the model. For the litterfall improvement, 4 functions were fitted (linear, logistic, non linear and mixed). All of those had better performance in estimating the litter fall than the original 3-PG equation, highlighting the mixed model that could represent before and after canopy closure. Using 113 pairs of twin-plots, 63% of those responded the extra fertilization after 48 months, the production gain was 12%. The twin-plots were used to calibrate and validate the 3-PG model for attainable and real productivity resulted in adequated accuracy for stem biomass estimation. The FR could be associated with chemical analysis, and sum of bases (Ca, Mg and K) were used to fit an FR equation. After calibration and valitadation of the 3-PG model, were possible to zone the real productivity in northeast of São Paulo; the two main constraints of productivity for those area were vapour pressure deficit and soil water.

Keywords: Forest productivity; Ecophysiological modeling; Geographic information system; Leaf area index; Litter fall; Soil fertility; *Eucalyptus*

1 INTRODUÇÃO

As áreas de florestas plantadas no Brasil são da ordem 7 milhões de hectares, sendo que 4,7 milhões são plantios do gênero *Eucalyptus* e 1,8 milhões, do gênero *Pinus* (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS, ABRAF, 2011). No período de 2005 a 2010 o acréscimo de área de plantações florestais foi de 23% (3,5% ao ano), sendo que os maiores índices de plantios ocorreram nos Estados de Mato Grosso do Sul (27,4%), Maranhão (10,2%), Tocantins (7,2%), Minas Gerais (6,7%) e Pará (6,4%). No Estado de São Paulo, com área de cerca de 600.000 ha, a área praticamente se manteve estável (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS, ABRAF, 2011).

O Setor Florestal Brasileiro possui um papel importante na economia e na sociedade em geral, pela geração de produtos, tributos (R$ 7,4 milhões), divisas, empregos (cerca de 2,1 milhões de empregos diretos e indiretos) e renda. O indicador econômico que avalia o desempenho e a produtividade utilizado no Setor de Florestas Plantadas, ou seja, o "Valor Bruto de Produção Florestal" (VBPF), que é calculado pela multiplicação do preço dos produtos florestais pela quantidade produzida, em 2010 correspondeu a R$51,8 bilhões, sendo que 56,1% provêm do Setor de Papel e Celulose (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS, ABRAF, 2011, ano base 2010).

São Paulo é o segundo Estado com a maior área plantada com o gênero *Eucalyptus* do país. O mercado paulista está voltado principalmente para o abastecimento das empresas de celulose, papel, painéis de madeira e energia. As áreas plantadas concentram-se principalmente no sudeste e centro-sul do estado (levantamento censitário das unidades de produção agropecuária do Estado de São Paulo - ano 2007 – 2008). O preço de terra no Estado é muito alto devido à alta competitividade entre os setores agrícola, pecuária e florestal, que demandam extensas áreas para plantios das lavoura (cana-de-açúcar, laranja e grãos), pastagem e áreas florestais. Outro fator que também contribui com o alto preço das terras são os centros urbanos e a alta densidade populacional.

O potencial produtivo das florestas de *Eucalyptus* nas diferentes regiões do Estado de São Paulo, que não possuem reflorestamento, ainda é pouco conhecido. Na década de 90, Ab´Saber et al. (1990), propuseram o "Plano Nacional de Reflorestamento", focado na mitigação dos problemas ocasionados pelo aumento da demanda por produtos florestais e na diminuição do impacto das mudanças climáticas pela ação antrópica. Neste plano, as áreas

potenciais para reflorestamento e as respectivas espécies foram definidas, mas a produtividade não foi proposta.

A produtividade das florestas de *Eucalyptus* é influenciada por vários fatores, tais como: material genético (espécie, procedência e clone); clima (radiação, ventos, temperaturas, precipitação, umidade relativa e balanço hídrico); fisiografia (relevo e drenagem); solo (características físico-químicas, biológicas e de fertilidade); manejo florestal (cultura anterior, limpeza do solo, preparo e conservação do solo, espaçamento de plantio, fertilização, mato-competição, desrama, desbaste, corte e condução da brotação); e proteção (pragas, doenças e fogo), o que justifica as grandes variações da produtividade florestal observadas no Estado, abrangendo de 10 a mais de 30 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$ (20 a mais de 60 m^3 $ha^{-1}ano^{-1}$) na idade de corte (6 a 8 anos).

A estimativa de crescimento e da produtividade florestal é obtida através de modelos empíricos de produção, que se baseiam, por exemplo, na idade da floresta, índice de sítio e na área basal do povoamento (CAMPOS; LEITE, 2006). Tais modelos são a base do planejamento nas empresas florestais, pelos quais se estima os estoques de madeira e seus sortimentos, auxiliando na organização da colheita e da otimização do abastecimento das fábricas (ALMEIDA, 2003).

Porém, os modelos empíricos não são apropriados para simular variabilidades biológicas, edáficas, climáticas e de manejo, fundamentais para análises de cenários futuros e planos de suprimento de madeira (LANDSBERG, 2003). Para incluir tais variáveis e efeitos ambientais na estimativa da produtividade florestal há necessidade de expressar o crescimento e a produção florestal em termos de variáveis de estado de modelos ecofisiológicos (LANDSBERG; WARING, 1997; STAPE 2002).

Os modelos ecofisiológicos baseiam-se na descrição da floresta em compartimentos (raízes, tronco, ramos e folhas), visando predizer a produção como resultado dos processos de crescimento da planta. Dentre estes processos destacam-se: transpiração, fotossíntese, respiração, alocação de material fotossintético e ciclagem de nutrientes (REFFYE et al., 1999). Assim, os modelos ecofisiológicos baseiam-se nos processos vitais para o crescimento das árvores (aspectos lumínicos, térmicos, hídricos, nutricionais e biológicos), descrevendo a produção de fotossintetizados, ou carbono, da floresta sob influência do ambiente e dos processos ecológicos (LANDSBERG; GOWER, 1997).

Na área florestal, Landsberg e Gower (1997) relacionam os seguintes modelos ecofisiológicos, como mais expressivos: FAST (1997), PT (1980), FORNUTS (Binkley &

Hart, 1985), LINKAGES (1986), SHAWN (1986), CENTURY (1987), FOREST-BGC (1988) ε Model (1989), FORCYTE (1989), MAESTRO (1990), BEX (1991), PnET (1992), BIOMASS (McMurtrie et al. 1990a, 1992, 1993) e 3-PG (**P**hysiological **P**rinciples **P**redicting **G**rowth, 1997), os quais variam em termos de complexidade (números de parâmetros) e passos de simulação (de horário a anual). Além dos modelos citado por estes autores, na década de 2000, outros modelos ecofisiológicos foram desenvolvidos e tiveram grandes progressos na área florestal, com destaque para G`DAY (COMINS; MCMURTRIE, 1993, CORBEELS et al., 2005); MAESTTRA (WANG; JARVIS, 1990; MEDLYN, 2004) e CABALA (BATTAGLIA et al., 2004).

Dentre estes modelos, o modelo 3-PG vem sendo utilizado em diferentes espécies e regiões do mundo (ALMEIDA, 2003). Este modelo já foi parametrizado e utilizado para eucalipto em vários sítios do Brasil (STAPE, 2002, 2004b; ALMEIDA et al., 2004a; SILVA, 2006; BORGES, 2009; ALVARES, 2011) e em outros países, tais como: Austrália (LANSBERG; WARING, 1997; SANDS; LANDSBERG, 2002; PAUL et al., 2007), África do Sul (DYE et al., 2004; ESPREY et al., 2004; CAMPION et al., 2005), Portugal (FONTES et al., 2006) e China (ZHAO et al., 2009).

O modelo 3-PG, proposto por Landsberg e Waring (1997), tem como objetivo preencher a lacuna existente entre os modelos empíricos mais reducionistas (baseado em medições) e os modelos mais complexos baseados em processo de balanço de carbono. Esta associação torna possível a utilização do 3-PG em aplicações em nível do povoamento e também em nível de uma região, utilizando o sensoriamento remoto (LANSBERG; SANDS, 2011). Assim, o propósito do desenvolvimento do modelo, segundo os autores, foi a inclusão do caráter de pesquisa concomitantemente à necessidade operacional da área florestal.

Deste a sua concepção em 1997 algumas modificações foram introduzidas no modelo 3-PG objetivando melhorar a predição do crescimento florestal (SANDS; LANDSBERG, 2002, SANDS, 2003). Porém, segundo Landsberg; Sands (2011), ainda existem muitas contribuições a serem realizadas em áreas do modelo em que o conhecimento científico e o entendimento ecofisológico são limitados. Como exemplo, os autores citam a melhor descrição da dinâmica da água no solo, a busca de formas objetivas de determinação do fator fertilidade do solo e a incorporação dos efeitos ambientais na estimativa de queda de folhedo.

Assim, o objetivo central deste trabalho foi o de verificar as adequações do modelo 3-PG para estimar o crescimento da floresta de *Eucalyptus* na região nordeste do estado de São

Paulo e elaborar o zoneamento da produtividade potencial e as restrições ambientais ao crescimento na região.

Quanto ao modelo 3-PG, estabeleceram-se as seguintes hipóteses relacionadas ao seu desempenho para utilização na eucaliptocultura do estado de São Paulo:

i. O modelo 3-PG poderá ser calibrado com adequada precisão para as diferentes produtividades do nordeste do estado de São Paulo, à semelhança de outras regiões do Brasil (STAPE, 2002; ALMEIDA et al., 2004a; SILVA, 2006; BORGES, 2009; ALVARES, 2011);
ii. A adequação do modelo 3-PG para modificar a quantidade máxima de água no solo segundo o crescimento do sistema radicular em profundidade aumentará a precisão com que o crescimento florestal é estimado (CHRISTINA et al., 2011);
iii. A incorporação das variáveis climáticas na dinâmica da taxa de queda de folhedo do modelo 3-PG aumentará a precisão de sua estimava, atualmente baseada apenas na idade de fechamento do dossel (HENNESSEY et al., 1992; DOUGHERTY et al. 1995);
iv. Os modificadores de fertilidade propostos pelo modelo 3-PG podem ser relacionados com atributos químicos do solo (STAPE, 2002; FERREIRA; STAPE 2009);
v. O uso do 3-PG de forma espacializada após as devidas calibrações e validações, permite efetuar inferências acerca da produtividade real a nível regional para tomadas de decisões (ALMEIDA et al., 2004b; ALMEIDA et al., 2010);
vi. O fator que mais restringi o crescimento das plantações fertilizadas de *Eucalyptus* no estado de São Paulo será a quantidade de água no solo disponível para a planta (STAPE et al., 2010);

1.1 Revisão Bibliográfica

1.1.1 Evolução da produtividade do *Eucalyptus* no Estado de São Paulo

O gênero *Eucalyptus*, de origem australiana para a maioria das espécies, pode ser considerado como um dos mais plantados no mundo devido ao grande número de espécie, facilidade de adaptação em diferentes sítios e possibilidade de produzir madeira para distintos usos (CAMPINHOS, 1999). O *Eucalyptus* tem o uso valorizado no Brasil graças ao rápido crescimento, alta produtividade, homogeneidade do material e adaptabilidade para as mais diversas condições edafoclimáticas.

Os primeiros plantios no Brasil que se tem registro datam de 1868, nos Estados de Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro, porém, os primeiros experimentos de natureza silvicultural deste gênero foram implantados em 1904 por Navarro de Andrade no estado de São Paulo. O objetivo da experimentação foi determinar espécies com características madeireiras adequada para suprir a demanda de lenha, como combustível para as locomotivas e também como dormentes para trilhos da Companhia Paulista de Estradas de Ferro. Após seis anos de estudos comparativos entre essências exóticas e nativas, no Horto Florestal de Jundiaí, Navarro de Andrade chegou à conclusão de que o eucalipto era a essência que deveria ser plantada em larga escala para tal fim. O uso como matéria-prima no abastecimento de fibras para as fábricas de celulose ocorreu somente a partir da década de 1950, sendo que hoje é a principal fonte de fibras para o setor de celulose e papel do Brasil.

Ao longo da década de 1960 até meados dos anos 1980, período do programa governamental de incentivos fiscais ao reflorestamento, houve grande expansão das florestas plantadas de *Eucalyptus.* Plantaram-se neste período pouco mais de 3 milhões de hectares, principalmente nas regiões sul e sudeste do Brasil (BRACELPA, 2007). Com o fim dos incentivos fiscais, as empresas florestais destinaram grandes investimentos para manutenção dos povoamentos, investiram em novos plantios e consolidaram associações e cooperativas com universidades públicas para o desenvolvimento tecnológico.

Deste então, esforços expressivos foram despendidos pelas empresas florestais em pesquisa e desenvolvimento nas áreas de melhoramento genético, solos e nutrição, biotecnologia e manejo florestal (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS, ABRAF, 2010). Esses conhecimentos contribuíram para avanços expressivos no incremento a produtividade do gênero *Eucalyptus*, passando de 10 m^3

ha^{-1} ano^{-1}, na década de 70, para 45 m^3 ha^{-1} ano^{-1} nos dias atuais (CAMPINHOS, 1999; GONÇALVES et al., 2004; STAPE et al., 2009). Registra-se que em algumas áreas com condições edafoclimáticas específicas alcançam-se produtividades de 70 a 80 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, o que demostra o elevado potencial produtivo do *Eucalyptus*.

Análise exploratória do banco de dados de inventário florestal das plantações de *Eucalyptus* na região de Mogi-Guaçu, São Paulo, entre 1974 e 2009, demonstrou que o ganho em produtividadede foi de quase 400% (figura 1). O aumento deve-se fortemente à mudança no material genético e melhorias progressivas nos tratos silviculturais, como preparo de solo, nutrição e controle de mato-competição e formigas.

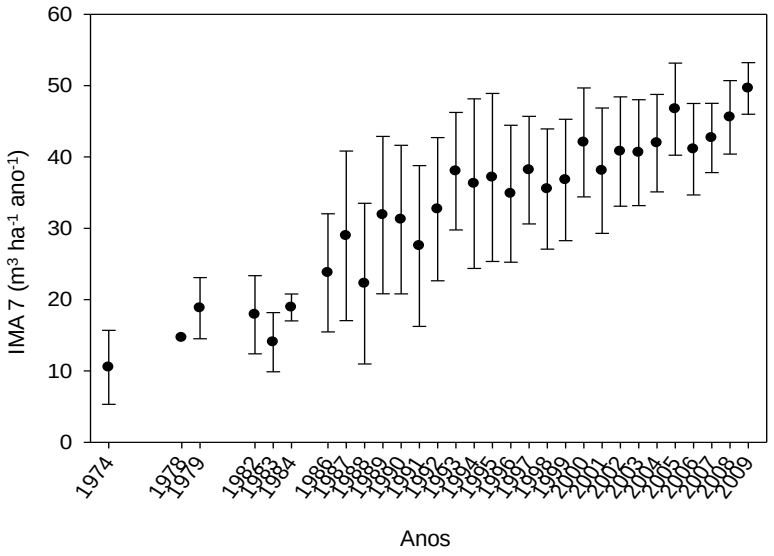

Figura 1 - Evolução da produtividade do gênero *Eucalyptus* plantado na região de Mogi-Guaçu, São Paulo. As produtividades, expressas em incremento médio anual aos 7 anos (IMA7 em m^3 ha^{-1} ano^{-1}), foram estimadas com base no inventário florestal e modelos de prognose da International Paper do Brasil (Fonte: HAKAMADA; LEMOS, 2011)

Na década de 1960 e início dos anos 1970, os materiais genéticos plantados eram provenientes de espécies e procedências sem ou com baixo nível de melhoramento. Na busca pelo aumento da produtividade e melhoria na qualidade de madeira, introduziram-se novas espécies e procedências de *Eucalyptus*, como por exemplo, o *E. grandis* de Coff´s Harbour, e o *E.urophylla* de Timor e Flores. Além disso, selecionaram-se procedências e progênies com características superiores onde se estabeleceram as áreas de produção de sementes para fornecimento de sementes de materiais mais adaptados e produtivos. Houve também a seleção de “árvores superiores” para sua multiplicação através da propagação assexuada (clonagem) e produção de pomares clonais e plantios comerciais (ASSIM, 1996; CAMPINHOS, 1999;

FERREIRA; SANTOS, 1997; FONSECA et al. 2010). Já nas décadas de 1980 e 1990, com a consolidação dos programas de melhoramento genéticos, surgem novas populações de cruzamentos interespecíficos, principalmente entre *E. grandis* e *E.urophylla*, buscando-se a segregação de indivíduos de alta produtividade e adequada qualidade da madeira. Através de técnicas de clonagem, os indivíduos selecionados foram testados e aqueles comprovadamente superiores foram plantados em escala comercial em diversas regiões do País (GONÇALVES et al., 2008).

Paralelamente ao melhoramento genético das espécies, houve melhoria das práticas silviculturais. As principais técnicas adotadas foram: conservação de solo e água, preparo de solo (subsolagem e cultivo mínimo), uso de análises de solo para recomendações de fertilizações, e controles mais rígidos de qualidade de mudas, de mato-competição, de pragas e doenças, e de incêndios florestais (GONÇALVES et al. 2002; 2008).

Do ponto de vista conceitual, a produtividade vegetal pode ser dividida em três categorias (figura 2), segundo a linha de pesquisa da "Escola de de Wit" (em inglês: *School of de Wit*), a saber: i) Potencial, em que o crescimento é definido pela concentração de CO_2 atmosférico, radiação solar, temperatura e material genético; ii) Atingível, em que o crescimento é determinado pelos fatores limitantes da produtividade, tais como: água e nutrientes; e iii) Real, em que o crescimento é reduzido abaixo do atingível, devido a fatores como mato-competição, pragas e doenças (BOUMAN, et al., 1996). Em termos florestais, a produtividade real é aquela efetivamente mensurada pelo inventário florestal.

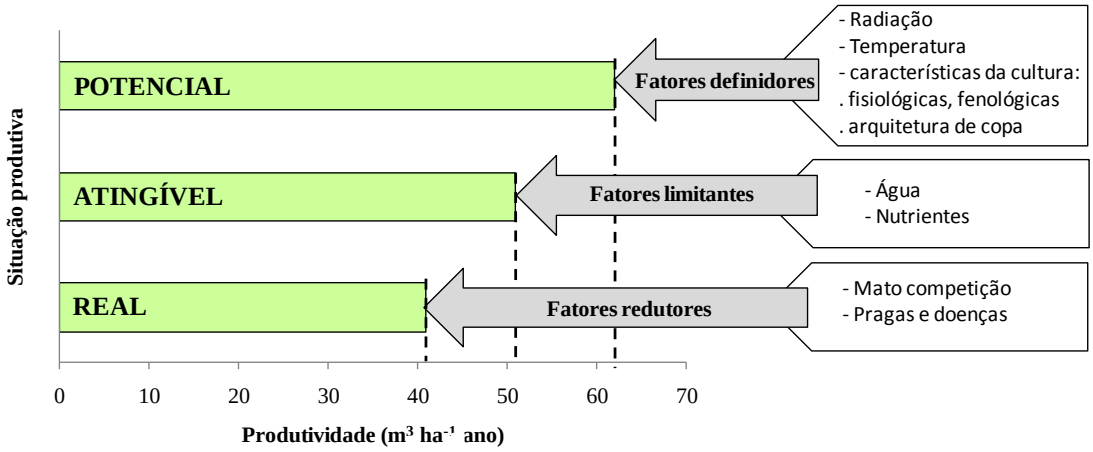

Figura 2 – Situação produtiva: conceitos de produtividade potencial, atingível e real para povoamentos de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* plantados no nordeste do estado de São Paulo e os fatores definidores, limitantes e redutores da produtividade. Fonte: Desenho esquemático Bouman et al. (1996); dados de produtividade florestal Stape et al. (2006)

Segundo Gonçalves et al. (2004) apesar de todas os avanços genéticos e silviculturais, a produtividade das plantações florestais no Brasil ainda é menor do que o potencial fisiológico pois o suprimento, a captura e o uso de luz, água e nutriente é menor do que o ótimo. A figura 2 atesta tal afirmação, pois evidencia para o nordeste do estado de São Paulo que a produtividade potencial é cerca de 50% superior à produtividade real (STAPE et al. 2006).

1.1.2 Estimativa de crescimento e produtividade florestal

A produtividade e crescimento florestal são normalmente estimados por meio de modelos, os quais são um conjunto de equações estabelecido com base em mensurações da produtividade real, via parcelas de inventário.

Existem diversos tipos de modelos e formas de sua classificação. Pautian et al. (1992), dividem os modelos matemáticos em três tipos: i) empíricos, baseados em dados observados; ii) estocásticos, em que o processo é descrito pelas leis de probabilidade; iii) e mecanísticos, que considera as leis físicas, químicas e biológicas no processo. Da mesma forma, os modelos de crescimento e rendimento florestal podem ser classificados em três categorias: i) empíricos; ii) baseados em processos; e iii) híbridos (KIMMINS; COMEAU; KURZ, 1990; LANDSBERG; WARING, 2011) que combinam a abordagem empírica com a baseada em processos.

Tanto os modelos empíricos como os baseados em processos são usados para estimar as produtividades dos plantios de eucalipto. Os modelos empíricos estimam o crescimento em volume ou biomassa pelo uso de variáveis dendrométricas (índice de sítio, área basal, densidade) associadas às idades iniciais e finais de projeção. Estes modelos são necessários para o planejamento e manejo econômico dos povoamentos (LANDSBERG; WARING, 2011). Por outro lado, os modelos baseados em processos determinam a produtividade com base nos processos vitais para o crescimento das árvores, como os regimes lumínico, térmico, hídrico, nutricional e biológico. Johnsen et al. (2001) definem os modelos baseados em processos, também chamados modelos ecofisiológicos, como representações matemáticas de sistemas biológicos que incorporam conhecimentos sobre mecanismos fisiológicos e ecológicos por meio de algoritmos preditivos baseados em teorias científicas, conferindo a estes modelos maior capacidade de predição de crescimento e maior abrangência de aplicação.

No setor florestal os modelos empíricos foram os primeiros a serem utilizados em silvicultura (CLUTTER, 1980). Assim sendo, foram os mais difundidos e comumente utilizados para estimar a produtividade do sistema, principalmente nos planos de abastecimento, pois requererem dados simples de entrada e poucos parâmetros, os quais são estimados somente com uma base histórica de dados (TAYLOR et al., 2009). Assim, esta é sua maior vantagem em relação aos modelos baseados em processos, os quais necessitam de muitos recursos para inicializar, explorar, interpretar, e demandando tempo, habilidade e multidisciplinaridade de conceitos para utilizá-los (LANDSBERG; COOP, 1999; LANDSBERG, 2003; TAYLOR et al. 2009). No entanto, os modelos processuais possuem a capacidade de fazer simulações, estimar a produtividade e o crescimento frente aos impactos de mudanças ambientais ou de manejo.

A escolha de qual modelo a ser utilizado na estimativa da produtividade e crescimento florestal depende das informações disponíveis para sua calibração, sua validação, e o nível de detalhes e acurácia desejada pelo manejador (TAYLOR et al., 2009). Nas últimas duas décadas houve um progresso considerável no uso de modelos florestais baseados em processos alicerçados pelos avanços da tecnologia computacional (LANDSBERG; GOWER, 1997; ALMEIDA, 2003).

No estudo conduzido por Stape; Ryan; Blinkey (2004b), os modelos clássicos de crescimento e rendimento (modelos empíricos) apresentaram limitações quando utilizados para estimar a produtividade específica da floresta a cada ano, numa região de grande variabilidade pluviométrica. Em teste comparativo entre simulações de produção de madeira utilizando o modelo empírico e o modelo ecofisiológico (modelo 3-PG), os autores concluíram que o primeiro modelo proporcionou boas estimativas em condições ambientais médias. Porém, para caracterizar a produção madeireira frente a diferenças climáticas (ano seco e úmido) o modelo ecofisiológico foi mais eficiente. Esta é uma grande vantagem para predizer o crescimento e a produtividade florestal durante as rotações curtas, onde alguns anos de clima atípico podem influenciar fortemente no rendimento do produto madeira.

No Brasil, adota-se cada vez mais a modelagem ecofisiológica com o objetivo de entender os mecanismos que regem o crescimento dos plantios homogêneos, para melhorar as tomadas de decisão no planejamento estratégico. Empresas como Copener (STAPE, 2002), Fibria (ALMEIDA, 2004 b; ALVARES, 2011), Cenibra (SILVA 2006), International Paper do Brasil (ZANI, 2009), Plantar (BORGES, 2009) vêm aplicando o modelo 3-PG em análises de produtividade florestal e das restrições de crescimento. Estes autores verificaram que os modelos processuais possuem grande potencial para serem utilizados como ferramenta auxiliar no manejo dos plantios florestais, possibilitando prever o impacto dos fatores determinantes da produtividade (radiação solar, temperatura, déficit de pressão de vapor, água e nutrientes) sobre o potencial produtivo das florestas plantadas. No entanto, com aplicação e uso do modelo 3-PG, podem ser identificados alguns pontos no modelo com potencial de melhoria para aumentar a eficiência do modelo, bem como aquedá-lo a local e espécie de uso.

1.1.3 Modelo ecofisiológico 3-PG e processos fisiológicos

O modelo 3-PG (LANDSBERG; WARING, 1997, modificado por SANDS; LANDSBERG, 2002; SANDS, 2004) é baseado em princípios fisiológicos para estimar o crescimento florestal. Landsberg e Sands (2011) classificam-no como um modelo híbrido, por combinar elementos de conservação de massa junto aos modelos baseados em processo com restrições alométricas.

Atualmente o modelo 3-PG_{XL}, (antigo 3-PG_{PJS}), é construído e estruturado em colaboração com os usuários finais, descrito na linguagem Visual Basic do Excel, possue código de acesso livre e é disponibilizado via internet.

O objetivo dos autores foi desenvolver uma ferramenta prática, acessível fosse a modeladores, fosse aos produtores florestais, bem como, poder associá-la às técnicas de sensoriamento remoto para visualização do crescimento do povoamento em escala regional (LANDSBERG; SANDS, 2011).

O modelo 3-PG calcula, essencialmente, a absorção de energia radiante pelo dossel e que é convertida em carboidratos e alocada nos diferentes componentes da árvore (folha, casca, tronco, galho e raiz). O modelo pode ser aplicado para plantios homogêneos de diferentes espécies florestais.

Os dados climáticos de entradas requeridos pelo modelo são: radiação solar (MJ m^{-2} dia), temperaturas mínima, máxima e média (^{o}C), umidade relativa do ar (%), precipitação (mm $mês^{-1}$) e número de dias de geada por mês. Outras entradas necessárias se referem ao sítio (coordenadas geográfica, máxima e mínima quantidade de água disponível no solo e taxa de fertilidade), às condições iniciais do povoamento (data de plantio, data para início da modelagem, número de árvores por hectare, biomassa inicial de folha, tronco e raiz) e aos parâmetros fisiológicos específicos da espécie estudada.

O modelo 3-PG é um modelo de passo mensal, o que possibilita refletir os efeitos de fatores ambientais sazonais no crescimento, como por exemplo: estresses hídricos ou períodos de baixa temperatura (LANDSBERG; SANDS, 2011).

O modelo pode ser rodado para qualquer número de anos, com dados climáticos mensais atuais ou médias históricas. Quando se deseja caracterizar os impactos no crescimento florestal, devido a algum evento específico, há a necessidade do uso de dados climáticos mensais reais (ALMEIDA, et al., 2004b, LANDSBERG; SANDS, 2011). Almeida et al. (2004), fizeram a comparação dos dois tipos de dados climáticos (mensais e médias históricas) para avaliar a estimativa do incremento anual médio da floresta de *Eucalyptus* usando o modelo 3-PG. Os autores concluíram que o uso de médias climáticas históricas gerou superestimação do crescimento da floresta devido a não representação da flutuação climáticas dos períodos de estiagem.

O modelo 3-PG é composto por cinco sub-modelos: (i) de assimilação de carbono (C); (ii) de alocação de C para raiz, folhas e tronco; (iii) de balanço hídrico no solo e uso da água; (iv) de mortalidade das árvores; e (v) de conversão da biomassa nas variáveis de interesse de

manejo, tais como: diâmetro a altura do peito (DAP), número de fustes, índice de área foliar (IAF), área basal e crescimento em madeira (SANDS; LANDSBERG, 2002, PAUL et al., 2007) (figura 3).

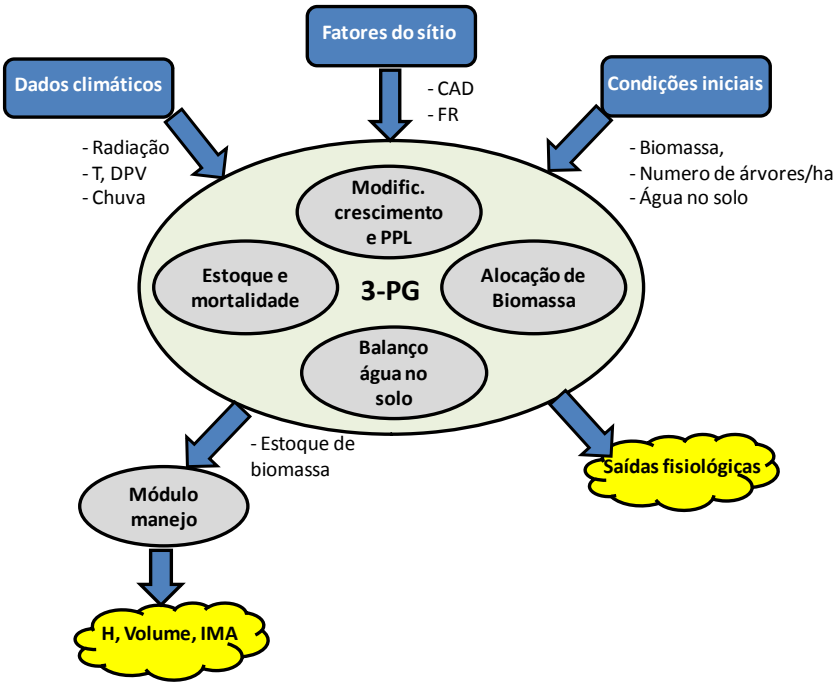

Figura 3 - Representação esquemática do modelo 3-PG. O modelo é composto por cinco sub modelos. Os dados de entrada são dados climáticos, fatores do sítio e condições iniciais do povoamento. Os resultados dos modelos são variáveis fisiológicas e dendrométricas. Fonte: Landsberg e Sands (2011) modificado

1.1.3.1 Assimilação de carbono

A produtividade florestal e o rendimento da cultura dependem da assimilação fotossintética de gás carbônico (CO_2). A assimilação de carbono da atmosfera é realizada por meio da fotossíntese. Este é o único processo de importância biológica que pode aproveitar a energia proveniente do sol e que em última análise, possibilita a vida (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A fotossíntese é o processo de conversão de energia luminosa em energia química, no qual o vegetal sintetiza substâncias orgânicas a partir de água, CO_2 e luz. A planta utiliza a energia solar absorvida pelas clorofilas, pigmentos verdes presentes nos cloroplastos, para a oxidação da água, liberando o oxigênio. A complexa série de reações resulta na redução de CO_2; reações ocorridas nos tilacóides, que são membranas internas especializadas dos cloroplastos. O resultado é a produção de compostos altamente energéticos, como ATP e $NADPH_2$, utilizados na síntese de açúcares; e na fixação do carbono (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A luz é um recurso crítico para as plantas, podendo limitar o crescimento e reprodução (TAIZ; ZEIGER, 2004). Segundo Larcher (2006) a radiação (energia radiante) possui três principais efeitos para a planta, sendo: i) fonte de energia (efeito fotoenergético); ii) estímulo que governa e condiciona o desenvolvimento (efeito fotocibernético); e iii) fator estressante (efeito fotodestrutivo).

A radiação solar se propaga através de pequenos pulsos ou feixes discretos de fótons, os *quantum* (plural: *quanta*). A biosfera recebe a radiação solar em comprimentos de onda de 290 nm até aproximadamente 3.000 nm. A radiação de comprimentos de ondas mais curtos é absorvida pelo ozônio e oxigênio do ar. Os comprimentos de ondas mais longos são absorvidos, dependendo da concentração, pelo vapor d´agua e CO_2 na atmosfera. De toda a radiação proveniente do Sol, em média 50% possui a faixa espectral de 380-710 nm, que é utilizada no processo de fotossíntese das plantas. A radiação usada nesse processo é denominada radiação fotossinteticamente ativa, ou PAR ("*Photosynthetic Active Radiation*"), freqüentemente definida na faixa de 400-700 nm. Abaixo desta faixa estão os comprimentos curtos de radiação ultravioleta (UV-A, 315 nm e UV-B, 280-315 nm) e, acima, os comprimentos longos de radiação infravermelha (IV, 759 - 4000 nm) (LARCHER, 2006). A radiação que chega até uma superfície horizontal é chamada de radiação global, composta pela radiação solar direta e pela radiação difusa do espaço (LARCHER, 2006).

Existem alguns modelos ecofisiológicos, dentre os quais se inclui o 3-PG, que estimam o crescimento e desenvolvimento de plantas com base na assimilação de carbono, tendo como processo inicial a fotossíntese calculada com base na radiação solar. São chamados modelos da família APAR (radiação fotossiteticamente ativa absorvida).

O modelo 3-PG trabalha com a penetração e absorção da luz no povoamento florestal para o processo de fotossíntese, por meio da lei de Lambert-Beer (equação 1), a qual leva em consideração a radiação fotossinteticamente ativa (PAR), o coeficiente de extinção de luz (k) e o índice de área foliar (IAF).

$$APAR = PAR.(1 - \exp^{(-k.IAF)}) \qquad (1)$$

A APAR refere-se à quantidade de fótons potencialmente utilizados pela planta no processo de fotossíntese, mas que pode ser reduzida em função da eficiência do uso desta energia (eficiência fotossintética).

A eficiência fotossintética depende da taxa de assimilação fotossintética por unidade de área foliar, a qual é influenciada pelo estado nutricional, hídrico e de sanidade das folhas e condições ambientais (temperatura, umidade relativa e concentração de CO_2).

A eficiência quântica do dossel representa a quantidade de CO_2 fixada por unidade de energia radiante absorvida (fótons) na copa das árvores. Sands e Landsberg (2002) estimaram a eficiência quântica máxima do dossel para uso no 3-PG como sendo 0,060 mol C mol fóton^{-1} para *Eucalyptus globulus*. Enquanto que para o *Eucalyptus grandis*, Almeida et al. (2004a), Esprey et al. (2004) e Stape et al. (2004b) utilizaram valores de 0,068; 0,060; 0,080 mol C mol fóton^{-1}, respectivamente.

A radiação efetivamente utilizada pela planta, no processo de fotossíntese para a produção da produtividade primária bruta (PPB), é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida utilizada, que é calculada pela multiplicação da APAR, máxima eficiência quântica do dossel (α_c) e pelos moduladores (redutores) adimensionais (equação 2). Estes modificadores adimensionais (f_i) adotam valores que variam de 0 (limitante) a 1 (não limitante) e refletem as barreiras imposta pela temperatura (f_t), idade do povoamento (f_{age}), água no solo (f_θ), déficit de pressão de vapor (f_{dpv}), geada (f_{frost}) e fertilidade do solo (FR) na expressão da eficiência do aparato fotossintético da copa.

$$PPB = APAR\ \alpha_c f_t\ f_{frost} f_{age} MIN(f_\theta f_{dpv}) FR \qquad (2)$$

A temperatura afeta as taxas dos processos metabólicos ao agir na atividade do sistema enzimático. A temperatura impacta o crescimento da planta, especialmente no balanço de carbono, através da influencia na fotossíntese e respiração, bem como no balanço de energia, transpiração e desenvolvimento do ciclo da planta (LANDSBEG; SANDS, 2011). Temperaturas extremas (máxima e mínima) podem ocasionar danos aos tecidos e interromper o crescimento temporário ou permanentemente (LANDSBERG, 2003). Desta forma, o modificador f_t depende da temperatura ótima de crescimento da planta, temperatura média do mês, e temperatura máxima e mínina suportada pela espécie (SANDS, 2001).

O f_{frost} representa o impacto ocasionado no crescimento da floresta em função da ocorrência do evento geada ou neve. É caracterizado por um parâmetro único, fração $k_{F,}$ que

representa os dias perdidos de crescimento no mês, a cada dia de geada ocorrido, penalizando assim o crescimento devido a este evento.

O modificador f_{age} é dado por uma equação empírica que proporciona a redução da produtividade primária líquida, conforme o envelhecimento do povoamento. Há várias linhas de pesquisas que tentam explicar os mecanismos que levam ao declínio da produtividade do povoamento em função da idade, destacando-se: respiração da madeira, limitação nutricional, declínio devido à condutância hidráulica, mudanças na alocação de biomassa, aumento da dominância entre as árvores e a queda de eficiência do uso de recursos pelas árvores suprimidas (MURTY; MCMURTRIE; RYAN, 1996; RYAN; BLINKLEY; FOWNES, 1997; HUNT; LAVIGNE; FRANKLIN, 1999; MURTY; MCMURTRIE, 2000; SANDS; LANDSBERG, 2002; BLINKLEY et al., 2002; BLINKLEY et al., 2004; RYAN et. al, 2010).

Os modificadores f_θ e f_{dpv} não são modificadores multiplicativos (equação 2). Eles formam o modificador fisiológico (f_{phy}), o qual adota o menor valor entre estes dois modificadores, embasado na abertura e fechamento dos estômatos, devido ao déficit de pressão de vapor (DPV) e água no solo (LANDSBERG; WARING, 1997). Os estômatos fecham-se devido ao DPV mais negativo, o que reduz a condutância estomática e, consequentemente, a fotossíntese, tornando o f_{dpv} fator limitante ao crescimento. Por outro lado, se o solo está muito seco, o estômato fecha-se para evitar a perda de água, fazendo com que f_θ seja o fator limitante independentemente do DPV (LANDSBERG; WARING, 1997).

O parâmetro f_θ é calculado com base na textura do solo conforme a equação 3.

$$f_\theta = \frac{1}{1+\left(\frac{1+r_\theta}{c_\theta}\right)^{n\theta}} \qquad (3)$$

O r_θ é a razão entre a quantidade de água disponível no solo e a capacidade máxima de água disponível no solo. Assim, r_θ varia de a 1 (sem estresse hídrico) a zero (estresse máximo). Os fatores c_θ e a potência n_θ adotam valores distintos para cada tipo de solo em função da textura. Landsberg e Waring (1997) sugerem c_θ= 0,7; 0,6; 0,5; 0,4 para texturas: arenosa, areno-argilosa, argilo-arenosa e argilosa, respectivamente, e n_θ = 9; 7; 5; 3 para estas mesmas texturas. Estes valores refletem o comportamento hidráulico do solo, em que para

uma dada quantidade de água no solo, o potencial hídrico dos solos argilosos é menor que dos solos arenosos.

O modificador de fertilidade (FR) é o único fator que não é expresso por equações matemáticas, e adota valores arbitrários de 0 (solo infértil) a 1 (solo sem restrição nutricional), a critério do usuário. Segundo Landsberg (2003) e Landsberg e Sands (2011), apesar de muitos anos de estudo sobre fertilidade do solo e nutrição de planta, a modelagem da influência da nutrição no crescimento da árvore ainda é muito limitada. Existem interações complexas, como os ciclos biogeoquímicos, que vão desde a absorção de nutriente pela planta à sua alocação interna e ciclagem biogeoquímica, dificultando a descrição matemática deste fator.

A produtividade primária líquida da floresta (PPL) é calculada pela produtividade primária bruta (PPB) menos as perdas que ocorrem pela respiração de crescimento e de manutenção de todos os tecidos da planta (LANDSBERG, 2003). No caso do modelo 3-PG, a respiração é simplificada pelo uso da razão constante (c_{pp}) entre a PPL e PPB, eliminando assim a necessidade de cálculos detalhados da respiração para vários tecidos e componentes das árvores (LANDSBERG; WARING, 1997). O c_{pp} é assumido como uma taxa constante e espécie específico (PPL/PPB) com valores entre 0,43 a 0,51 (WARING et al., 1998; LITTON; RAICH; RYAN, 2007).

1.1.3.2 Alocação de carbono

A alocação de carbono desempenha um papel crítico na ciclagem de carbono no sistema florestal, pela distribuição da PPL para os componentes da planta acima e abaixo do solo. (LITTON; RAICH; RYAN, 2007).

Apesar de muitos estudos sobre o padrão de alocação de carbono nas florestas, ainda há falta de entendimento claro sobre este tema e padronização da definição de alocação. Litton, Raich e Ryan (2007) fizeram uma revisão de todas as publicações existentes até 2007, que abordavam a questão de alocação de carbono no ecossistema florestal. O objetivo era testar hipóteses relacionadas ao padrão, plasticidade e limites de três componentes de alocação: i) biomassa (definida como quantidade do material presente); ii) fluxo (refere-se ao escoamento do componente por unidade de tempo); e iii) partição (fração da PPB usada por um componente da planta). Neste artigo, os autores propuseram a padronização da definição destes componentes da alocação, sendo: biomassa, fluxo e partição. Uma vez que os termos:

translocação, transporte, distribuição, alocação, partição, alocação de biomassa, rateio são muitas vezes utilizados como sinônimos.

Assim, as principais conclusões de Litton; Raich; Ryan (2007) foram:

- A biomassa não deve ser usada para inferir sobre a partição e fluxo, pois estes dois últimos não são proporcionais à retenção de carbono. A biomassa reflete o acúmulo de carbono nos tecidos jovens e adultos;

- O fluxo de carbono se eleva com o aumento da produtividade primária bruta para todos os componentes da planta.

- A partição do fluxo de carbono abaixo do solo (composto pela PPL radicular + respiração radicular + carbono destinado a para exudado radicular e micorrizas) e a partição de PPL de madeira são sensíveis às mudanças na disponibilidade de água e nutriente em um mesmo sítio, e variam com a idade.

- Quando há baixa disponibilidade de recurso para a planta, reduz-se a partição de carbono para produção de madeira (PPL para produção de madeira + respiração do tronco) e o fluxo de carbono abaixo do solo aumenta.

- A partição de carbono para a respiração total é conservada em uma ampla gama de PPB e não varia com recursos disponíveis, idade do povoamento ou competição dentro de um mesmo sítio. No entanto entre sítios se difere, por uma razão ainda não explicada.

- A partição para folha (PPL folha + respiração folha) é conservada em uma ampla gama de floresta (0,26 ± 0,03).

A partição é um ponto crítico para entendimento da alocação de carbono. A revisão desenvolvida por Litton, Raich e Ryan (2007) auxiliou na identificação de alguns padrões; porém, mudanças no fluxo de carbono e partição, principalmente abaixo do solo (sistema radicular), ainda é pouco conhecido.

Nas condições brasileiras de plantio de *Eucalyptus*, Ryan et al. (2010) testaram como a disponibilidade hídrica e a estrutura do povoamento alteram a produção e alocação de carbono, quantificando assim os padrões de interceptação da luz e eficiência do uso da luz. A disponibilidade hídrica foi testada pela irrigação do povoamento. A irrigação aumentou a PPB em 18% e PPL da madeira (idades de 3 a 5 anos) em 27%, devido ao aumento de interceptação de luz (5%), eficiência fotossintética (11%) e partição para madeira (8%). Já o

aumento da heterogeneidade da estrutura do povoamento resultou na perda de 14% em produtividade de madeira em relação a povoamento com estrutura uniforme. Os padrões para fluxos e distribuição devido à irrigação igualaram com aqueles encontrados por Litton, Raich e Ryan (2007) exceto o fluxo para o solo.

Giardina et al. (2003) avaliaram o padrão de alocação de carbono do *Eucalyptus saligna*, sob dois regime distintos de fertilização, plantado no Havaí, na idade de 3 anos. A PPB no povoamento fertilizado foi 34% maior do que nas parcelas não fertilizadas, explicado pelo aumento do IAF (maior interceptação da luz) e eficiência do uso da luz (devido ao aumento da quantidade de nitrogênio no dossel). A PPL da parte aérea foi 85% maior nas parcelas fertilizadas. Apesar da mudança não significativa na alocação de carbono total abaixo do solo (TBCA), a fertilização alterou os seus componentes, sendo: maior incremento de raízes grossas, e menor ao fluxo de raízes finas (respiração de raízes finas, exudados, micorrizas e renovação de raízes finas).

A alocação de carbono para as raízes é influenciada, em grande parte, pela disponibilidade de água e nutrientes no solo. Solos com reduzidos estoques de água e nutrientes apresentam uma produção relativa de biomassa da parte aérea notadamente inferior, quando comparada àquela de um solo com maior estoque de água e nutrientes, considerando-se mesma espécie e prática silvicultural (GONÇALVES; MELLO, 2000). Stape, Binkley e Ryan (2004a) verificaram que o *Eucalyptus grandis* x *urophylla* crescendo no nordeste do Brasil demonstrou muita plasticidade na partição de biomassa, com frações de biomassa raiz grossa/ parte aérea variando de 0,15 a 0,32. As frações inferiores estavam associadas a povoamentos mais produtivos, ou seja, menor proporção entre o sistema radicular em relação à parte aérea.

A relação folhas/ raízes finas (ou parte aérea/ raiz) fornece uma indicação aproximada da relação fonte/ dreno de fotoassimilados para diferentes genótipos. Em solos menos férteis (menor disponibilidade de água e nutrientes), as plantas tendem ampliar o sistema radicular para aumentar a capacidade de absorção de água e nutrientes (REIS et al., 1985; GONÇALVES, 1994; GONÇALVES; MELLO, 2000) e desta forma a relação parte aérea/ raíz é reduzida.

A produção de madeira depende do padrão de partição da biomassa na árvore. A biomassa de madeira é normalmente 10 - 30% da PPB da floresta (GIARDINA; RYAN, 2002; BLINKLEY; STAPE; RYAN, 2004).

O modelo 3-PG trabalha com a alocação de carbono diferencial aos compartimentos acima e abaixo do solo e a respiração é tida como uma taxa constante. Primeiramente, uma fração da PPL é destinada para composição do sistema radicular. A quantidade de carbono alocado depende da qualidade do sítio: fertilidade e quantidade de água disponível no solo. A quantidade restante de carbono da PPL é distribuída para os compartimentos folha e tronco. A distribuição é baseada em uma equação alométrica, que reflete a idade do povoamento por meio do aumento de incremento do DAP (diâmetro da árvore na altura do peito), expressa entre DAP de 2 e 20 cm (LANDSBERG; WARING, 1997; SANDS; LANDSBERG, 2002; LANDSBERG; SANDS, 2011), conforme mostra a equação 4.

$$pFS = a_p DAP^{ns}$$

(4)

Em que pFS é a relação entre biomassa de folha e tronco em função do diâmetro e coeficiente de multiplicação a_p e coeficiente de potencia n_s, os quais são expresso como $a_p = \frac{a_f n_f}{a_s n_s}$ e $n_p = n_f - n_s$. A obtenção dos coeficientes de multiplicação do compartimento folha (a_f) e tronco (a_s) e os coeficientes de potência destes mesmos compartimentos (n_f e n_s respectivamente) são possíveis pela determinação da relação alométrica ente a biomassa de folha (W_F, equação 5) e tronco (W_S, equação 6).

$$W_F = a_F B^{nf} \quad (5)$$

$$Ws = a_s B^{ns} \quad (6)$$

Quando as condições do sítio estão favoráveis, em termos nutricionais e disponibilidade de água, o balanço de carbono alocado à parte superior da planta é favorecido (tronco, folha, casca), sendo que a biomassa da floresta cresce até o início da mortalidade de árvores.

As perdas naturais do sistema florestal, como queda de folhedo e renovação das raízes finas, são descontadas da quantidade de biomassa foliar e radicular estimadas mensalmente pelo modelo 3-PG.

A queda de folhedo pelo modelo 3-PG varia em função da idade do povoamento. Florestas mais jovens apresentam taxas mais baixas de queda, com o aumento da idade, a taxa eleva-se em uma assíntota, segundo as equações 7 e 8 (SANDS; LANDSBERG, 2002).

$$\gamma_F(t) = \frac{\gamma_{Fx}\gamma_{F0}}{\gamma_{F0} + (\gamma_{Fx} - \gamma_{F0})e^{-k_\gamma t}} \tag{7}$$

$$k_\gamma = \frac{1}{t_{\gamma F}} \ln\left(1 + \frac{\gamma_{Fx}}{\gamma_{F0}}\right) \tag{8}$$

Em que γ_{F0} e γ_{Fx} são taxas de queda de folhedo mensal na idade zero e máxima, respectivamente; $t\gamma_F$ idade em que a taxa de queda de folhedo mensal é ½(γ_{F0}+ γ_{Fx}); e t é a idade do povoamento em meses.

A taxa de renovação de raízes finas e o seu comportamento ao longo do ciclo da floresta é uma variável muito difícil de ser obtida. O modelo 3-PG adota uma taxa constante que é descontada da biomassa de raiz produzida mensalmente.

1.1.3.3 Mortalidade das árvores

Landsberg e Waring (1997) abordam a mortalidade das árvores no modelo 3-PG, pela diminuição da PPL devido o envelhecimento da floresta. Utilizam a chamada lei da potencia - 3/2 (lei do autodesbaste) e taxas de crescimento de fuste para calcular mudanças no número de fuste, por unidade de área, com o tempo. É embasada na perda de produtividade devido à redução da condutância estomática associada a reduções na condutividade hidráulica com o envelhecimento das árvores. Isto causa a diminuição da fotossíntese e da produção de assimilados disponíveis para manter a área foliar, abrindo o dossel da floresta. Quando o crescimento ultrapassa a massa máxima, ocorre a mortalidade de árvores dominadas e a biomassa é descartada do povoamento. A mortalidade de fuste ocorre entre os menores fustes da população (LANDSBERG; WARING, 1997, SANDS; LANDSBERG, 2002).

1.1.3.4 Balanço hídrico do solo

A distribuição do sistema radicular no perfil do solo é de importância para exploração do solo e estabelecimento da planta. A distribuição horizontal das raízes facilita o aproveitamento dos nutrientes aplicados via fertilização. A distribuição vertical, em profundidade, facilita a aquisição de água e a exploração do solo como um todo (RODRÍGUEZ; ALVAREZ, 2010). A habilidade das árvores em adquirir água em profundidade é pouco conhecida (CHRISTINA et al., 2011), no entanto, a disponibilidade hídrica é um dos grandes fatores que condicionam a produtividade da cultura.

O modelo 3-PG, segundo Landsberg e Waring (1997), trabalha com uma única camada de solo, onde o balanço hídrico é calculado mensalmente. É computado a entrada de água no sistema pela precipitação ou irrigação e saída pela interceptação na copa, evapotranspiração, e perlocação/escorrimento superficial. A quantidade de água máxima armazenada no solo é dada pela diferença entre a capacidade máxima e mínima de retenção de água no solo. A quantidade de água armazenada no solo é calculada entre a diferença entre a água que entrou no sistema florestal (precipitação e irrigação) menos a que saiu (interceptação e evapotranspiração), somado à quantidade de água disponível no solo no mês anterior. Se a quantidade de água armazenada for maior do que a quantidade de máxima armazenável no solo, o modelo considera que o excedente foi escoado superficialmente ou percolado para o lençol freático (LANDSBERG; WARING, 1997).

Da água que chega ao sistema pela chuva, parte é interceptada pela copa e evaporada dependendo das condições atmosféricas. A interceptação calculada pelo modelo 3-PG é uma taxa fixa em função do IAF. A outra parte da chuva que chega à superfície do solo é infiltrada e armazenada no solo até a sua capacidade máxima de retenção. Acima deste limite, a água é percolada para o lençol freático ou escorrida superficialmente.

As capacidades máxima e mínima de retenção de água no solo são dois parâmetros de entrada exigidos pelo modelo, os quais variam de acordo com o tipo de solo estudado, segundo os critérios adotados pelo usuário do modelo (LANDSBERG; WARING, 1997).

A quantidade de água disponível no solo é absorvida pelas raízes das plantas e liberada para o ambiente pelas folhas pelo processo de transpiração. Este processo depende das condições atmosféricas, área foliar, condutância estomática e propriedades físicas do fluxo de

água. O modelo calcula a transpiração usando a equação de Penman-Monteith, o qual leva em consideração as condições meteorológicas, energia do sistema e a aerodinâmica da planta.

O estômato é uma estrutura da planta de interface entre a superfície da folha e o ambiente, e que permite a entrada de carbono, na forma de gás carbônico (CO_2) e saída de água (processo de transpiração), regulado por meio da abertura e fechamento estomático. Os estômatos tendem a abrir na presença de luz e fechar no escuro. Funcionam como a primeira barreira das árvores contra o estresse hídrico. A água disponível no solo move-se da raiz pelo xilema da planta até o topo da árvore na folha, em que é perdida para a atmosfera na forma de vapor. É o estômato que regula o processo de transpiração (LANDSBERG, 2003).

A medida da regulação da abertura estomática é dada pela condutância estomática (gs). A condutância estomática é medida pela taxa de difusão das moléculas de vapor de água para fora da cavidade subestomática (LANDSBERG; SANDS, 2011).

Entender os fatores que afetam a condutância estomática é a chave para predizer o uso da água e a produção fotossintética, o que tem se tornado grande foco das pesquisas sobre a relação da água no sistema solo-planta-atmosfera, principalmente ao longo dos últimos 30 anos (MACFARLANE; WHITE; ADAMS, 2004).

O modelo de condutância estomática proposto por Jarvis (JARVIS, 1976), expressa a condutância estomática frente à variáveis ambientais internas e externas da planta, sendo o modelo mais aceito nas linhas de pesquisas em nível de árvore e dossel (LANDSBERG; WARING, 1997; MACFARLANE; WHITE; ADAMS, 2004; LANDSBERG; SANDS, 2011). O modelo utiliza a radiação, DPV, potencial de água (pressão de turgor), temperatura e concentração de CO_2 na atmosfera (JARVIS, 1976).

Pesquisas recentes realizadas no Brasil para o gênero *Eucalyptus*, demonstraram a influência do DPV na condutância estomática e nos impactos na produção de fotoassimilados (MARRICH, 2009), e a relação do DPV na condutância estomática, em áreas com ausência de estresse hídrico (STAPE et al., 2008).

Karasawa (2006) e Stape et al. (2008) verificaram que o DPV influencia a condutância estomática mesmo em áreas com ausência de estresse hídrico (áreas irrigadas), gerando diminuição nas atividades fisiológicas da planta e queda de folhas. Karasawa (2006) trabalhou com a evapotranspiração em cultivo de *Coffea arabica* irrigado por gotejamento, na região sudeste do Brasil. Em épocas em que o DPV é alto, mesmo com déficit hídrico nulo, a atividade fisiológica da planta decresceu nos meses mais seco (meses de inverno). O mesmo foi observado para plantio de eucalipto na região nordeste do Brasil. Quando a atmosfera

estava seca com DPV mais negativo, a produtividade do eucalipto foi reduzida mesmo sob irrigação (STAPE et al., 2008).

Na escala de dossel, os fluxos de fotossíntese e transpiração são estimados pela condutância estomática, em função da área foliar da floresta, compondo assim a condutância do dossel (gc). A área foliar da floresta pode ser expressa quantativamente pelo índice de área foliar (IAF), definido por Watson (1947). É calculada pela área fotossintética da folha por unidade de superfície do solo (m^2folha m^{-2}solo). Representa a interface ativa entre a atmosfera e o ecossistema, local que acontece a maioria dos fluxos de energia (BRÉDA, 2003). A superfície foliar controla os processos de fotossíntese, interceptação da precipitação e evapotranspiração, e está diretamente relacionada com a produtividade do ecossistema florestal (LANG; MCMURTRIE, 1992). O IAF possui variação temporal e espacial ao longo da vida do povoamento e entre estação do ano (LACLAU et al., 2009; MARSDEN et al., 2010).

1.1.3.5 Conversão da biomassa nas variáveis de interesse de manejo

O modelo 3-PG foi formulado com o objetivo de atender a necessidade não somente dos pesquisadores em entender os processos de crescimento das árvores, mas também para servir como ferramenta para os produtores florestais. Existem variáveis de interesse dos silvicultores, como por exemplo: biomassa, volume, DAP, área basal e número de fustes (LANDSBERG; WARING, 2011).

1.1.4 Espacialização do modelo 3-PG

Além da análise da produtividade florestal em escala de parcela ou talhão, entre as quais as condições climáticas e edáficas são únicas, os modelos baseados em processos vêm sendo desenvolvidos para estimarem o crescimento florestal na escala da paisagem, os chamados modelos espacialmente distribuídos e que possibilitam também, a incorporação da técnica de sensoriamento remoto. Os modelos 3-PGS (COOPS; WARING; LANDSBERG, 1998; WHITE; COOPS; SCOTT, 2000; COOPS; WARING, 2001; COOPS; WARING; LANDSBERG, 2001; COOPS; WARING; LAW, 2005; NIGHTINGALE et al., 2008a; 2008b; COOPS; WARING; SCHOREDER, 2009; COOPS et al., 2009; WARING; COOPS; LANDSBERG, 2010) e 3-PG Spatial (TICKLE; COOPS; HAFNER, 2001; TICKLE et al.,

2001; ALMEIDA et al., 2010) foram estruturados pela união dos fundamentos do modelo 3-PG incorporados às técnicas de espacialização. Estes dois modelos diferem entre si pelo fato do modelo 3-PGS utiliza-se da técnica de sensoriamento remoto como dado de entrada do modelo, e o modelo 3-PG Spatial utiliza-se somente do sistema de informação geográfica para estimar a dinâmica do crescimento de espécies florestais.

O uso da técnica de sensoriamento remoto está sendo cada vez mais viável devido ao desenvolvimento de softwares e computadores com maior capacidade de processamento de dados, bem como ao grande histórico de imagens de satélite disponível aos usuários. Para a grande extensão brasileira, as imagens de satélites podem ser adquiridas gratuitamente pelo site do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

As medições feitas por sensoriamento remoto podem estimar parâmetros importantes como o índice de área foliar e quantidade de nitrogênio ou clorofila no dossel da floresta, capacidade fotossintética, estrutura da parte aérea da floresta e biomassa (WARING; COOPS; LANDSBERG, 2010). Em plantações florestais equiâneas de rápido crescimento, como por exemplo, plantio de *Eucalyptus*, há um grande potencial no uso operacional do sensoriamento remoto para o manejo florestal via monitoramento do IAF e da biomassa da floresta (MARSDEN et al., 2010; NOUVELLON et al., 2010; LE MAIRE et al., 2011).

Os índices de vegetação calculados usando sensoriamento remoto baseiam-se na absorção seletiva da radiação pelo dossel da vegetação, resultando em padrões distintos de refletância da radiação de ondas curtas (FLORES, et al., 2006). O espectro de refletância da vegetação capturada pelo satélite é caracterizado por uma baixa refletância na banda vermelho (0,6 - 0,7 µm), associada à absorção da clorofila; e forte refletância na banda infravermelho (0,7 - 1,2 µm), associada à estrutura interna da folha.

Os dois índices de vegetação mais utilizados são o SR - “simple ratio” (em português razão simples, calculado pela divisão da banda infravermelho pela vermelha) e NDVI – “Normalized Difference Vegetation Index” (índice de vegetação pela diferença normalizada – calculada pela diferença entre as bandas infravermelha e vermelha divida pela soma destas duas bandas) (FLORES, et al., 2006). Estes índices possuem uma relação linear com o índice de área foliar, e segundo FLORES et al., 2006, o índice SR não é afetados pelo sítio, estrutura do povoamento ou época do ano (FLORES et al., 2006).

O modelo 3-PGS originalmente desenvolvido por Coops; Waring; Landsberg, 1998, associando o modelo 3-PG com sensoriamento remoto (figura 4) utiliza o índice de vegetação NDVI para estimar a radiação interceptada pelo dossel da vegetação. WARING; COOPS;

LANDSBERG (2010) propõem modificação ao 3-PGS original, incorporando as estimativas de sensoriamento na variação sazonal da interceptação de luz pelo dossel e inclusão de variáveis fisiológicas (condutância estomática e eficiência quântica do dossel), as quais podem ser estimadas com as medições por sensoriamento remoto.

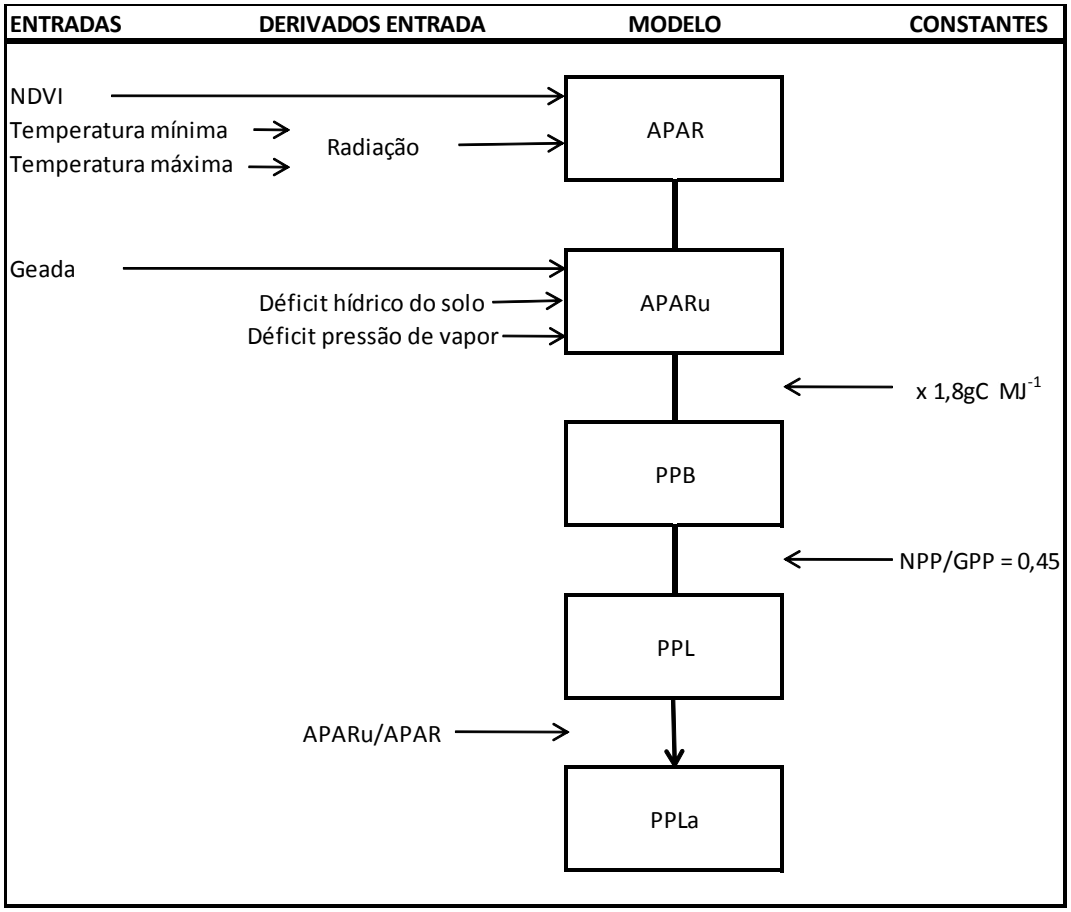

Figura 4 - Diagrama representativo dos dados de entrada, as constantes e a sequência de cálculos usado no modelo 3-PGS, em que o APAR é a radiação fotossinteticamente ativa, APARu é o APAR utilizável pela planta, PPB é a produtividade primária bruta, PPL produtividade primária líquida e PPLa é a produtividade primária bruta destinada para parte aérea. Fonte: Coops, Waring e Landsberg, 1998 modificado

Os dados de entrada necessários para o 3-PGS são feições de condições climáticas e solos. Esta ferramenta não necessita que a área estudada seja coberta pela vegetação, podendo estimar o crescimento em áreas em que haja o interesse em se conhecer o comportamento do sistema florestal.

Tickle; Coops; Hafner (2001) e Tickle et al. (2001) calibraram o modelo 3-PG Spatial com dados de 22 e 8 parcelas permanentes de inventário, respectivamente, alocadas na floresta nativa de *Eucalyptus* no sudeste da Austrália. Em ambos os estudos, o modelo 3-PG Spatial forneceu boas estimativa de volume do tronco, número de árvore e média do DAP. Os autores concluem que existe a possibilidade de uso do modelo 3-PG Spatial para fazer estimativas de crescimento em escalas locais, usando mapas de alta resolução espacial de dados climáticos e edáficos; e com os parâmetros calibrados utilizando-se parcelas de inventário.

Em condições climáticas brasileiras, sob o regime de produção de floresta de *Eucalyptus* em ciclo curto, Almeida et al. (2010) utilizou o 3-PG Spatial para quantificar como as restrições ambientais influenciam no crescimento dessa espécie em 180.000 ha de plantio. O modelo foi sensível às mudanças do IAF e quantidade de água disponível e à detecção das instabilidades climáticas, como um grande período de seca. Neste estudo, foram obtidos boas estimativas de volume e diâmetro da árvore, porém para incremento médio anual não foi muito eficiente.

Os cenários oferecidos pela espacialização do modelo 3-PG possibilitam elevar a compreensão da dinâmica da floresta pelos silvicultores na escala da paisagem, permitindo assim, entender como o rendimento da cultura pode ser afetado pelos elementos do sistema que se interagem em cada parte da paisagem, fornecendo informações importantes para decisões quanto ao manejo florestal (ALMEIDA et al., 2010).

1.1.5 Pontos de melhorias do modelo 3-PG

Após quase 15 anos de existência e uso do modelo 3-PG, é possível identificar pontos a serem aprimorados no modelo tornando-o mais eficiente, e que incluem: taxa de respiração variável com espécie e condições climáticas; taxa de queda de folhedo associadas às condições climáticas; limite de estoque por compartimento; balanço hídrico sensível à profundidade do sistema radicular; mortalidade de árvores frente aos estresses ambientais; e moduladores de fertilidade objetivamente determinados com base nos atributos químicos do solo (LANDSBERG; SANDS, 2011; RYAN, 2011).

Nesta tese trabalhou-se com três pontos de aprimoramento do modelo 3-PG: balanço hídrico, queda de folhedo e fertilidade do solo.

1.1.5.1 Balanço hídrico

O modelo 3-PG caracteriza o balanço hídrico como sendo uma única camada de solo, em que a capacidade máxima de água no solo disponível para a planta é constante ao longo de todo o ciclo de crescimento da planta. A capacidade máxima de água no solo é determinada com base na profundidade efetiva de crescimento radicular, a qual foi determinada por muitos autores, aplicando o modelo 3-PG em povoamento de *E. urophylla x grandis* plantados no Brasil, como sendo de 2 a 2,5 metros de profundidade em solos profundos (STAPE et al., 2004b; ALMEIDA et al. 2004b; 2008). Estudo recente realizado em Itatinga - São Paulo, sobre padrão de crescimento do sistema radicular do *Eucalyptus* em profundidade, demonstra que o crescimento radicular e profundidade efetiva não se restringem somente a 2 a 2,5 metros de profundidade, chegando alcançar até de 10 metros de profundidade (CHRISTINA, 2011).

Landsberg e Sands (2011) identificaram dois pontos com potencial para suprir esta falha no balanço hídrico: uso de camadas múltiplas de solo para o cálculo do balanço hídrico de água no solo ou determinação da zona radicular. Almeida et al. (2007) e Feikema et al. (2010) trabalharam com o modelo 3-PG associado a outros modelos hidrológicos de passo diário e camadas múltiplas de solo, obtendo bons resultados para estimativa da dinâmica da água no solo e crescimento florestal. Outra opção é a incorporação do padrão de crescimento radicular, o que será o propósito desta tese.

1.1.5.2 Queda de folhedo

A taxa de queda de folhedo é um parâmetro muito sensível no modelo 3-PG, influencia diretamente a estimativa do IAF e, consequentemente, a fotossíntese, PPB, crescimento e produtividade da floresta. O modelo 3-PG calcula a taxa de queda de folhedo em função apenas da idade do povoamento, não variando com as sazonalidades climáticas.

A queda de folhedo é um processo dinâmico dependente da produção de folhas, tipo de árvore, estrutura da floresta (densidade populacional, espaçamento) e condições climáticas. O ciclo de vida de uma folha, em árvores perenes pode variar de 1 a 10 anos (POOK, 1984).

A produção de folhas ocorre em todos os meses do ano, com variação no ritmo de crescimento, em função das condições climáticas, maior no verão e menor no inverno. Isso

devido à influência das mudanças anuais no nível de fatores com dependência solar, como irradiação, temperatura e duração do dia. O padrão de crescimento é modificado frequentemente pelo baixo suprimento de água, mas é também influenciado pela fenologia reprodutiva em algumas árvores (POOK, 1984).

Landsberg e Waring (2011) descreveram a dinâmica foliar for fase de crescimento da floresta. Nas idades iniciais há a formação de novas estruturas na planta, tais como folhas e galhos, gerando o aumento da massa foliar até o fechamento do dossel. Após o fechamento do dossel, o aumento de massa foliar tende a ser compensado pela queda de folhedo, assim a quantidade de folhas no dossel tende a ser mais estável. Em longo prazo, normalmente há um declínio na massa de folha devido à mudança do padrão de partição de fotoassimilados do compartimento folha para tronco, e também pela necessidade de promover estabilidade estrutural e uma boa condutividade hidráulica nas árvores altas.

Como forma de aprimoramento da equação da taxa de queda de folhedo do modelo 3-PG, Landsberg e Sands (2002) sugerem a incorporação de variáveis climáticas junto à dinâmica foliar.

1.1.5.3 Fertilidade do solo

A fertilidade do solo é abordada pelo modelo 3-PG como o modificador FR, o qual adota valores de 0 a 1, valor definido pelo usuário de forma empírica de acordo com a fertilidade do solo trabalhado.

Alguns autores trabalharam com diferentes métodos para a determinação do FR, levando em consideração a fertilidade do solo (STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004b), a análise nutricional foliar (CAMPION; ESPREY; SCHOLES, 2005) e as interações químicas e físicas do ambiente (ALMEIDA et al., 2010).

Stape, Binkley e Ryan (2004b) trabalharam com a fertilidade do solo em resposta ao crescimento da árvore de *Eucalyptus*. O modificador FR adotou valores com base na resposta à fertilização calculada em parcelas pareadas (parcelas gêmeas). Adotaram-se valores de 0,6 em áreas com maiores respostas à fertilização até 1,0 em locais sem resposta. Desta forma, pode-se descrever uma equação em função da resposta à fertilização e potencial máximo de ganho em biomassa da floresta.

Campion, Esprey e Scholes (2005) determinaram o FR de acordo com os nutrientes da análise foliar. O experimento contemplava tratamentos contendo fertilização e irrigação, somente fertilização, somente irrigação e controle (sem fertilização). Os valores adotados de

FR foram: 0,9; 0,8; 0,7; 0,6, respectivamente. A premissa adotada foi que a irrigação auxilia na assimilação do nutriente pela planta. Portanto, o tratamento fertilizado e irrigado adota valores maiores de FR, mas não chega ao valor máximo (1), por haver se detectado limitações de P e K nas plantas.

Segundo Almeida et al. (2010), o efeito da fertilidade do solo no crescimento dos plantios de eucalipto não é limitado exclusivamente pelo fator químico do solo, mas também deveriam ser incluídos os fatores físicos que podem influenciar na absorção dos nutrientes pela árvore. Desta forma, este autor determinou uma equação que descreve o FR com base não apenas na fertilização, mas também considerando a limitação por água, manejo e topografia.

Apesar destes estudos forneceram bons resultados, ainda não foram validados em outros povoamentos florestais.

Referências

_____. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF), 2011, Disponíveis em: http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp. Acesso em: 15 jun.2011.

_____. BRACELPA, 2007 **Florestas plantadas de eucalipto e pinus**: a solução verde. Disponível em: http://www.bracelpa.org.br/bra/saibamais/florestas/index.html. Acesso em: 05 ago 2011.

_____. SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI). Instituto de Economia Agrícola. Levantamento censitário de unidades de produção agrícola do Estado de São Paulo - LUPA 2007/2008. São Paulo: SAA/CATI/IEA, 2008. Disponível em: <http://www.cati.sp.gov.br/projetolupa>. Acesso em: 03 nov. 2009.

AB'SABER, A.; GOLDEMBERG, J.; RODES, L. Identificação de áreas para o reflorestamento no espaço total do Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v.4, n.9, p.63-119,1990.

ALMEIDA, A.C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T.R.; BEADLE, C.; FONSECA, S.; LOOS, R. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p.1730-1740, 2010.

ALMEIDA, A. **Application of a process-based model for predicting and explaining growth in Eucalyptus plantations**. 2003. 232 p. Thesis (Doctor of Philosophy) – The Australian National University, Canberra, 2003.

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 Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.167-177, 2004b.

ALMEIDA, A.C.; LANDSBERG, J.J.; SANDS, P.J.; Parameterisation of 3-PG model for fast-growing Eucalyptus grandis plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.1993, p.179-195, 2004a.

ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V.; LANDSBERG, J. J.; REZENDE,G.D. Growth and water balance of Eucalyptus grandis hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.251, p.10-21, 2007.

ALVARES, C.A. **Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de Eucalyptus no sul do Estado de São Paulo**. 2011. 279p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz", Piracicaba, 2011.

BATTAGLIA, M., SANDS, P., WHITE, D., MUMMERY, D. CABALA: a linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.251-282, 2004.

BLINKLEY, D. A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. **Forest Ecology amd Management**, Amsterdam, v.190, p.265-271, 2004.

BLINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; BARNARD, H.R.; FOWNES, J. Age-related decline in forest ecoystem growth: an individual-tree, stand-struture hypothesis. **Ecosystems**, New York, v.5, p.58-67, 2002.

BORGES, J.S. **Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do Cerrado de Minas Gerais**. 2009. 65p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

BOUMAN, B.A.M.; VAN KEULEN, H.; VAN LAAR, H.H.; RABBINGE, R. The "School of de Wit" crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v.52 p.171-198, 1996.

BRÉDA, N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 54, n. 392, p. 2043-2417, 2003.

CAMPINHOS, E. Sustainable plantations of high-yield Eucalyptus trees for production of fiber: the Aracruz case. **New Forests**, Amsterdam, v.17 p.129-143, 1999.

CAMPION, J.M.; ESPREY, L.J.; SCHOLES, M.C. Application of the 3-PG model to a Eucalyptus grandis stand subjected to varying levels of water and nutritional constrains in

KwaZulu-Natal, South Africa. **Southern African Forestry Journal**, Menlo Park, v.203, p.3-13, 2005.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. Capítulo12 Modelos de crescimento e produção em nível de povoamento In: CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal**: Perguntas e Respostas Viçosa: Editora Viçosa, 2006, p.295 – 354.

CHRISTINA, M.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.P. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. **Ecosphere**, New York, v. 2, p.1-10, 2011.

CLUTTER, J. L. Development of taper functions from variable-top merchantable volume equations. **Forest Science**, Washingtom, v.26, n.1, p.117-120, 1980.

COMINS; H.N.; MCMURTRIE, R.E. Long-term biotic response of nutrient-limited forest ecosystems to CO2-enrichment; equilibrium behavior of integrated plant-soil models. **Ecology Application**, New York, p.666-681, 1993.

COOPS N.; WARING, R.; LAW, B. Assessing the past and future distribution and productivity of ponderosa pine in the Pacific Northwest using a process model, 3-PG. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.183, p.107–124, 2005.

COOPS N.; WARING, R.; SCHROEDER, T.A. Combining a generic process-based productivity model and a statistical classification method to predict the presence and absence of tree species in the Pacific Northwest, U.S.A. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.220, p.1787–1796, 2009.

COOPS, N.; FERSTER, C. J.; WARING, R. H.; NIGHTINGALE, J.; Comparison of three models for predicting gross primary production across and within forested ecoregions in the contiguous United States. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v.113, p.680–690, 2009.

COOPS, N.C.; WARING, R.H. The use of multiscale remote sensing imagery to derive regional estimates of forest growth capacity using 3-PGS. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v.75, p.324–334, 2001.

COOPS, N.C.; WARING, R.H.; BROWN, S.R.; RUNNING, S.W. Comparison of predictions of net primary production and seasonal patterns in water use derived with two forest growth models in Southwestern Oregon. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.142, p. 61–81, 2001.

COOPS, N.C.; WARING, R.H.; LANDSBERG, J.J. Assesing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.104, p.113-127, 1998.

CORBEELS, M.; MCMURTRIE, R.E.; PEPPER, D.A.; MENDHAM, D.S.; GROVE, T.S.; O'CONNELL, A.M. Long-term changes in productivity of eucalypt plantations under

different harvest residue and nitrogen management practices: a modelling analysis. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam v. 217, p. 1−18, 2005.

DOUGHERTY, P.M.; HENNESSEY, T.C.; ZARNOCH, S.J.; STENBERG, P.T.; HOLEMAN, R.T.; WITTWER, R.F. Effects of stand development and weather on monthly leaf biomass dynamics of a loblolly pine (*Pinus taeda* L.) stand. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.72, p.213-227, 1995.

DYE, P.J. Modelling growth and water use in four Pinus patula stands with the 3-PG model. **Southern African Forest Journal**, Menlo Park, v.191, p. 53–63, 2001.

ESPREY, L.J.; SANDS, P.J; SMITH, C.W. Understanging 3-PG using a sensitivity analysis. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.235-250, 2004.

FEIKEMA, P.M.; MORRIS, J.D.; BEVERLY, C.R.; COLLOPY, J.J.; BAKER, T.G.;LANE, P.N.J. Validation of plantation transpiration in south-eastern Australia estimated using the 3PG+ forest growth model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.260, p.663-678, 2010. doi: 10.1016/j.foreco.2010.05.022

FERREIRA, J.M.; STAPE, J.L. Productivity gains by fertilization in Eucalyptus urophylla clonal plantations across gradients in site and stand conditions. **Southern Forests**, Menlo Park, v.71,n.4, p.253 – 258, 2009.

FLORES, F.J.; ALLEN, H.L.; CHESHIRE, H.M.; DAVIS, J.M.; FUENTES, M.; KELTING, D. Using multispectral satellite imagery to estimate leaf area and response to silvicultural treatments in loblolly pine stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.36, p. 1587-1596, 2006.

FONTES L.; LANDSBERG, J.; TOMÉ, J.; TOMÉ,M.; PACHECO, C.A.; SOARES,P.; ARAUJO, C. Calibration and testing of a generalized process-based model for use in Portuguese eucalyptus plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.36, p.3209-3221, 2006.

GIARDINA; C.P.; RYAN, M.G. Total belowground carbon allocation in fast-growing Eucalyptus plantation estimated using a carbon balance approach. **Ecosystems**, New York, v.5, p.487-499, 2002.

GIARDINA; C.P.; RYAN, M.G.; BLINKLEY, D.; FOWNES, J.H. Primary production and carbon allocation in relation to nutrient supply in a tropical experiment forest. **Global Change Biology**, Urbana, v.9, p.1-13, 2003.

GONÇALVES, J.L.M.; MELLO, S.L.M. Capítulo 8 O sistema radicular das árvores. In:GONÇALVES, J.L.M.; MIRANDA, S.M. **Nutrição e Fertilidade Florestal.** Piracicaba: IPEF, 2000. p. 219-268.

GONÇALVES, J.L.M. Conservação do solo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE J.L. **Conservação e Cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p.41-130.

GONÇALVES, J.L.M..; STAPE, J.L.; LACLAU, J.L.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-

growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, Menlo Park, v.70, p.105-118, 2008.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; SMETHURST, P.; GAVA, J.L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations, **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 45-61, 2004.

GONÇALVES, J.M.L. **Características do sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas.** 1994. 84p. Tese (Tese de Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

HAKAMADA, R.E.; LEMOS, C.C.Z. Evolução da produtividade da IP: Influência de manejo e do melhoramento genético.In: WORKSHOP DE MELHORAMENTO,6.; REUNIÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA DO PTSM,60., 2010. Botucatu. **Anais...**Botucatu, 2010.

HENNESSEY, T.C.; DOUGHERTY, P.M.; CREGG, B.M.; WITTWER, R.F. Annual variation in needlefall of a loblolly pine stand in relation to climate and stand density. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.51, p.329-338, 1992.

HUNT, E.R.J.; LAVIGNE, M.B.; FRANKLIN, S.E. Factors controlling the decline of net primary production with stand age for balsam fir in Newfoundland assessed using an ecosystem simulation model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.122, p.151-164, 1999.

JARVIS, P.G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, London, v.273, p. 593-610, 1976.

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

KARASAWA S. **Evapotranspiração de cafezal semi-adensado irrigado por gotejamento e sua relação com a evapotranspiração de referência**. 2006. 96p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.Piracicaba, 2006.

KIMMINS, J.P.; COMEAU, P.G.; KURZ,W. Modelling the inteactions between moisture and nutrients in the control of forest growth. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.30, p.361-379, 1990.

LACLAU, J.P.; ALMEIDA, J.C.R.; GONÇALVES, J.L.M.; SAINT ANDRE, L.; VENTURA, M.; RANGER, J.; MOREIRA, R.M.; NOUVELLON, Y. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf lifespan and allocation of above-ground growth in Eucalyptus plantations. **Tree Physiology**, Victoria, v.29, p.111-124, 2009.

LANDSBERG, J.J. **Physiology in forest models:** History and the future. FBMIS, 2003. p.49-63.

LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. **Aplications of physiological ecology to forest management**. San Diego: Academic Press, 1997. 354p.

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

LANDSBERG, J.J.; COOPS, N.C. Modeling forest productivity across large areas and long periods. **Natural Resources Modeling**, Somerset, v.12, p.383 – 411, 1999.

LANDSBERG, J.J; WARING, R.H. Top-down models and flux measurements are complementary methods of estimatingcarbon sequestration by forest: illustrations using the 3-PG. In: MENCUCCINI, M.;MONCRIEFF, J.;MCNAUGTON, K.; GRACE, J. (Ed**.). Forest at Land Atmosphere Interface**. Edinburg: Scotland, 2003. 304 p.

LANDSBERG, J.; SANDS, P. **Physiological ecology of forest production**: principles, processes and models. Amsterdam: Elsevier, 2011. 331p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA, 2006. 531p.

LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y.; GRINAND, C.; HAKAMADA, R.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P. Modis NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. **Remote Sensing of Environmental**, Amsterdam, v.115, p.2613-2625, 2011.

LITTON, C.M.; RAICH, J.W.; RYAN, M.G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, Urbana, v.13, p.2089–2109, 2007.

MACFARKANE, C.; WHITE, D.A.; ADAMS, M.A. The apparent feed-forward response to vapour pressure deficit of stomara in droughted, field-grown Eucalyptus globulus Labill. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v.27, p.1268-1280, 2004.

MARRICHI, A.H.C. **Caracterização da capacidade fotossintética e da condutância estomática em sete clones comerciais de Eucalyptus e seus padrões de resposta ao déficit de pressão de vapor.** 2009.104p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MARSDEN, C.; LE MAIRE, G.; STAPE, J.L.; LO SEEN, D.; ROUPSARD, O.; CABRAL, O.; EPRON, D.; LIMA, A.M.N.; NOUVELLON, Y. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p.1741-1753, 2010.

MEDLYN, B.E. A MAESTRO retrospective. In: MENCUCCINI, M.; GRACE, J.; MONCRIEFF, J.; MCNAUGHTON, K.G. **Forests at the Land-Atmosphere Interface**. Wallingford: CAB International,2004. 105−121p.

MURTY, D.; MCMURTRIE, R.E. The decline of forest productivity as stands age: a model-based method for analysing causes for the decline. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.134, p.185 – 205, 2000.

MURTY, D.;MCMURTRIE, R.E.; RYAN, M.G. Declining forest productivity in aging forest stands: a modeling analysis of alternative hypotheses. **Tree Physiology**, Victoria, v.9, p.187-200, 1996.

NIGHTINGALE, J.M.; HILL, M.J.; PHINN, S.R.; DAVIES, I.D.; HELD, A.A.; ERSKINE, P.D. Use of 3-PG and 3-PGS to simulate forest growth dynamics of Australian tropical rainforests: I. Parameterisation and calibration for old-growth, regenerating and plantation forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 254, p.107 -121, 2008a.

NIGHTINGALE, J.M.; HILL, M.J.; PHINN, S.R.; DAVIES, I.D.; HELD, A.A. Use of 3-PG and 3-PGS to simulate forest growth dynamics of Australian tropical rainforests: II. An integrated system for modelling forest growth and scenario assessment within the wet tropics bioregion. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.254, p.122 -133, 2008b.

NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.P.; EPRON, D.; KINANA, A.; MABIALA, A.; ROUPSARD, O.; BENNEFOND, J.M.; LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; BONTEMPS, J.D.; SAINT- ANDRÉ Within-stand and seasonal variations of specific leaf area in a clonal Eucalyptus plantation in the Republic of Congo. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 259, p.1796-1807, 2010.

PAUL, K.I.; BOOTH, T.H.; JOVANOVIC, T.; SANDS, P.J.; MORRIS, J.D. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.243, p.237-247, 2007.

PAUSTIAN, K.; PARTON, W.J.; PERSSON, J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen fertilized long-term plots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.476 -488, 1992.

POOK, E.W. Canopy Dynamics of *Eucalyptus maculata* Hook. I Distribution and Dynamics of Leaf Populations. **Australian Journal of Botany**, Victoria, v.32, p.387 – 403, 1984.

REFFYE, P.H. de; HOULLIER, F.; AUCLAIR, D.; BARCZI, J.; DAUZAT, J. Tree architecture as a link between process and forest growth. In: EMPIRICAL AND PROCESS BASED MODELS FOR FOREST TREE AND STAND GROWTH SIMULATION, 1., 1997, Oeiras. **Anais…**Lisboa: Salamandra, 1999. p.53-60.

REIS, M.G.F.; KIMMINS, J.P.; REZENDE, G.C. DE; BARROS, N.F. DE. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de Eucalyptus grandis plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, v.9, p.149-162,1985.

RODRIGUEZ, J.; ALVAREZ, J. **Nutricion y fertilizacion de las plantaciones forestales**. Santiago de Chile:Grafica LOM, 2010. 521 p.

RYAN, M.G. Unsolved problems in whole-tree physiology: how to make progress for clonal Eucalyptus forests. In: IUFRO WORKING GROUP 2.08.03 Improvement and Culture of *Eucalyptus*. Porto Seguro, **Proceding…** Porto Seguro, 2011.p. 47-48.

RYAN, M.G.;BLINKLEY, D. ;FOWNES, J.H. Age-related decline in forest productivity: pattern and process. **Advances in Ecological Research**, Amesterdam, v.27, p.213-262, 1997.

RYAN, M.G.; STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R.A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.A. ; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C. Factors controlling Eucalyptus productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, p.1695-1703, 2010.

SANDS, P. **Adaptation of 3-PG to novel species**: guidelines for data collection and parameter assignment. CRC for Sustainable Production Forestry, Hobart, Australia, 2004. 34p. (Technical Report, 141).

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

SANDS, P.J. **3PGPJS - a User-Friendly Interface to 3-PG, the Landsberg and Waring Model of Forest Productivity**. Hobart: CRC for Sustainable Production Forestry, 2001. 22p. (Technical Report, 29).

SILVA, G.G.C. **Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de Eucalipto em reposta à disponibilidade de água e nutriente.** 2006. 102p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de Viçosa, Viçosa, 2006.

STAPE, J.L. **Production ecology of clonal Eucaliptus plantations in Northeastern Brazil**. 2002. 265p. Thesis (Ph.D.) - Colorado State University, Fort Collins, 2002.

STAPE, J.L.;BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.17-31, 2004a.

STAPE, J.L.;BINKLEY, D.; RYAN, M.G. 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**, Amsterdam, v.193, p.219 - 234, 2004b.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam,v.255, p. 920-930, 2008.

STAPE J.L.; BINKLEY, D.; RAYAN, M.G.; FONSECA, S.; LOOS, R.A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.A.; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C.; AZEVEDO, M.R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam,v.259, p.1684-1694, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TAYLOR, A.R.; CHEN, H.Y.H.; VANDAMME L.; A Review of Forest Succession Model and their suitability for Forest Management Planning. **Forest Science**, Bethesda, v.55,n.1, p.23-36, 2009.

TICKLE, P.K.; COOPS, S.D. HAFNER, S.D. Comparison of a forest process model (3-PG) with growth and yield models to predict productivity at Bago State Forest, N.S.W. **Australian Forestry**, Yarralumla, v.64, p.111-122, 2001.

TICKLE, P.K.;COOPS, S.D. ;HAFNER,S.D..BAGO SCIENCE TEAM.; Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using a process model, 3PG-SPATIAL. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.152, p.275-291, 2001.

WARING, R.H.; LANDSBERG,J.J.; WILLIAMS, M. Net primary production of forests: A constant fraction of gross primary production? **Tree Physiology**, Victoria v.18, p. 129-134, 1998.

WARING, R.H.; COOPS N.C.; LANBSBERG, J.J. Improving predictions of forest growth using the 3-PG model with observatons made by remote sensing. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, p.1722-1729, 2010.

WATSON, D.J. Comparative physiological studies on growth of fild crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**,Oxford, v.11, p.41-76, 1947.

WHITE , J.D.;COOPS, N.C.; SCOTT, N.A. Estimates of New Zealand forest and scrub biomass from the 3-PG model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.131, p.175–190, 2000.

ZANI, C.C.; STAPE, J.L.;LIMA, A.M.N. Physiologic processes related to Eucalyptus plantation in “twin-plots”. INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROCESSES CONTROLLING PRODUCTIVITY IN TROPICAL PLANATATIONS, 2008. Porto Seguro. **Proceding…**Porto Seguro, 2008. P.82-83.

ZHAO, M.; XIANG, W.; PENG, C.; TIAN, D. Simulating age-related changes storage and allocation in Chinese fir plantation growing in southern China using 3-PG model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.257, p.1520–1531, 2009.

2 APRIMORAMENTO DO MODELO 3-PG QUANTO À DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO E TAXA DE QUEDA DE FOLHEDO DO EUCALIPTO

Resumo

O 3-PG é o modelo baseado em processo mais utilizado para estimar o crescimento de espécies florestais. Após quase 15 anos de existência e uso, unido ao progresso no conhecimento científico neste período, algumas processos descritos no modelo podem ser melhorados, como por exemplo: balanço de água no solo e taxa de queda de folhedo. O objetivo deste trabalho foi adequar o modelo 3-PG para o *Eucalyptus* no tocante a: i) disponibilidade de água no solo em função da distribuição do sistema radicular no perfil do solo com a idade do povoamento; e ii) taxas de queda de folhedo levando em conta os estresses ambientais. Para tal finalidade, utilizou-se a rede experimental do BEPP, com o sítio localizado em Mogi-Guaçu, e tomando-se 2 tratamentos: o tratamento controle (fertilização tradicional, sem irrigação) e o tratamento fertilizado e irrigado. O aprimoramento do modelo para quantidade máxima de água disponível no solo baseou-se na relação entre o crescimento do sistema radicular e da parte aérea, passando de um valor constante, no 3-PG original, para valor crescente com a idade. A melhoria resultante desta modificação foi avaliada pela estimativa fornecida pelo modelo 3-PG para a biomassa do tronco e índice de área foliar. Houve melhoria nas estimativas de biomassa de tronco feitas pelo 3-PG. Nestes mesmos tratamentos foram realizadas coletas de queda de folhedo mensais ao longo do ciclo, sendo possível ajustar a taxa de queda de folhedo em função das variáveis climáticas e biométricas do povoamento. A precipitação de dois meses anteriores ao evento e o índice de área foliar foram variáveis que aprimoraram os padrões mensais estimados de queda de folhedo. Ajustaram-se quatro modelos (linear, logístico, não linear, e combinado), e todos proporcionaram melhores estimativas da queda de folhedo quando comparado à versão atual do 3-PG, com destaque para o modelo combinado (modelo 3-PG original e modelo linear), que divide a dinâmica de queda de folhedo em pré- e pós-fechamento do dossel.

Palavras-chave: Modelagem ecofisiológica; Retenção de água; Taxa de queda de folhedo; *Eucalyptus*

Abstract

The 3-PG is widespread process-based model for estimation of forest growth. After almost 15 years of its develop and use, associated by new scientific knowledge in forest research during this period, improvements can be done, such as: soil water content and litter fall rate. The objective of this study was to adjust the 3-PG model to: i) soil water content, taking into account the root distribution in the soil profile during the forest cycle; and ii) litter fall rate, taking into account the environmental effects. For this proposal, we used one site of BEPP Project (Brazilian Eucalyptus Potential Productivity) located in Mogi-Guaçu, and two treatments were used: control treatment (traditional fertilization and rainfed) and irrigated and fertilized treatment. The soil water content was improved using the root system relationships between above and belowground exploration. The constant value of water soil content was replaced by dynamic value changing with the root distribution in the soil profile and deep exploration with the age. This modification was evaluated by the increases in model efficiency to estimate the stem biomass and reliable estimation for leaf area index. In those

treatments the litter fall was collected monthly over the Eucalyptus cycle. The litter fall rate was fitted as function of climate and biological variables. The precipitation of two months prior the litter fall and the leaf area index were used to improve monthly litter fall rate. Four models were fitted (linear, logistic, non linear and mixed models). All those models had better performance to estimate the litter fall rate than the actual 3-PG model, highlighting to the mixed model which were able to represent the litter fall stages: before and after canopy closure.

Keywords: Ecophysiological modeling; Soil water soil; Litter fall rate; *Eucalyptus*

2.1 Introdução

O 3-PG (Physiological Principle Predicting Growth, desenvolvido por LANDSBERG; WARING, 1997 e modificado por SANDS; LANDSBERG, 2002, SANDS, 2003) é o modelo baseado em processo mais difundido na estimativa de crescimento florestal. O 3-PG possui uma grande aceitação no setor florestal, devido a sua relativa simplicidade para uso, e vem servindo como ferramenta de auxílio nas tomadas de decisões estratégicas e manejos silviculturais (LANDSBERG, 2003, ALMEIDA et al., 2004b).

O modelo 3-PG já foi calibrado para várias espécies florestais, como por exemplo: *E. globulus* (SANDS; LANDSBERG, 2002), *E. urophylla x grandis* (STAPE, 2002, STAPE et al., 2004b, BORGES, 2009, ALMEIDA et al., 2010, ALVARES, 2011), *Pinus taeda* (LANDSBERG et al., 2001) e *Tectona grandis* (BEHLING, 2009). No caso específico do gênero *Eucalyptus*, o modelo vem sendo utilizado em vários países, tais como Brasil (ALMEIDA et al., 2004a b, STAPE et al., 2004b, SILVA, 2006, ALMEIDA et al., 2007, ALMEIDA, 2010, ALVARES, 2011), Austrália (SANDS; LANDSBERG, 2002), África do Sul (DYE et al., 2004; ESPREY et al., 2004; CAMPION; ESPREY; SCHOLES, 2005), Portugal (FONTES et al., 2006).

O 3-PG estima o crescimento da floresta com base na radiação interceptada e eficiência quântica aparente da copa. A eficiência quântica aparente é limitada pela temperatura, déficit de pressão de vapor, água disponível no solo, idade do povoamento e fertilidade do sítio, afetando assim a assimilação de carbono para a floresta. Os fotoassimilados são alocados aos diversos compartimentos da planta (folha, tronco, casca, galho e raiz) ou perdidos na forma de respiração. O modelo ainda é suportado por processos físicos e ecofisiológicos como, por exemplo, balanço de água no solo e queda de folhedo, entre outros.

O modelo 3-PG foi idealizado para servir como uma ferramenta prática, acessível tanto aos pesquisadores quanto aos silvicultores, por isso foi descrito usando modelos

biofísicos simplificados, associados a equações empíricas construídas com base em experimentos e medições de campo durante longos períodos de crescimento de florestas ou plantações florestais. (LANDSBERG; WARING, 1997, LANDSBERG; SANDS, 2011). Por ser um modelo muito difundido e com quase 15 anos de existência, muitas pesquisas foram desenvolvidas desde sua criação contribuindo para melhoria dos pontos considerados falhos pelos idealizadores, como por exemplo: balanço hídrico e taxa de queda de folhedo (LANDSBERG; SANDS, 2011).

O balanço de água no solo do modelo 3-PG é representado por uma camada única com passo mensal, onde o limite máximo de água disponível para a planta é especificado pelo usuário como dado de entrada. A disponibilidade hídrica limita o crescimento da floresta, como um modulador, f_θ, influenciando a eficiência quântica aparente do dossel. Este modulador é calculado por meio de dois parâmetros empíricos que descrevem a relação entre a taxa de transpiração relativa e o volume de água contido no solo para diferentes classes texturais. A água é fornecida para o solo pela precipitação e irrigação, e removida do sistema por meio dos processos de evaporação da água no solo e transpiração das plantas, e escoamento superficial e percolação.

Com objetivo de tornar mais precisas as estimativas sobre o balanço hídrico nos plantios, alguns trabalhos associaram o modelo 3-PG com outros modelo hidrológicos (ALMEIDA et al., 2007, FEIKEMA et al., 2010) avaliando o crescimento florestal e uso da água na escala de microbacia, trabalhando com múltiplas camadas de solo e passos diários. No entanto, estas propostas tornam o modelo mais complexo, por necessitar de dados climáticos diários e maior banco de dados para análise.

O conhecimento do sistema radicular das árvores, bem como a distribuição de raiz no perfil do solo é uma fonte necessária para explicar os processos ecofisiológicos básicos, principalmente os relacionados com a nutrição mineral e balanço hídrico de um povoamento florestal (MELLO et al., 1998). Porém, a relação entre o crescimento da parte aérea da árvore e o sistema radicular ainda é bem incipiente, devido principalmente à dificuldade de mensuração do sistema radicular. Alguns trabalhos foram desenvolvidos no sentido de tentar explicar esta relação. Para o gênero *Eucalyptus*, Calder et al. (1997) estudou o sistema radicular de *E. camaldulensis* na Índia; Stape et al. (2004a) avaliaram a relação parte aérea e

raiz no nordeste do Brasil; e Christina et al., (2011) estudaram a profundidade de concentração das raízes de *Eucalyptus* em solo profundo do Estado de São Paulo.

Christina et al. (2011) analisaram a relação entre o crescimento vertical acima (altura do tronco) e abaixo do solo (sistema radicular no perfil do solo) de *Eucalyptus grandis*, plantado no sudeste do Brasil, Itatinga - SP, na cronosequência de 5, 18, 30, 42 e 71 meses. Estes autores constataram um crescimento de 85% em profundidade do sistema radicular em relação à média de altura das árvores, em povoamentos com altura superior a 20 metros e em solos profundos (mais de 15 metros) sem impedimento físico. Neste mesmo trabalho, foi também verificado que as raízes finas chegaram a explorar profundidades superiores a 10 metros aos 30 meses de idade do plantio. No entanto, a profundidade que corresponde a 95% da massa radicular manteve-se menor que 5 metros ao longo de todo o crescimento do povoamento.

Além deste trabalho, outros estudos (LACLAU et al., 2001, BOUILLET et al., 2002) forneceram informações importantes para o conhecimento da dinâmica do sistema radicular, bem como subsídio para melhorias nos modelos ecofisiólogicos que necessitam desse tipo de informação.

Outro aspecto importante para melhoria do modelo 3-PG é a estimativa da taxa de queda de folhedo. Sands e Landsberg (2002) ajustaram esta variável para o modelo, com base somente na idade do povoamento; de forma que a taxa de queda de folhedo é menor em povoamentos jovens e aumenta com a idade da floresta até se tornar constante após o fechamento do dossel. Para descrever este processo foi utilizada uma equação logística (SANDS; LANDSBERG, 2002, LANDSBERG; SANDS, 2011). Esta é a equação atualmente utilizada pelo modelo 3-PG para estimar a taxa de queda de folhedo.

A relação empírica entre a queda de folhedo e idade foi, segundo Sands e Landsberg (2002), a melhor equação ajustada para as informações disponíveis para aquele momento. Estes autores recomendaram que, como desenvolvimento futuro do modelo 3-PG, a equação da taxa de queda de folhedo contemplasse o efeito os fatores ambientais.

A taxa de queda de folhedo do modelo 3-PG possui uma forte influência na dinâmica da biomassa de folha e índice de área foliar (IAF). Isso porque, o balanço da biomassa de folha no dossel é calculado pelo modelo, como a soma da biomassa de folhas do mês anterior a biomassa produzida no mês menos a quantidade de folhas perdida por abscisão foliar (queda de folhedo).

Além da equação da dinâmica da queda de folhedo proposta por Landsberg e Sands (2002), Dougherty et al. (1995) descreveram a dinâmica da queda de folhedo de *Pinus taeda*, como doze funções não lineares aplicada mês a mês, contendo como variável dependente as variáveis climáticas: temperatura média nos últimos dois meses e precipitação menos evapotranspiração potencial média dos últimos dois meses. Segundo estes autores, a tendência mensal e anual de precipitação, evapotranspiração potencial e temperatura indica a magnitude do estresse de seca, que ocasiona a abscisão foliar. O efeito da nutrição é outro fator que pode gerar grande variabilidade no padrão de absição foliar em plantios de *Eucalyptus* (EPRON et al., 2011).

A produção anual de biomassa de folha e a queda mensal de folhedo variam com as condições climáticas (POOK, 1984; HENNESSEY et al., 1992) e disponibilidade de recursos (VOSE; ALLEN, 1998, WHITEHEAD; BEADLE, 2004) e impactam a dinâmica do IAF.

Battaglia et al. (1998) avaliaram a dinâmica do IAF para povoamento de *E. nitens* e *E. globulus* e constataram que para ambas as espécies, a resposta do IAF decaiu linearmente com estresse hídrico. No entanto, a resposta do IAF para a temperatura média anual foi substancialmente diferente entre as espécies. A precisão em predizer o IAF está ligada a parâmetros como área foliar específica e queda de folhedo com as condições do sítio. Nouvellon et al. (2010), estudando a variação da área foliar específica em função das diferenças climáticas, em plantio de *Eucalyptus* no Congo no período de 2 a 4 anos de idade da floresta, constataram que a variação sazonal do IAF estava atrelada às mudanças na área foliar específica e biomassa foliar. Neste mesmo estudo, o pico de área foliar específica ocorreu 2-3 meses após o início da estação úmida, seguido por uma diminuição constante até a próxima estação úmida.

Com base nos estudos já realizados frente ao crescimento radicular e fatores ambientais que influenciam na queda de folhedo, o objetivo deste estudo foi de investigar a possibilidade de melhoria no modelo 3-PG para o *Eucalyptus* incorporando: i) disponibilidade de água no solo levando em consideração a distribuição do sistema radicular no perfil do solo; e ii) taxas de queda de folhedo considerando os fatores ambientais. Para isso foram utilizados dados coletados na rede experimental do BEPP (Brasil *Eucalyptus* Potential Productivity, STAPE et al., 2010), tomando-se dois tratamentos experimentais: i) tratamento controle

(fertilização tradicionalmente utilizada na área e sem irrigação); e ii) tratamento fertilizado e irrigado.

2.2 Desenvolvimento

2.2.1 Material Método

2.2.1.1 Caracterização do Projeto Brazil Eucalyptus Potential Productivity (BEPP)

Até a década de 90, as tomadas de decisões baseadas nas conquistas alcançadas pelas pesquisas florestais eram, em quase sua totalidade, empíricas, sendo que os fatores ecofisilógicos que influenciaram no resultado adquirido eram poucos explorados e muitas vezes desconhecidos (ALMEIDA et al. 2004a; STAPE et al. 2004b; 2010).

Para suprir tal déficit, algumas linhas de pesquisas foram implementadas no sentido de aprimorar o conhecimento sobre o sistema florestal na sua totalidade, embasadas principalmente nos processos que refletem o crescimento da planta, os quais podem ser descritos na forma de modelos processuais.

Um exemplo de projeto de pesquisa desta natureza foi o Projeto Produtividade Potencial do *Eucalyptus* no Brasil (BEPP - Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity, http://www.ipef.br/bepp/) o qual foi desenvolvido em consórcio com 8 empresas florestais brasileiras, duas universidades (Universidade de São Paulo e Colorado State University) e dois institutos florestais (Instituto de Pesquisas Florestais e o USDA Forest Service).

O projeto BEPP estabeleceu uma rede experimental com delineamento único, instalada em vários sítios do Brasil, cujo objetivo foi determinar as taxas de crescimento potencial do *Eucalyptus* quando as limitações nutricionais e hídricas são removidas. O projeto abrangeu uma ampla escala geográfica e vários clones, incluindo estudos dos processos de crescimento em madeira, alocação de carbono, uso dos recursos e eficiência no uso de luz, água e nutrientes (STAPE et al., 2010).

O BEPP forneceu subsídios a diversas linhas de pesquisas voltadas ao entendimento dos processos ecofisiológicos que regem o crescimento das florestas, tais como padrões de crescimento do povoamento na escala espacial (STAPE et al., 2010), balanço de carbono (STAPE et al., 2008, RYAN et al., 2010), eficiência do uso de recursos pelas árvores individuais (BINKLEY et al., 2010), eficiência do uso da luz e nitrogênio (STAPE et al., 2004a) uso e eficiência no uso da água (STAPE et al., 2004a; 2004c, HUBBARD et al., 2010).

Os resultados e dados obtidos nessa rede experimental do BEPP permitem também parametrizar, calibrar e adequar o modelo 3-PG. Esta tese de doutorado usa, portanto, parte desta base de dados para estas finalidades.

2.2.1.2 Área de estudo

O estudo foi conduzido em um dos oito sítios que compõem a rede experimental do projeto BEPP, situado nas áreas da empresa International Paper do Brasil em Mogi-Guaçu (22º18'S e 47º05'O, altitude 312 m). Este ensaio foi iniciado em outubro de 2000 com o plantio do experimento e finalizado em outubro de 2007, em um solo Latossolo vermelho escuro eutrófico, teor médio de argila de 40%, conteúdo de água no solo de 1,5 mm cm^{-1}, anteriormente cultivado com laranja.

O clima da região segundo a classificação de Köeppen é Cwa, com precipitação média anual de 1278 mm e temperatura média anual de 21,4º C.

2.2.1.3 Delineamento experimental

O experimento BEPP foi estruturado em um delineamento fatorial com dois fatores: regime hídrico e nutricional e quatro repetições. O fator regime nutricional foi composto por dois níveis: fertilização tradicionalmente aplicada na região (T) e fertilização potencial (F). O fator regime hídrico contemplou também dois níveis: irrigado (I) e não irrigado (N). As parcelas experimentais foram formadas por 12 x 12 plantas no espaçamento de plantio de 3 m x 2,75 m (figura 5, área experimental de Mogi-Guaçu). A irrigação aplicada foi em média de 6 mm dia^{-1} em dias secos para evitar o déficit hídrico, foi iniciada em janeiro de 2001, aos 3 meses de idade da floresta e encerrado em outubro de 2006 aos 6 anos da floresta (figura 6). Para minimizar a influência entre os tratamentos foram utilizados 2 linhas de bordadura e escavação do solo entre as parcelas até a profundidade de 1 metro.

Figura 5 - Vista aérea do ensaio BEPP em Mogi Guaçu, SP, 6 meses após a instalação

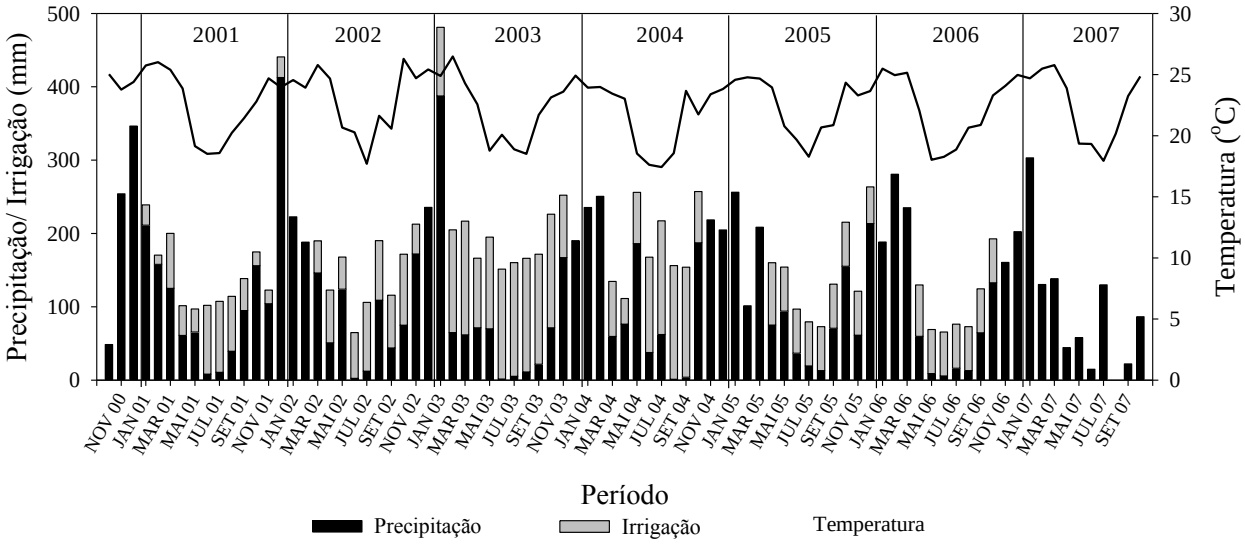

Figura 6 - Distribuição da precipitação, irrigação e temperatura média mensal ocorrida ao longo do ciclo do experimento BEPP na International Paper de outubro de 2000 a outubro de 2007. A irrigação foi realizada somente no tratamento FI (fertilizado e irrigado)

A quantidade de nutrientes aplicada no tratamento com fertilização tradicionalmente utilizada na região foi de 33 kg N ha^{-1}, 44 kg P ha^{-1}, 27 kg K ha^{-1}, 2 kg B ha^{-1}, sem a aplicação de Ca e Mg no solo (solo eutrófico). Para o tratamento com fertilização potencial aplicou-se 640 kg N ha^{-1}, 238 kg P ha^{-1}, 498 kg K ha^{-1}, 996 kg Ca ha^{-1}, 180 kg Mg ha^{-1}, 5kg B ha^{-1}. Considera-se como fertilização potencial a aplicação de uma dosagem de fertilizante superior à tradicionalmente recomendada, de tal forma que houvesse plena quantidade de nutrientes disponíveis no solo para se utilizado pela floresta.

Para a calibração do modelo 3-PG foi utilizado os dois tratamentos mais contrastantes: fertilização tradicional sem irrigação (acrônimo - TN) e fertilização potencial e irrigação (acrônimo - FI).

2.2.1.4 Dados dendrométricos, índice de área foliar e queda de folhedo

O crescimento em madeira e índice de área foliar (IAF) foram mensurados desde a instalação do experimento até a colheita do povoamento aos 7 anos. Estes dados foram utilizados para calibração as estimadas do modelo 3-PG.

O IAF foi coletado mensalmente pelo método indireto de determinação, usando Ceptômetro AccuPAR modelo LP-80 Decagon Devices, Pullman, EUA, no período entre 12 e 77 meses de idade. O aparelho possui 80 sensores eqüidistantes (fotodiodos) dispostos em uma sonda de 1m de comprimento, e apresenta valores de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em tempo real.

As medições da PAR incidente foram realizadas em área aberta, livre de qualquer impedimento ou interferência entre a radiação solar incidente e a sonda do aparelho, a uma distância de, no mínimo, sete vezes a altura da vegetação mais próxima (BRÉDA, 2003), nos horários de maior incidência solar, ou seja, das 11 às 14 horas. O equipamento foi nivelado e tomadas medições nos quatro pontos cardiais (norte, sul, leste e oeste) em um ponto amostrado.

Medições da PAR transmitidas foram tomadas imediatamente após a PAR incidente, no interior da floresta. Foram coletados 12 pontos sistematizados por parcela, distribuídos igualmente na linha e entrelinha do plantio, perfazendo as duas diagonais da parcela. Em cada ponto amostral foram coletadas medições nos quatro pontos cardiais.

Com as medições do PAR incidente (Io), PAR transmitada (I) e tendo-se o fator de extinção da luz (k), pode-se assim estimar o IAF pela equação de Beer-Lambert (equação 9).

$$IAF = -\left(\frac{1}{k}\right)\ln\left(\frac{I}{I_o}\right) \qquad (9)$$

O valor de k usado foi de 0,5 (STAPE et al., 2010).

Coletas mensais de queda de folhedo foram realizadas utilizando-se seis coletores (50 x 50 cm) por parcela. Quantidades totais de folhas e galhos foram pesadas separadamente no campo; a amostra de cada compartimento foi seca em estufa a 70°C para determinação do teor de umidade e, posteriormente, para estimar do peso seco do folhedo. A massa de queda de folhedo foi corrigida pela adição da massa perdida pela decomposição, valor de 0,0072 dia^{-1} (STAPE et al., 2008, valor adquirido no estudo no nordeste do Brasil).

Medições dendrométricas de altura total e diâmetro à altura do peito (DAP) foram coletadas nas parcelas trimestralmente, entre 5 e 78 meses de idade do plantio. O volume foi calculado com a equação desenvolvida para o clone trabalhado (equação 10).

$$V = \exp\left(-10{,}049541 + 1{,}863489.\ln(DAP) + 1{,}043579.\ln(Ht)\right) \qquad (10)$$

Em que V é o volume de madeira em m^{3} árvore^{-1}, DAP é o diâmetro em cm e Ht é a altura total da árvore em metros.

Amostragens destrutivas em parcelas instaladas no experimento para determinação de biomassa da árvore foram realizadas aos 12, 30 e 84 meses de idade do povoamento. Na amostragem, foram selecionadas 5 árvores por parcela aos 12 meses de plantio e 9 árvores por parcela aos 30 e 84 meses. Para a seleção das árvores amostradas, todas as árvores das parcelas foram classificadas em ordem crescente de DAP e escolheram-se sistematicamente uma árvore a cada 4 para a coleta de biomassa. Com estas medições determinou-se a equação de biomassa do tronco baseada no DAP e altura, (STAPE et al., 2010, equação 11) e equação alométrica entre a biomassa de folha, tronco e DAP (SANDS, 2001, equação 12) necessárias na parametrização do modelo 3-PG.

$$Ws = 0{,}0050.DAP^{1.751}.Ht^{1.542} \quad n = (169) \qquad (11)$$

Em que Ws é a biomassa de tronco em kg, DAP é o diâmetro em cm e Ht é altura em metros.

$$p_{FS} = a.DAP^{n_P} \qquad (12)$$

Em que p_{FS} refere-se a relação entre a biomassa particionada para folha e tronco, DAP é o diâmetro do tronco em cm, a e n_p são os coeficientes obtidos por meio dos dados de biomassa de folha e tronco coletados nas três campanhas de campo nas amostragens destrutivas (figura 7).

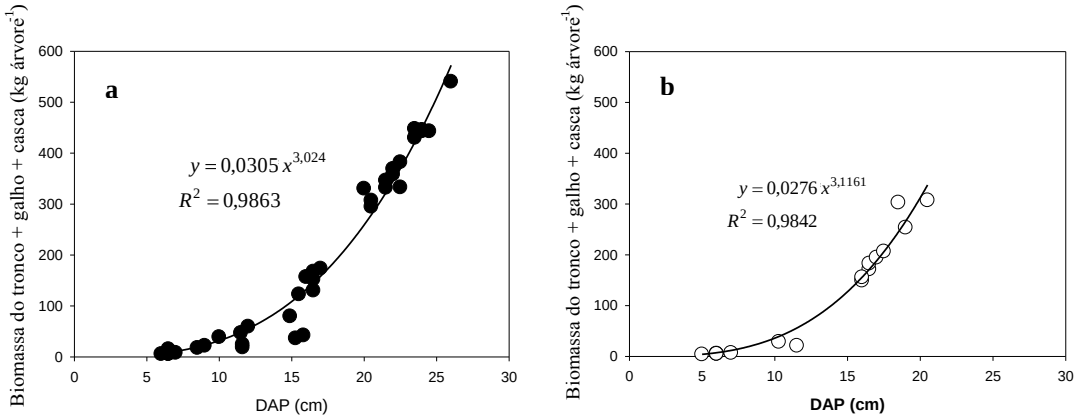

Figura 7 - Equação alométrica, biomassa do tronco, galho e casca (Mg ha^{-1}) em função do DAP (cm) para o tratamento fertilizado e irrigado (a) e tratamento com fertilização tradicional e não irrigado (b)

Para estimar a biomassa somente de tronco pelo modelo, determinou-se a fração de casca e galho (ρBB) por idade. Aos 12 meses, a proporção da fração de casca e galhos (ρBB0) foi de 31,5% para o tratamento FI e 31,9% para o tratamento TN. Na idade de 84 meses esta fração (ρBB1) passou a ser 9,5% e 9,3% respectivamente. A idade média em fração casca e galho (tbb) foi de 4 anos.

2.2.1.5 Parametrização e calibração do modelo

A parametrização e calibração do modelo 3-PG foram feitas utilizando-se de dados obtidos experimentalmente, em revisões bibliográficas ou ajustados (tabela 1). Os parâmetros ajustados, por meio do processo de calibração do modelo, foram relacionados à partição da PPL: i) fração mínima de PPL destinada ao sistema radicular e; ii) partição folha/tronco DAP = 20 cm.

O processo de calibração do modelo foi direcionado segundo a proposta de Sands (2004), na qual subdivide os parâmetros em três grupos que interagem entre si: (a) eficiência quântica máxima do dossel, (b) parâmetros que controlam a alocação da biomassa (tais como: Partição folha/tronco ao DAP 2 cm e DAP 20 cm, partição para a raiz) e (c) modificadores que controlam o crescimento (por exemplo: taxa de fertilidade do solo, déficit de pressão de

vapor). Estes parâmetros são considerados como muito sensíveis no modelo (LANDSBERG; WARING, 1997; LANSBERG et al., 2001; WARING; MACDOWELL, 2002).

A calibração foi feita primeiramente nas parcelas do tratamento FI, sem limitação na disponibilidade de recursos nutricionais e hídricos. Uma vez calibrada, os parâmetros determinados foram usados na calibração das parcelas TN. Nesta etapa, objetivou-se modelar o comportamento fisiológico do clone em relação à disponibilidade hídrica e a eficiência do uso dos recursos, já que as condições climáticas (temperatura, radiação, déficit de pressão de vapor, umidade relativa) e de fertilidade são constantes (não houve diferença estatística entre as parcelas fertilizadas e tradicionais para este experimento, STAPE et al., 2010).

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na calibração do modelo 3-PG para o tratamento irrigado e fertilizado (FI) e tratamento com fertilização tradicional e sem irrigação (TN)

(continua)

Parâmetros	Unidades	Tratamentos		Fonte
		TN	FI	
Partição de biomassa e renovação				
Relações alométricas e partição				
Partição folha/ tronco DAP=2	-	0,7	0,7	Almeida et al. (2004a)
Partição folha/ tronco DAP=20	-	0,11	0,14	Ajustado
Coef. constância para eq. biomassa tronco/ DAP	-	0,0276	0,0305	Determinado
Coef. potência para eq. biomassa tronco/ DAP	-	3,1161	3,024	Determinado
Fração máxima de PPL para raiz	-	0,6	0,6	Almeida et al. (2004a)
Fração mínima de PPL para raiz	-	0,15	0,15	Ajustado
Queda de folhedo e renovação de raiz				
Taxa máxima de queda de folhedo	1 $mês^{-1}$	0,10	0,13	Determinado
Taxa de folhedo t=0	1 $mês^{-1}$	0,001	0,001	Sands; Landsberg (2002)
Idade queda de folhedo adquire valor médio	mês	16	16	Determinado
Taxa de renovação média mensal de raiz	1 $mês^{-1}$	0,015	0,015	Sands; Landsberg (2002)
PPL e modificadores condutância				
Modificador de temperatura (f_t)				
Temperatura mínima para crescimento	^oC	8	8	Stape (2002)
Temperatura ótima para crescimento	^oC	21	21	Média local
Temperatura máxima para crescimento	^oC	40	40	Stape (2002)
Modificador de geada (f_{Frost})				
Dias produtivos perdidos por dia de geada	dias	0	0	Determinado
Modificador de água no solo (f_θ)				
Coef. textura do modificador de água no solo	-	0,4	0,4	Landsberg; Waring (1997)
Coef. potência do modificador de água no solo	-	3	3	Landsberg; Waring (1997)
Estrutura do dossel e processos				
Area foliar específica				
Área foliar específica para idade 0	$m^2\ kg^{-1}$	9	9	Determinado
Área foliar específica para folhas maduras	$m^2\ kg^{-1}$	8,5	8,5	Determinado
Idade para intermediária área foliar específica	anos	2	2	Determinado
Interceptação da luz				
Coeficiente de extinção da luz absorvida dossel	-	0,5	0,5	Almeida et al. (2004a)
Idade de fechamento do dossel	anos	1,5	1,5	Stape (2002)
Proporção máxima de chuva evaporada dossel	-	0,15	0,15	Lima (1993)
IAF para interceptação máxima de chuva	-	3,33	3,33	
Produção e respiração				
Eficiência quântica do dossel	molC molPAR-1	0,08	0,08	Almeida et al. (2004b)
Razão PPL/PPB	-	0,47	0,47	Landsberg et al.(2001)
Condutância				
Máxima condutância do dossel	m s-1	0,021	0,021	Mielke et al. (1999)
IAF para máxima condutância do dossel	-	3,33	3,33	
Coef. estomático em resposta ao DPV	1 $mBar^{-1}$	0,047	0,047	Almeida et al. (2004a)

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na calibração do modelo 3-PG para o tratamento irrigado e fertilizado (FI) e tratamento com fertilização tradicional e sem irrigação (TN)

(conclusão)

Parâmetros	Unidades	Tratamentos		Fonte
		TN	FI	
Condutância na camada limite do dossel	m s^{-1}	0,2	0,2	Landsberg; Waring (1997)
Propriedades do povoamento e madeira				
Biomassa máxima do tronco com 1.000 fuste/ha	kg $árvore^{-1}$	300	300	Stape et al.(2004b)
Fração galho e casca				
Fração galho e folhas para povoamento maduro	-	0,319	0,315	Determinado
Fração galho e folhas na idade 1	-	0,093	0,095	Determinado
Idade intermediária entre fração de galho/ folhas	anos	4	4	Determinado
Densidade básica				
Densidade básica mínima - para árvores adultas	t m^{-3}	0,45	0,45	Determinado
Densidade básica máxima- para árvores velhas	t m^{-3}	0,55	0,55	Determinado
Idade intermediária entre densidade básica	anos	4	4	Determinado
Altura do tronco				
Coef. de constância na relação altura do tronco	-	0,9051	1,2366	Determinado
Coef. Potência do DAP x altura do tronco	-	1,194	1,0668	Determinado
Coef. Potência do N. de árvores x altura tronco	-	0	0	Determinado
Classe do solo*	-	C	C	Determinado

* C= solos argilosos

A fração mínima de PPL destinada ao sistema radicular ajustada neste estudo foi igual para os dois tratamentos. Na calibração do modelo, o valor que melhor se ajustou foi de 15%.

A partição da PPL para folha/tronco DAP 20 cm diferenciou-se entre os tratamentos. O tratamento FI adotou valor maior do que o tratamento TN, 0,14 contra 0,11. Ryan et al. (2010), ao analisar os sítios do BEPP, verificaram que a irrigação resultou na mudança de fluxo e distribuição da PPL e PPB (produtividade primária bruta). Estes autores verificaram ainda que para os sítios com tratamento irrigado, em média, o IAF aumentou em 11% e a distribuição da fotossíntese para madeira, em 8%.

Além dos parâmetros ajustados no modelo, alguns outros foram adotados segundo os valores usados em outras calibrações do modelo 3-PG para o gênero *Eucalyptus*.

A eficiência quântica máxima do dossel (α) e a taxa de produtividade líquida/ bruta (PPL/PPB) são dois parâmetros com grande sensibilidade, nos quais pequenas alterações nos seus valores proporcionam muitas variações no resultado final estimado pelo modelo.

Neste estudo o α máximo utilizado foi de 0,08 molC mol^{-1}PAR (STAPE, 2002 e STAPE et al., 2004b), pelo fato de medições do α aparente no campo encontrarem valores de 0,068 molC mol^{-1}PAR (STAPE, 2002) e 0,060 molC mol^{-1}PAR (ALMEIDA et al., 2004a). O α aparente corresponde ao α máximo reduzido pelas condições ambientais, tais como: estresse hídrico, temperatura, déficit de pressão de vapor (DPV). A taxa de produtividade líquida/ bruta (PPL/ PPB) usada foi de 0,47 (WARING et al., 1998).

A condutância estomática em reposta ao DPV não variou entre os tratamentos (HUBBARD et al., 2010). Assim, na calibração adotou-se o mesmo valor nos tratamentos, de 0,047 m s^{-1} (ALMEIDA et al., 2004a).

A temperatura ótima adotada refere-se à temperatura média anual da região da experimentação, e foi de 21°C. A temperatura máxima e mínima crítica para o crescimento foi de 40ºC e 8ºC, conforme a característica adaptativa do clone estudado. Ao longo do período de condução do experimento não houve ocorrência de geada, assim os dias improdutivos por dia de geada foi igual a 0.

Outros parâmetros de difícil mensuração e pouca sensibilidade tais como condutância máxima do estômato, condutância na camada limite do dossel, albedo da copa, taxa de renovação de raiz foram obtidos em outros estudos (LANDSBERG; WARING, 1997;

LANDSBERG et al., 2001; SANDS; LANDSBERG, 2002; STAPE, 2002; STAPE et al., 2004b; ALMEIDA et al. 2004a; SILVA, 2006).

Os parâmetros determinados por medição no experimento foram: fração de casca e galho (idade inicial e adulta), taxa de queda de folhedo, equações alométricas (coeficiente de constância e potência), textura do solo, capacidade máxima e mínima de retenção de água no solo.

Para o solo estudado a capacidade de água disponível para planta (CAD) foi de 1,5 mm cm^{-1} de solo. Na calibração, considerou-se 2 metros como profundidade efetiva, valor usual adotado para plantio de *Eucalyptus* (FERREIRA 2007, STAPE et al. 2004b). A CAD usado na parametrização foi de 300 mm.

Os parâmetros determinados na calibração inicial foram os mesmos utilizados ao longo do aprimoramento do 3-PG para retenção máxima de água no solo e queda de folhedo.

Os dados de entrada necessários no modelo 3-PG são: fatores específicos do sítio (latitude e longitude), climatológicos (médias mensais de temperatura, déficit de pressão de vapor, radiação, precipitação, número de dias por mês com temperatura abaixo de zero); solo (fertilidade, textura e disponibilidade de água); cultura (biomassa inicial de folha, lenho e raízes, número de árvores, coeficientes de equações alométricas); e fisiológicos (máxima eficiência quântica do dossel, condutância estomática máxima do dossel, área foliar específica, densidade básica da madeira, fração de galhos e casca em relação à biomassa lenhosa da parte aérea).

Como variáveis respostas foram analisadas o crescimento em madeira e o índice de área foliar (IAF). Os dados climáticos utilizados pertencem à estação meteorológica da fábrica da International Paper do Brasil, localizado na região de Mogi-Guaçu (temperatura, precipitação) e a radiação global mensal foi adquirida na estação automática da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” em Piracicaba. O uso da radiação global mensal desta outra estação meteorológica foi possível pelo fato de ela estar distante 95 km, na mesma altitude e temperatura máxima média similar.

A versão do modelo 3-PG utilizado foi a 2.7, descrita na linguagem Visual Basic do Excel, planilha “Multisites”. A idade inicial para o começo da estimativa de crescimento da floresta foi de 1 ano.

2.2.1.6 Modelo 3-PG – Balanço hídrico e taxa de queda de folhedo

O balanço hídrico que descreve o modelo 3-PG considera uma única camada de solo na qual são contabilizadas as entradas e saídas de água no sistema florestal, tendo como reservatório máximo de água no solo a diferença entre a capacidade máxima e mínima de retenção de água no solo (CAD); este valor é um parâmetro de entrada do modelo.

A entrada de água no sistema florestal é contemplada pela precipitação (PPT) e irrigação (IRR), a perda de água é dada pelos processos de interceptação de água pela copa (INT), evapotranspiração (EPT, calculado pelo modelo de Penman-Monteith), escoamento superficial e percolação (equação 13).

$$ARM = PPT + IRR - (EPT + INT) \qquad (13)$$

Se o armazenamento de água (ARM) é maior que o CAD, o modelo considera que a água excedente saiu do sistema por escoamento superficial ou percolação no perfil do solo para o lençol freático. Este ARM proporciona a quantidade de água disponível para o uso pela floresta e influenciará no cálculo do modificador de água no solo (f_θ) e, consequentemente, na quantidade de carbono fixado pela floresta.

A taxa de queda de folhedo é dada em função da idade do povoamento, sendo representada por uma equação de curva logística, que descreve o aumento da taxa de queda de folhedo com a idade, desde planta jovem até o fechamento do dossel, quando atinge a taxa máxima de queda de folhedo (figura 8, vide equações 7 e 8).

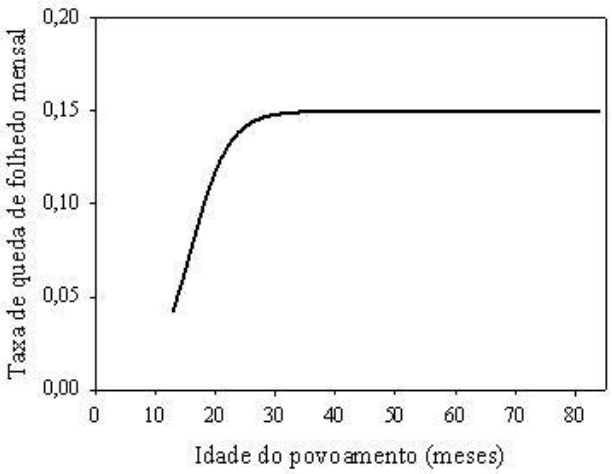

Figura 8 – Comportamento da equação da taxa de queda de folhedo descrita pelo modelo 3-PG em função da idade do povoamento

2.2.1.7 Aprimoramento do modelo 3-PG para retenção máxima de água

A inclusão deste aprimoramento no 3-PG foi feita pela modificação da descrição da retenção de água do solo na versão 2.7 do modelo no Visual Basic. Os parâmetros capacidade máxima e mínima de retenção de água no solo e quantidade de água disponível inicial foram removidos do modelo. Introduziram-se os parâmetros: altura média inicial do povoamento em metros, máxima retenção de água no solo (W_{cont}, mm cm^{-1}de solo) e profundidade máxima do solo ($prof_{max}$, m).

Para calcular a quantidade máxima de água no solo disponível para planta (ASW_{max}, em mm) em função da exploração radicular no solo, utilizou-se o estudo conduzido por Christina et al. (2011) em uma região próxima ao sítio do experimento BEPP Mogi-Guaçu, descrito na forma de equação (equação 14).

$$ASW\max_i = H_{i-1} \,.\, 0{,}85 \,.\, W_{cont} \,.\, 100 \qquad (14)$$

Em que, a H_{i-1} é a altura da árvore no mês anterior (m), Wcont é máxima retenção de água no solo em mm cm^{-1} solo e i é período. Sendo que a altura para início do modelo é fornecida pelo usuário.

Neste aprimoramento do modelo 3-PG, a ASW_{max} varia com a distribuição do sistema radicular em profundidade do solo, no entanto, é limitado pela profundidade máxima do solo, impedimentos físico e químico do solo e a profundidade efetiva de exploração do solo pelo sistema radicular. Neste estudo, o ASW_{max} limite adotado foi a profundidade efetiva do

sistema radicular, neste caso 5 metros (CHRISTINA et al., 2011), uma vez que o solo trabalhado é considerado muito profundo (DEMATTÊ, não publicado).

A performance do modelo 3-PG em estimar a biomassa do tronco antes e após o aprimoramento do modelo 3-PG foi avaliada por procedimentos estatísticos padrões usado para o modelo 3-PG: eficiência do modelo (EF, equação 15) e raiz quadrada do erro médio (RQEM, equação 16). O melhor modelo deve ter EF e r^2 próximos à unidade, e RQEM próximo de zero.

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \tag{15}$$

$$RQEM = \frac{100}{\overline{O}} * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \tag{16}$$

Em que, O representa o valor observado, P o valor estimando, i período da observação, $\overline{O}$ é valor médio de todas as observações e n refere-se ao número de observações.

2.2.1.8 Aprimoramento do modelo 3-PG para queda de folhedo

A taxa de queda de folhedo é obtida pela relação entre a biomassa foliar senescente e a biomassa de folha na copa no período de senescência (equação 17).

$$\gamma f = \frac{loss_F}{W_F} \tag{17}$$

Em que γf é a taxa de queda de folhedo, $loss_F$ é a biomassa foliar senescente em Mg ha^{-1} $mês^{-1}$) e W_F é a biomassa de folha na copa no período de senescência em Mg ha^{-1}.

A taxa de queda de folhedo foi ajustada em função das variáveis climáticas e biométricas. Baseado em literatura, utilizaram-se as seguintes variáveis climáticas para a

construção do modelo de queda de folhedo: i) precipitação; ii) temperatura máxima; iii) temperatura mínima; iv) DPV do dia inteiro; v) DPV no período de insolação; vi) evapotranspiração potencial calculada pelo método de Thrornthwaite; vii) diferença entre ETP e precipitação; viii) radiação; e ix) quantidade de água disponível no solo estimada pelo modelo 3-PG. Para todas estas variáveis, avaliaram-se: i) o valor adotado no mês em que foi computada a taxa de queda de folhedo; ii) mês anterior ao evento; iii) dois meses anteriores; e iv) a média entre o mês anterior e dois meses que antecederam o evento. As variáveis biométricas estudadas foram: i) idade do povoamento; ii) IAF; iii) área basal; iv) DAP; v) volume de madeira; e v) altura.

Os modelos testados foram: i) modelo linear; ii) modelo logístico; iii) não linear; e iv) modelo combinado. O modelo combinado foi composto pelo modelo de taxa de queda mensal de folhedo, proposto por Landsberg e Sands (2002), e aplicado até fechamento do dossel. Após isso substituiu-se pelo modelo linear ajustado neste estudo. Os ajustes dos modelos foram feitos usando os dados do tratamento TN, por não haver diferença estatística entre estes e FI para taxa de queda de folhedo ($p = 0,37$).

Para determinar quais variáveis independentes que melhor explicam a taxa de queda de folhedo, foi utilizado o procedimento de regressão estatística *stepwise*, processado no SAS 9.2 (95% de probabilidade). Os modelos foram ajustados usado o proc glm do SAS 9.2, exceto o modelo não linear, para o qual se usou o software Labfit (ajuste de curvas).

O desempenho dos modelos ajustados foi avaliado com base em: i) coeficiente de determinação (R^2); ii) teste de significância “teste F”; iii) avaliação gráfica do resíduo (verificação de possíveis tendenciosidades nas estimativas); e iv) performance da taxa de queda de folhedo simulada pelo modelo 3-PG usando o novo modelo ajustado.

2.2.2 Resultados e Discussões

2.2.2.1 Caracterização do crescimento florestal

O estoque de biomassa do tronco no tratamento FI em comparação ao tratamento TN apresentou um ganho médio de 21,9% em crescimento de biomassa de tronco. A produção média estimada com os dados de inventário aos 77 meses de idade (6,5 anos) foi de 213,0 Mg ha^{-1} (incremento médio anual de 32,8 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$, cerca de 65 m^3 $ha^{-1}ano^{-1}$) para o tratamento irrigado e fertilizado e 166,3 Mg ha^{-1} (IMA de 25,3 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$, equivalente a 51 m^3 $ha^{-1}ano^{-1}$) para o tratamento tradicional (figura 9).

O aumento das taxas de fertilização do nível tradicionalmente utilizadas pela empresa (T) para fertilização potencial (F) não teve efeito significativo no crescimento (STAPE et al., 2010). Além disso, a fertilização não mostrou interação significativa com a irrigação ou a estrutura do povoamento (STAPE et al., 2010), evidenciando que o crescimento diferenciado do *Eucalyptus* no presente estudo foi devido somente à irrigação, propiciando a inferência sobre o crescimento e o balanço hídrico.

A irrigação elevou o incremento médio anual do sítio (STAPE et al., 2010), e o efeito aumentou com a idade.

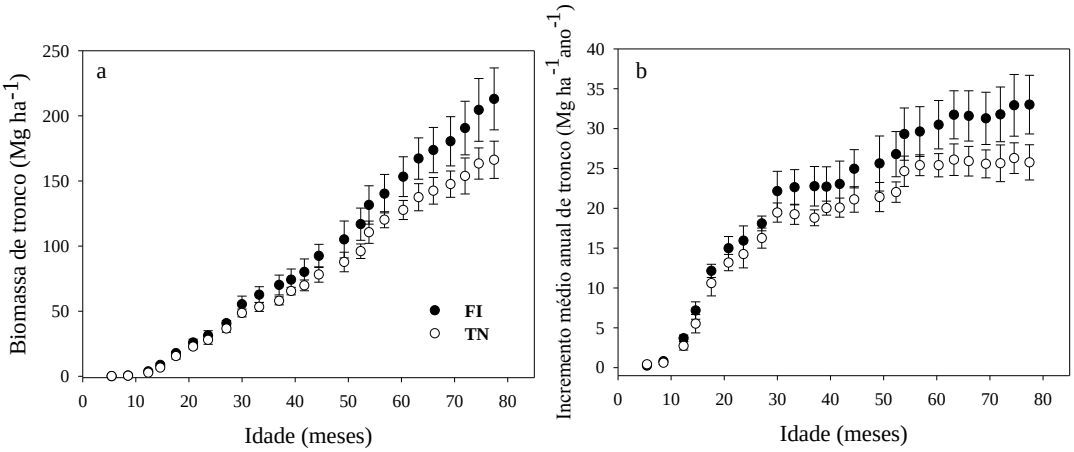

Figura 9 - Crescimento em biomassa do tronco (Mg ha^{-1}) e incremento anual médio (Mg ha^{-1} ano^{-1}) ao longo da rotação do plantio de *Eucalyptus*, até os 77 meses de idade (6,5 anos) submetido ao tratamento fertilizado e irrigado (FI) e tratamento com fertilização tradicional e sem irrigação (TN). A barra representa o desvio padrão (n=4)

A proporção de biomassa estocada por comportamento da árvore foi avaliada aos 12 e 84 meses, por meio da amostragem destrutiva. Verificou-se que esta proporção não variou em função do tratamento, mas sim pela idade. A proporção de biomassa das folhas variou de 22,6%, aos 12 meses de idade, para 1,4%, aos 84 meses; a biomassa de tronco variou de 28,0% para 79,5%, e da raiz grossa (> 5mm), de 18,1% para 11,2%, no tratamento TN. O mesmo padrão de estoque de biomassa por compartimento da planta foi observado para o tratamento FI (figura 10). A diminuição da proporção de biomassa de folha é influência pela dinâmica foliar de queda e renovação das folhas, enquanto a biomassa lenhosa se acumula.

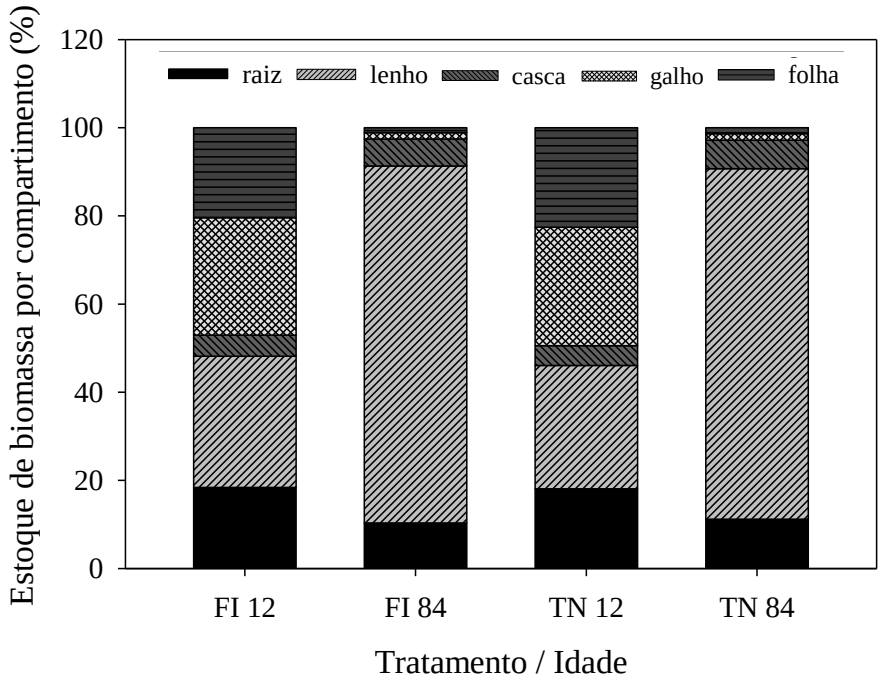

Figura 10 – Estoque de biomassa em porcentagem (%) presente nos compartimentos da árvore: raiz, tronco, casca, galhos e folhas nas idades de 12 e 84 meses para os tratamentos: fertilizado e irrigado (FI) e fertilização tradicional e sem irrigação (TN)

O estoque de distribuição média da produtividade primária líquida (PPL) particionada para os compartimentos da planta - tronco, casca, folhas, galhos e raízes no início e final do ciclo - está representado na tabela 2.

Tabela 2 - Biomassa média do tronco, casca, folhas, galhos e raízes > 5mm de diâmetro, em kg árvore^{-1}, nas idades de 12 e 84 meses para os tratamentos fertilizados e irrigados (FI) e fertilização tradicional e sem irrigação (TN)

Tratamento	**Idade (meses)**	**DAP (cm)**	**TRONCO**	**CASCA**	**FOLHAS**	**GALHOS**	**RAIZES**	**Total**
			kg árvore^{-1}					
FI	12	6,5	3,1	0,5	2,1	2,8	1,9	10,4
FI	84	18,4	190,1	14,4	2,6	3,3	24,3	234,7
TN	12	6,0	2,5	0,4	2,0	2,4	1,6	9,0
TN	84	17,5	157,0	12,8	2,7	2,9	22,1	197,5

Assim como o que foi constatado por Ryan et al. (2010), ao analisar a rede experimental BEPP, os fluxos de PPL (escoamento da PPL para os componentes da planta por unidade de tempo) de folhas, respiração de folhas respiração de madeira aumentaram no tratamento irrigado. O fluxo de assimilado para o solo manteve-se constante.

2.2.2.2 Aprimoramento do modelo 3-PG para retenção máxima de água no solo

O aprimoramento da disponibilidade de água no solo no modelo 3-PG consistiu em mudanças na quantidade máxima de água disponível no solo para a planta (ASW_{max}), de valor constante (CAD) para variável segundo o crescimento da floresta e exploração do sistema radicular em profundidade do solo em função da idade do povoamento (figura 11).

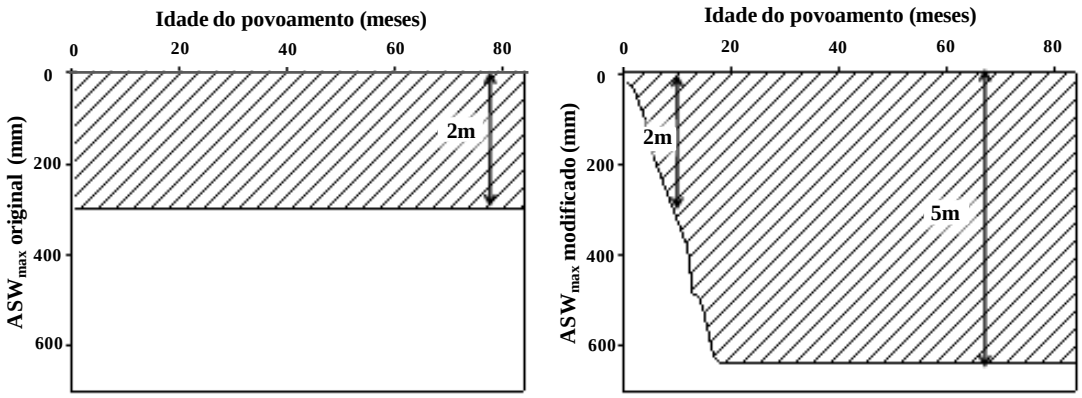

Figura 11 – Representação da quantidade máxima de água disponível para a planta originalmente adotada pelo modelo (ASW_{max} original) e após o aprimoramento do modelo 3-PG (ASW_{max} modificado) em função da idade do povoamento. As setas representam a profundidade de exploração do sistema radicular

Este aprimoramento possibilitou melhorar a estimativa de crescimento em biomassa de tronco nos tratamentos TN e FI (figura 12 e 13). A eficiência do modelo em estimar a biomassa de tronco do tratamento TN aumentou de 0,94 para 0,98 e a raiz quadrada do erro médio (RQEM) reduziu de 18,22 para 12,16. No tratamento FI a eficiência do modelo em estimar biomassa de tronco teve ligeiro aumento de 0,93 para 0,95, e o RQEM passou de 18,72 para 17,62.

A modificação do modelo 3-PG melhorou as estimativas de biomassa de madeira no final da rotação (5 a 7 anos), período em que a adequada precisão nas estimativas para plantios de *Eucalyptus* ciclo curto é muito importante no plano de uso da madeira, quer seja para abastecimento de fábricas ou venda no mercado. Neste estudo, o aprimorar do modelo para quantidade de máxima de água disponível à planta a precisão em estimar biomassa de madeira passou de uma subestimativa de 11% para subestimativa de 5% aos 7 anos de idade no tratamento TN.

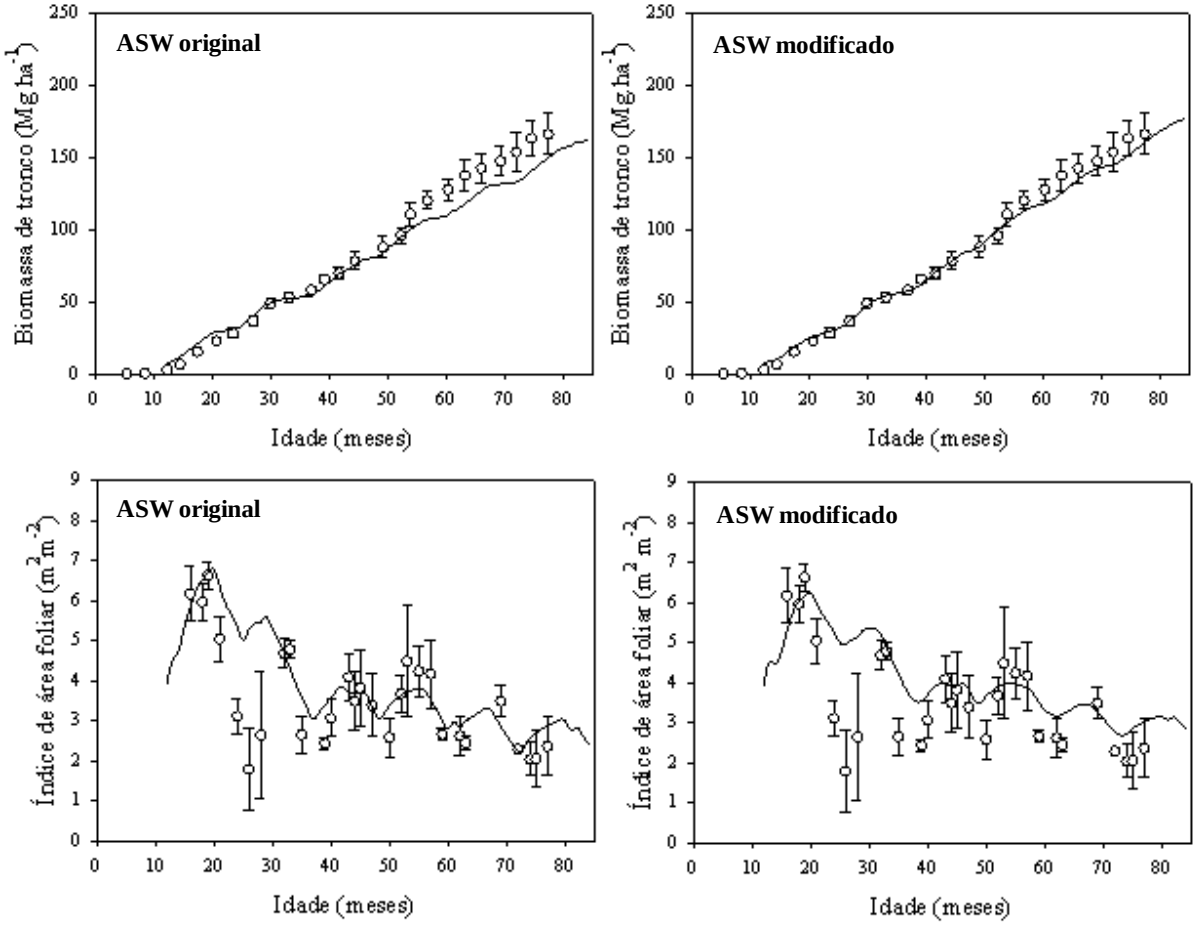

Figura 12 – Estimativa de biomassa de tronco e índice de área foliar no povoamento de *Eucalyptus* sob o tratamento de fertilização tradicional sem irrigação, usando o modelo 3-PG original (ASW original) e usando o modelo com aprimoramento para retenção máxima de água no solo (ASW modificado). Os pontos representam os dados observados e a linha contínua representa a estimativa do modelo 3-PG. A barra corresponde ao desvio padrão

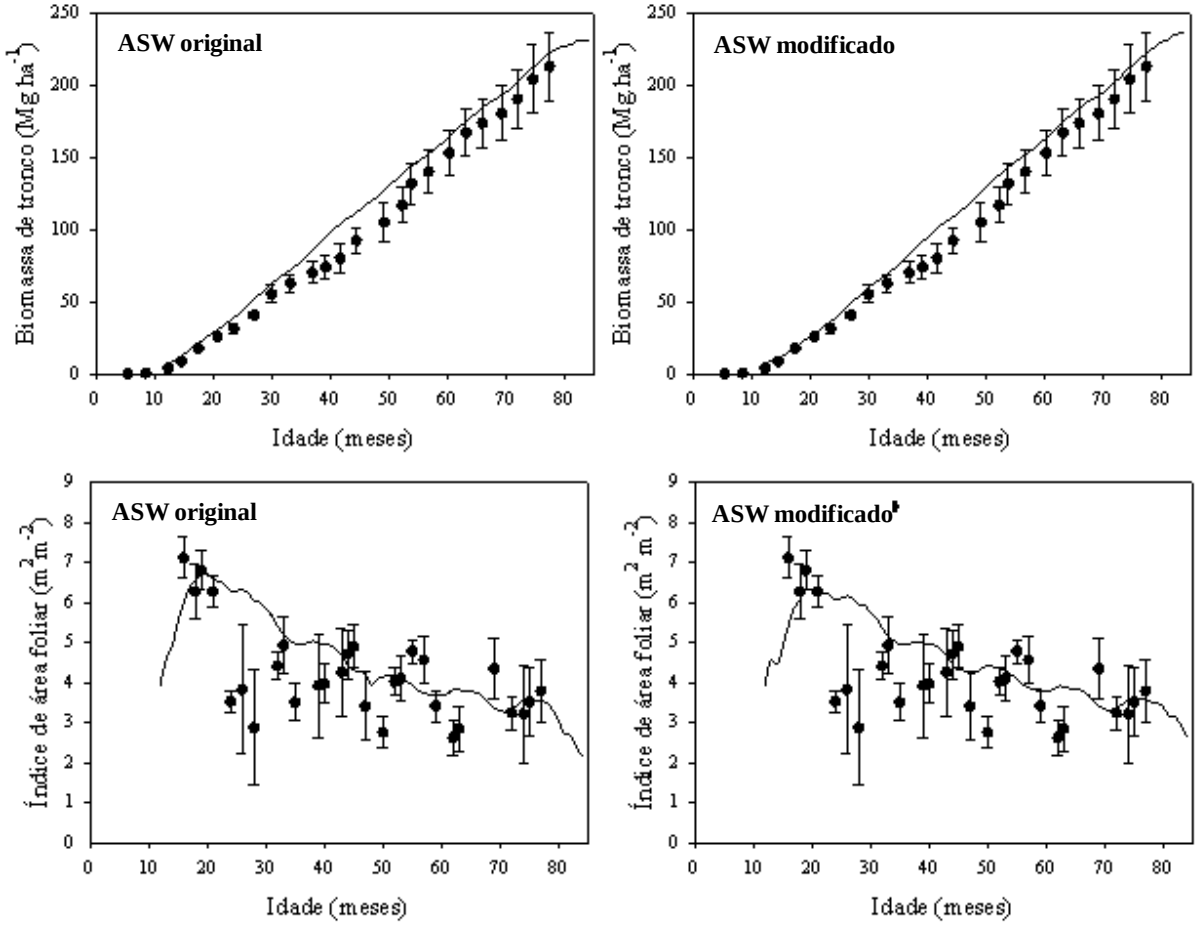

Figura 13 – Estimativa de biomassa de tronco e índice de área foliar no povoamento de *Eucalyptus* sob o tratamento fertilizado e irrigado, usando o modelo 3-PG original (ASW original) e usando o modelo com aprimoramento para retenção máxima de água no solo (ASW modificado). Os pontos representam os dados observados e a linha contínua representa a estimativa do modelo 3-PG. A barra corresponde ao desvio padrão

No modelo 3-PG original a biomassa de tronco estimada para o tratamento TN era subestimada após os 50 meses de idade do povoamento, apresentando uma diferença de 15 Mg ha^{-1} aos 7 anos, devido principalmente ao estresse hídrico acusado pelo modelo, uma vez que a profundidade efetiva do sistema radicular adotada foi de 2 metros. Modelos 3-PG aplicados em florestas brasileiras utilizaram-se de profundidade efetiva para *Eucalyptus* variando de 2 a 2,5 metros (STAPE, 2002; ALMEIDA et al. 204b; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004b; ALMEIDA et al., 2010).

Embora a habilidade do sistema radicular em explorar o solo e capturar água ainda seja pouco conhecida, devido à dificuldade de medição (GONCALVES; MELLO, 2000; CHRISTINA et al., 2011), estudos demonstram que o sistema radicular do *Eucalyptus* não se limita a 2 metros (para solos considerados profundos), chegando atingir a 5 metros, ou mais. (LACLAU et al., 2001; BOUILLET et al., 2002; CHRISTINA et al., 2011).

As raízes finas são as mais importantes na absorção de água e nutriente para a planta (GONÇALVES; MELLO, 200), apresentam-se maior densidade nos primeiros 20 a 30 cm (MELLO et al.1998, LACLAU et al., 2001) com distribuição heterogênea e reduzindo a densidade de raiz bruscamente com aumento em profundidade (LACLAU et al. 2001).

No entanto para o *Eucalyptus*, as raízes profundas são fundamentais no suprimento de água. De acordo com o estudo de Sana (1997), citada por Laclau et al. (2001) e Bouillet et al. (2002), que trabalhou com *Eucalyptus* plantado no Congo aos 5,5 anos de idade do plantio, constatou que a maior parte de água do solo absorvida pela planta durante o período de seca localizava-se abaixo dos 5 metros de profundidade. Confirmado também para *Pinus*, pelo estudo de Nambiar e Sands (1992), em que as raízes mais profundas foram importantes no suprimento de água à planta nas épocas secas, em que houve redução na umidade da camada superficial do solo. Estes estudos apontam a importância da adequação do modelo 3-PG para a incorporação da dinâmica de distribuição do sistema radicular para determinação do ASW_{max}, levando em consideração as características da espécie e sítio estudado, quando se deseja inferir sobre o crescimento florestal e uso da água.

Uma vez comprovada a importância das raízes finas distribuídas no perfil do solo para o suprimento de água ao *Eucalyptus*, uma maneira de incorporar o crescimento radicular em profundidade é por meio da relação entre o crescimento aéreo e sistema radicular, como foi feito neste trabalho. Estudos sobre este tema apontam boas correlações entre esta relação (CAIRNS, 1997; CHRISTINA, et al. 2011). Pode-se assim, sugerir o acompanhamento do

crescimento aéreo, que é facilmente mensurável, e relacioná-lo com o acesso do sistema radicular à água em maiores profundidades.

Apesar da adoção ASW_{max} como valor variável e profundidade efetiva maior do que o usualmente trabalhado, verificou-se que o estresse hídrico sofrido pelos tratamentos ocorre de forma diferente, o que confirma a eficiência do aprimoramento. O estresse hídrico é representado no modelo como o modificador de água no solo (f_θ). O f_θ junto ao modificador de DPV (f_{dpv}) compõe o modificador fisiológico (f_{phy}), o qual limita a eficiência quântica aparente do dossel e, consequentemente, a assimilação de carbono pela árvore. No tratamento TN, o f_{phy} adotou valores baixos, chegando ao mínimo de 0,1 no inverno, época de estiagem (figura 14). Com o aprimoramento do modelo, o f_{phy} aumentou com a diminuição do rigor proporcionado pelo f_θ, uma vez que a ASW_{max} aumentou. No entanto, os tratamentos não adotaram valores iguais de f_{phy} após a adequação, uma vez que, a quantidade de água efetiva disponível para a planta depende da água inserida no sistema florestal, sendo as principais fontes a precipitação e irrigação. Demonstrando também que a simples incorporação do conceito fisiológico de crescimento da planta para estimar o ASW_{max} não proporcionou perdas na eficiência do modelo em estimar crescimento sob diferentes regimes hídricos.

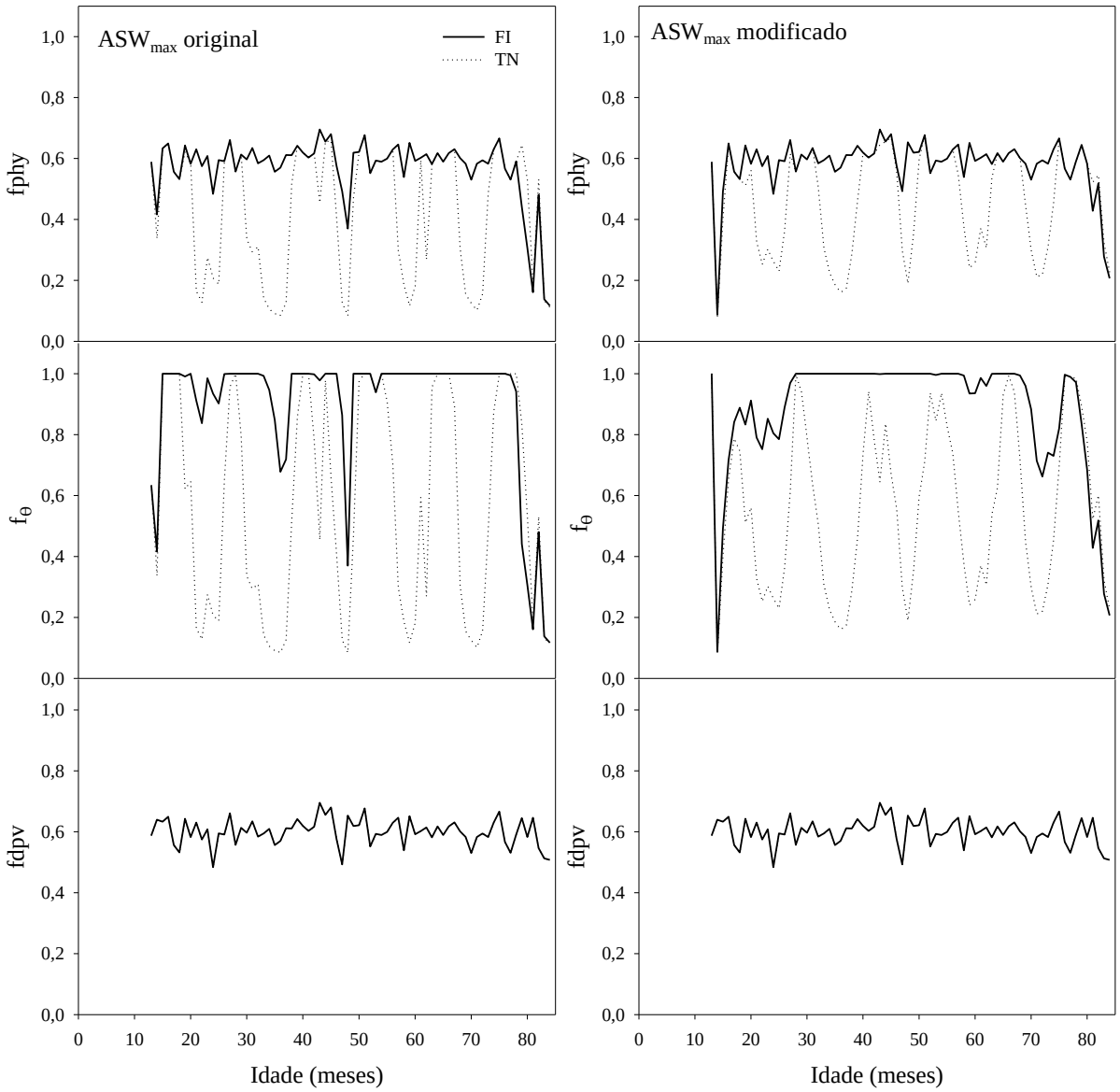

Figura 14 – Comparação dos modificadores: fisiológico (f_{phy}), umidade de água no solo (f_{θ}) e déficit de pressão de vapor (f_{dpv}) estimados nos tratamentos: fertilizado e irrigado (FI) e fertilização tradicional e não irrigado (TN) entre o modelo 3-PG original (ASW_{max} original) e 3-PG aprimorado para a retenção de água no solo (ASW_{max} modificado)

Segundo Landsberg, 2003 a ASW_{max} tem uma influência não linear no crescimento da planta, quando o solo está úmido, outros fatores limitam o crescimento, assim que este se torna seco, a água se torna importante, interagindo-se com o DPV para limitar a condutância estomática e reduzir a capacidade de absorção de nutriente pela árvore. E o presente aprimoramento melhorou as interações dos modificadores limitantes ao crescimento, resultando no aumento na estimativa da biomassa de tronco.

Desta forma, a incorporação do conceito fisiológico de crescimento da raiz da planta para estimar o ASW_{max} aumentou a eficiência do modelo em estimar crescimento sob diferentes regimes hídricos. Em regimes hídricos menos favoráveis, como áreas mais secas ou solos rasos, este ajuste será ainda mais relevante.

2.2.2.3 Caracterização da dinâmica foliar

A dinâmica foliar do povoamento foi acompanhada pelo índice de área foliar (IAF) e queda de folhedo ao longo do crescimento da floresta (figura 15). O IAF, sob diferentes regimes hídricos e nutricionais, foi estatisticamente diferente ao nível de 95% de probabilidade ($p = 0,0022$); porém, o tratamento FI possuiu, em média, 0,7 IAF a mais que o TN. A média do IAF foi de 4,2 m^2folha m^{-2}solo para o tratamento FI e 3,5 m^2folha m^{-2}solo para o TN.

O IAF caracterizou-se por apresentar, em ambos os tratamentos, valor máximo de cerca de 6,5 m^2folha m^{-2}solo por volta de 18 meses, época de fechamento do IAF; após este pico, o IAF apresentou uma queda brusca seguido por oscilações sazonais relacionadas às condições climáticas. O maior valor anual de IAF ocorre final do verão de cada ano (março/abril), ou seja, após um crescimento intensivo proporcionado pela disponibilidade hídrica e radiação e temperaturas mais elevada. Os menores valores de IAF ocorrem ao final do inverno (setembro/outubro), após o período de estresse hídrico, e menores radiações e temperatura mais amenas.

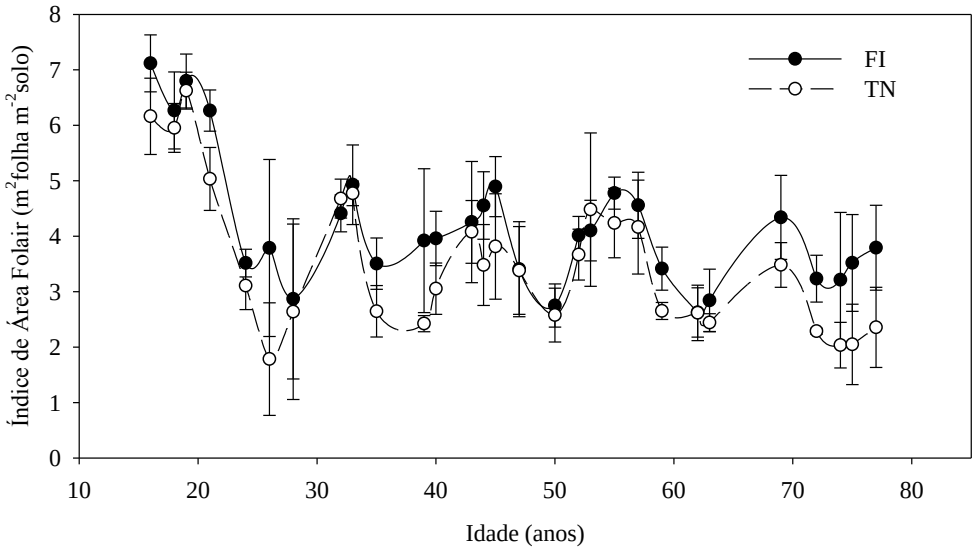

Figura 15 - Variação do índice de área foliar (IAF, m^2folha m^{-2}solo) no plantio de *Eucalyptus* dos 16 aos 77 meses de idade para o tratamento fertilizado e irrigado (FI) e tratamento com fertilização tradicional e não irrigado (TN). A barra representa o desvio padrão (n=4)

A queda de folhedo foi mensurada no período de 12 a 77 meses da floresta. O tratamento FI apresentou, em média, queda de folhedo ligeiramente superior ao tratamento TN, cerca de 0,45 Mg ha^{-1}mês^{-1} (5,47 Mg ha^{-1} ano^{-1}) contra 0,41 Mg ha^{-1} mês^{-1} (4,99 Mg ha^{-1} ano^{-1}) do tratamento TN (tabela 3), apesar da queda de folhedo não serem estatisticamente diferente entre os tratamentos (p = 0,2051). Em média, o tratamento com irrigação apresentou maior queda de folhedo, assim como encontrado por Linder et al. (1987), Raison et al. (1992) para *Pinus radiata*, explicada principalmente devido à maior biomassa de folhas produzidas ao longo do ciclo.

Tabela 3 – Quantidade acumulada de biomassa de folha anual proporcionada pela queda de folhedo (Mg ha^{-1} ano^{-1}) e tempo médio de vida da folha (meses) nos anos de plantio: 12 aos 77 meses de idade do povoamento de *Eucalyptus*, submetido em 6 anos de rotação sob dois tratamentos: fertilidade e irrigado (FI) e tratamento com fertilização tradicional e não irrigado (TN)

Trat.	**Idade do plantio de *Eucalyptus***					**Média**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	
	Queda de folhedo (Mg ha^{-1} ano^{-1})					
FI	5,73	6,24	5,21	5,50	4,67	5,47
TN	5,17	5,73	4,88	4,80	4,36	4,99
	Tempo médio de vida da folha (meses)					
FI	-	8,07	8,63	9,10	-	8,60
TN	-	6,91	7,90	9,13	-	7,98

Analisando a queda mensal de folhedo (figura 16), verifica-se que há uma grande dispersão na quantidade de queda no mesmo mês em anos diferentes. No entanto, observa-se que nos meses posteriores ao período de déficit hídrico e temperatura mais baixa (inverno), a quantidade de folhas senescentes é menor, por se tratar de um período (outubro e novembro) em que retornam as chuvas e intensifica-se a produção de folhas pelas gemas da árvore.

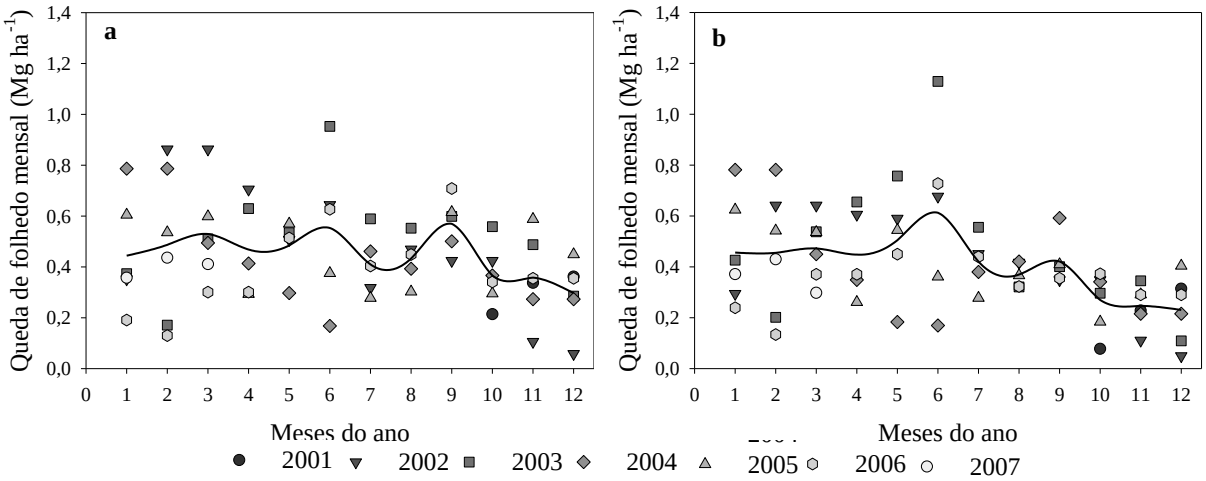

Figura 16 – Queda de folhedo mensal (Mg ha^{-1} mes^{-1}) entre outubro de 2001 (12 meses de idade do povoamento) a março de 2007 (77 meses de idade) para os tratamentos: fertilidade e irrigado (a) e tratamento com fertilização tradicional e não irrigado (b). A linha contínua representa a média entre os meses do ano

Pela análise anual, verifica-se que o pico de queda de folhedo ocorre no segundo ano da rotação, época em que o IAF está mais elevado, há o fechamento do dossel da floresta e uma queda brusca no IAF. O tempo médio de vida da folha foi de 8 a 9 meses após o fechamento do dossel.

Pela relação entre a biomassa de folhedo senescente da copa e a biomassa de folha na copa (calculada em relação ao IAF e à área foliar específica) determinou-se a taxa de queda de folhedo (figura 17) usada no aprimoramento do modelo 3-PG para queda de folhedo (item 1.2.2.5). O valor médio de área foliar específica foi de 8,5 m^2 kg^{-1}.

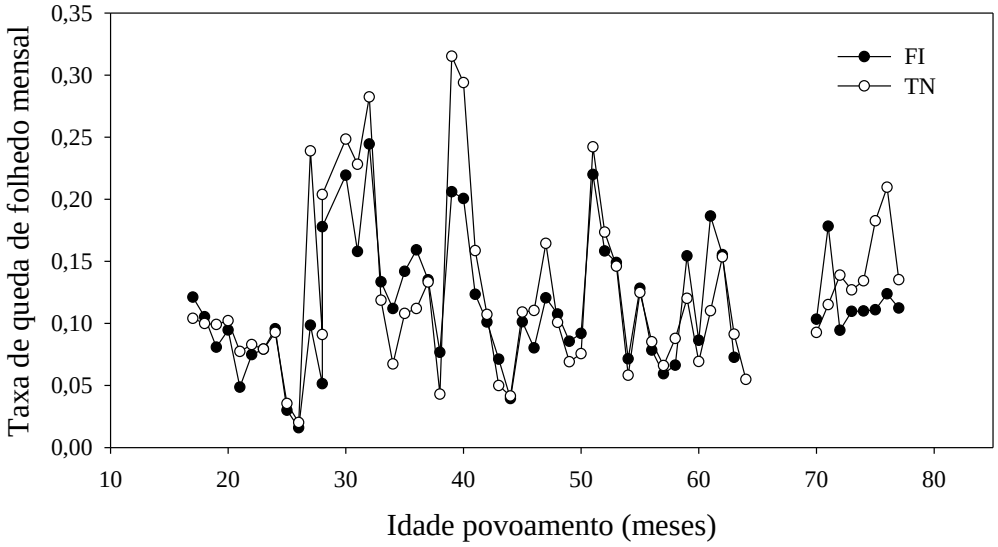

Figura 17 – Taxa mensal de queda de folhedo (proporção da biomassa de folha perdida pelo dossel no processo de abscisão foliar em relação à biomassa total de folhas presente no dossel) ao longo dos 16 aos 77 meses da floresta de *Eucalyptus* submetida aos tratamentos: fertilizado e irrigado (FI) e fertilização tradicional e sem irrigação (TN)

2.2.2.4 Aprimoramento do modelo 3-PG para queda de folhedo

Os fatores climáticos que influenciam a queda de folhedo já foram constatados por vários autores em estudos voltados principalmente para *Pinus* (RAISON et al., 1992; HENNESSEY, et al. 1992; VOSE et al., 1994; DOUGHERTY et al. 1995; LINDER et al., 1987; BATTAGLIA et al. 1998). A queda de folhedo está ligada aos fatores climáticos que geram estresse hídrico, térmico e lumínico nas plantas.

Neste estudo, foram testadas variáveis climáticas e biométricas, porém as variáveis que melhor explicaram a taxa de queda de folhedo, selecionadas pelo procedimento de regressão estatística *stepwise* avaliando o tratamento TN, foram: i) a precipitação ocorrida dois meses antes do evento (PPT2) ($p = 0,024$) e; ii) o IAF no período da queda de folhedo ($p = 0,036$).

A precipitação é um fator climático que mais expressa o estresse hídrico, e a PPT2 pode estar associada a um período de disponibilidade de água no solo ao longo prazo, bem como o tempo de respostas fisiológicas a eventos de seca. A PPT2 também foi utilizada por Dougherty et al. (1995) no ajuste de modelos não lineares para a taxa de queda foliar em *Pinus*.

No tratamento FI, a PPT2 representa a quantidade de água que entrou no sistema, neste caso foi a precipitação mais irrigação.

Outras variáveis climáticas testadas como radiação, temperaturas máximas e mínimas não foram significativas em explicar a taxa de queda de folhedo, diferente do que foi proposto por Hennerssey et al. (1992) e Dougherty et al. (1995), em que a temperatura foi um fator importante na dinâmica de abscisão foliar. Ressalta-se que as áreas estudadas por estes autores apresentavam grande amplitude térmica, o que não ocorreu neste estudo. Desta forma, a intensidade do estresse térmico no presente estudo não foi significativa para influenciar a queda de folhedo.

A evapotranspiração potencial e o DPV, apesar de serem fatores importantes no estresse hídrico na planta, interferindo no mecanismo de abertura e fechamento estomático (MARRICH, 2009), não se relacionaram estatisticamente, neste caso, com as taxas de queda de folhedo.

Dentre as variáveis biométricas avaliadas (idade do povoamento, área basal, IAF, DAP, volume de madeira e altura), somente o IAF se associou à taxa de queda de folhedo. Diferente do que foi encontrado por Dougherty et al. (1995) em que a área basal e as variáveis climáticas (temperatura média, e a diferença entre a precipitação e evapotranspiração potencial) nos níveis atingidos no sítio de Mogi Guaçu não foram hábeis para explicar a queda de folhedo do *Eucalyptus*. O IAF é uma variável que expressa a quantidade de biomassa da folha na copa, as quais possuem o potencial de absição, conforme a fisiologia da folha ou como estratégia de sobrevivência da planta em época seca.

Os modelos linear, logístico e não linear ajustados com as varáveis PPT2 e IAF forneceram as melhores estimativas da taxa de queda de folhedo (tabela 4), auxiliando na descrição do comportamento dinâmico da queda de folhedo após o fechamento do dossel (figura 18 e 19). No entanto, antes do fechamento do dossel, o *Eucalyptus* possui um comportamento diferente, de forma que para representá-lo foi necessário recorrer ao modelo combinado.

Tabela 4 – Relação de modelo de estimativa de taxa de queda de folhedo (γ_F) em função da precipitação ocorrida dois meses antes do evento (PPT2, mm) e índice de área foliar (IAF, m^2foliar m^{-2}solo); número de observações utilizadas no ajuste da equação (n); coeficiente de determinação (R^2) e o valor de p no teste F

Modelo	**Equação**	**n**	**R^2**	**p**
Linear	$\gamma_F = 0{,}15517 + 0{,}00021(PPT2) - 0{,}01573(IAF)$	92	0,1844	0,0045
Logístico	$\gamma_F = \dfrac{e^{-1{,}94798 + 0{,}00208(PPT2) - 0{,}10659(IAF)}}{1 + e^{-1{,}94798 + 0{,}00208(PPT2) - 0{,}10659(IAF)}}$	92	0,1518	0,0127
Não Linear	$\gamma_F = 0{,}07427(PPT2)^{0{,}24507 + (-0{,}10804\ln(IAF))}$	92	0,1943	0,0000

Até o fechamento do dossel, há uma intensa produção de folhas e pouca queda de folhedo, isso devido à menor competição entre plantas por luz, água e nutrientes. Quando ocorre o fechamento da copa, a competição por recursos passa a ser mais intensa devido ao aumento do sombreamento das folhas inferiores, o que eleva ao rápido aumento da queda de folhedo. O modelo combinado foi formulado para representar duas fases na dinâmica de queda de folhedo, sendo composto pelo modelo original do 3-PG até o fechamento do dossel e após isso, o modelo linear. Este modelo linear foi escolhido por apresentar melhor performance ao ser incorporado no modelo 3-PG em relação ao modelo logístico e não-linear.

Dougherty et al. (1995) relatam que a função logística foi adequada para descrever o acréscimo mensal de acícula de *Pinus*. No entanto, para estimar a queda de folhedo, esta função não detectou as oscilações mensais nem os picos de queda, assim como foi observado neste estudo. Desta forma, estes autores descreveram 12 modelos não lineares para estimar a proporção de queda de folhedo na tentativa de associar ao mês fenológico da árvore.

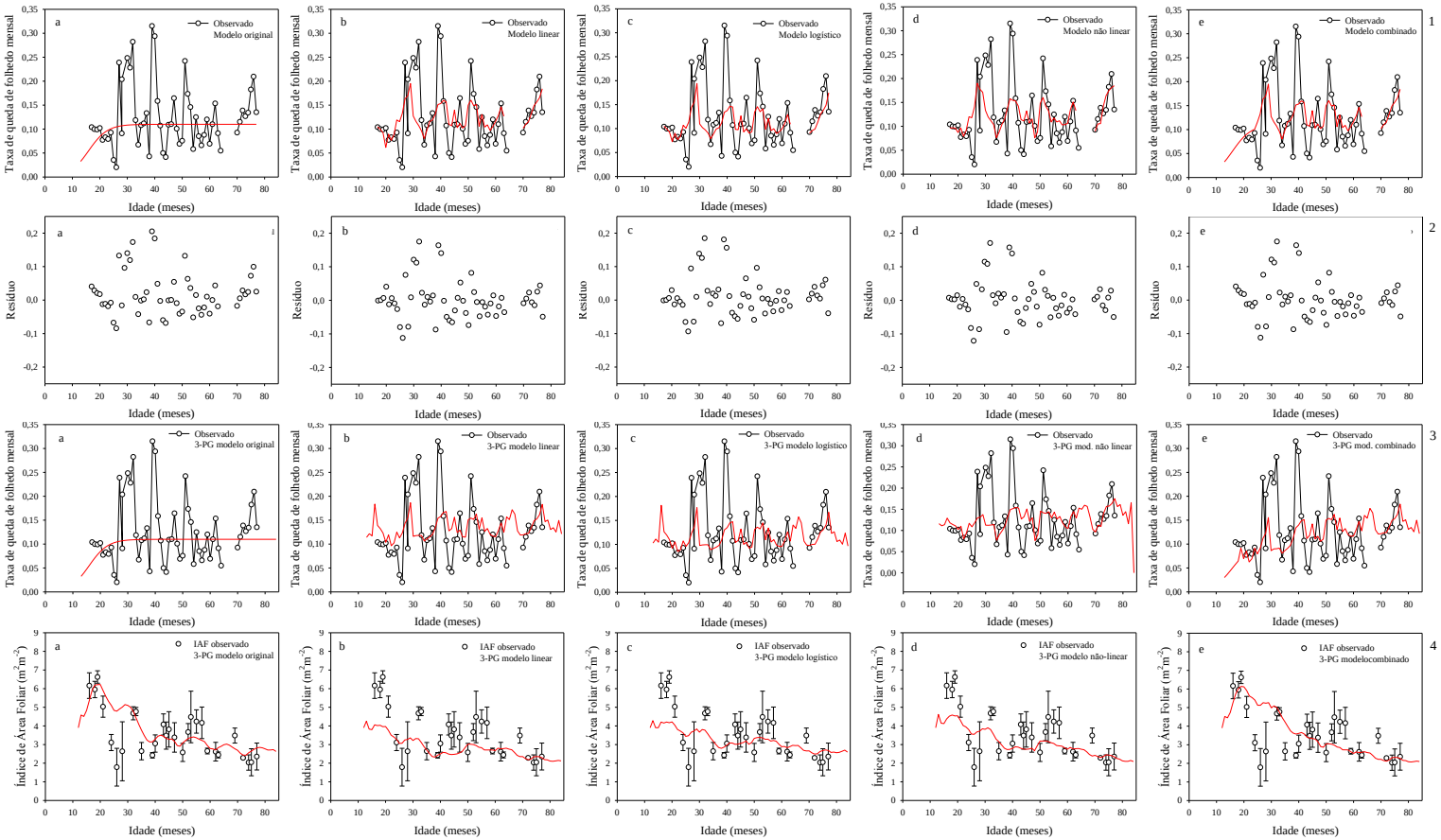

Figura 18 - Comparação entre os cinco modelos de estimativa da taxa de queda de folhedo aplicado ao tratamento fertilizado não irrigado (TN): a) modelo Sands; Landsberg (2002), denominado original; b) modelo linear; c) modelo logístico; d) modelo não-linear; e) modelo combinado. Na linha: 1) Estimativa da taxa de queda de folhedo utilizando-se dos dados coletados experimentalmente; 2) Resíduo de cada modelo; 3) Estimativa da taxa de queda de folhedo ao inserir a equação no modelo 3-PG; 4) Estimativa do índice de área foliar no modelo 3-PG após a modificação de queda de folhedo

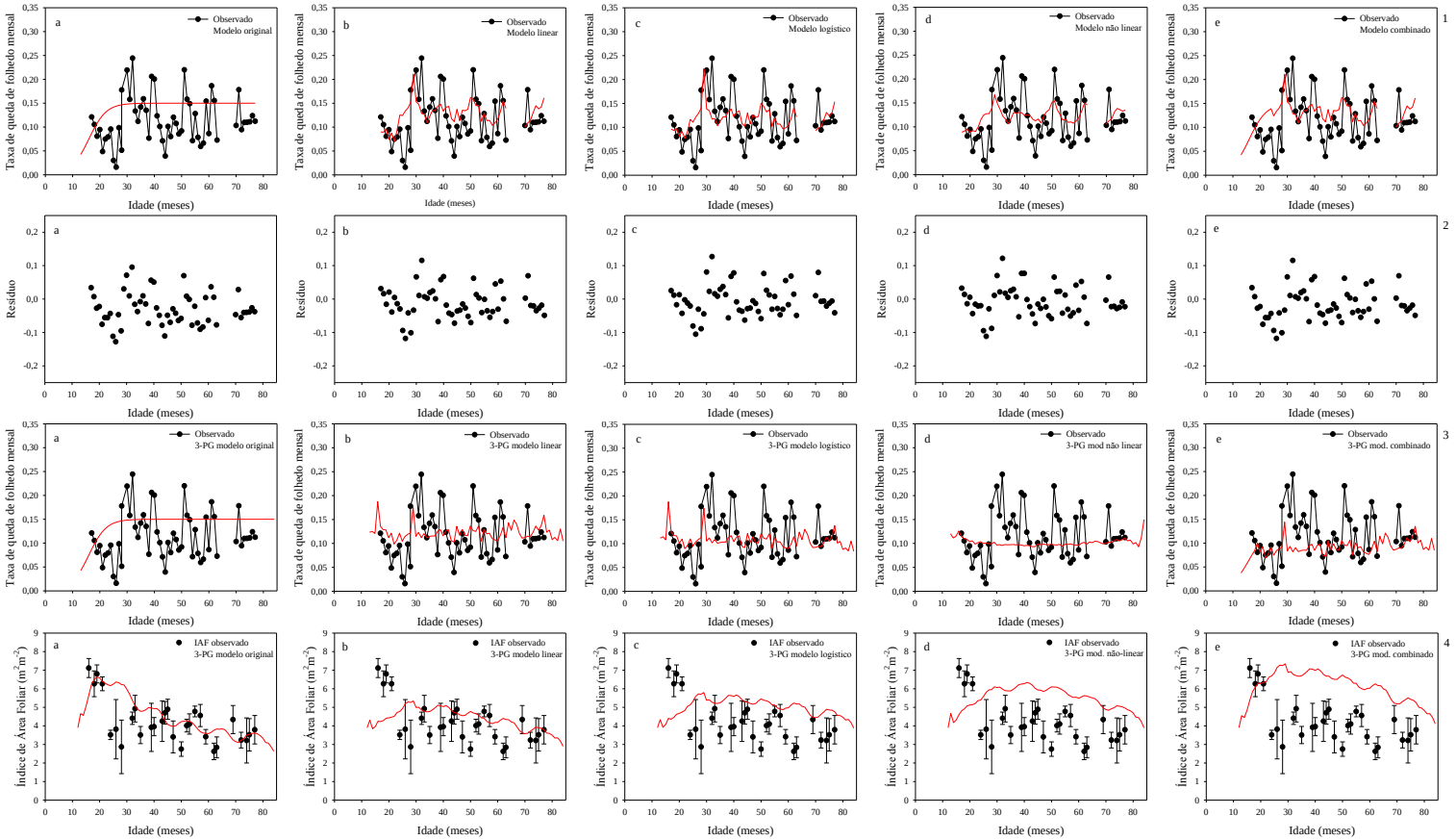

Figura 19 - Comparação entre os cinco modelos de estimativa da taxa de queda de folhedo aplicado no tratamento fertilizado e irrigado (FI): a) modelo Sands; Landsberg (2002), denominado original; b) modelo linear; c) modelo logístico; d) modelo não-linear; e) modelo combinado. Na linha: 1) Estimativa da taxa de queda de folhedo utilizando-se dos dados coletados experimentalmente; 2) Resíduo de cada modelo; 3) Estimativa da taxa de queda de folhedo ao inserir a equação no modelo 3-PG; 4) Estimativa do índice de área foliar no modelo 3-PG após a modificação de queda de folhedo

As figuras 18 e 19 claramente evidenciam que há grande potencial de melhorar a estimativa da queda de folhedo do *Eucalyptus* no modelo 3-PG via incorporação de variáveis climáticas que afetam a dinâmica da copa deste gênero. Somente com a inclusão de um índice de precipitação (PPT2) e da dimensão da copa (IAF) já foi possível melhor descrever a oscilação mensal da queda de folhedo.

Os resultados mostram que o *Eucalyptus* apresenta uma dinâmica foliar muito sensível aos fatores ambientais, e face ao seu rápido crescimento esta dinâmica deve ser capturada para adequadamente estimar o IAF, o qual afeta diretamente as estimativas de crescimento e transpiração. Como este foi somente um dos oito sítios do projeto BEPP, a incorporação dos demais sítios seria oportuna para investigar em mais detalhes as variáveis climáticas e do povoamento que efetivamente controlam a aceleração da queda de folhas.

O modelo combinado foi o que obteve a melhor performance da taxa de queda de folhedo e estimativa do IAF para o tratamento TN, por representar a dinâmica do IAF antes e após o fechamento do dossel. Porém, ao ser aplicado no tratamento FI, superestimou o IAF estimado, por não simular corretamente a queda após o fechamento do dossel, proporcionando uma diminuição da taxa de queda de folhedo ao longo do ciclo. No 3-PG, a queda de folhedo é a única maneira de perda de biomassa de folha. Esta equação possui um grande potencial para estimativa da taxa de queda de folhedo, no entanto, ainda é preciso mais estudos para definitamente integrá-la ao 3-PG.

Os modelos ajustados capturaram uma tendência de queda de folhedo baseado no IAF da floresta e na precipitação, podendo ser usado ainda com cautela. O que se produziu aqui foi uma solução local, sítio e clone específica. Os mecanismos de queda de folhedo estão ligados não só as variáveis climáticas, mas também as características genéticas dos clones, como: orientação das folhas, sensibilidade dos estômatos ao DPV, crescimento de raízes em profundidade, regulação osmótica do turgor celular (WHITEHEAD; BEADLE, 2004). Outros fatores que podem ainda influenciar a taxa de queda de folhedo é a produção mensal de folhas, nutrição foliar (EPRON et al., 2011) e intensidade de vento.

Os parâmetros do 3-PG estimados neste estudo fornecem valores para uso na estimativa de crescimento de florestas comerciais de *Eucalyptus* no nordeste do Estado de São Paulo. Novos avanços nesta área podem ser alcançados utilizando-se os demais sítios BEPP

distribuídos no Brasil, possibilitando assim o uso deste modelo em simulações de produtividade do *Eucalyptus* em diversas situações de clima, solo e fertilidade.

2.3 Conclusão

Com base na análise de um ciclo completo de 7 anos de Eucalyptus clonal instalado em Mogi Guaçu, SP, num solo eutrófico, e com níveis de suprimento hídrico (somente chuva, e com irrigação), pode-se conluir que:

- A modificação da retenção máxima de água no solo em função da distribuição de raiz no perfil do solo melhorou as estimativas de crescimento em biomassa do tronco e IAF para plantios de *Eucalyptus;*

- A precipitação foi a variável climática mais relacionada com a melhoria da estimativa de queda de folhedo do *Eucalyptus*, conjuntamente com o IAF do povoamento;

- O modelo original do 3-PG utilizado até o fechamento do dossel, combinado como modelo linear do efeito da precipitação, pós fechamento, foi o que melhor representou a dinâmica da taxa de queda de folhedo no estudo;;

- A incorporação da profundidade do sistema radicular mostra-se adequada para incorporação ao 3-PG melhorando a estimativa de biomassa de tronco de -11% para -5%. No entanto, este aprimoramento deve estar atrelado à compreensão das variabilidades de solo e dos clones em explorá-los; e

- Há nítida evidência de que o modelo 3-PG requer aprimoramento nas equações de taxa de queda de folhedo, e que esta melhoria terá contribuição ao se incorporar o balanço hídrico. Porém, há necessidade de melhor caracterização, e de se conhecer sua especificidade em nível de clone.

Referências

ALMEIDA, A.C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T.R.; BEADLE, C.; FONSECA, S.; LOOS, R. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p.1730-1740, 2010.

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 Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.167-177, 2004b.

ALMEIDA, A.C.; LANDSBERG, J.J.; SANDS, P.J.; Parameterisation of 3-PG model for fast-growing Eucalyptus grandis plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.1993, p.179-195, 2004a.

ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V.; LANDSBERG,J.J.; REZENDE,G.D. Growth and water balance of Eucalyptus grandis hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.251, p.10-21, 2007.

ALVARES, C.A. **Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de Eucalyptus no sul do Estado de São Paulo**. 2011. 279p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011

BATTAGLIA, M.; CHERRY, M.L.; BEADLE,C.L.; SANDS, P.J.; HINGSTON, A. Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. **Tree Physiology**, Victoria, v.18, p.521-528, 1998.

BEHLING, M. **Nutrição, partição de biomassa e crescimento de povoamentos de teca em Tangará da Serra – MT.** 2009. 156p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; BAUERLE, W.L.; RYAN, M.G. Explaining growth of individual trees: Light interception and efficiency of light use by Eucalyptus at four sites in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, p.1704-1713, 2010.

BORGES, J.S. **Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do Cerrado de Minas Gerais**. 2009. 65p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

BOUILLER, J.P.; LACLAU, J.P.; ARNAUD, M.; M'BOU, A. T.; SAINT-ANDRÉ, L.; JOURDAN, C. Changes with age in spatial distribuition of roots of *Eucalyptus* clone in Congo Impact on water and nutrient uptake. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.171, p.43-57, 2002.

BRÉDA, N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 54, n. 392, p. 2043-2417, 2003.

CAIRNS, M.A.; BROWN, S.; HELMER, E.H. BAUMGARDNER, G.A. Root biomass allocation in the world's upland forests. **Oecologia**, Berlin, v. 111, p.1-11, 1997.

CALDER, I.R.; ROSIER, P.T.W.; PRASANNA, K.T.; PARAMESWARAPPA, S. Eucalyptus water use greater than rainfall input – a possible explanation from southern India. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v.1, p.249-256, 1997.

CAMPION, J.M.; ESPREY, L.J.; SCHOLES, M.C. Application of the 3-PG model to a Eucalyptus grandis stand subjected to varying levels of water and nutritional constrains in

KwaZulu-Natal, South Africa. **Southern African Forestry Journal**, Menlo Park, v.203, p.3-13, 2005.

CHRISTINA, M.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.P. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. **Ecosphere**, New York, v.2,n.3, p.1-10, 2011.

DOUGHERTY, P.M.; HENNESSEY, T.C.; ZARNOCH, S.J.; STENBERG, P.T.; HOLEMAN, R.T.; WITTWER, R.F. Effects of stand development and weather on monthly leaf biomass dynamics of a loblolly pine (*Pinus taeda* L.) stand. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.72, p.213-227, 1995.

DYE, P.J. Modelling growth and water use in four Pinus patula stands with the 3-PG model. **Southern African Forest Journal**, Menlo Park, v.191, p. 53–63, 2001.

ESPREY, L.J.; SANDS, P.J; SMITH, C.W. Understanging 3-PG using a sensitivity analysis. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.235-250, 2004.

EPRON, D.; LACLAU, J.P.; ALMEIDA, J.C.R.; GONÇALVES, J.L.M.; PONTON, S.; SETTE JR, C.R.; DELGADO-ROJAS, J.S.; BOUILLET, J.P. Do changes in carbon allocation account for growth response to potassium and sodium applications in tropical *Eucalyptus* plantations? **Tree Physiology**, Oxford, 31, p.1-13, 2011.

FEIKEMA, P.M.; MORRIS, J.D.; BEVERLY, C.R.; COLLOPY, J.J.; BAKER, T.G. ;LANE, P.N.J. Validation of plantation transpiration in south-eastern Australia estimated using the 3PG+ forest growth model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.260, p.663-678, 2010. doi: 10.1016/j.foreco.2010.05.022.

FERREIRA, J.M.A. - **Ganho de produtividade de plantações clonais de Eucalyptus urophylla e suas correlações com variáveis edafoclimáticas e silviculturais**. 2007. 84p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

FONTES L.; LANDSBERG, J.; TOMÉ, J.; TOMÉ,M.; PACHECO, C.A.; SOARES,P.; ARAUJO, C. Calibration and testing of a generalized process-based model for use in Portuguese eucalyptus plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.36, p.3209-3221, 2006.

GONÇALVES, J.L.M.; MELLO, S.L.M. O sistema radicular das In:GONÇALVES, J.L.M.; MIRANDA, S.M. **Nutrição e Fertilidade Florestal.** Piracicaba: IPEF, 2000.p.219-268.

GONÇALVES, J.M.L **Características do sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas.** 1994. 84p. Tese (Tese de Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

HENNESSEY, T.C.; DOUGHERTY, P.M.; CREGG, B.M.; WITTWER, R.F. Annual variation in needlefall of a loblolly pine stand in relation to climate and stand density. **Forest Ecology and Management,** Amsterdam, v.51, p.329-338, 1992.

HUBBARD R.M.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; ALMEIDA, A.C.; ROJAS,J. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing Eucalyptus plantations **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, p. 1714-1721, 2010.

LACLAU, J.P.; ARNAUD, M.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Spatial distribution of Eucalyptus roots in a deep sandy soil in the Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. **Tree Physiology**, Oxford, v.21, p.129-136, 2001.

LANDSBERG, J.; SANDS, P. Physiological **ecology of forest production**: principles, processes and models. Amsterdam: Elsevier, 2011. 331p.

LANDSBERG, J.J. **Physiology in Forest Models:** History and the future. FBMIS, 2003. p.49-63.

LANDSBERG, J.J.; JOHNSEN, K.H.;ALBAUGH, T.J.; ALLEN, L.;MCKEAND, S.E. Applying 3-PG, a simple process-based model designed to produce practical results, to data from loblolly pine experiments. **Forestry Sciencs**, Bethesda, v.47, p.43–51, 2001.

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

LIMA, W.P. **Impacto ambiental do eucalipto**. Editora: Edusp, São Paulo, 1993. 301p.

LINDER, S.; BENSON, M.L.; MYERS, B.J.; RAISON, R.J. Canopy dinamics and growth of Pinus radiata. I. Effects of irrigation and fertilization during a drought. **Canadian Journal of Forest Research**,Ottawa, v.17, p.1157-1165, 1987.

MARRICHI, A.H.C. **Caracterização da capacidade fotossintética e da condutância estomática em sete clones comerciais de Eucalyptus e seus padrões de resposta ao déficit de pressão de vapor.** 2009.104p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MELLO, S.L.M.; GONÇALVES, J.L.M.; OLIVEIRA, L.E.G. Características do sistema radicular em povoamentos de eucaliptos propagados por sementes e estacas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.54, p.16-26, 1998.

MIELKE, M.S.; OLIVA, M.A.; BARROS, N.F.; PENCHEL, R.M.; MARTINEZ, C.A.; ALMEIDA, A.C. Stomatal control of transpiration in the canopy of clonal Eucalyptus grandis plantation. **Trees**, Berlin, v.13, n.1, p.152-160, 1999

NAMBIAR E.K.S.; SANDS, R. Effects of compaction and simulated root channels in the subsoil on root development, water uptake and growth of radiata pine. **Tree Physiology**, Victoria, v.10, p.297–306, 1992.

NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.P.; EPRON, D.; KINANA, A.; MABIALA, A.; ROUPSARD, O.; BENNEFOND, J.M.; LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; BONTEMPS, J.D.; SAINT- ANDRÉ Within-stand and seasonal variations of specific leaf area in a clonal

Eucalyptus plantation in the Republic of Congo. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 259, p.1796-1807, 2010.

POOK, E.W. Canopy Dynamics of *Eucalyptus maculata* Hook. I Distribution and dynamics of l-leaf populations. **Australian Journal of Botany**, Victoria, v.32, p.387 – 403, 1984.

RAISON, R.J.; KHANNA, P.K.; BENSON, M.L.; MCMURTRIE, R.E.; LANG, A.R.G. Dynamics of Pinus radiata foliage in relation to water and nitrogen stress: II. Needle loss and temporal changes in total foliage mass. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.52, p.159-178, 1992.

RYAN, M.G.; STAPE, J.L.;BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R.A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.A. ; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C. Factors controlling Eucalyptus productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, p.1695-1703, 2010.

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

SANDS, P.J. **3PGPJS - a User-Friendly Interface to 3-PG, the Landsberg and Waring Model of Forest Productivity**. Hobart: CRC for Sustainable Production Forestry, 2001. 22p. (Technical Report, 29).

SILVA, G.G.C. **Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de Eucalipto em reposta à disponibilidade de água e nutriente.** 2006. 102p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de Viçosa, Viçosa, 2006.

STAPE, J.L. **Production ecology of clonal Eucaliptus plantations in Northeastern Brazil**. 2002. 265p. Thesis (Ph.D.) - Colorado State University, Fort Collins, 2002.

STAPE, J.L. BINKLEY, D.; RYAN, M.G.Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.17-31, 2004a.

STAPE, J.L. BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; GOMES, A.N. Water use, water limitation, and water use efficiency in a Eucalyptus plantation. **Bosque**, Valdivia, n.25 v.2, p. 5-41, 2004c

STAPE, J.L.;BINKLEY, D.; RYAN, M.G. 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**, Amsterdam, v.193, p.219 - 234, 2004b.

STAPE J.L.; BINKLEY, D.; RAYAN, M.G.; FONSECA, S.; LOOS, R.A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.A. ; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam,v.259, p.1684-1694, 2010.

VOSE, J.M.; ALLEN, K.L. Leaf area, stemwood growth, and nutrition relationship in loblolly pine. **Forest Science**, Bethesda, v.34, p. 547-563, 1988.

WARING, R.H.; MCDOWELL, N. Use of a physiological process model with forestry yield tables to set limits on annual carbon balances. **Tree Physiology**, Victoria, v.2, p.179-188, 2002.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C.L. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p.113-140, 2004.

3 APRIMORAMENTOS DO MODIFICADOR DE FERTILIDADE DO SOLO DO MODELO 3-PG

Resumo

O manejo nutricional em plantações florestais é uma das atividades mais impactantes na manutenção e ganho da produtividade. Este manejo nutricional normalmente é realizado por meio da aplicação de adubos minerais na floresta durante a época de plantio e primeiro ano de seu crescimento. No entanto, a adubação florestal é a operação mais cara no custo de produção das florestas plantadas, necessitando assim, de planejamento adequado entre doses de nutrientes, freqüência de aplicação e expectativas de resposta à fertilização. O delineamento de parcelas gêmeas de inventário florestal é uma alternativa para determinação da resposta à fertilização na escala de paisagem, possibilitando avaliar a produtividade real e atingível da floresta, bem como os nutrientes limitantes ao crescimento na escala de paisagem. Além disso, este tipo de delineamento possui o potencial para uso na calibração e validação de modelos ecofisiológicos, principalmente quando se deseja entender o crescimento da espécie em resposta à fertilização na escala de paisagem. O objetivo deste estudo foi o de utilizar pares de parcelas gêmeas no aprimoramento do modificador fertilidade do solo (FR) do modelo 3-PG para plantios de *Eucalyptus* plantado no nordeste do estado de São Paulo. Para tanto, fez-se necessário a calibração e validação do modelo 3-PG utilizando-se 113 pares de parcelas gêmeas. Os pares de parcelas gêmeas foram formados por dois tratamentos: controle (fertilização e controle de mato-competição tradicional da empresa) e manejo intensivo (fertilização e controle de mato-competição extras), estratificados em três tipos de solos: Neossolo, Latossolo e Argissolo. O modelo 3-PG obteve um bom desempenho na estimativa da produtividade atingível para os três tipos de solos, medido através do crescimento da biomassa de tronco no tratamento de manejo intensivo; e também em estimar o índice de área foliar no final do ciclo. O FR foi então ajustado por parcela e tipo de solo, usando-se o tratamento controle. Os solos arenosos (Neossolos) foram os que apresentaram maior deficiência nutricional, limitados pelas somas de bases (Ca, Mg e K). Desta forma, foi possível correlacionar o FR ao atributo soma de base. Nas condições do estudo, conclui-se que pela calibração e validação do modelo 3-PG obteve adequada precisão em estimar a produtividade no nordeste do estado de São Paulo. Foi possível determinar o FR com base em atributos químico do solo. Este índice, no entanto, é dependente do manejo tradicional da empresa, sendo necessária portando uma rede de parcelas gêmeas para sua adequada determinação.

Palavras-chave: Modelagem ecofisiológica; modelo 3-PG; Parcelas gêmeas; Fertilidade do solo; Calibração; Validação

Abstract

Nutritional management in forest plantations is one of the most impacting activities to provide the forest productivity gain and maintenance. The nutrient management is usually accomplished through the mineral fertilizers application in the forest at planting date and during the first years of forest growth. However, forest fertilization is the most expensive

operation in the forest plantation in Brazil. The adequate planning for nutrients balance in the soil linked to fertilization response of forest is important to ensure the financial returns. The twin-plot design is an alternative to determine the forest fertilization response in the landscape scale, allow to establish the actual and attainable forest productivity, as well as, the chemical element that limit the forest growth. Moreover, this kind of design can be use to calibrate and validate ecophysiological models, mainly to understand the forest growth intro the fertility response and landscape variation. The aim of this study was to evaluate the fertilization response in the paired twin-plots installed in Eucalyptus plantations along the northeastern of São Paulo state; calibrate and validate the 3-PG model using those twin-plots; and determine the 3-PG soil fertility modifier (FR) using the soil chemical analysis. The pair of plots is composed by one control plot and one treated plot that receives an intensive management (extra fertilization and weed competition). For this study 113 pairs of twin-plots were stratified into three soils types: Typic, Oxisol and Ultisol. The 3-PG model had a good performed in estimate the attainable productivity for those three soil types, evaluated by stem biomass in the intensive management treatment, and also to estimate the leaf area index at the end of the cycle. The FR was adjusted for each plot and soil type, using the control treatment. Entisols were those with had the highest nutritional deficiency, limited by the sums of bases (Ca, Mg and K). Thus, it was possible to correlate the FR to the soil chemistry variable: sum of bases. Under the conditions of this study, it is concluded that the 3-PG model has a good performed in estimating the stem biomass in a landscape scale for forest plantations after calibrate and validate. The FR can be estimated based on soil chemical analysis, using the most restrict nutrient from Ca, Mg and sum of bases.

Keywords: Ecophysiological modeling; Twin plots; Soil fertility; Model calibration; Model validation

3.1 Introdução

O manejo nutricional nas plantações de *Eucalyptus* é uma das questões chave para o aumento da produtividade e sustentabilidade de produção de madeira. A fertilização química é uma das principais fontes de nutrientes no manejo florestal, demanda alto investimento e adequado planejamento de aplicação (FERREIRA, 2007). Visto que as plantações de *Eucalyptus* situam-se em áreas com diversos tipos de solos, é necessário a definição de tratos silviculturais direcionados para cada sítio a fim de otimizar a rentabilidade do plantio.

O delineamento em “parcelas gêmeas” (STAPE et al., 2006), capaz de capturar a resposta à fertilização em um período curto de tempo, fornece informações importantes para a recomendação silvicultural em extensas áreas (FERREIRA; STAPE, 2009). Este método requer o estabelecimento de pares de parcelas ao longo da paisagem, sendo uma parcela dita controle (com manejo silvicultural usual da empresa/ instituição) e outra parcela com manejo intensivo (com maiores taxas de fertilização e controle de mato-competição) (STAPE et al., 2006).

Este tipo de delineamento aplicado em florestas de *Eucalyptus* ao longo do Nordeste do Estado de São Paulo forneceu informações importantes ao manejo da nutrição florestal (STAPE et al., 2006, FERREIRA, 2007, STAPE; FERREIRA, 2009, SILVA, 2011). Os solos menos férteis (arenosos) foram mais responsíveis ao aumento da adubação gerando aumento na produtividade em volume de madeira de 15% a 25%, ao passo que nos solos mais férteis (argilosos) o aumento em produtividade foi inferior a 10% ou ausente (FERREIRA; STAPE, 2009). Assim, neste caso específico, os autores puderam determinar uma forma de direcionar a recomendação nutricional para solos mais responsivos em termos de produção de madeira, sendo neste caso específico, os mais arenosos.

Porém, além da reposta da floresta à fertilização é fundamental entender quais as características do solo que limitam o crescimento florestal e fazem com que um tipo de solo seja mais responsivo que outro.

Segundo a revisão realizada por Gonçalves, Demattê e Couto (1990) sobre a relação entre o crescimento florestal global e as características químicas dos solos, o pH do solo, teor de matéria orgânica, teor de fósforo disponível, nitrogênio total, teor de potássio, cálcio e magnésio trocável, em ordem decrescente de freqüência, são as propriedades químicas do solo que mostram as melhores correlações com o crescimento da maioria das espécies florestais.

Estudo realizado por estes mesmos autores no Estado de São Paulo, com espécie de *Eucalyptus grandis* e *E. saligna*, concluiu que o pH em $CaCl_2$, teor de silte, teor de fósforo assimilável e teor de matéria orgânica foram as características do solo que apresentaram melhores relações com a produtividade do sítio. Além disso, os autores verificaram que a camada superficial de 0 – 20 cm foi a que apresentou propriedades físicas e químicas mais relacionadas com a qualidade de sítio, sendo a mais indicada para amostragem e análise para fins de avaliação de fertilidade do solo (GONÇALVES; DEMATTÊ; COUTO, 1990).

Gava (1997) obteve uma forte resposta à fertilização com potássio, após sucessivos cultivos do *Eucalyptus*. Ferreira e Stape (2009) usando o delineamento em parcelas gêmeas de *Eucalyptus*, no nordeste do estado de São Paulo, constataram que as características químicas do solo que mais se correlacionaram com resposta à fertilização foram a soma de bases, cálcio, magnésio e potássio. Silva (2011) ao estudar o mesmo delineamento no sul do estado de São Paulo, verificou que o potássio, magnésio e fósforo eram os elementos mais limitantes.

Além disso, a resposta à fertilização foi tanto maior quando o aumento da disponibilidade hídrica.

Segundo Gonçalves et al. (2008), em áreas com cultivo de plantações de rápido crescimento o manejo nutricional é muito importante para conservação e sustentabilidade do solo, visto que estas florestas demandam nutrientes, e exportam parte destes pela colheita. A adubação é a forma de manter o estatus nutricional ao sistema.

A adequada fertilização é necessária para garantir a produtividade das florestas e seu retorno financeiro, principalmente em regiões como o estado de São Paulo em que o custo de oportunidade da terra é muito elevado. O acompanhamento e avaliação da produtividade florestal são realizados atualmente através das parcelas de inventário e modelos de produção empíricos derivados de suas medições (CAMPOS; LEITE, 2006). Os modelos empíricos de determinação de produtividade não incorporam diretamente em suas estimativas as variações de produtividade devido ao estatus nutricional, nem o efeito do manejo florestal, por exemplo.

O modelo baseado em processo (modelo ecofisiológico) é uma ferramenta complementar ao inventário florestal que vem sendo adotado nas empresas florestais. Seu uso é destinado à análise no sistema de manejo, às predições das produtividades atingível e potencial, ao auxílio na aquisição de novas áreas e na quantificação do efeito ambiental e do manejo (ALMEIDA et al., 2004b).

A vantagem dos modelos ecofisiológicos, em relação aos modelos empíricos, é a capacidade de respostas às variações climáticas, manejo florestal (preparo de solo, adubação, controle da mato-competição) e aos riscos associados ao ataque de pragas e doenças (LANDSBERG, 2003). O modelo 3-PG é um modelo ecofisiológico difundido no meio florestal, e é sensível às variações do solo e clima na estimativa de produtividade florestal (LANDSBERG et al., 2001; STAPE et al., 2004b; CAMPION; ESPREY; SCHOLE, 2005; ALMEIDA et al., 2010a). No entanto, a questão da fertilidade do solo deste modelo ainda é subjetiva. O 3-PG adota um fator modificador de fertilidade (FR) que associa a solos muito pobres em nutrientes o valor zero (0), e aos solos altamente férteis o valor um (1).

Segundo Landsberg (2003) a capacidade dos modeladores em descrever o estatus nutricional do solo em termos quantitativos é extremamente limitada, pois os nutrientes disponíveis dependem de ciclos biogeoquímicos complexos.

Stape, Binkley e Ryan (2004b), Campion, Esprey e Scholes (2005), Almeida et al. (2010a) propuseram diferentes métodos na determinação do FR. Stape; Binkley; Ryan (2004b) trabalharam com a fertilidade do solo em resposta ao crescimento da árvore de

Eucalyptus usando o delineamento de parcelas gêmeas. Campion; Esprey; Scholes (2005) determinaram o FR de acordo com a análise foliar dos nutrientes, e Almeida et al. (2010a) formularam uma equação abrangendo não somente a fertilização do solo, mas também consideraram a limitação por água, manejo e topografia.

O uso de parcelas gêmeas é uma ferramenta eficaz para avaliar a performance do modelo 3-PG frente a variações edafoclimática (STAPE et al., 2006) para o modelo adequadamente calibrado e validado para região de estudo, bem como estimar o parâmetro FR para o modelo 3-PG.

Desta forma, este estudo teve como objetivo calibrar e validar o modelo 3-PG para floresta de *Eucalyptus* plantadas no nordeste do estado de São Paulo usando delineamento experimental de parcelas gêmeas e aprimorar o modificador de fertilidade do solo do modelo 3-PG, determinando-o com base na análise química dos diferentes tipos de solos da região.

3.2 Desenvolvimento

3.2.1 Material e Métodos

O aprimoramento do modificador fertilidade do solo (FR) do modelo 3-PG foi realizado utilizando-se de 113 blocos experimentais de pares de parcelas gêmeas pertence ao Projeto “Parcelas Gêmeas de Inventário”, distribuídas ao longo do nordeste do estado de São Paulo. Com os pares de parcelas gêmeas foi possível calibrar e validar o modelo 3-PG para parcelas sem limitação nutricional e determinar a variação do FR em função da produtividade na parcela controle. Por fim, os FR foram associados aos atributos químicos do solo.

3.2.1.1 Caracterização do Projeto Parcelas Gêmeas de Inventário (PPGI)

O Projeto Parcelas Gêmeas visa determinar as limitações nutricionais, hídricas e de manejo de plantações florestais numa ampla escala espacial e temporal, podendo determinar a magnitude da diferença entre a produtividade real e potencial dos plantios de eucaliptos.

O delineamento das parcelas gêmeas consiste em selecionar de 5 a 8% das parcelas permanentes de inventário, usados comumente na rede de inventário contínuo, baseando-se em critérios discriminatórios como material genético, solo, idade e índice de sítio. Os sítios são selecionados de forma proporcional ao existente na paisagem regional. Estas parcelas

perfazem parte da rede de inventário da empresa, a qual quantifica a produtividade real (figura 2) dos povoamentos.

A técnica das parcelas gêmeas consiste em instalar a uma distância de 15 a 30 metros da parcela permanente de inventário selecionada outra parcela com mesma dimensão, sendo que esta nova parcela passa a receber tratos culturais diferenciados da parcela de inventário visando eliminar as restrições ao crescimento através da fertilização extra e de rígido controle de pragas e mato-competição (STAPE et al., 2006). A parcela com manejo intensivo passa a expressar a produtividade atingível do sítio ou até mesmo a produtividade potencial, quando as restrições hídricas são nulas.

3.2.1.2 Área de estudo

O estudo foi conduzido em 113 pares de parcelas gêmeas distribuídas espacialmente ao longo do nordeste do estado de São Paulo (figura 20), nas regiões de Mogi-Guaçu, Brotas e São Simão, pertencentes ao Projeto Parcela Gêmeas da International Paper do Brasil.

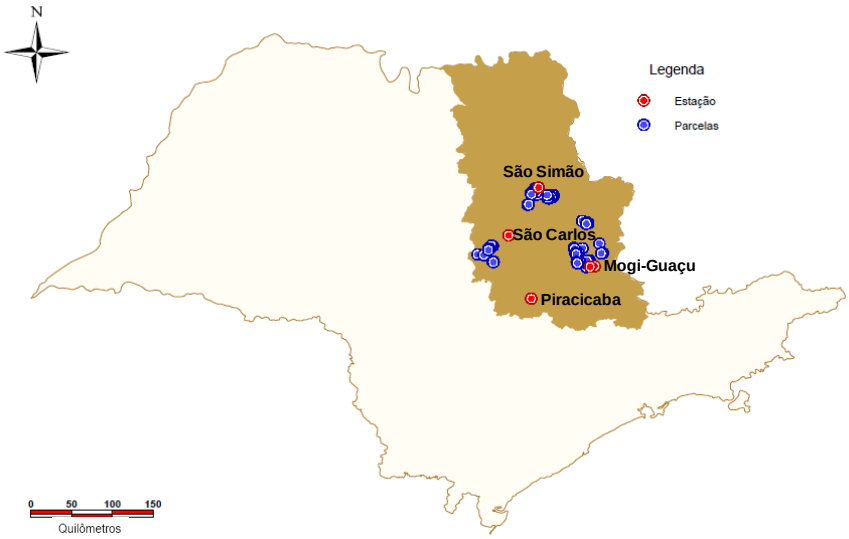

Figura 20 – Localização da área de estudo: nordeste do estado de São Paulo (coloração marron escuro) com parcelas distribuídas ao longo das regiões de Mogi-Guaçu, Brotas e São Simão (pontos azuis) e a localização das estações meteorológicas em Piracicaba, Mogi-Guaçu, Aguaí, São Carlos e São Simão (pontos vermelhos)

A metodologia adotada para a determinação dos pares de parcelas gêmeas adotou a estratificação de 2.830 parcelas de inventário contínuo da empresa em três regiões (Mogi-Guaçu, Brotas e São Simão) e quatro classes de idade (classe I - 2,0 a 2,9 anos; classe II - 3,0 a 3,9 anos; classe III - 4,0 a 4,9 anos; e classe IV - 5,0 a 5,9 anos) (FERREIRA, 2007).

Em cada estrato foram selecionadas, aleatoriamente, de 10 a 15 parcelas para compor as parcelas controle, as quais foram adubadas com a dosagem de fertilizante tradicionalmente utilizada pela empresa, assim como a operação de mato-competição. Na vizinhança, ente 15 a 30 metros, instalaram-se parcelas semelhantes, de manejo intensivo com fertilização extra e maior controle de mato-competição. Para o estudo de calibração e validação do modelo 3-PG foram utilizados 113 blocos ou pares de parcelas retangulares, com áreas variando entre 320 a 500 m^2 (tabela 5).

As parcelas controle tiveram a recomendação de adubação da empresa na época de plantio e receberam de 36 a 47 kg N ha^{-1}, 30 a 50 kg P ha^{-1}, 60 a 170 kg K ha^{-1} e 190 a 800 kg Ca ha^{-1}. As parcelas de manejo intensivo receberam adubações extras ao longo de 24 meses totalizando 400kg N ha^{-1}, 160 kg P ha^{-1} , 350 kg K ha^{-1}, 500 kg Ca ha^{-1} mais Mg, S e os micronutrientes, aplicados em abril de 2004, janeiro 2005 e abril de 2005 (FERREIRA; STAPE, 2009).

Tabela 5 - Caracterização dos 113 blocos de parcelas gêmeas distribuídos nas regiões de Mogi-Guaçu, Brotas e São Simão por classe de idade na data de instalação da parcela ocorrida em 2004 e tipo de solo (LVA Latossolo vermelho amarelo; LV Latossolo vermelho; PVA Argissolo vermelho amarelo; RQ Neossolo quartzarênico)

Região	**Número Parcelas**	**Classe de Idade (na instalação)**	**Tipos de solo**
Mogi-Guaçu	52	2,0 - 2,9 (23%) 3,0 - 3,9 (48%) 4,0 - 4,9 (17%) 5,0 - 5,9 (12%)	LVA (62%) LV (21%) PVA (31%)
Brotas	27	2,0 - 2,9 (37%) 3,0 - 3,9 (41%) 4,0 - 4,9 (15%) 5,0 - 5,9 (7%)	RQ (100%)
São Simão	34	2,0 - 2,9 (38%) 3,0 - 3,9 (32%) 4,0 - 4,9 (15%) 5,0 - 5,9 (15%)	RQ (80%) LVA (11%) LV (9%)

As três regiões de estudo caracterizam-se pela ocorrência do clima Cwa (Köppen) e distintas situações edáficas:

Região I: Município de Mogi-Guaçu (22°21’S, 48°58’W). Os solos predominantes da região são Latossolo vermelho amarelo, Latossolo vermelho escuro e Argissolo vermelho amarelo;

Região II: Município de Brotas (22°13’S, 48°01’W). Os solos predominantes da região são Neossolo quartzarênico (figura 21);

Região III: Município de São Simão (22°29’S, 47°34’W). Os solos predominantes na região são Latossolo vermelho amarelo e Neossolo quartzarênico.

Figura 21 - Imagem das parcelas gêmeas na regional de Brotas após a colheita e plantio das áreas vizinhas, com plantio comercial. Cada bloco de parcela é constituído por uma parcela controle e outra parcela de manejo intensivo, nesta figura são vistos 3 blocos de parcelas

A colheita florestal nas áreas comerciais ao redor do experimento ocorreu quando o povoamento completou aproximadamente 7 anos, os blocos de parcelas gêmeas instalados na classe de idade classe III (4,0 a 4,9 anos) e IV (5,0 a 5,9 anos) não foram cortados, sendo conduzidos isoladamente até completarem 9 e 10 anos respectivamente (figura 22).

Figura 22 – Parcela gêmea na região de Mogi-Guaçu 8 meses após a colheita, com plantio no entorno

3.2.1.3 Material genético

O material genético estudado foi o clone H13, selecionado pelo programa de melhoramento de *Eucalyptus urophylla* da International Paper em 1982 em um teste de progênie de um pomar de sementes com sementes procedentes de Rio Claro (SP).

Desde sua seleção o clone H13 vem sendo plantado comercialmente não só nas áreas da International Paper, mas em muitas regiões do Brasil, podendo ser considerado como um dos clones mais plantado na década de 90, graças ao bom crescimento e qualidade da madeira.

Porém nos últimos anos, com a disseminação da doença ferrugem do eucalipto, causada pelo fungo *Puccinia psidii*, este clone, altamente suscetível, vem sendo substituído por outros com resistência genética à doença.

3.2.1.4 Análise do crescimento e resposta à fertilização

3.2.1.4.1 Medições dendrométricas e Índice de Área Foliar

As parcelas foram mensuradas no momento da instalação do experimento (plantio com 2 a 6 anos de idade) e após 12, 24 e 48 meses. Mediu-se o diâmetro da árvore à altura do peito (DAP) de todas as árvores, a altura total de 15 árvores e altura das quatro dominantes. A altura das árvores restantes foi estimada pela equação hipsométrica deste clone (equação 18).

$$Ht = -8{,}9959 + 0{,}5487 HDOM + 4{,}5281.\ln(DAP) + 0{,}4126(DAP) \qquad (18)$$

Em que Ht refere-se a altura total da árvore em metros, HDOM altura das árvores dominantes em metros e DAP é o diâmetro da árvore à altura do peito em cm.

No início de 2008, ao final da experimentação, fez-se uma campanha de campo para determinar o índice de área foliar (IAF), área foliar específica, densidade da madeira e biomassa das árvores.

Foi derrubada uma árvore de volume médio por parcela, totalizando 226 árvores, para cubagem do tronco e coleta de folhas da copa. Esta árvore média foi selecionada com base no último inventário.

A cubagem consistiu na medição da circunferência das toras de árvores com e sem casca nas posições: base, 1,3 metros; 50% da altura comercial e na altura comercial. Posteriormente determinou a equação volumétrica da árvore por Schumacher & Hall. Nessas mesmas árvores, foram extraídos discos de madeira, com espessura de 5 cm, nas posições do DAP (1,30 m) e 50% da altura comercial a fim de determinar a densidade básica da madeira a fim de estimar a biomassa de madeira das parcelas. De cada disco de madeira amostrado, duas cunhas foram extraídas para a determinação da densidade básica pelo método da balança hidrostática (BARRICHELO; FOELKEL; BRASIL, 1971).

Como a amostragem ocorreu no final de ciclo do plantio, as idades das parcelas variaram de 6 a 10 anos. Desta forma, para a determinação das estimativas volumétricas nos inventários realizados em idades mais jovens da parcela, foi necessário utilizar-se da equação de volume padrão da empresa para este clone, a fim de obter boas estimativas (equação 19). A equação da densidade básica da madeira em função da idade (equação 20) foi ajustada com dados medidos no clone H13 para levantamentos de qualidade da madeira na empresa (FERREIRA, 2007).

$$Vol = \exp(-10{,}0495 + 1{,}8635\ln(DAP) + 1{,}0436\ln(Ht)) \qquad (19)$$

Em que Vol refere-se ao volume de madeira por árvore em m^3, DAP é o diâmetro à altura do peito em cm e Ht é a altura total em metros.

$$Densidade = 424 + 11{,}546(idade) \qquad (20)$$

Onde a densidade é expressa em kg m^{-3} e idade em anos.

A biomassa de tronco foi calculada por parcela pela multiplicação do volume da parcela pela densidade básica da madeira e expandida para hectare com base na área da parcela.

Nas mesmas árvores cubadas, fez-se a amostragem de folhas para a determinação da área foliar específica (figura 23). Coletaram-se 120 folhas no terço superior da copa, estratificado em 30 folhas por pontos cardiais. Com estas folhas ainda frescas, mediram-se as áreas foliares usando o equipamento LICOR 3100 (LI-Cor, EUA). Após isso, estas folhas foram secas em estufa de fluxo contínuo a 65º C até peso constante e determinou-se a massa seca por amostra usando uma balança de precisão. A relação entre a área foliar dividido pelo peso da massa seca forneceu a área foliar específica.

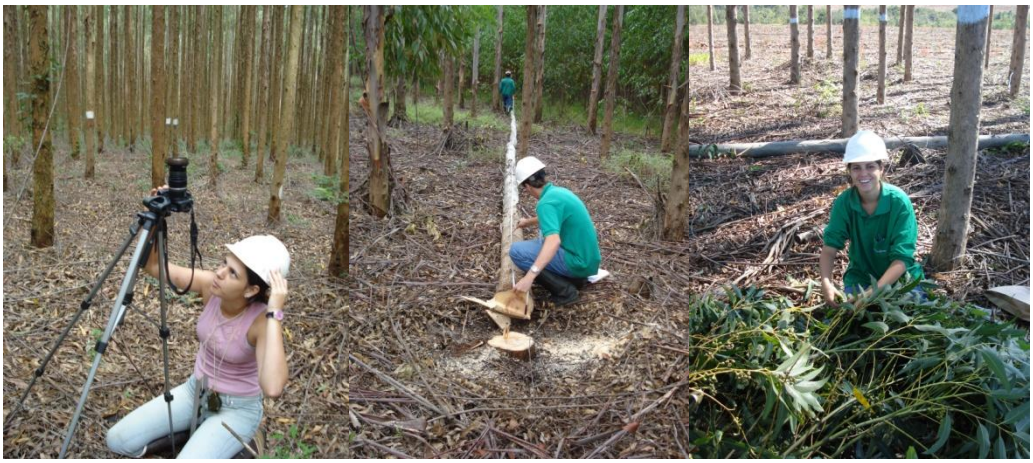

Figura 23 - Coleta de campo, 1. Fotografia hemisférica do dossel; 2. Derrubada da árvore média, cubagem e remoção de discos para fazer densidade básica da árvore; 3. Coleta de folhas para determinar a área foliar específica

Estimativas do IAF das parcelas gêmeas foram obtidas pelo método de fotografias hemisféricas digitais do dossel (figura 24), analisadas pelo programa de computador HEMISFER ® 1.3.1. A sobreposição e angulação de folhas e tronco são corrigidas pelo software.

Para capturar as imagens, máquina fotográfica digital FinePix S5000 com lente “Olho de Peixe” (Lante Nikon Fish Eyes FC – E9) foi acoplada a um tripé e posicionada paralelamente ao dossel voltada ao Norte Geográfico. Em cada parcela foram fotografádos 10 pontos por parcela distribuídos sistematicamente na linha e entre-linha do plantio, uma no

centro da parcela e quatro nas extremidades, deixando duas linhas e duas plantas como bordadura.

A coleta da imagem foi realizada nos meses de janeiro, fevereiro e de março de 2008, no período das 7- 10 horas da manhã e após as 3 horas da tarde, evitando a incidência direta dos raios solares na lente da máquina e posteriores complicações de interpretação.

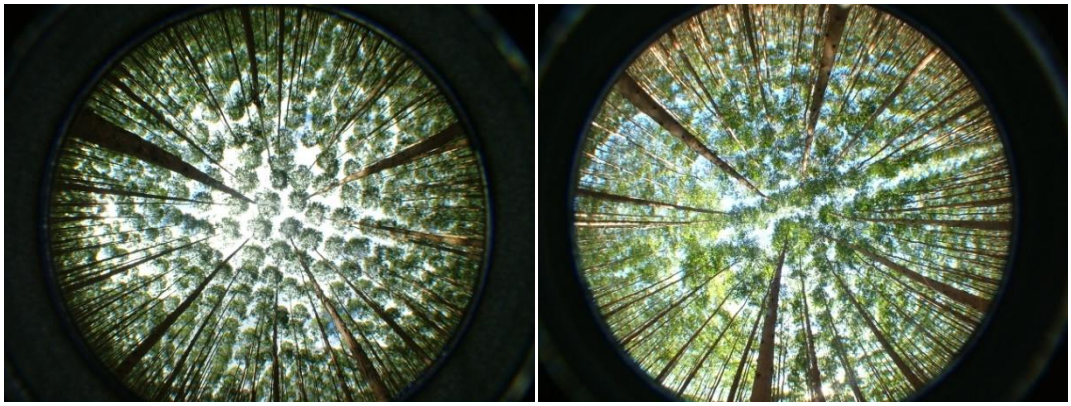

Figura 24 – Exemplo de fotografia hemisférica: imagem do dossel obtida pela máquina fotográfica FinePix S5000 com lente Fish Eyes

Os valores de IAF obtido pelo Hemisfer 1.3.1 foram corrigidos usando o IAF determinado de forma destrutiva. Para isso, em quatro talhões de plantios comerciais com idade variando de 2 a 5 anos, foram selecionadas aleatoriamente parcelas de inventário para representar o crescimento da floresta naquela região. Nestas parcelas estimou-se o volume dos troncos, pelas medições das alturas e DAPs e o IAF pelo método de fotografias hemisféricas do dossel realizadas sistematicamente em 5 pontos na parcela.

Dada a amplitude de variação do DAP pelo inventário, calcularam-se seis DAP eqüidistantes, e árvores ao redor da parcela (até 15 metros) foram derrubadas para amostragem da copa. Estas árvores foram cubadas e todas folhas da copa foram pesadas no campo, extraindo-se amostras foliares para determinação da massa seca e área foliar específica, afim de determinar o IAF.

Os IAF obtidos de forma destrutiva foram confrontados com o IAF estimado pelo método de fotografia hemisférica analisadas no Hemisfer 1.3.1, obtendo a equação 21.

$$IAFc = 2{,}2078.(IAFest) - 0{,}5417 \qquad R^2 = 0{,}8463 \tag{21}$$

No qual IAFc refere-se ao índice de área foliar corrigido (m^2folha m^{-2}solo) e IAFest é o índice de área foliar estimado pelo método de fotografia hemisférica (m^2folha m^{-2}solo).

3.2.1.4.2 Análise das variáveis químicas e físicas do solo

Coletas de solo para análise das variáveis químicas e físicas foram feitas na parcela de tratamento controle logo após o término da instalação do experimento. Foram coletadas duas amostras compostas extraídas na linha e entre linha de plantio na profundidade de 0-20 cm. Segundo Gonçalves et al. (1990) a faixa do perfil do solo, 0-20 cm, possui as propriedades físicas e químicas mais relacionadas com a qualidade de sítio.

As variáveis químicas analisadas foram: pH em $CaCl_2$ pelo método colorimétrico, a porcentagem de matéria orgânica, teor de P-resina extraído pelo método de colorímetro, Ca, K, Mg por absorção atômica e o teor de Al por titulometria. Com estas variáveis foram determinados a soma de bases (SB = Ca + K + Mg), capacidade de troca catiônica [T = SB + (H+Al)] e saturação por bases [V% = (SB/T) x 100]. Na análise física as variáveis analisadas foram porcentagem de areia, argila e silte.

3.2.1.4.3 Cálculo do crescimento das árvores e da resposta a fertilização

O crescimento das árvores dos tratamentos foi analisado por meio do incremento corrente anual médio calculado no período entre o dado de inventário coletado no momento da instalação do experimento e ao final da experimentação, após 4 anos (equação 22).

$$ICAM = \frac{BIOM_f - BIOM_i}{I_f - I_i} \quad (22)$$

Em que ICAM refere-se ao incremento anual médio em Mg ha^{-1} ano^{-1}, BIOM é a biomassa de madeira em Mg ha^{-1} no início da experimento (i) e na última medição de inventário (f), I é a idade.

A resposta à fertilização (RF) de cada bloco experimental foi calculada com base na equação utilizada por Stape (2002) que utiliza a diferença entre o incremento da parcela com manejo intensivo menos o incremento da parcela controle ajustada pela biomassa inicial

média das parcelas (equação 23). Este ajuste é realizado para atenuara influência da biomassa inicial entre os tratamentos de um bloco.

$$RF = \left(\frac{ICAM_B}{BIM_B} - \frac{ICAM_A}{BIM_A} \right) . \left(\frac{BIM_B + BIM_A}{2} \right) \quad (23)$$

Onde RF refere-se à resposta à fertilização, ICAM ao incremento corrente anual em Mg ha^{-1} ano^{-1}, BIM é a biomassa inicial das parcelas em Mg ha^{-1}, A e B designam os tratamentos controle e manejo intensivo respectivamente.

Após a determinação da resposta à fertilização para cada bloco experimental, esta foi correlacionada com as variáveis químicas do solo coletadas nas parcelas, usado o coeficiente de correlação de Pearson, processado no software SAS 9.2. Nesta etapa, utilizou-se de 94 pares de parcelas gêmeas as quais continham o inventário após 48 meses de instalação.

3.2.1.5 Calibração e Validação do modelo 3-PG

Na calibração do modelo 3-PG utilizou-se de 20% dos pares de parcelas gêmeas estratificadas por tipo de solo: Argisolo vermelho-amarelo (PVA), Latossolo vermelho escuro (LV), Latossolo vermelho-amarelo (LVA) e Neossolo quartzarênico (RQ). A seleção dos pares de parcelas foi feita de forma sistemática após ordenamento da biomassa do tronco aos cinco anos de idade das parcelas de manejo intensivo dentro de cada tipo de solo.

Os processos de calibração e validação do modelo 3-PG foram constituídos por 4 etapas: i) calibração das parcelas de manejo intensivo, adotando o valor do modificador fertilidade (FR) igual a 1; ii) calibração das parcelas controle, quando somente o FR foi ajustado iii) validação do modelo nas cerca de 80% das parcelas de manejo intensivo não utilizadas na calibração; iv) validação da equação do FR usando as parcelas controle que não foram utilizadas na calibração.

Na calibração ocorrida na etapa i, os parâmetros ajustados foram taxa de partição folha/ tronco (DAP 2 e 20 cm), e fração máxima e mínima da produtividade primária líquida (PPL) destinada para raiz (LANDSBERG; WARING, 1997; LANSBERG et al., 2001; WARING; MACDOWELL, 2002, STAPE et al. 2004b).

Na calibração etapa ii foram utilizados os mesmos parâmetros ajustados na primeira etapa, e somente o FR foi ajustado. Uma vez ajustado o FR por parcela, este foi

correlacionado com as características químicas provenientes de sua respectiva análise química para determinação da equação representativa do FR para os tipos de solos analisados. Para selecionar as variáveis que mais explicavam o FR usou a regressão estatística *stepwise* do SAS 9.2.

Na validação, etapas iii e iv, utilizaram-se as parcelas não utilizadas na calibração, e os mesmos parâmetros determinado na calibração foram usados na parametrização. O FR adotou valor igual a 1 na validação utilizando-se do tratamento manejo intensivo. Para o tratamento controle o FR foi calculado com base na equação ajustada na etapa de calibração para este mesmo tratamento.

Como variável respostas para avaliar o desempenho do modelo durante a fase de calibração, utilizou-se da biomassa do tronco (Mg ha^{-1}) e o IAF (m^2folha m^{-2}solo).

3.2.1.5.1 Parametrização

Os parâmetros calibrados no estudo anterior para o tratamento TN (fertilizado e sem irrigação) foram utilizados na parametrização do modelo 3-PG para os diferentes tipos de solos.

A versão do modelo utilizada foi a 3-PG 2.7, com a modificação para disponibilidade de água no solo (proposta desta tese). Trabalhou-se com a planilha denominada “Multisite”.

3.2.1.5.2 Dados de entrada

Os dados de entrada exigidos pelo modelo são as variáveis climáticas, edáficas, biométrico e características locais.

- *Variáveis climáticas*

As variáveis climáticas mensais de temperatura máxima (^oC), temperatura mínima (^oC), precipitação (mm) e radiação global (MJ m^{-2} $mês^{-1}$) foram coletados em 5 estações meteorológicas distribuídas ao longo da região de estudo, localizadas nos municípios de Aguaí, Mogi-Guaçu, Piracicaba, São Carlos e São Simão (tabela 6), no período de 1998 a 2008 (figura 20) .

As estações de Mogi-Guaçu, São Carlos e São Simão possuem coletas de precipitação, temperatura máxima e mínima. Na estação de Aguaí só foram coletados dados de precipitação, dados de temperatura máxima e mínima foram completados pela coleta na estação meteorológica mais próxima, a de Mogi-Guaçu. A estação de Piracicaba é a mais completa, possui dados de temperatura máxima e mínima, precipitação e radiação global.

Tabela 6 - Características das estações meteorológicas: Proprietário, período de funcionamento, localização espacial (latitude, longitude e altitude)

Município	**Proprietário**	**Funcionamento**	**Latitude (S)**	**Longitude (W)**	**Altitude (m)**
Aguaí	Microbacia IP	2001 – 2011	-22º21’00”	-48º55’48”	653
Mogi-Guaçu	Fábrica IP	1964 – 2011	-22º21’00”	-48º58’48”	608
Piracicaba	ESALQ	1997-2011*	-22º42’36”	-47º37’48”	546
São Carlos	INMET	1961 – 2011	-22º00’36”	-47º52’48”	875
São Simão	INMET	1961 – 2011	22º28’48”	-47º33’00”	668

* Estação automática da ESALQ

A radiação global (Rg) é um dado climático necessário para o modelo 3-PG, pois a radiação fotossinteticamente ativa é a base para o cálculo do carbono assimilado e, consequentemente, estimativa do crescimento florestal. Porém é uma variável de difícil obtenção, pois a maioria das estações meteorológicas não a registra.

Sendo assim, foi necessário ajustar uma regressão para estimar a Rg para as estações que não possuíam este tipo de medição. Para isso, analisou-se as variáveis climáticas aplicadas em outros modelos de estimativa da Rg (CONCEIÇÃO; MARIN, 2007): temperatura máxima média mensal, temperatura mínima média mensal, amplitude da temperatura média mensal mínima e máxima e precipitação mensal, usando dados da estação meteorológica de Piracicaba, para o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2008 (mesmo período do estudo). A variável que melhor estimou a Rg foi definida usando-se o procedimento de regressão estatística *stepwise* do SAS 9.2.

De posse da variável independente criou-se uma regressão linear no proc glm do SAS (equação 24).

$$Rg = -17{,}42 + 1{,}22.(T\max) \qquad (24)$$

A radiação global incidente (Rg, em MJ m^{-2} $mês^{-1}$) em Piracicaba foi altamente correlacionada com a temperatura máxima média mensal (Tmax, R^2=0,73, p <0,0001).

- *Variáveis edáficas*

A profundidade de solo e a quantidade de água máxima disponível no solo (mm cm^{-1} de solo) foram determinadas por solo e região de ocorrência das parcelas, com base no levantamento detalhado de solo (DEMATTÊ, 2000, não publicado) realizado na International Paper do Brasil.

Pela análise física realizada na parcela controle foi possível determinar a classe textural de cada parcela (arenoso, argiloso, areno-argiloso e argilo-arenoso) e para definir os valores dos fatores do modelo 3-PG: c_θ e n_θ, usando os valores sugeridos por Landsberg e Waring (1997) de acordo com a textura.

- *Variáveis biométricas*

A idade inicial para a modelagem de crescimento florestal foi de 12 meses. Nesta mesma idade, determinou-se a altura inicial, biomassa inicial de tronco, folha e raiz com base nos dados do BEPP 12 meses. E o estoque de madeira de fuste foi calculado com base nos dados de inventário das parcelas e espaçamento de plantio.

3.2.1.5.3Análise estatística

Para analisar o desempenho do modelo em estimar a biomassa de tronco do *Eucalyptus*, utilizou-se da eficiência do modelo (equação 15) raiz quadrada do erro médio (equação 16) durante a calibração. Na validação utilizou-se do teste t pareado.

3.2.2 Resultados e Discussão

3.2.2.1 Análise de crescimento das árvores em resposta à fertilização

Houve diferença significativa do crescimento em biomassa do tronco entre o tratamento controle e o tratamento de manejo intensivo. As biomassas de madeira na instalação das parcelas gêmeas eram estatisticamente iguais entre os pares, com média de 54 Mg ha^{-1} (tabela 7, figura 25). Após 48 meses de experimentação, a diferença entre o tratamento de manejo intensivo e o controle se elevou para 14 Mg ha^{-1} (figura 26). O incremento corrente anual médio (ICAM) observado no tratamento de manejo intensivo foi de 29,3Mg ha^{-1} ano^{-1} enquanto que o tratamento controle foi de 26,1 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$ (ganho de

12%). Os resultados apresentados corroboram com as análises realizadas por Ferreira e Stape (2009), os quais estudaram este experimento até 24 meses após sua instalação.

Tabela 7 – Síntese das médias de biomassa de madeira no momento de instalação do experimento ($BIM_{inicial}$) e após 4 anos, no final da experimentação (BIM_{final}), área foliar específica (AFE), índice de área foliar (IAF) e densidade básica (DB) medidas no término do estudo (as letras minúsculas devem ser comparadas na linha, em que representam a diferença estatística de pelo menos 95% de probabilidade entre os tratamentos, o termo ns representa diferença não significativa)

Variáveis	Unidades	Tratamento – Manejo	
		Controle	Intensivo
$BIM_{inicial}$	Mg ha^{-1}	$52,8^{ns}$	$54,3^{ns}$
BIM_{final}	Mg ha^{-1}	$156,1^{b}$	$165,4^{a}$
AFE	m^2 kg^{-1}	$7,68^{ns}$	$7,79^{ns}$
IAF	m^2 folha m^{-2} solo	$3,29^{ns}$	$3,46^{ns}$
DB	$g.cm^{-3}$	$0,53^{a}$	$0,50^{b}$

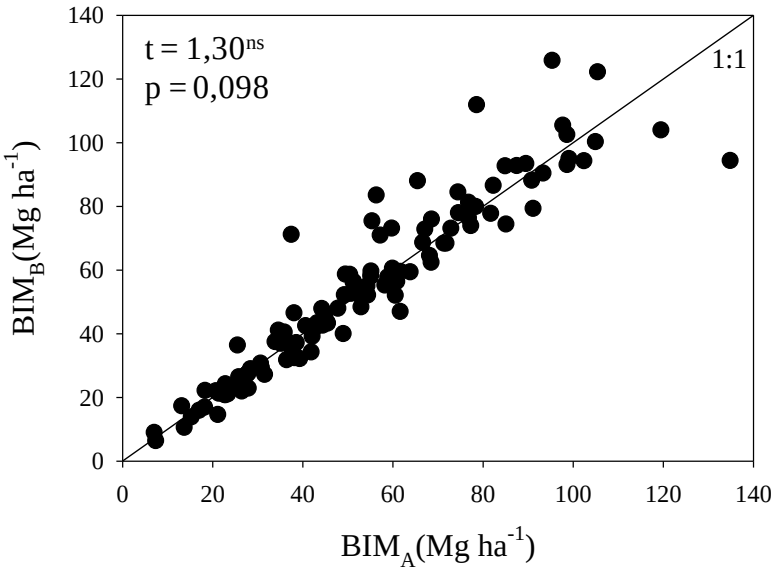

Figura 25 – Relação entre a biomassa de madeira do tratamento controle (BIM_A) e do tratamento manejo intensivo (BIM_B) no início do experimento para 113 blocos experimentais

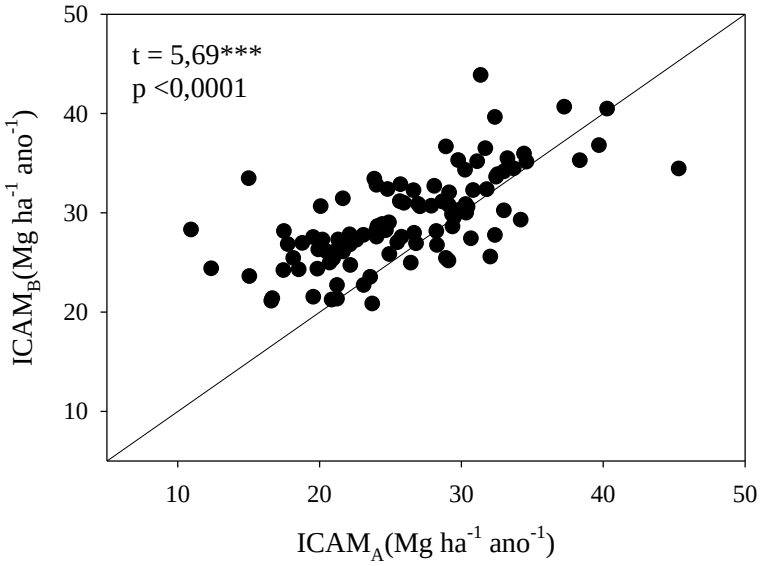

Figura 26 – Relação entre o incremento corrente médio anual do tratamento controle ($ICAM_A$) e do tratamento manejo intensivo ($ICAM_B$) no período de instalação do experimento (2003) e finalização (2007) para 103 blocos experimentais

Para uma investigação minuciosa das características fisiológicas da floresta, as quais poderiam ser afetadas pelo tratamento, foram avaliados, no final da experimentação, além do crescimento em biomassa de madeira, o comportamento foliar por meio da área foliar específica (AFE) e índice de área foliar (IAF); e a qualidade da madeira através da densidade básica da madeira.

Analisando a AFE e o IAF, verificou-se que a AFE foi estatisticamente semelhante entre os tratamentos (p = 0,5406), porém o IAF diferenciou-se entre os tratamentos ao nível de 95% de probabilidade (p = 0,0299). Assim como foi observado por Smethurst et al. (2003) em que a fertilização aumentou o IAF em 3,1 unidades de IAF para *Eucalyptus nitens*. No entanto, houve diferença estatística a 95% de probabilidade da AFE (p = 0,0013) e IAF (p < 0,0001) em relação à idade do povoamento (figura 27). A AFE tendeu a diminuir com o aumento da idade, tal como observado por Pierce et al. (1994). O IAF tendeu a elevar-se com aumento da idade, o que pode ser explicado pelo fato das parcelas mais velhas (8 a 10 anos) estarem espacialmente isoladas em função da colheita ao redor do experimento, o que gerou brotação de gemas epicórnicas ao longo do tronco (figura 22).

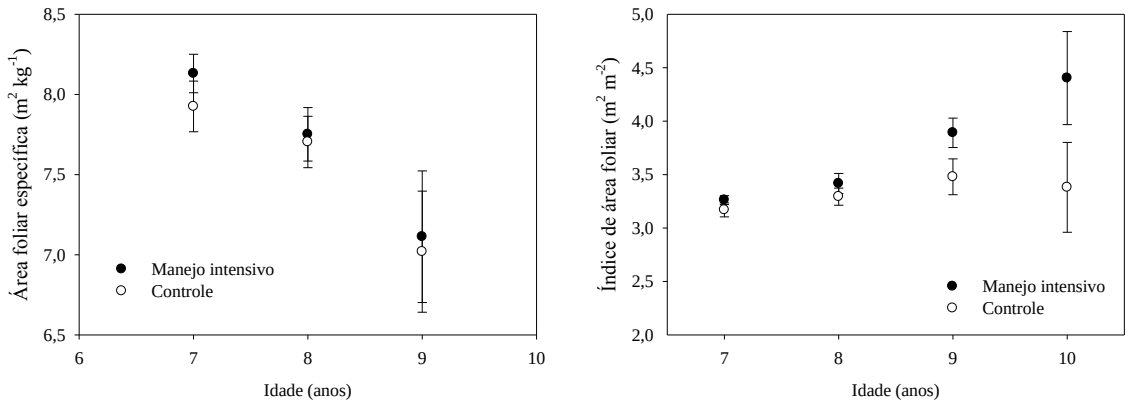

Figura 27 – Relação da área foliar específica (AFE), índice de área foliar (IAF) entre os tratamentos controle e manejo intensivo em função da idade do povoamento. A barra corresponde ao erro padrão

A densidade básica da madeira foi estatisticamente diferente entre os tratamentos (p <0,0001), com valores menores para o tratamento de manejo intensivo, afetado talvez pelo ritmo de crescimento mais acelerado devido à fertilização extra (figura 28). A densidade básica da madeira também diferenciou estatisticamente entre as idades do povoamento (p <0,0001), aumentando com a idade, assim como verificado por Ferreira (1972).

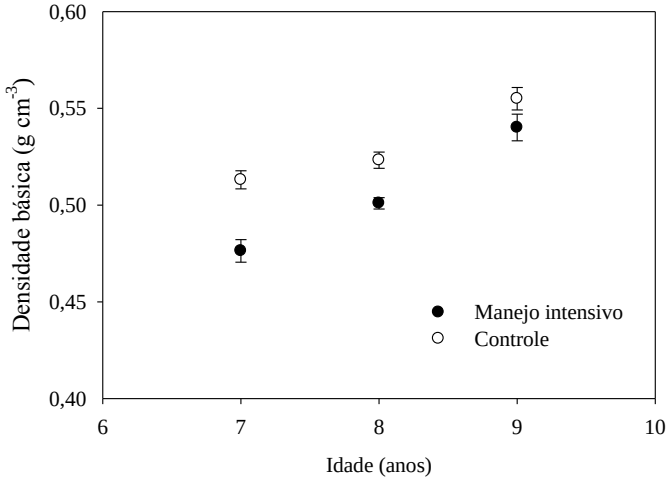

Figura 28 – Relação da densidade básica da madeira entre os tratamentos controle (círculos abertos) e manejo intensivo (círculos cheios) em função da idade do povoamento. A barra corresponde ao erro padrão

A fertilização extra do experimento não alterou o índice de área foliar, portanto a eficiência de uso da luz foi maior no tratamento de manejo intensivo, pois com a mesma quantidade de folhas a produção de biomassa de tronco foi maior. Este resultado está alinhado

com a revisão de Binkley et al., 2004, que concluíram que sob diversos gradientes ambientais e tratamentos silviculturais, os povoamentos mais produtivos tendem a apresentar maiores eficiências de uso dos recursos. Especificamente para o *Eucalyptus*, Stape et al. 2004 também observaram que esta espécie tende a aumentar a produtividade mais pelo efeito da melhoria da sua eficiência fotossintética do que pelo aumento do seu IAF, o qual é fortemente controlado pela disponibilidade hídrica.

Dos pares de parcelas analisados, 63% responderam positivamente à fertilização, sendo que a maior concentração de resposta à fertilização (32%) foi de 3,0 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$ (figura 29). Embora a resposta seja devido à fertilização e controle de ervas daninhas, credita-se o maior peso à fertilização pois o controle tradicional de mato competição da empresa assegura baixa incidência de ervas daninhas nas áreas.

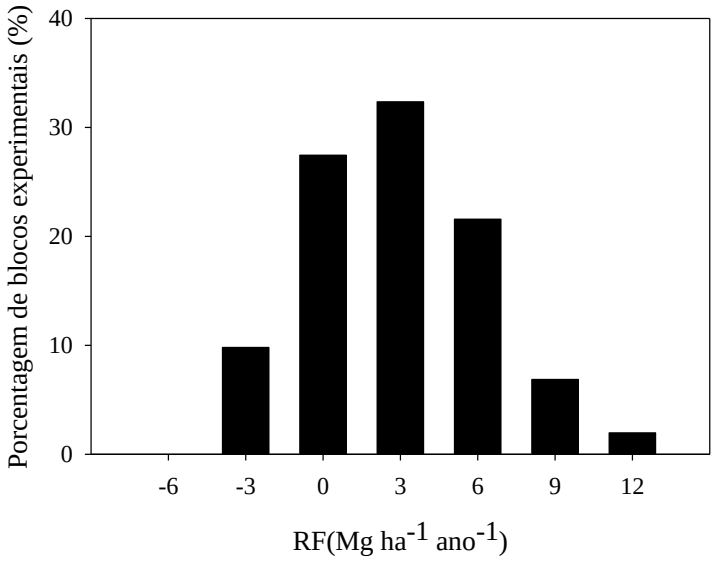

Figura 29 – Distribuição da resposta à fertilização (RF), do período avaliado em entre a época de instalação do experimento, ocorrida em 2003, e o último inventário, ocorrido antes da colheita em 2007, entre 103 blocos experimentais

O padrão de respostas à fertilização da figura 29 evidencia ampla variação dos solos em termos de responsividade à fertilização, as quais devem ser capturadas pelo fator FR do 3-PG.

3.2.2.1.1 Análise da resposta à fertilização por critério de estratificação

Com o objetivo de avaliar os porquês nas diferenças das respostas à fertilização entre os pares de parcelas gêmeas, estes foram estratificados por grupo de solos, classe de idade e região de ocorrência.

Avaliando as respostas à fertilização por grupo de solos (Latossolo vermelho – LV, Latossolo vermelho amarelo – LVA, Argissolo vermelho amarelo – PVA e Neossolo quartzarênico – RQ), verificou-se que os pares de parcelas instaladas no PVA não tiveram respostas à fertilização. Já nos solos latossolícos formado por LVA e LV as respostas à fertilização foram similares, média de 2 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$ para LVA e de 1,4 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$ para LV. O solo RQ foi o que obteve a maior respostas à fertilização com valor médio de 4,8 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$ (tabela 8), e ganho médio de 23% em ICAM devido à fertilização extra.

Não houve diferença estatística significativa entre as classes de idade para a resposta à fertilização. Diferente do que foi observado por Ferreira (2007) e Ferreira e Stape (2009), isso se deve provavelmente pelo fato de todas as parcelas já terem mais de 4 anos de ciclagem dos nutrientes aplicados.

As regiões com maiores respostas à fertilização foram Brotas e São Simão 5,1 e 4,6 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$ respectivamente. Constatou-se que as três regiões apresentam características químicas e físicas do solo diferentes (tabela 9). Houve predomínio de solos arenosos nas regiões de Brotas e São Simão, com porcentagem média de areia de 90% para a maioria dos blocos de parcelas estudadas. A região de Mogi-Guaçu foi composta por solos com maior porcentagem de argila e níveis nutricionais mais elevados de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K), sendo caracterizada como uma região com maior fertilidade do solo, o que levou às menores respostas à fertilização .

Tabela 8 – Síntese de médias de incremento corrente anual em madeira (ICAM) dos tratamentos controle (A) e manejo intensivo (B) e a resposta à fertilização (RF) avaliado em relação ao período inicial de instalação do experimento e último inventário antes da colheita por critério de grupos de solos, classe de idade (momento da instalação do experimento) e região (as letras minúsculas devem ser comparadas na coluna por critério, com base no teste de Tukey a 95% de probabilidade)

Critério	Grupo	N	$ICAM_A$	$ICAM_B$	RF
			Mg $ha^{-1}ano^{-1}$		
Grupo de Solos	LV	9	27,4	28,4	+ 2,0[b]
	LVA	34	30,0	31,7	+ 1,4[b]
	PVA	8	30,5	29,3	- 1,3[b]
	RQ	52	22,6	27,8	+ 4,8[a]
Classe de Idade	I (2-2,9 anos)	46	28,3	30,5	+ 2,8
	II (3-3,9 anos)	44	25,2	28,3	+ 2,6
	III (4-4,9 anos)	7	22,9	30,0	+ 4,5
	IV (5-5,9 anos)	6	19,1	26,4	+ 4,5
Região	Brotas	26	24,3	20,3	+ 5,1[a]
	Mogi-Guaçu	44	30,3	25,7	+ 0,4[b]
	São Simão	33	21,8	17,4	+ 4,6[a]
Total Geral		103	26,1	29,3	+ 2,9

Tabela 9 – Médias das variáveis químicas e físicas dos solos de ocorrência das 113 blocos de pares de parcelas gêmeas distribuídos ao longo das regiões de Mogi-Guaçu, Brotas e São Simão (LVA Latossolo vermelho amarelo; LV Latossolo vermelho; PVA Argissolo vermelho amarelo; RQ Neossolo quartzarênico)

Região	**Grupo solo**	**N**	**pH**	**P**	**Ca**	**Mg**	**K**	**Al**	**MO**	**V%**	**ARE**	**ARG**	**SIL**
			$CaCl_2$	**$mg.dm^{-3}$**	**$mmol_c dm^{-3}$**				**%**				
Mogi-Guaçu	LV	11	5,3	15,2	30,6	5,5	1,3	4,0	2,5	49,9	54,2	38,0	7,9
	LVA	32	4,6	16,5	21,1	4,4	0,7	5,0	2,4	38,2	61,5	33,6	6,2
	PVA	9	4,7	16,6	32,1	6,9	2,0	4,7	3,1	50,8	65,5	26,8	7,7
Brotas	RQ	27	4,1	9,0	6,8	3,0	0,4	7,5	2,1	19,2	90,3	8,1	1,6
São Simão	LV	3	4,4	11,7	12,7	5,8	0,5	4,2	2,8	30,2	68,6	27,0	4,4
	LVA	4	3,9	13,0	4,8	2,0	0,3	9,1	2,2	11,2	91,1	7,2	1,7
	RQ	27	4,1	18,0	6,5	2,9	0,3	6,4	2,1	19,7	93,2	5,5	1,4

N: número de blocos formados por pares de parcelas gêmeas; P: fósforo em resina; Ca: cálcio trocável; Mg: magnésio trocável; K: potássio trocável; MO: matéria orgânica; ARE: areia; ARG: argila; SIL: silte

Os atributos químicos do solo que mais se correlacionaram com a resposta à fertilização das parcelas (calculado pelo coeficiente de correlação de Pearson) foi a soma de base (SB), cálcio e saturação por base, os quais correlacionaram inversamente com a respostas à fertilização (tabela 10), indicando uma forte resposta à fertilização em solos menos férteis. Os solos menos férteis tendem a serem os mais arenosos.

Tabela 10 - Correlação (coeficiente de correlação de Pearson) entre à resposta a fertilização, em biomassa de madeira (RF, em Mg $ha^{-1}ano^{-1}$) e os atributos químicos do solo, na profundidade de 0 a 20 cm

Parâmetros	Coeficiente de Correlação (r)
SB ($mmol_c dm^{-3}$)	-0,49970**
Ca ($mmol_c dm^{-3}$)	-0,50086**
V (%)	-0,48608**
Mg ($mmol_c.dm^{-3}$)	-0,40907**
PH $CaCl_2$	-0,40340**
K ($mmol_c.dm^{-3}$)	-0,35539**
MO (%)	-0,25080*
P resina (mg dm^{-3})	$-0,07354^{ns}$
Al ($mmol_c.dm^{-3}$)	0,29621**

Em que ** p<0,01; *p<0,05; ns - não significativo

3.2.2.2 Calibração e Validação do modelo ecofisiológico 3-PG

3.2.2.2.1 Calibração modelo 3-PG parcelas manejo intensivo

A calibração foi realizada com 30 parcelas do tratamento de manejo intensivo, em que o FR adotou valor igual a 1. A parametrização (tabela 11) foi feita por tipo de solo: i) Neossolo quartzarênico (NQ); ii) Latossólicos (LVA e LV); iii) Argissolo vermelho amarelo (PVA).

As condições ambientais diferenciadas nas parcelas foram associadas ao clima, textura do solo e disponibilidade hídrica.

As classes texturais dos solos RQ, LV e PVA foram arenoso (S), argilo-arenoso (CL) e areno-argiloso (SL), respectivamente. A diferença textural entre os solos refletiu na capacidade máxima de água disponibilidade de água no perfil do solo para raiz, em que LV>PVA >RQ, com média de retenção máxima de água no solo nas parcelas calibradas de 1,60, 1,41 e 0,98 mm cm^{-1}solo, respectivamente.

A partição de carbono ajustada no modelo 3-PG variou segundo a disponibilidade hídrica do solo. A taxa de partição folha/ tronco no DAP = 20 cm e fração mínima de PPL destinada para o sistema radicular foram maiores nos solos RQ> PVA> LV. No entanto, a fração máxima de PPL destinada para o sistema radicular e taxa máxima de queda de folhedo foram iguais nos solos PVA e LV, conferindo a seguinte ordem: RQ> PVA=LV.

Os ajustes foram embasados na revisão sobre alocação de carbono realizada por Litton et al. (2007). Os autores verificaram que o aumento da disponibilidade de nutrientes ocasionou elevação na PPL alocada ao tronco e folhas e decréscimo na partição de carbono para as raízes e micorrizas.

O parâmetro fração da PPL alocada ao sistema radicular ajustados para os RQ apresentou valor máximo de 80% e mínimo de 25%, diferenciado dos outros solos, os quais

adotaram a fração máxima de 60% e mínima de 12%. A diferenciação na partição de carbono para a raiz em função do tipo de solo está ligada à estratégia do crescimento do sistema radicular do *Eucalyptus* para o suprimento de água, principalmente em épocas de seca, tal como foi observado no estudo de Reis et al. (1985). Os autores verificaram que a proporção de biomassa radicular de *E. grandis* variou em função da fertilidade e disponibilidade hídrica de 32% em sítio pouco fértil e com déficit hídrico a 13% em sítios fértil e menor deficiência hídrica. Mudança na estratégia de alocação de carbono em função da fertilização foi observada por Epron et al. (2011), fertilização com potássio resultou no aumento da PPB e na diminuição na fração de carbono alocado abaixo do solo (composição do sistema radicular, exudação, respiração radicular e associção com microrganismo). O mesmo padrão foi visualizado com a aplicação de sódio, no entanto, em menor magnitude. (Nouvellon et al. 2012).

Ryan et al. (2004) em plantios de *Eucalyptus saligna* no Hawai, verificaram que uma grande fração da fotossíntese produzida pela copa (32-51%) é alocada abaixo do solo, para serem utilizadas na respiração, composição de biomassa e renovação do sistema radicular, por micorrizas e exudado das raízes.

Outro parâmetro ajustado foi a taxa máxima mensal de queda de folhedo, adotando valores levemente superiores nos solos RQ (0,11) do que os outros solos (0,10), isso porque a disponibilidade hídrica também influencia na queda de folhedo.

Tabela 11 - Parâmetros do modelo 3-PG utilizado na calibração do projeto BEPP (tratamento com adubação tradicional); e os calibrados no projeto Parcelas Gêmeas para três tipos de solos: Neossolo quartzarênico (RQ), Latossolo (LV*, formado pelos solos Latossolo vermelho amarelo e Latossolo vermelho) e Argissolo vermelho amarelo (PVA)

(continua)

Parâmetros	Unidades	BEPP	Tipo de solos			Fonte
			RQ	LV*	PVA	
Partição de biomassa e renovação						
Relaçõe alométricas e partição						
Partição folha/ tronco DAP=2	-	0,7	0,7	0,7	0,7	Almeida et al. (2004a)
Partição folha/ tronco DAP=20	-	0,11	0,13	0,1	0,12	Ajustado
Coef. constância para eq. biomassa tronco/ DAP	-	0,0276	0,0276	0,0276	0,0276	Determinado
Coef. potência para eq. biomassa tronco/ DAP	-	3,1161	3,1161	3,1161	3,1161	Determinado
Fração máxima de PPL para raiz	-	0,6	0,8	0,6	0,6	Ajustado
Fração mínima de PPL para raiz	-	0,15	0,22	0,11	0,12	Ajustado
Queda de folhedo e renovação de raiz						
Taxa máxima de queda de folhedo	1 $mês^{-1}$	0,1	0,11	0,1	0,1	Ajustado
Taxa de folhedo t=0	1 $mês^{-1}$	0,001	0,001	0,001	0,001	Sands; Landsberg (2002)
Idade queda de folhedo adquire valor médio	mês	16	16	16	16	Determinado
Taxa de renovação média mensal de raiz	1 $mês^{-1}$	0,015	0,015	0,015	0,015	Sands; Landsberg (2002)
PPL e modificadores condutância						
Modificador de temperatura (f_t)						
Temperatura mínima para crescimento	^oC	8	8	8	8	
Temperatura ótima para crescimento	^oC	21	21	21	21	Stape (2002)
Temperatura máxima para crescimento	^oC	40	40	40	40	
Modificador de geada (f_{Frost})						
Dias produtivo perdidos por dia de geada	dias	0	0	0	0	Determinado

Tabela 11 - Parâmetros do modelo 3-PG utilizado na calibração do projeto BEPP (tratamento com adubação tradicional); e os calibrados no projeto Parcelas Gêmeas para três tipos de solos: Neossolo quartzarênico (RQ), Latossolo (LV*, formado pelos solos Latossolo vermelho amarelo e Latossolo vermelho) e Argissolo vermelho amarelo (PVA)

(continuação)

Parâmetros	Unidades	BEPP	Tipo de solos			Fonte
			RQ	LV*	PVA	
Modificador de água no solo (f_θ)						
Coef. textura do modificador de água no solo.	-	0,4	0,7	0,5	0,6	Landsberg; Waring (1997)
Coef. potência do modificador de água no solo.	-	3	9	5	7	Landsberg; Waring (1997)
Estrutura do dossel e processos						
Área foliar específica						
Área foliar específica para idade 0	$m^2\ kg^{-1}$	9	9,5	9,5	9,5	Determinado
Área foliar específica para folhas maduras	$m^2\ kg^{-1}$	8,5	9	9	9	Determinado
Idade para intermediária Área foliar específica	anos	2	2,5	2,5	2,5	Determinado
Interceptação da luz						
Coeficiente de extinção da luz absorvida pelo dossel	-	0,5	0,5	0,5	0,5	Almeida et al. (2004a)
Idade de fechamento do dossel	anos	1,5	1,5	1,5	1,5	Stape (2002)
Proporção máxima de chuva evaporada no dossel	-	0,15	0,15	0,15	0,15	Lima (1996)
IAF para interceptação máxima de chuva	-	3,33	3,33	3,33	3,33	
Produção e respiração						
Eficiência quântica do dossel	$molC\ molPAR^{-1}$	0,08	0,08	0,08	0,08	Stape, 2002
Razão PPL/PPB	-	0,47	0,47	0,47	0,47	Landsberg et al.(2001)
Condutância						
Máxima condutância do dossel	$m\ s^{-1}$	0,021	0,021	0,021	0,021	Mielke et al. (1999)
IAF para máxima condutância do dossel	-	3,33	3,33	3,33	3,33	
Coef. estomático em resposta ao DPV	$1\ mBar^{-1}$	0,047	0,047	0,047	0,047	Almeida et al. (2004a)
Condutância na camada limite do dossel	$m\ s^{-1}$	0,2	0,2	0,2	0,2	Landsberg; Waring (1997)
Propriedades do povoamento e madeira						
Biomassa máxima do tronco com 1000 fuste/ha	$kg\ árvore^{-1}$	300	300	300	300	Stape et al.(2004b)

Tabela 11 - Parâmetros do modelo 3-PG utilizado na calibração do projeto BEPP (tratamento com adubação tradicional); e os calibrados no projeto Parcelas Gêmeas para três tipos de solos: Neossolo quartzarênico (RQ),Latossolo (LV*, formado pelos solos Latossolo vermelho amarelo e Latossolo vermelho) e Argissolo vermelho amarelo (PVA)

(conclusão)

Parâmetros	**Unidades**	**BEPP**	**Tipo de solos**			**Fonte**
			RQ	**LV***	**PVA**	
Fração galho e casca						
Fração galho e folhas para povoamento maduro	-	0,319	0,319	0,319	0,319	Determinado
Fração galho e folhas na idade 1	-	0,093	0,093	0,093	0,093	Determinado
Idade intermediária entre a fração de galho e folhas	anos	4	4	4	4	Estimado
Densidade básica						
Densidade básica mínima - para árvores adultas	$t\ m^{-3}$	0,450	0,450	0,450	0,450	Determinado
Densidade básica máxima- para árvores velhas	$t\ m^{-3}$	0,550	0,550	0,550	0,550	Determinado
Idade intermediária entre densidade básica	anos	4	4	4	4	Determinado
Altura do tronco						
Coeficiente de constância na relação altura do tronco	-	0,9051	0,9051	0,9051	0,9051	Determinado
Coef. Potência do DAP na relação altura do tronco	-	1,194	1,194	1,194	1,194	Determinado
Coef. Potência do num. de árvores relação altura do tronco	-	0	0	0	0	Determinado
Classe do solo*	-	C	S	CL	SL	Determinado

* C = argiloso; CL= argilo-arenoso; S= arenoso; SL areno-argiloso

A calibração do modelo 3-PG em função do tipo de solo forneceu bons resultados na estimativa de biomassa de tronco e índice de área foliar para o tratamento de manejo intensivo (figura 30 e tabela 12). A eficiência do modelo (EF) em estimar a biomassa de tronco para os solos RQ e LV foi superior a 0,80.

No solo RQ, o modelo 3-PG superestimou a biomassa de tronco nas idades mais jovens do povoamento e subestimou nas idades mais velhas. A estimativa média do IAF pelo modelo 3-PG foi visualmente adequada, próximando-se ao IAF medido no campo pelo método de fotografia hemisférica. Como o IAF foi mensurado em um único período de crescimento da floresta, os pontos amostrados serviram como referência auxiliar na calibração.

A biomassa de tronco média estimada pelo modelo 3-PG para o solo LV aproximou-se muito da biomassa de tronco observada. A estimativa do IAF médio entre todas as parcelas proporcinou uma variação entre o IAF no final do ciclo entre 2,5 a 4,0 m^2folha m^{-2}solo.

A estimativa de biomassa do tronco para o solo PVA foi a menos eficiente com EF de 0,64 e raiz quadrada de erro médio de 27,24, influenciado pela grande heterogeneidade na produtividade florestal e pela baixa intensidade amostral (4 parcelas). Verificou-se uma ligeira superestimação da biomassa de tronco nas idades mais jovens do povoamento. A estimativa de IAF médio foi bem ajustada (tabela 12).

Os IAF medidos em povoamentos mais velhos (acima de 100 meses) adotaram valores maiores do que os estimados pelo modelo, podendo ser explicado pelo isolamento espacial das parcelas, o que ocasionou aumento na intensidade de luz no tronco e estimulou a brotação de gemas laterais de folhas, levando ao aumento no IAF.

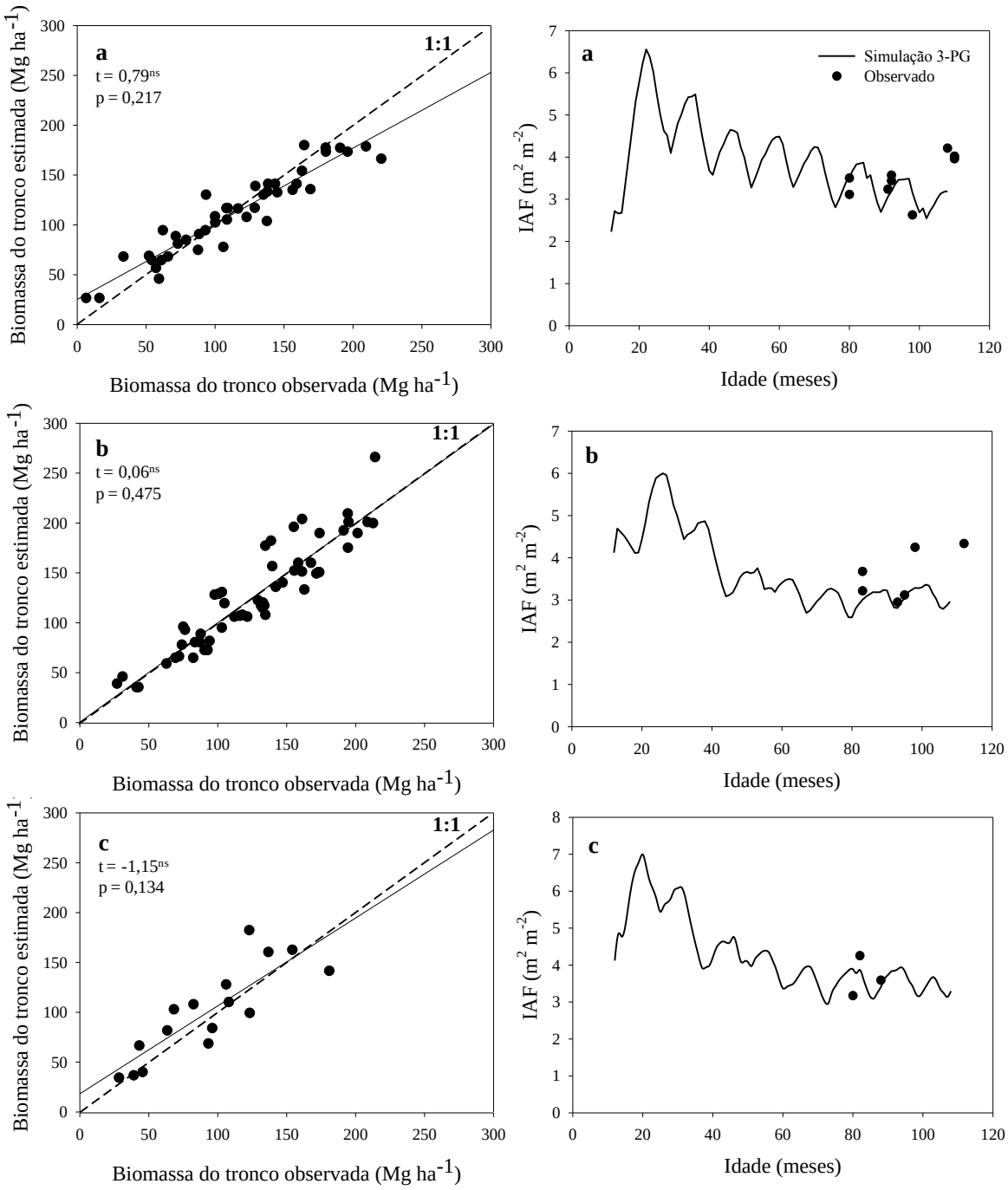

Figura 30 - Relação entre o estoque de biomassa do tronco observada (inventário florestal) e estimada pelo modelo 3-PG e o índice de área foliar (IAF) após a calibração das parcelas de manejo intensivo nos solos a) Neossolo quartzarênico; b) Latossolos; c) Argissolo vermelho amarelo. A linha pontilhada representa a relação 1:1. A linha contínua da estimativa do IAF representa um padrão médio estimado de IAF, podendo ter maior variação dentro da estimativa de cada parcela

Tabela 12 - Eficiência (EF) do modelo 3-PG e raiz quadrática do erro médio (RQME) para variável biomassa de tronco (Mg ha^{-1}) obtidos na calibração das parcelas de manejo intensivo, estratificadas segundo o solo de ocorrência Neossolo quartzarênico (RQ), Latossolos (LV*, formado por parcelas presentes nos solos Latossolo vermelho amarelo e Latossolo vermelho) e Argissolo vermelho amarelo (PV); os números de parcelas utilizadas, número de medições realizadas (N. observ.) e modificador de fertilização (FR)

Solos	EF	RQEM	N. parcelas	N. observ.	FR
RQ	0,87	14,76	11	44	1
LV*	0,83	17,14	15	58	1
PV	0,64	27,24	4	16	1

3.2.2.2.2 Validação modelo 3-PG tratamento manejo intensivo

A validação foi realizada em 83 parcelas que possuíam o tratamento manejo intensivo e confirma a eficiência da calibração do modelo para áreas que não há limitação nutricional (figura 31).

Visualmente, a estimativa média do IAF pelo modelo 3-PG teve comportamento similar aos valores coletados em campo, exceto para os povoamentos mais velhos.

Desta forma, confirma-se que a calibração do modelo 3-PG para o nordeste do estado de São Paulo foi eficiente, resultando em boas estimativas de biomassa de tronco e IAF do *Eucalyptus* para áreas sem limitação nutricional. O modelo é capaz de estimar diferentemente a produtividade de acordo com a variação climática, proporcionada pela distribuição espacial e etária das parcelas.

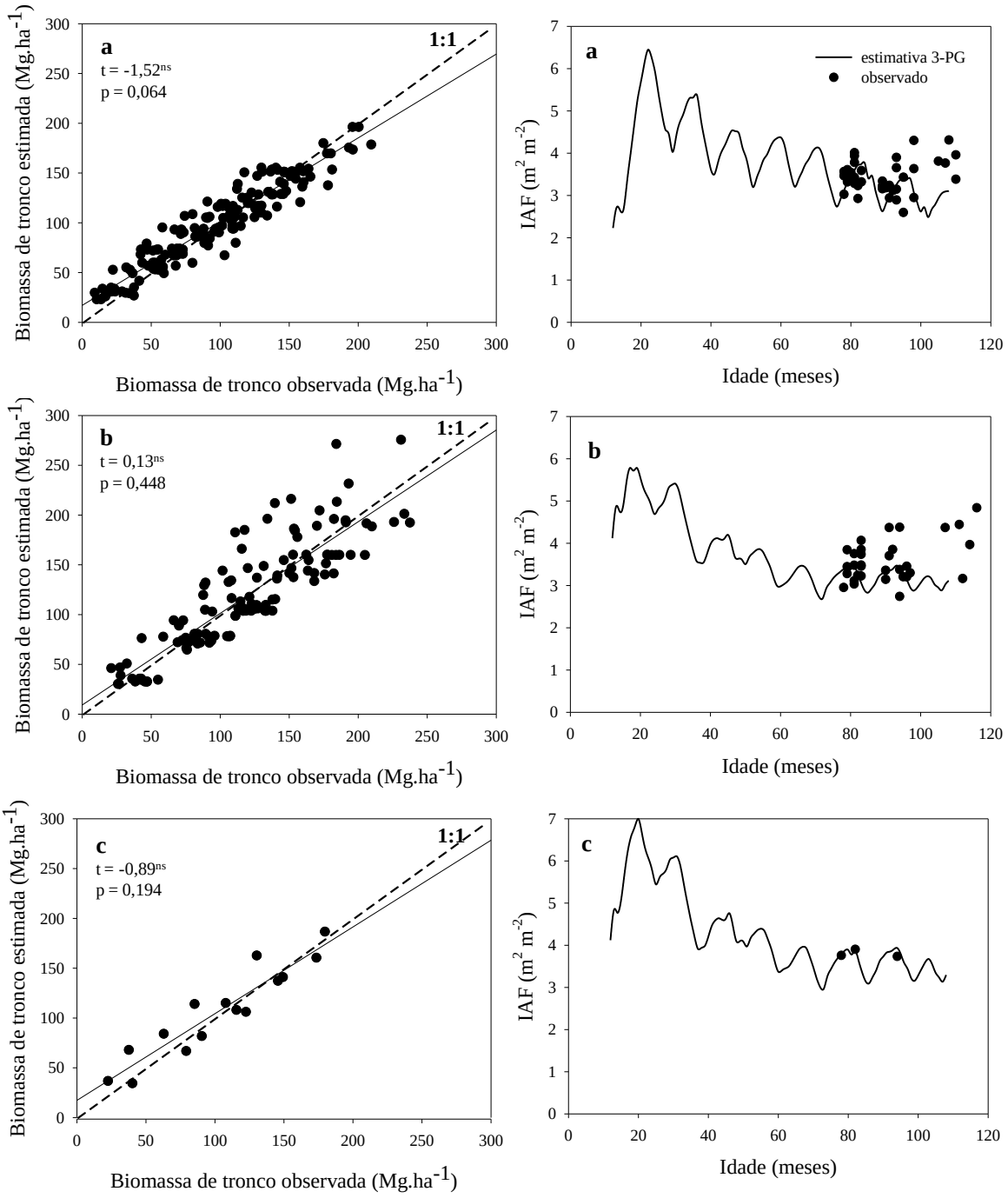

Figura 31 – Relação entre o estoque de biomassa de tronco observada (inventário florestal) e estimada pelo modelo 3-PG e o índice de área foliar (IAF) na validação do modelo 3-PG para o tratamento de manejo intensivo nos solos a) Neossolo quartzarênico; b) Latossolos; c) Argissolo vermelho amarelo. A linha pontilhada nos gráficos a relação 1:1. A linha contínua da estimativa do IAF representa um padrão médio estimado de IAF, podendo ter maior variação dentro da estimativa de cada parcela

3.2.2.2.3 Calibração modelo 3-PG nas parcelas controle e determinação do modificador fertilidade do solo

Os mesmos parâmetros ajustados na calibração das parcelas de manejo intensivo foram usados, nesta etapa porém, o FR foi ajustado com base no crescimento da floresta em relação a estimativa de produção pelo modelo 3-PG.

O ajuste do FR forneceu uma boa estimativa da biomassa de tronco por tipo de solo, eficiência do modelo superior a 0,75 (figura 32, tabela 13). O solo PV adotou valor de FR igual a 1, seguido do LV com média de 0,95 e RQ com FR médio de 0,85.

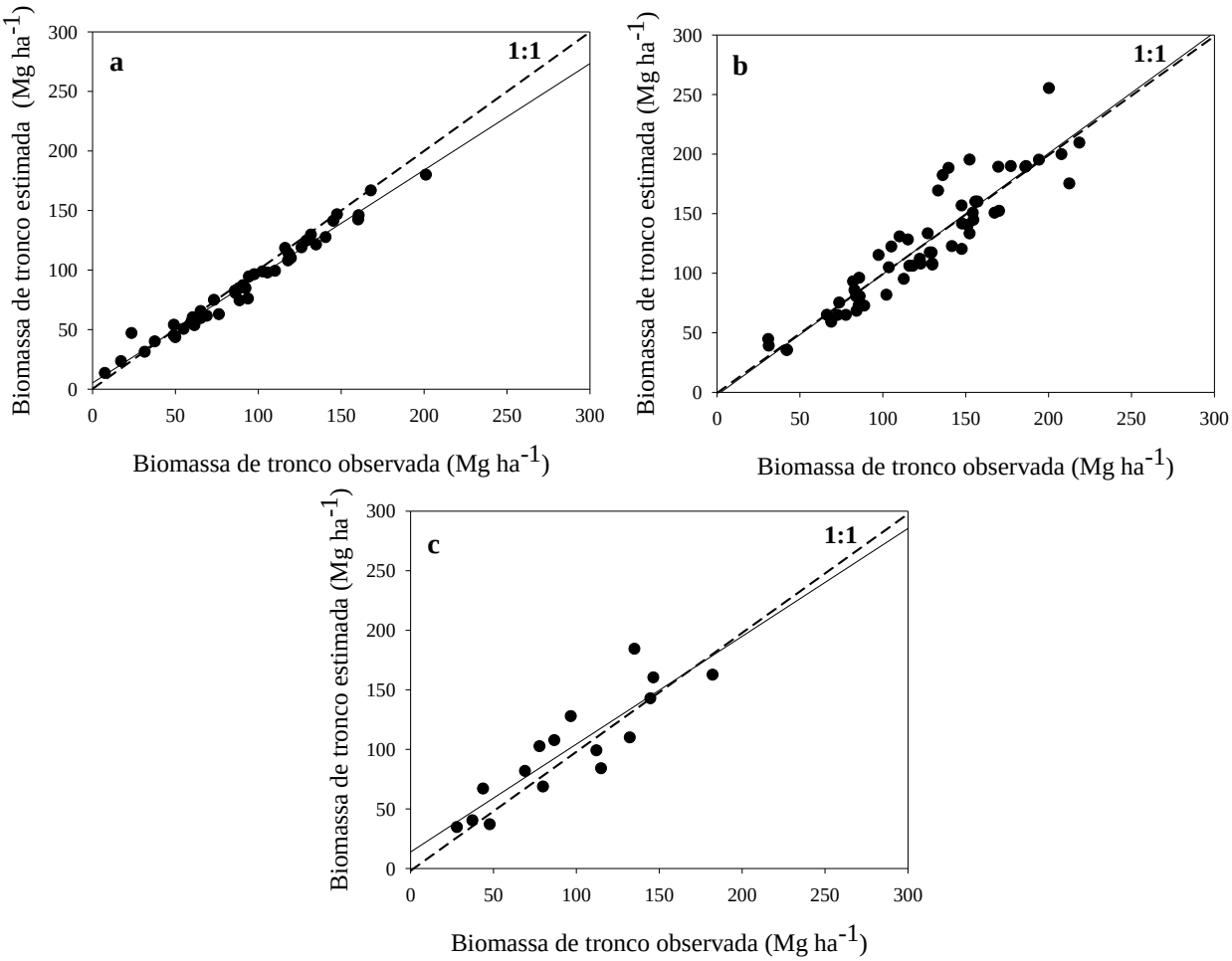

Figura 32 - Comparação do estoque de biomassa de tronco observada e estimado após a calibração das parcelas controle, nos solos: a) Neossolo quartzarênico; b) Latossolos c) Argissolo vermelho amarelo. A linha preta demonstra a correlação linear entre os dados e a linha pontilhada delimita a relação 1:1 entre a estimativa do modelo e observação

Tabela 13 - Eficiência (EF) do modelo 3-PG e raiz quadrática do erro médio (RQME) obtidos na calibração das parcelas controle, estratificadas por tipo de solo: Neossolo quartzarênico (NQ), Latossolos (LV*, formado por parcelas presentes nos solos Latossolo vermelho amarelo e Latossolo vermelho) e Argissolo vermelho amarelo (PVA); os números de parcelas utilizadas, número de medições realizadas (N. observ.) e modificador de fertilização (FR)

Solos	EF	RQME	N. parcelas	N. observ.	FR
RQ	0,90	11,52	11	32	0,85
LV*	0,82	20,26	15	39	0,95
PV	0,75	20,99	4	16	1

Os valores médios do FR por tipo de solo refletiram a reposta à fertilização (figura 33). Nota- se, que conforme aumenta a resposta à fertilização há um aumento de forma não linear no FR, de maneira similar ao padrão adotado pelas curvas de respostas à fertilização (produtividade x teor de elemento químico). As parcelas que não responderam à fertilização os FR foram iguais a 1 e as que mais responderam obtiveram valores de até 0,47.

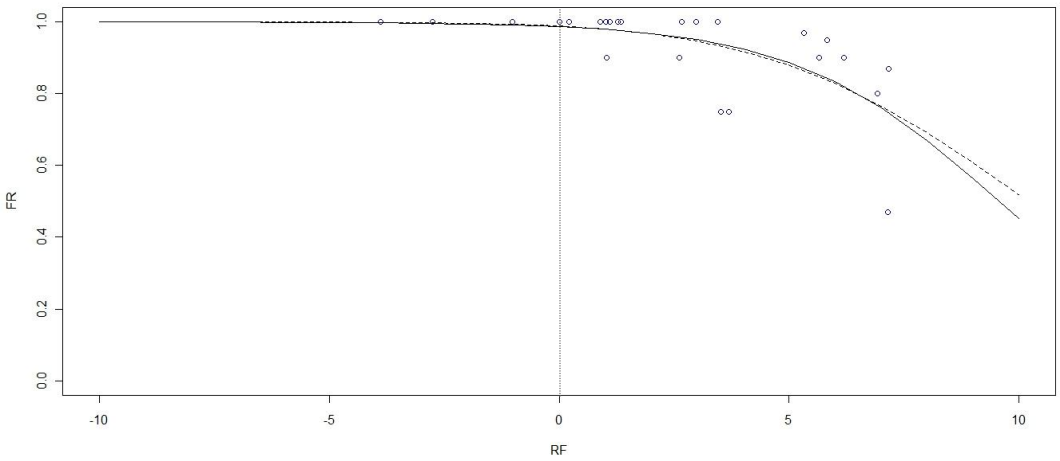

Figura 33 – Representação da resposta à fertilização (RF) e o modificador fertilidade do solo (FR)

A soma de base foi o atributo químico de maior correlação com o FR ($p < 0,05$), assim como observado na resposta à fertilização. A figura 34 apresenta a relação entre o FR e as características químicas e tipos de solo.

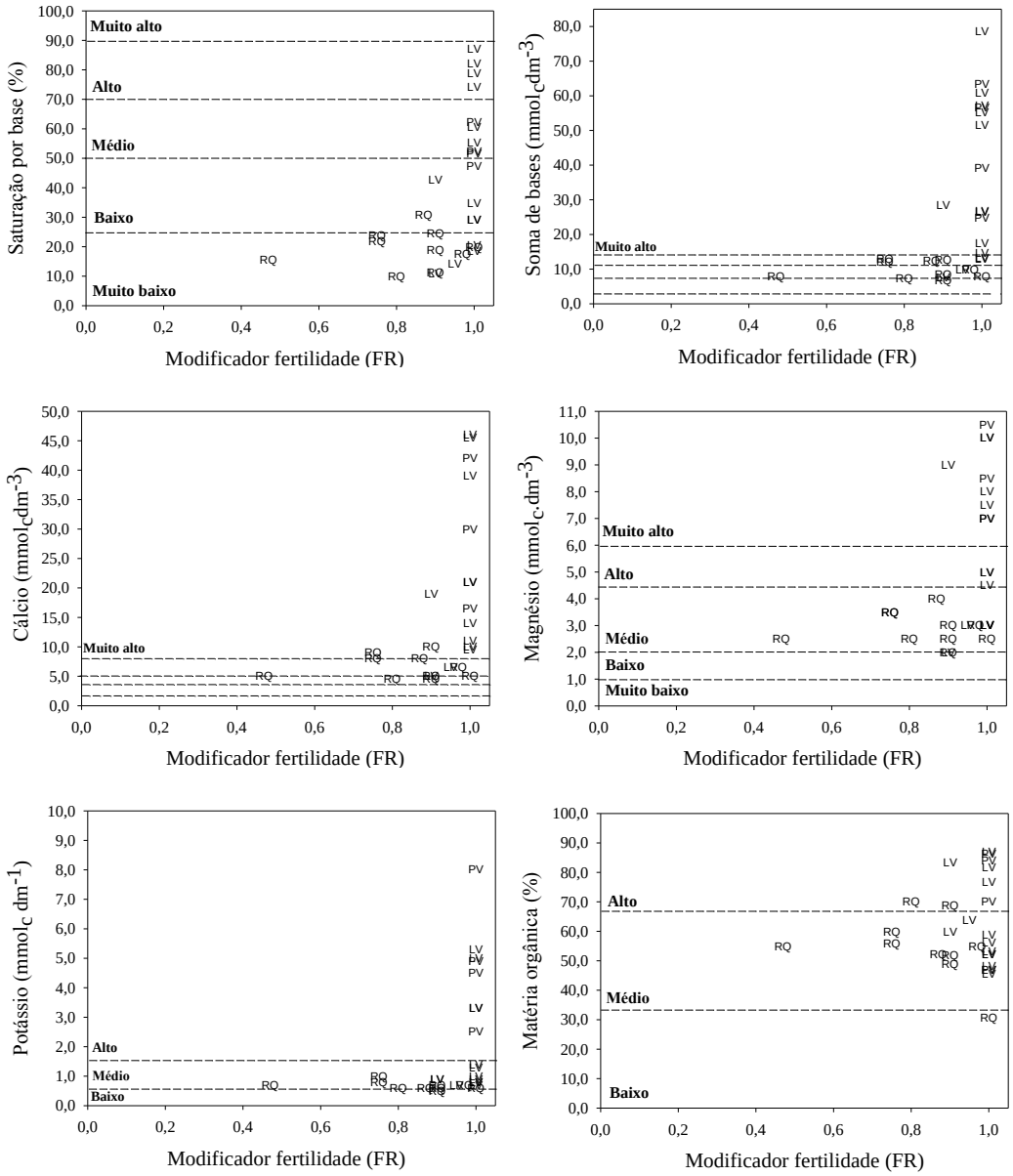

Figura 34 – Correlação entre o modificador fertilidade (FR) do modelo 3-PG ajustado e as características químicas do solo: saturação por base, soma de base, porcentagem de matéria orgânica e teores de cálcio, magnésio, potássio. As siglas representam o tipo de solo em que RQ: Neossolo quartzarênico; LV: Latossolos; PV: Argissolo vermelho amarelo. As linhas pontilhadas separam as características químicas do solo em classe de interpretação da fertilidade do solo, dividida em muito baixo à muito alto, segundo Gonçalves (2011)

Pela análise da figura 34 fica claro que as bases do solo (cálcio, potássio e magnésio) são os maiores controladores da resposta à fertilização uma vez que 100% das ocorrências de FR < 0,9 estão associados a valores muito baixos destes elementos. De forma contrastante, a matéria orgânica não apresenta este comportamento.

Como estas áreas são fertilizadas pela empresa, estes valores de FR não são os naturais do solo, ou seja, há uma menor faixa de detecção, mas que aponta para elementos como cálcio e potássio. Com base nestes dois elementos mais a soma de base, criou-se uma equação composta, em que o atributo químico mais limitante determina o valor do FR (equações 25), seguindo a teoria da "Lei do Mínimo" de Liebig. Esta teoria fundamenta-se no conceito de que o elemento em menor quantidade necessária para a planta limita tende a ter efeito limitante de crescimento. Para cada elemento foi ajustada uma equação logística (26 a 28, figura 35).

$$FR = mín\,(FR_{Ca}; FR_K; FR_{SB}) \tag{25}$$

$$FR_{Ca} = \frac{1{,}0155}{\left(1+\frac{Ca}{2{,}8710}\right)^{-1{,}4486}} \qquad R^2=0{,}34\ (p=0{,}003) \tag{26}$$

$$FR_K = \frac{1{,}0363}{\left(1+\frac{K}{3{,}9185}\right)^{-8{,}3800}} \qquad R^2=0{,}17\ (p=0{,}029) \tag{27}$$

$$FR_{SB} = \frac{1{,}0229}{\left(1+\frac{SB}{1{,}2221}\right)^{-1{,}0792}} \qquad R^2=0{,}30\ (p=0{,}004) \tag{28}$$

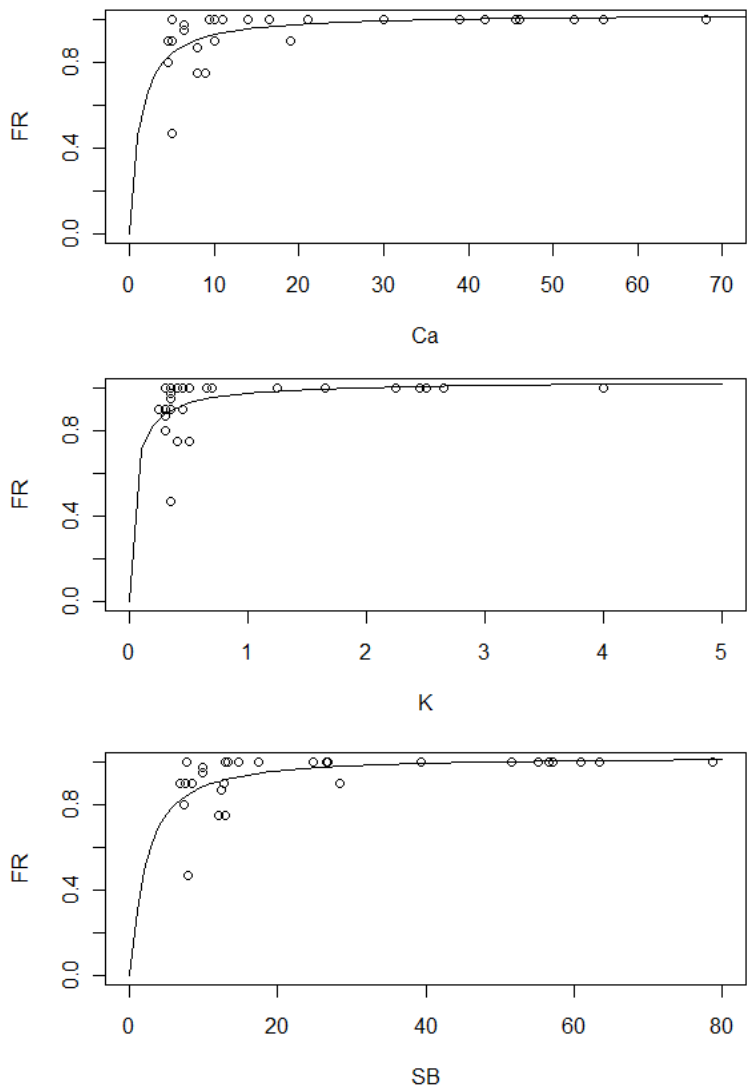

Figura 35 – Ajuste do modelo logístico para os atributos do solo: cálcio (Ca, $mol_c\ dm^{-3}$), potássio (K, $mol_c\ dm^{-3}$) e soma de bases (SB, $mol_c\ dm^{-3}$) em relação ao modificador de solo (FR) do modelo 3-PG

Em que FR é o modificador fertilidade do solo, variando de 0 a 1, FRx é o modificador fertilidade do solo para o Ca – cálcio, K – potássio e SB – soma de base. Os elementos cálcio (Ca), potássio (K) e soma de base (SB) estão expressos em $mmol_c\ dm^{-3}$. O ajuste foi feito utilizando-se somente 30 parcelas e resultou em modelos significativos, o uso de mais parcelas com o delineamento de parcelas gêmeas, espera-se que aumente a precisão para estimativa do FR com base no atributo químico do solo. Além disso, o uso de parcelas

sem fertilização seria uma alternativa para melhorar o ajuste do modelo para estimar FR mais baixo.

3.2.2.2.4 Validação modelo 3-PG tratamento controle e modificador fertilidade do solo

Pelo teste t pareado nota-se que nos solos LV e PV, locais considerados mais férteis com valores elevados de soma de base, cálcio e potássio, a equação FR representou bem a condição nutricional, adotando valores médios de FR em 0,91 e 0,98, respectivamente. No entanto, apesar do valor médio do FR estimado para RQ (0,83) ser similar ao ajustado na calibração (0,85), houve uma superestimativa inicial biomassa de tronco, resultando em um teste t pareado não significativo, porém a correlação de Pearson (r) foi alta, 0,91 (figura 36).

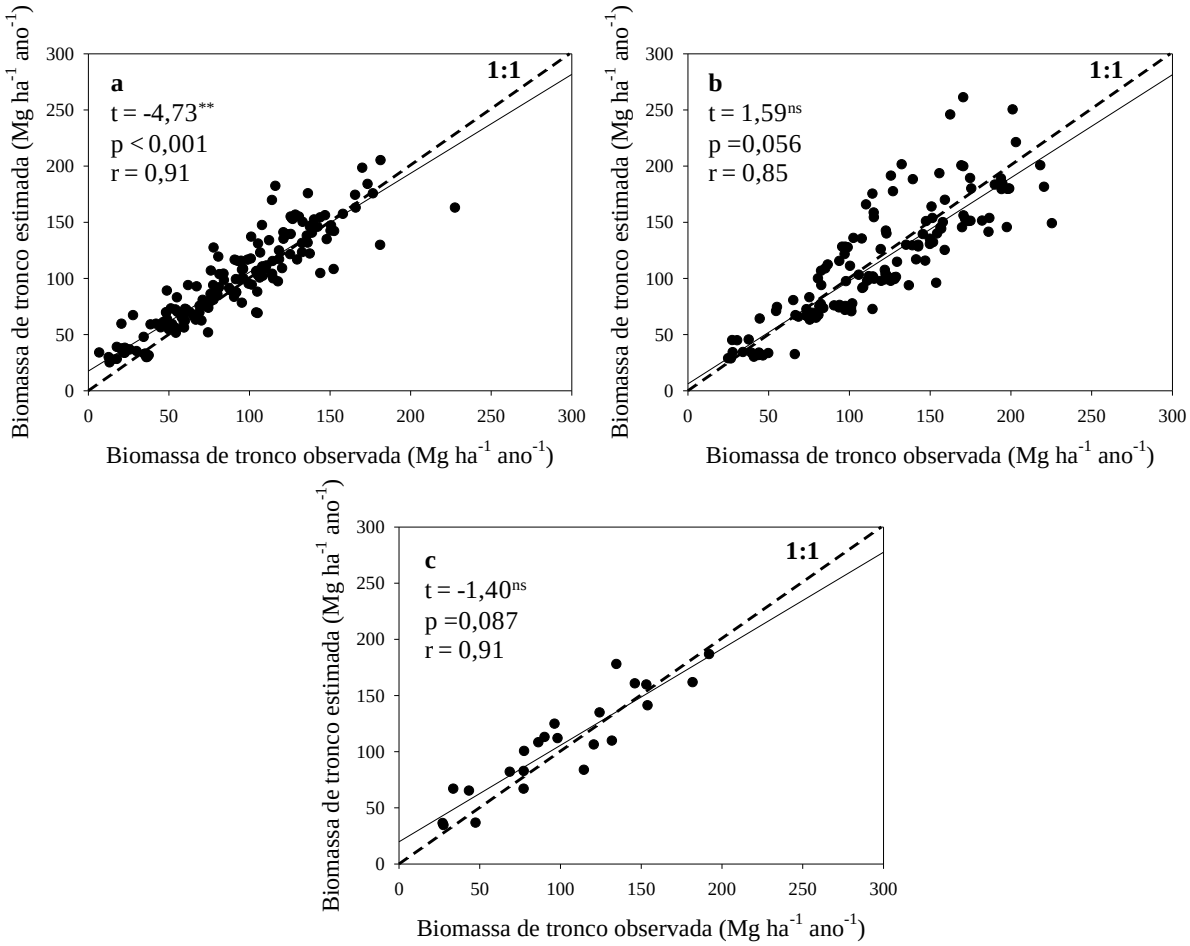

Figura 36 – Relação entre o estoque de biomassa de tronco observada (inventário florestal) e estimada pelo modelo 3-PG e o índice de área foliar (IAF) na validação do modelo 3-PG para o tratamento de controle nos solos a) Neossolo quartzarênico; b) Latossolos; c) Argissolo vermelho amarelo. A linha pontilhada representa a relação 1:1

O valor do FR do modelo 3-PG normalmente é definido de forma arbitrária, dificultando o uso das parametrizações em áreas em que não há dados de produtividade para comparar com a estimativa do modelo. Além disso, ele influencia os padrões de alocação e a

eficiência quântica do dossel ao longo de todo ciclo de crescimento. Face a isso, a estimativa objetiva do FR no 3-PG é de extrema importância. Os valores de FR já utilizados em solos brasileiros com fertilização operacional variaram de 0,40 a 1 (STAPE, 2002; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004b; ALMEIDA et al., 2007; 2010a).

Stape, Binkley e Ryan (2004b), assim como neste trabalho, determinaram o FR com base na resposta à fertilização de pares de parcela gêmeas. Estes autores trabalharam com uma escala de 0,6 a 1,0, com FR variando de acordo com a resposta à fertilização obtida na área estudada, tendo como limite máximo de resposta observada em parcelas na região de 29 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$. Estes autores identificaram que a resposta à fertilização estava inversamente relacionada aos teores de K, P e CTC do solo, porém, não estabeleceram a equação de FR.

Em uma linha diferente de estudo, Almeida et al. (2010a) compõem o FR com base não somente na fertilidade do solo, mas também em função de fatores do solo que limitam a disponibilidade de nutrientes tais como: água no solo, oxigênio, manejo e topografia, cada qual recebendo um peso diferenciado, em que o maior peso é conferido à fertilidade igual a 0,4.

Neste estudo foi possível associar a FR com os atributos químicos potássio, cálcio e soma de base, com variação de FR na validação de 0,73 a 1. Segundo Santana, Barros e Neves (2002) cálcio e potássio são possíveis nutrientes a limitarem a produção após sucessivos ciclos se não forem repostos pela adubação, principalmente devido à exportação pela colheita de madeira com casca.

Normalmente, os nutrientes limitantes à produtividade florestal estão ligados aos tratos silviculturais realizado na área de plantio, principalmente ao tipo de adubação e ao histórico do uso da terra. A limitação dos elementos potássio ou cálcio reduzindo o crescimento do eucalipto já foi identificado em outros trabalhos (BARROS et al., 1992; GAVA, 1997; STAPE; MOREIRA, 2004; SILVA, 2011).

Stape e Moreira (2004) em estudo sobre curva de resposta em *Eucalyptus* plantado em Itatinga – SP aos 6 anos de idade, verificaram que o potássio e o cálcio foram mais limitantes ao crescimento, e que a omissão destes elementos resultaram em produtividade de 8,5 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$ e 15,6 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$, respectivamente contra a 19,2 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$ tratamento completo. Almeida et al. (2010b) estudando o efeito da substituição parcial do potássio pelo sódio na fisiologia e crescimento do *Eucalyptus*, verificaram os tratamentos fertilizados com sódio e os

adubados com potássio aumentaram o incremento de biomassa do plantio em 56% e 130% respectivamente, em relação ao tratamento controle sem adubação, aos 3 anos de idades do plantio, demonstrando a importancia da adubação em áreas deficiente em potássio. Estes mesmos autores verificaram que a aplicação de sódio na adubação aumentou o acúmulo deste elemento nos componentes aéreos das árvores (folha, galho, tronco), no entanto, isso não modificou o acúmulo de potássio, sugerindo que houve a substituição parcial do elemento potássio pelo sódio.

Silva (2011), usando parcelas gêmeas distribuídas no sul do estado de São Paulo, observou que a resposta à fertilização estava ligada ao elemento limitante potássio, e também ao magnésio e fósforo.

No entanto, Gava e Gonçalves (2008) não encontraram nenhuma correlação entre o incremento médio anual de *Eucalyptus grandis*, plantado em cinco regiões do estado de São Paulo com idades de 6,5 a 7 anos, com os teores de fósforo, cálcio e potássio, porém melhores correlações com a matéria orgânica, alumínio trocável e CTC do solo. Diferentemente do que ocorreu neste estudo, estes autores não dispunham de uma rede de parcelas gêmeas para capturar tão somente o efeito da fertilização em suas análises. Desta forma, a determinação da equação de FR requer a existência das parcelas gêmeas para sua efetiva implementação, uma vez que a variabilidade de solo, e manejo entre as florestas é muito grande.

3.3 Conclusão

Com base numa rede de 113 pares de parcelas gêmeas de inventário no nordeste do Estado de São Paulo, onde se eliminou o estresse nutricional pelas fertilizações e controle de matocompetição extras nas parcelas de manejo intensivo, determinando-se às respostas à fertilização e sua relação com os atributos químicos dos solos, pode-se concluir que:

- O modelo 3-PG pode ser calibrado com adequada precisão para a estimativa de produtividade, o que foi confirmado pelo processo de validação;
- Atributos químicos dos solos limitantes ao crescimento podem compor uma equação objetiva para o modificador fertilidade do solo (FR), e no presente caso se relacionaram com as bases do solo (Ca, K e soma de base);
- Esta equação do FR, ajustada com base nas variáveis químicas do solo, foi eficiente em estimar os FR para os solos LV e PV. No entanto, para o RQ o uso do FR estimado na validação gerou superestimativa em produtividade, demonstrando que a equação ainda deve ser melhor investigada, notadamente para solos menos férteis; e

- O uso de parcelas gêmeas é recomendado para poder estabelecer estas equações objetivas do modulador de fertilidade, uma vez que os típicos ensaios de fertilização em um único local nunca irão capturar a diversidade de solos existentes na escala regional

Referências

ALMEIDA, A.C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T.R.; BEADLE, C.; FONSECA, S.; LOOS, R. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p.1730-1740, 2010a.

ALMEIDA, A.C.; LANDSBERG, J.J.; SANDS, P.J.; Parameterisation of 3-PG model for fast-growing Eucalyptus grandis plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.1993, p179-195, 2004a.

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 Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.167-177, 2004b.

ALMEIDA, J.C. R., LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L. M.; RANGER J.; SAINT-ANDRÉ, L. A positive growth response to NaCl applications in Eucalyptus plantations established on K-deficient soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259 p.1786-1795, 2010b.

BARRICHELO, L.E.G.; FOELKEL, C.E.B.; BRASIL, M.A.M.; Métodos para determinação da densidade básica de coníferas e folhosas, **IPEF**, Piracicaba, n. 2/3, p. 65-74, 1971.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. and Leal, P.G.L. Fertilizing eucalypt plantations on the Brazilian savannah soils. **South African Forestry Journal**, Menlo Park, v.160, p.7-12. 1992.

BLINKLEY, D. A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. **Forest Ecology amd Management**, Amsterdam, v.190, p.265-271, 2004.

CAMPION, J.M.; ESPREY, L.J.; SCHOLES, M.C. Application of the 3-PG model to a Eucalyptus grandis stand subjected to varying levels of water and nutritional constrains in KwaZulu-Natal, South Africa. **Southern African Forestry Journal**, Menlo Park, v.203, p.3-13, 2005.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal**: Perguntas e Respostas Viçosa: Editora Viçosa, 2006. cap.12:Modelos de crescimento e produção em nível de povoamento. p.295 – 354.

FERREIRA, J.M.A. - **Ganho de produtividade de plantações clonais de Eucalyptus urophylla e suas correlações com variáveis edafoclimáticas e silviculturais**. 2007. 84p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz," Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

FERREIRA, J.M.; STAPE, J.L. Productivity gains by fertilization in Eucalyptus urophylla clonal plantations across gradients in site and stand conditions. **Southern Forests**, Menlo Park, v.71,n.4, p.253 – 258, 2009.

FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de povoamentos comerciais de *E. grandis* Hill ex Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 16 anos. **IPEF**, Piracicaba, v.4, p. 65-89, 1972.

GAVA, J.L. Efeito da adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potásssio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v.11, n.30, p.89–94, 1997.

GAVA, J.L.; GONÇALVES, J.L.M. Soil attributes and wood quality for pulp production in plantations of *Eucalyptus grandis* clone. **Science Agricola**. Piracicaba, v.65, p.306-313,2008.

GONÇALVES, J.L.M. **Eucalipto. Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes - Culturas**. Piracicaba: Livroceres, 2011. v. 3, p. 30-45.

GONÇALVES, J.L.M.; DEMATTÊ, J.L.I.; COUTO, H.T.Z. Relações entre a produtividade de sítios florestais de Eucalyptus grandis e E. saligna com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no Estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, v.43/44, p.24-39, 1990.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.L.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, Menlo Park, v.70, p.105-118, 2008.

LANDSBERG, J.J. **Physiology in Forest Models**: History and the future. FBMIS, 2003. p.49-63.

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

LANDSBERG, J.J.; JOHNSEN, K.H.;ALBAUGH, T.J.; ALLEN, L.; MCKEAND, S.E. Applying 3-PG, a simple process-based model designed to produce practical results, to data from loblolly pine experiments. **Forestry Sciencs**, Bethesda, v.47, p.43–51, 2001.

LIMA, W.P. **Impacto ambiental do eucalipto**. Editora: Edusp, São Paulo, 1993, p.301

MIELKE, M.S.; OLIVA, M.A.; BARROS, N.F.; PENCHEL, R.M.; MARTINEZ, C.A.; ALMEIDA, A.C. Stomatal control of transpiration in the canopy of clonal Eucalyptus grandis plantation. **Trees**, Berlin, v.13, n.1, p.152-160, 1999.

PIERCE, L.L.; RUNNING, S.W.;WALKER, J. Relationships of Leaf Area Index to Specific leaf area and leaf nitrogen content. **Ecological Applications**, New York, v.4, n.2, p.313-321, 1994.

REIS, M.G.F.; KIMMINS, J.P.; REZENDE, G.C. DE; BARROS, N.F. DE. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de Eucalyptus grandis plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, v.9, p.149-162,1985.

RYAN, M.G., BINKLEY, D.; FOWNES, J.H.; GIARDINA, C.P.; SENOCK, R.S. An experimental test of the causes of forest growth decline with stand age. **Ecological Monographs**, Ithaca, v.74, p.393-414, 2004.

SANTANA, R.C.; BARROS, N. F.; NEVES, J.C.L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de Eucalyptus grandis e Eucalyptus saligna em sítios florestais do estado de São Paulo. **Árvore**, Viçosa, v.26, p.447-457, 2002.

SILVA, R.M. L. da. **Resposta à fertilização de plantios comerciais de *Eucalyptus* e sua correlação com as características edafoclimáticas e silviculturais em diferentes regiões do estado de São Paulo**. 2011. 118p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz," Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SMETHURST P.; BAILLIE C.; CHERRY M.; HOLZ G. Fertilizer effects on LAI and growth of four Eucalyptus nitens plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.176, n.1, p.531- 542, 2003.

STAPE, J.L. **Production ecology of clonal Eucaliptus plantations in Northeastern Brazil**. 2002. 265p. Thesis (Ph.D.) - Colorado State University, Fort Collins, 2002.

STAPE, J.L. BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.17-31, 2004a.

STAPE, J.L. BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; 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**, Amsterdam, v.193, p.219 - 234, 2004b.

STAPE, J.L. ; MOREIRA, R.M. Similarity of nutrient limitation ranking effects on forest productivity among distinct genetic materials in a sandy soil in Brazil. In: INTERNATIONAL IUFRO CONFERENCE, 2004, Aveiro. INTERNATIONAL IUFRO CONFERENCE OF THE WP2.08.03 ON SILVICULTURE AND IMPROVMENT OF EUCALYPTUS, 2004. v. 1. p. 595-596.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; JACOB, S.W.;TAKAHASHI, E.N. A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential productivity in Eucalyptus plantations at landscape scales in Brazil. **Forest Ecology and Managament**, Amsterdam, v.223, p.358-362, 2006.

STAPE J.L.; BINKLEY, D.; RAYAN, M.G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA C. R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M. A. ; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam,v.259, p.1684-1694, 2010.

WARING, R.H.; MCDOWELL, N. Use of a physiological process model with forestry yield tables to set limits on annual carbon balances. **Tree Physiology**, Victoria, v.2, p.179-188, 2002.

4 ZONEAMENTO DA PRODUTIVIDADE E DETERMINAÇÃO DAS RESTRIÇÕES AO CRESCIMENTO DO EUCALYPTUS PLANTADOS NO NORDESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

Resumo

Em um mercado florestal aquecido e competitivo por área com outras culturas, o zoneamento da produtividade do *Eucalyptus* pode auxiliar na tomada de decisão sobre o uso mais rentável da terra. Além disso, alocar corretamente a floresta em função das condições edáficas e climáticas tende a garantir a produtividade. O objetivo deste estudo foi zonear a produtividade real do *Eucalyptus* no nordeste do estado do São Paulo e determinar os principais fatores de restrição da produtividade. A estimativa da produtividade foi feita utilizando-se o modelo 3-PG aprimorado para retenção de água associado à ferramentas do ArcGis. Para tanto, utilizou-se de mapas de estimativa de precipitação, temperatura máxima e mínima (normais climáticas) e mapa pedológico. Para a validação do modelo, comparou-se a estimativa do incremento médio anual aos sete anos (IMA7) com a projeção do IMA7 para parcelas de inventário comercial com idade superior a 5 anos e inferior a 8, advindas de 58.000ha de plantios. A estimativa do IMA7 médio de toda a área validada foi similar ao projetado pelo inventário comercial, com produtividade média de 42 $m^3ha^{-1}ano^{-1}$. No entanto, aos comparar os IMA7 estratificados por tipo de solo e fazenda, verificou-se que havia dispersão entre os valores estimados e projetados. Isso pode ser reflexo dos dados climáticos médios utilizados, detalhamento do tipo de solo pelo mapa pedológico, diferente adaptação de materiais genéticos e tratamentos silviculturais. Verificou-se que com o aumento da escala de estudo houve uma redução na precisão das estimativas. Foi possível fazer o zoneamento da produtividade real do *Eucalyptus* no nordeste do estado de São Paulo, identificando que as áreas mais ao sul tendem a ser as mais produtivas, e que os fatores hídricos foram os que mais restringiram o crescimento (déficit de pressão de vapor e água no solo).

Palavras-chave: Sistema de informação geográfica; Modelo 3-PG; Incremento médio anual; fatores limitantes ao crescimento

Abstract

In a competitive wood market for land with other cultures, zoning the productivity can help the forest managers to make decision about land use, based on technical information of forest productivity. In addition, the correct forest location on climate condition, possibility ensure the wood production and decrease the need for land, resulting in reduce the pressure of native forest deforestation. The objective of this study was to zone the actual productivity of *Eucalyptus* forest plantation in the northeastern of São Paulo state and determinate constraints to forest growth. The estimative of productivity was made using 3-PG model modified by soil water content associated with ArcGIS tools for spatialize the analyses. For this purpose, we used maps of precipitation and maximum and minimum temperature estimation and pedological map. To validate the model, were compared the mean annual increment at 7 years (MAI 7) estimated by 3-PG with inventory projection (forest with 5 to 8 years), corresponding

around 58,000 ha. The average of all validated area was similar between the 3-PG estimation and inventory projection, 42 m^3 ha^{-1} $year^{-1}$. However, the comparison of the IMA7 between measured and predicted, stratified by soil type and farm, we found high data dispersion, probably because of the average climatic data used as model input, soil type detailing reflecting the soil water content, genetic material adaptation and silviculture management, or interaction of those factors. The results suggested that increase the analytical scale reduce the precision of the estimatives. It was possible to make the zoning of the real productivity of *Eucalyptus* in the northeastern state of São Paulo. The most productivity areas were located at south. The main growth constraints were vapor pressure deficit and soil water content.

Keywords: Geographic Information System; 3-PG model; Mean annual increment; Limiting growth factors

4.1 Introdução

O Estado de São Paulo possui extensão territorial de cerca de 250 mil km^2, é o mais populoso do Brasil com 41 milhões de pessoas (IBGE, 2009) e o mais rico da Nação, responsável por cerca de 33% do PIB brasileiro. As terras agricultáveis estão destinadas ao plantio de cana-de-açúcar, laranja, floresta, pastagem e grãos como: milho, feijão e soja, as quais competem intensamente por espaço, o que interfere diretamente no preço da terra. São Paulo possui as terras mais valorizadas do Brasil, devido à grande competitividade entre as culturas e existência de grandes centros urbanos.

Além do problema do abastecimento dos centros urbanos, outra questão que emerge para a manutenção do crescimento econômico do Estado é o fornecimento de energia. Segundo informações do Ministério de Minas e Energia (2008), a contribuição das florestas (carvão e lenha) corresponde à 12% do fornecimento de energia do país, ficando atrás da produção de energia hidroelétricas, cana-de-açucar e petróleo. Este percentual tende a aumentar com a restrição do uso de fontes de energias obtidas através do petróleo.

Os grandes consumidores de energia proveniente de madeira são cerâmicas, frigoríficos, indústrias alimentícias (óleo vegetal, suco de laranja, alimentos processados, torrefadoras e secagem de grãos), granjas, rações, curtumes, indústria de fertilizantes, além do consumo urbano, representado por panificadoras, docerias e restaurantes (churrascarias e pizzarias) (INSTITUTO ECONOMICO AGRICOLA – IEA, 2010).

A manutenção do crescimento de um mercado já abastecido por fontes de energias provenientes da madeira, a crescente demanda por biomassa para energia e a melhor utilização de terras para cultivo de alimentos serão um grande desafio na criação de políticas para o melhor aproveitamento do uso da terra.

A elaboração de políticas do uso da terra também deve abranger a grande preocupação com os remanescentes florestais. Protegidos por Lei (Código Florestal), as APPs (Áreas de Preservação Permanente) e as Reservas Legais são espaços constantemente ameaçados pela demanda por uso da terra e por fonte de madeira. Desta forma, o uso adequado da terra é de suma importância para o abastecimento de centros consumidores e meio ambiente, bem como ao bem estar da população. A otimização do uso da terra propicia a alocação de culturas em áreas adequadas garantindo assim a boa produtividade, diminuindo a necessidade por terra e consequentemente pressão da expansão de cultivo em remanescentes florestais.

O zoneamento florestal surge desta preocupação em utilizar a terra de forma racional. Os primeiros trabalhos de zoneamento tinham como objetivo avaliar a terra por aptidão de espécie, tais como os de Golfari, Caser e Moura (1978) e Ab'Saber et all (1990). Este tipo de zoneamento mapeava as espécies florestais aptas para cada região, levando em consideração apenas os fatores climáticos.

Preocupados com o abastecimento de madeira no Brasil, Golfari, Caser e Moura (1978) desenvolveram o "*Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil*" os quais dividiram o Brasil em 26 regiões bioclimáticas, levando em consideração as características física, climática e de vegetação. Este trabalho teve como objetivo orientar políticas de florestamento e reflorestamento indicando as espécies de eucalipto e coníferas com maior aptidão e rendimento por região.

Com o mesmo objetivo, Ab'Saber et al. (1990), propôs um plano nacional de reflorestamento para tentar mitigar problemas causados pelo aumento da demanda por produtos florestais e pelas mudanças climáticas ocorridas devido a ação antrópica.

Apesar destes estudos florestais, o zoneamento da produtividade florestal sob as diferentes condições climáticas e edáficas ainda não foi implementado. Modelos ecofisiológicos tem se monstrado uma ferramenta para estimar a produtividade de culturas florestais na escala espacial (WHITE et al., 2000, COOPS et al., 2001, COOPS; WARING, 2001, TICKLE et al., 2001, NIGHTINGALE et al., 2008 a, b, ALMEIDA et al. 2010, ALVARES, 2011), pois este tipo de modelo leva em consideração as variáveis climáticas, edáficas e fisiológicas.

A vantagem de um modelo baseado em processo é a capacidade de estimar a produtividade florestal e ao mesmo tempo identificar e quantificar os fatores que podem aumentá-la ou reduzi-la (ALMEIDA, et al. 2010). Auxiliam também, na interpretação de fenômenos climáticos, no direcionamento dacompra de terras e manejo florestal, e na identificar das restrições de produtividade potencial. Além disso, segundo Guimarães et al. (2007), estimativas realizadas pelo modelo 3-PG também permitem a formulação de políticas para um melhor aproveitamento do espaço rural, direcionamento de programas de fomento florestal, seleção de áreas prioritárias para o reflorestamento e definição de níveis de produtividades locais.

Guimarães et al. (2007) utilizaram-se do modelo 3-PG para o zoneamento do potencial produtivo do *Eucalyptus* para o estado de Minas Gerais, fazendo uma comparação entre a produtividade e os níveis tecnológicos de cultivo. No estudo conduzido por Almeida et al. (2010) o modelo 3-PG foi capaz de estimar o crescimento em função das variações climáticas, diferenciar o crescimento de clones, estimar o volume do povoamento, o diâmetro da árvore e as mudanças no índice de área foliar.

No entanto para o uso deste modelo é necessário que todas as etapas de uso estejam asseguradas, ou seja, sua calibração e validação tenham sido satisfatórias, e os bancos de dados climáticos e edáficos sejam confiáveis para assim gerar informações confiáveis de crescimento e produtividade.

O presente trabalho vem para acrescentar aos estudos de mapeamento florestal, o zoneamento da produtividade do *Eucalyptus* na região nordeste do estado de São Paulo, avaliar a capacidade do modelo em estimar esta produtividade espacialmente e determinar os fatores de restrição ao crescimento florestal.

4.2 Desenvolvimento

4.2.1 Material e Método

4.2.1.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido no nordeste do estado de São Paulo (figura 37) localizado entre as latitudes 23º 3’S a 18º 58’S e longitudes 48º 38’O a 46º 21’O, abrangendo uma área de cerca de 5 milhões de ha. Esta área é composta os climas Aw, Cwa e Cwb (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 1960), e inserido nas formações geomorfológicas de: Serra Geral, Pirambóia, Botucatu, Tubarão, Passa Dois e Paraná (ROSS; MOROZ, 1997). O relevo predominante é de plano a suave-ondulado (IBGE, 1959).

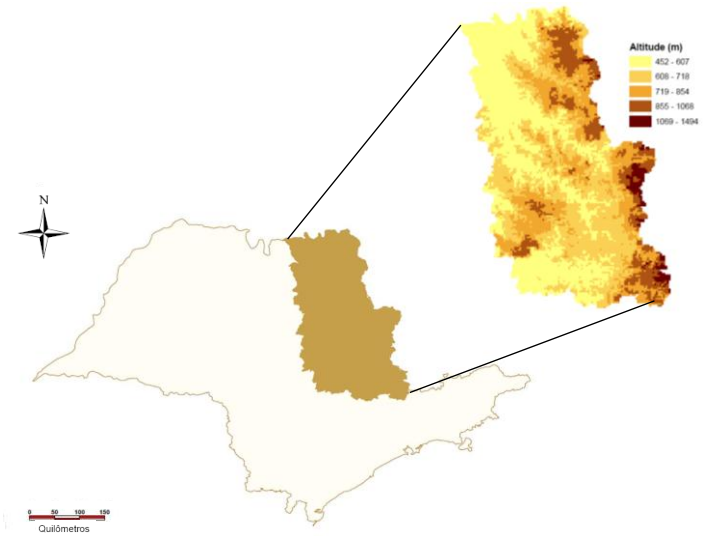

Figura 37 – Representação da área de estudo no nordeste do estado de São Paulo e a altitude (m)

4.2.1.2 Modelo 3-PGIS

Para estudar a produtividade do *Eucalyptus* no nordeste do estado de São Paulo foi utilizado do modelo ecofisiológico 3-PGIS (acrônimo *Physiological Principles Predicting Growth* in Geographical Information System). O 3-PGIS é um modelo espacialmente distribuído, formado por meio da associação do modelo 3-PG, descrito na linguagem Visual Basic do Microsoft Excel®, e às ferramentas de espacialização do software ArcGIS 9.3 (ALVARES, 2011).

Neste estudo, utilizou-se do modelo 3-PG aprimorado para retenção de água no solo interligado ao software ArcGIS 9.3.

4.2.1.3 Dados de entrada do modelo 3-PG

O mapa do nordeste do estado de São Paulo foi divido em células quadradas (*grid*) com dimensões de 2 x 2 km, compondo uma área de 400 ha, totalizando 12.702 células. A cada célula associou-se um ponto localizado no centro geométrico do polígono (ponto centróide). Nestes pontos centróides foram ligadas às coordenadas UTM e aos dados de entrada e saída do modelo 3-PG.

Mapas digitais mensais de temperatura mínima e máxima mensal estimada pela normal climática (ALVARES et al., 2011a) e de precipitação total mensal (ALVARES et al., 2011b) do Brasil foram utilizados como dado de entrada do modelo 3-PG (figuras 38 a 40).

Estes mapas foram recortados na área de estudo e posteriormente dividido em células de 400 ha, em cada célula associaram-se as informações climáticas ao ponto centróide padrão.

As variáveis radiação solar e número de dias com geada foram determinadas por equações matemáticas específicas para estes fins. A radiação solar global foi estimada utilizando a equação descrita por Pereira, Angelloci e Sentelhas (2002), a qual utilizada para o cálculo a latitude, declinação solar, fotoperíodo e época do ano, com estimativa corrigida para a declividade e orientação das vertentes da área. A radiação foi calculada no 15º dia de cada mês, representando a média do mês (figura 41). A radiação fotossinteticamente ativa foi considerada como 50% da radiação global.

O número de dias de geada por mês foi determinado segundo a metodologia de Nicholas Coops aplicada por Alvares (2011) no distrito florestal de Capão Bonito, calculada com base na temperatura média mínima mensal local (equação 29, figurra 42).

$$Ng = 21{,}16 - (1{,}74.T_{\min}) \qquad n=22; \quad R^2=0{,}81 \qquad (29)$$

Em que Ng é o número de dias de geada no mês e T_{min} é a temperatura mínima média mensal (^{o}C).

Todas as informações geográficas utilizadas neste estudo foram trabalhadas no sistema de coordenadas projetadas UTM (Universal Transversa de Mercator). O datum de referência foi atualizado para o SIRGAS 2.000 (Sistema de Referência Geocêntrico para a America do Sul) com elipsóide GRS 1.980 (Geodetic Reference System).

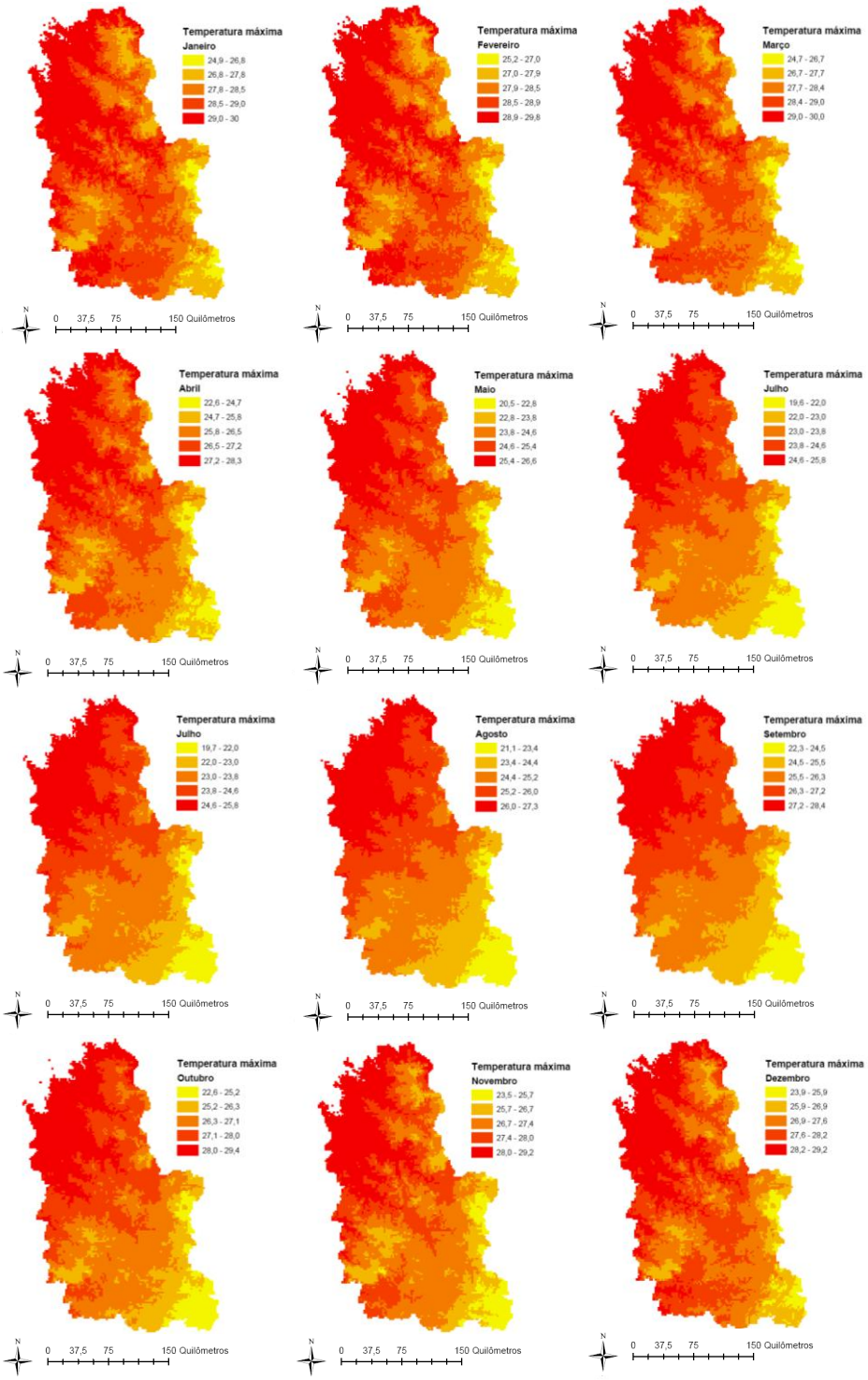

Figura 38 – Mapas mensais de temperatura máxima (^{o}C) média estimada pela normal climática (ALVARES et al., 2011a) do nordeste do estado de São Paulo

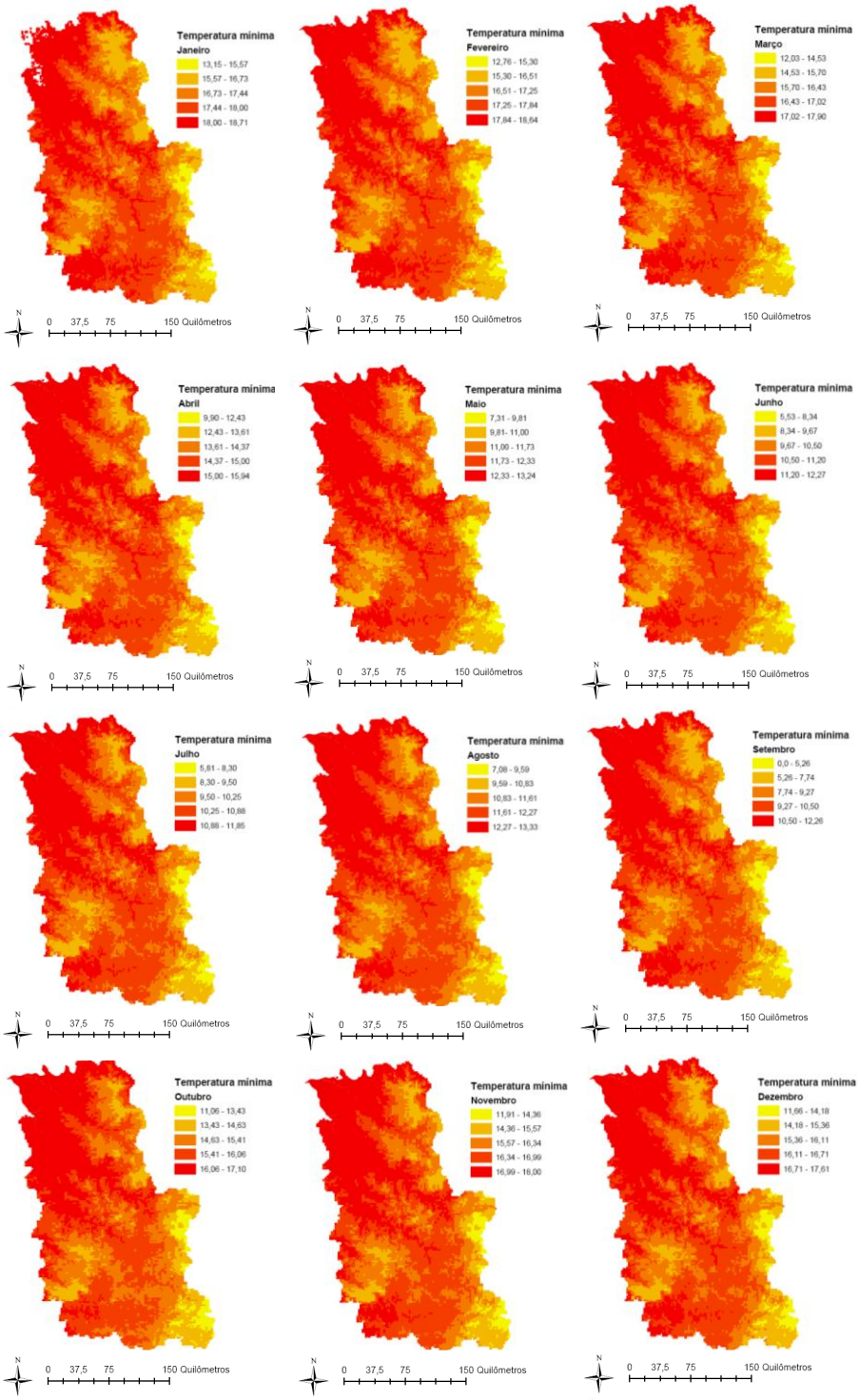

Figura 39 – Mapas mensais de temperatura mínima (^{o}C) média estimada pela normal climática (ALVARES et al., 2011a) do nordeste do estado de São Paulo

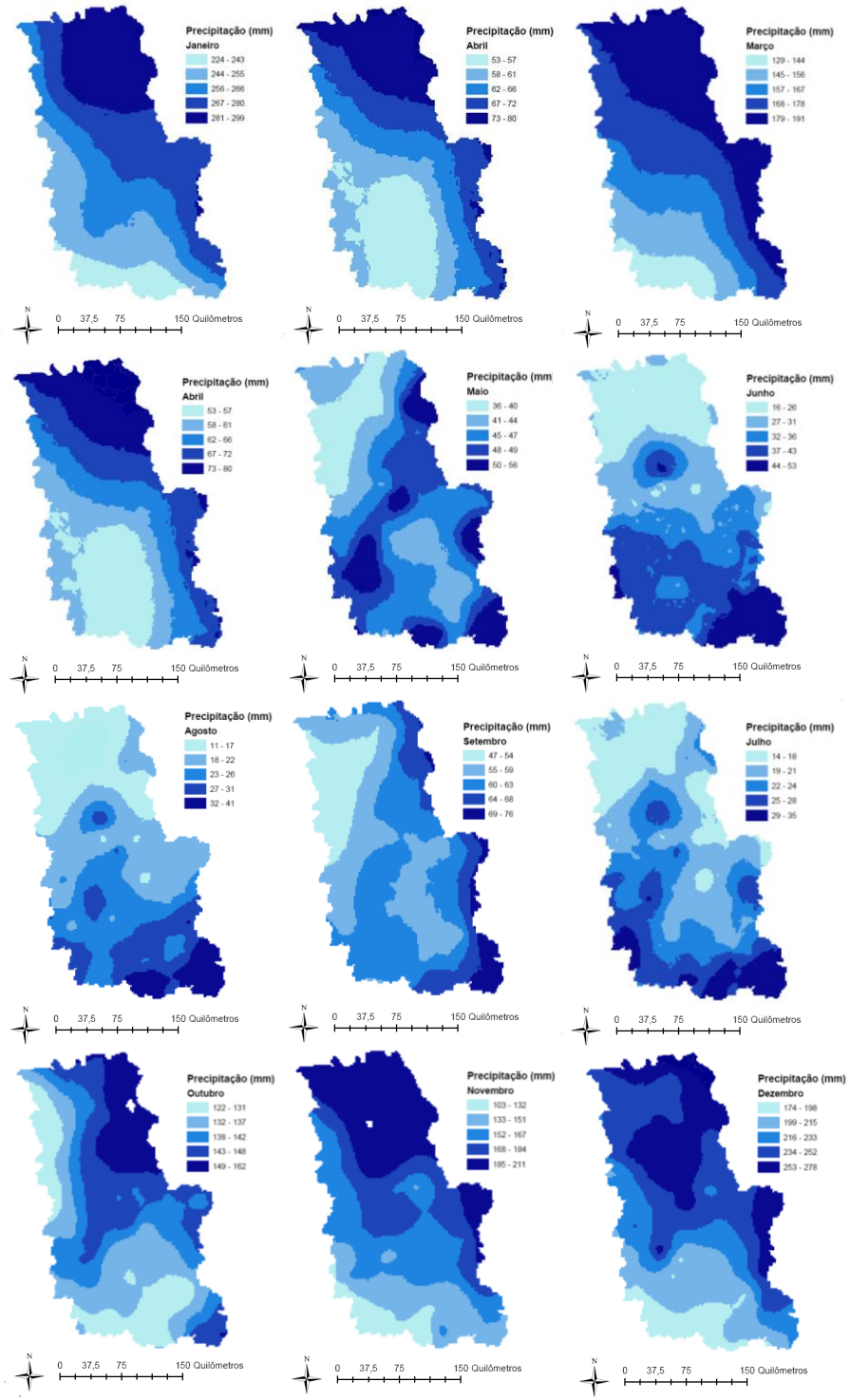

Figura 40 – Mapas mensais de precipitação total (ALVARES et al., 2011b) para a região nordeste do estado de São Paulo

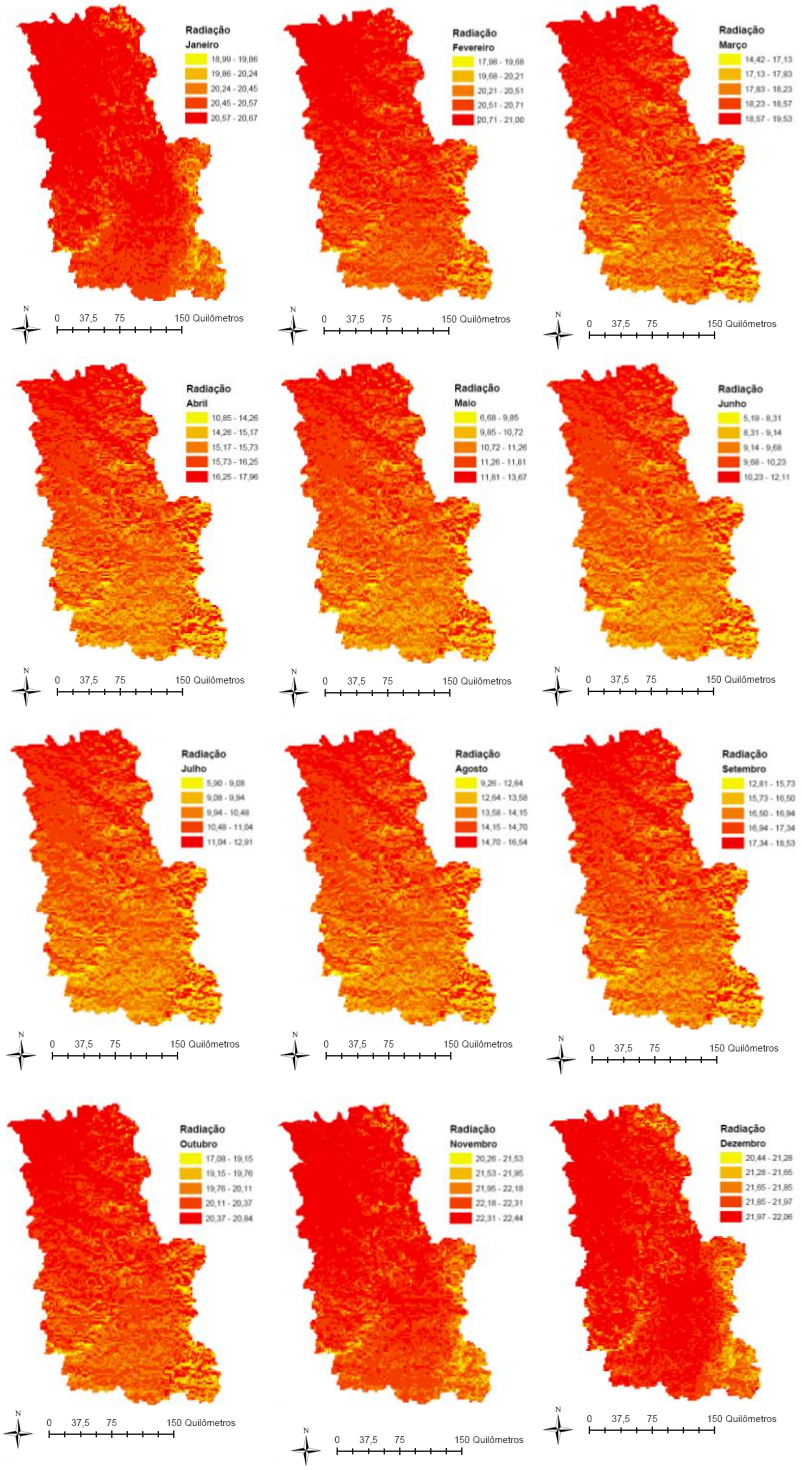

Figura 41 – Mapas mensais de radiação solar (MJ m^{-2} $mês^{-1}$) calculado com base na equação de Pereira, Angelloci e Sentelhas (2002) para a região nordeste do estado de São Paulo

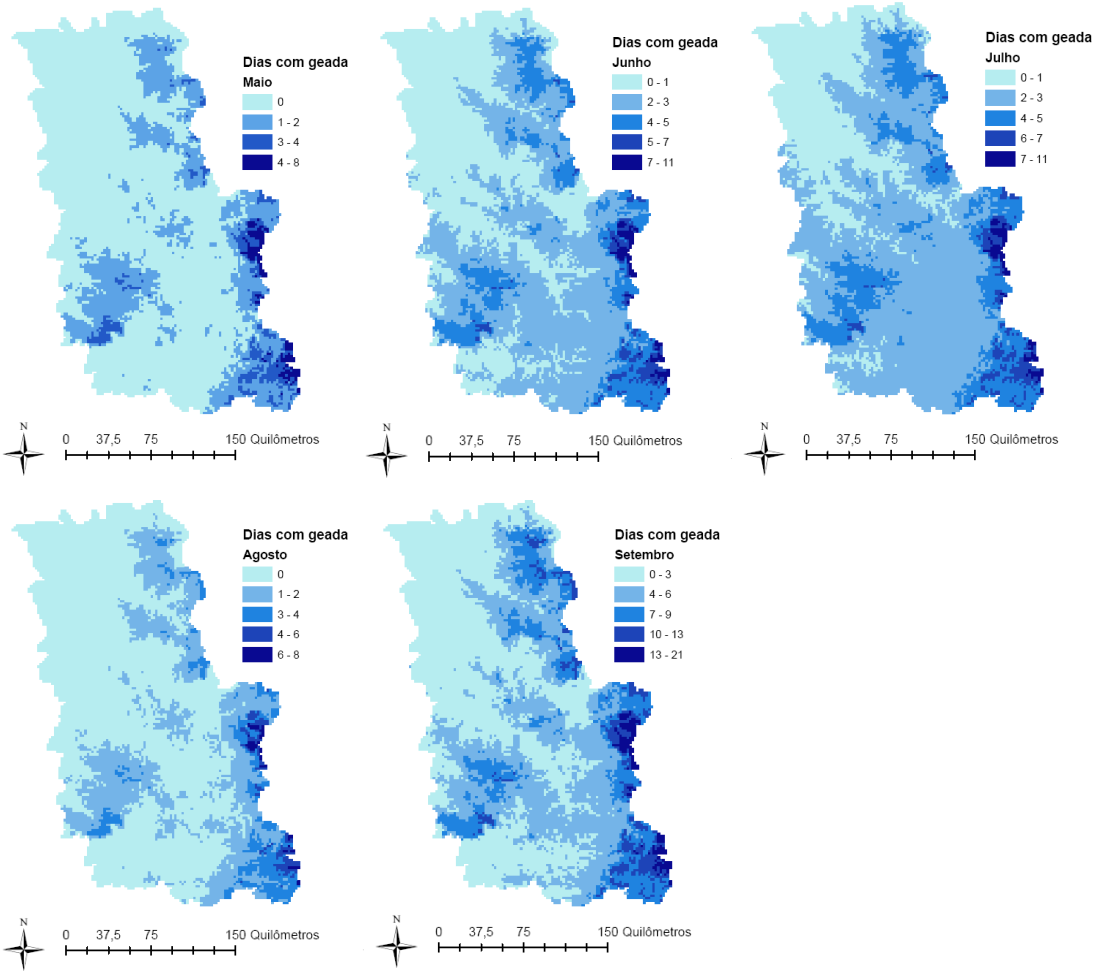

Figura 42 – Mapas de número de dias com geada estimados para os meses de Maio a Setembro

4.2.1.4 Parametrização do modelo 3-PG

Os parâmetros ajustados na calibração e validação do 3-PG por tipo de solo nesta tese (tabela 11) foram utilizados para alimentação do modelo. A produtividade florestal foi estimada pelo modelo nas áreas do nordeste do estado de São Paulo composta pelos três tipos de solos da calibração: Neossolo, Latossolo e Argissolo (figura 43).

O mapa pedológico do estado de São Paulo (OLIVEIRA et al.,1999, digitalizado por ALVARES et al., não publicado) foi utilizado para a determinação da textura do solo e retenção máxima de água no solo. O mapa contém informações sobre o tipo de solo, classes texturais por horizonte de solo, classe de profundidade e fertilidade.

A profundidade do solo foi classificada por Oliveira et al. (1999) como: raso, pouco profundo, profundo, muito profundo. Para o cálculo da retenção máxima de água no solo as

profundidades foram traduzidas em valores numéricos segundo a classificação descrita no Sistema brasileiro de classificação do solo (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1999) em 0,5; 1,0; 2,0 e 5,0 m. A retenção máxima de água no solo em mm cm^{-1} foi determinada por tipo de solo segundo os dados disponíveis para os solos da International Paper do Brasil (DEMATTÊ, 2002, não publicado). Pela multiplicação da profundidade do solo e a retenção máxima de água no solo obteve-se a quantidade máxima de água no perfil do solo disponível para árvore (ASW_{max}).

A textura do horizonte A foi utilizada para classificar o solo em: arenoso, areno-argiloso, argilo-areno e argiloso, conforme a necessidade do modelo 3-PG (LANDSBERG; WARING, 1997).

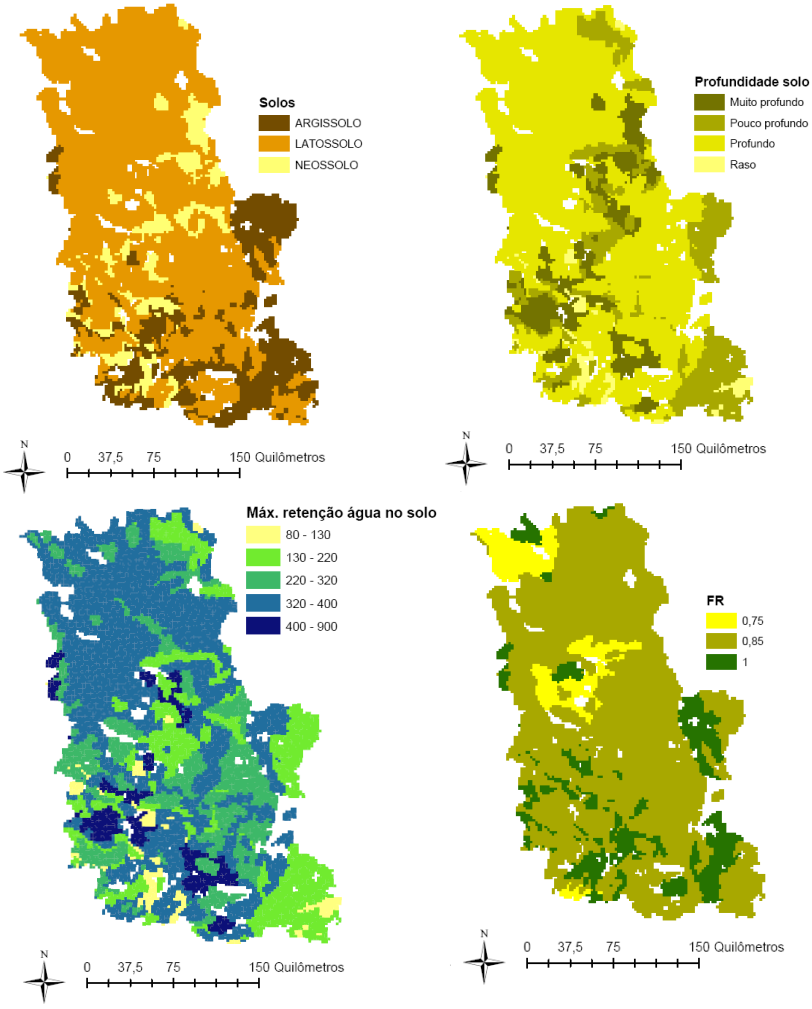

Figura 43 – Mapas das características edáficas do nordeste do estado de São Paulo: tipo de solo, profundidade do solo, máxima retenção de água (mm) e fertilidade. A fertilidade foi traduzida no modificador de fertilidade do solo (FR) do modelo 3-PG nos valores de 1 a 0,75, de solos mais férteis até pouco férteis

A fertilidade do solo no mapa pedológico foi classificada como alta, média e baixa, as quais foram associadas ao modificador de fertilidade do solo (FR) do modelo 3-PG, com valores de 1, 0,85 e 0,75, respectivamente. Os valores adotados foram fundamentados no FR determinado para as parcelas gêmeas desta tese (figura 44).

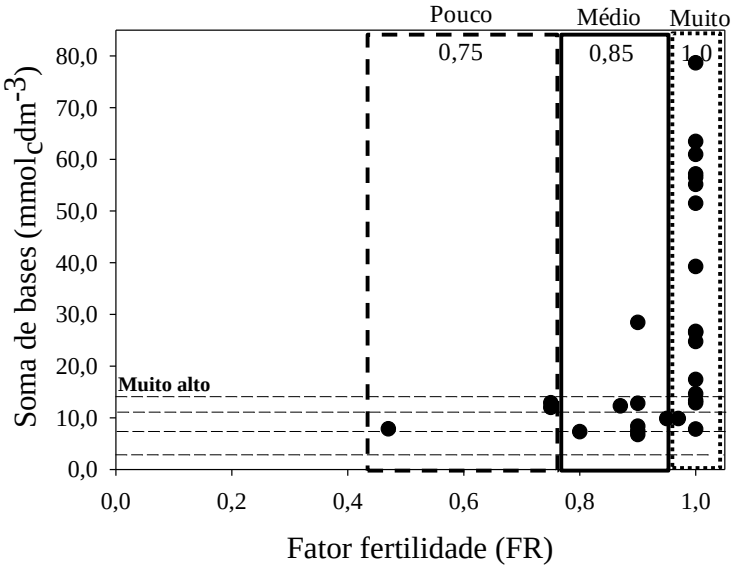

Figura 44 – Representação esquemática da classificação dos valores do modificador fertilidade do solo do 3-PG em função da resposta à fertilização das parcelas gêmeas instaladas no nordeste do estado de São Paulo

O modelo foi rodado do primeiro ao sétimo ano do ciclo do *Eucalyptus*, tendo como biomassa inicial de tronco, folha e raiz os dados levantados no projeto BEPP aos 12 meses e densidade de planta de 1212 árvores por hectare. Avaliou-se como variável de saída a produtividade do *Eucalyptus* aos 7 anos em m^3 ha^{-1} ano^{-1} e o índice de área foliar (IAF) no sétimo ano em janeiro.

4.2.1.5 Validação do modelo 3-PG

A produtividade estimada pelo modelo 3-PG foi validada utilizando-se de dados do inventário comercial da empresa International Paper do Brasil, distribuído ao longo do nordeste do estado de São Paulo (figura 45). Para tanto, foram selecionadas 1.884 parcelas de inventário com idade superior a 5 anos de idades até 8 anos, representando uma área 58.000 ha. O volume de madeira das parcelas foi projetado para o IMA7 (incremento médio anual

aos 7 anos) pela equação de Clustter comercialmente utilizada pela empresa e padronizada por clone e área de ocorrência.

Como as parcelas possuem áreas de 400 m^2 e o pixel de estudo é de 400 ha, trabalhou-se com a produtividade média na unidade de talhão. Sendo assim, para cada pixel associou-se a produtividade média ponderada pelas áreas dos talhões que o compõem para comparação. Na avaliação final trabalhou-se ao nível de fazendas para inferir o IMA7, devido à escala da informação e nível de detalhamento do solo.

A análise da eficiência do modelo em estimar a produtividade para o nordeste do Estado de São Paulo foi por meio gráfico relação 1:1, o qual correlaciona o IMA7 estimado pelo modelo e o IMA7 projetado no inventário comercial.

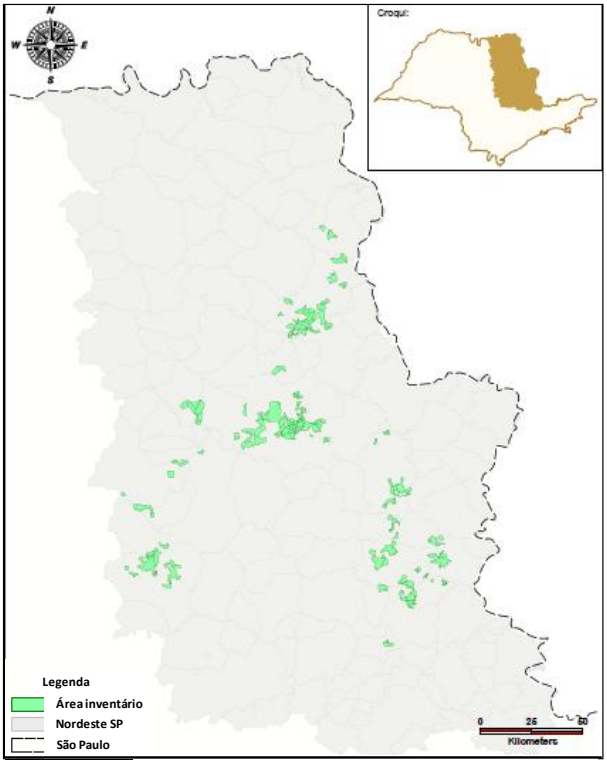

Figura 45 – Representação da área de estudo no nordeste do estado de São Paulo e localização das áreas com inventário florestal para a validação do modelo 3-PG

4.2.1.6 Fatores limitantes do crescimento florestal

A determinação dos fatores limitantes do crescimento florestal foi feita com base nas restrições ao crescimento proporcionadas pelos modificadores do 3-PG. Os modificadores atuam na limitação da eficiência quântica do dossel em capturar a radiação fotossinteticamente ativa e transformá-la em carbono assimilado. Para isso, utilizou-se 10% da área estudada, 1.200 células (unidade amostral) selecionadas aleatoriamente pelo programa

estatístico R. Em cada unidade amostral avaliou-se os modificadores: temperatura (ft), geada (f_{frost}), água no solo (f_{Θ}), déficit de pressão de vapor (f_{dpv}) e fertilidade do solo (FR) ao longo de todo o ciclo para determinar o fator limitante da produtividade potencial.

4.2.2 Resultados e Discussões

4.2.2.1 Validação da produtividade estimada pelo modelo 3-PG

A produtividade média geral estimada para os 58.000 ha pelo modelo 3-PG foi equivalente a produtividade projetada pelo inventário florestal, 42,3 m^3 $ha^{-1}ano^{-1}$ e 42,8 m^3 $ha^{-1}ano^{-1}$ respectivamente. No entanto, ao se avaliar a produtividade por tipo de solo, constatou que o modelo subestimou a produtividade média no solo Neossolo (RQ) em 6,3 $m^3ha^{-1}ano^{-1}$ e superestimou em 3,3 $m^3ha^{-1}ano^{-1}$ nas áreas compostas por Argissolo (PV). No Latossolo a produtividade média estimada e projetada foi similar (tabela 14).

Ao comparar o IMA7 estimado com o projetado por fazenda (figura 46), verificou-se que houve muita dispersão entre os pontos.

Tabela 14 – Síntese do incremento médio anual aos 7 anos (IMA7 m^3 $ha^{-1}ano^{-1}$) projetado pelo inventário florestal e o estimado pelo modelo 3-PG no solo Neossolo (RQ), Latossolo (LV) e Argissolo (PV) e a proporção de área avaliada por tipo de solo e número de fazendas que compõe

Solo	**Área**	**N. Fazendas**	**IMA 7**	
			Projeção	**3-PG**
RQ	46%	37	42,92	36,59
LV	41%	40	45,40	46,14
PV	13%	23	44,22	47,49

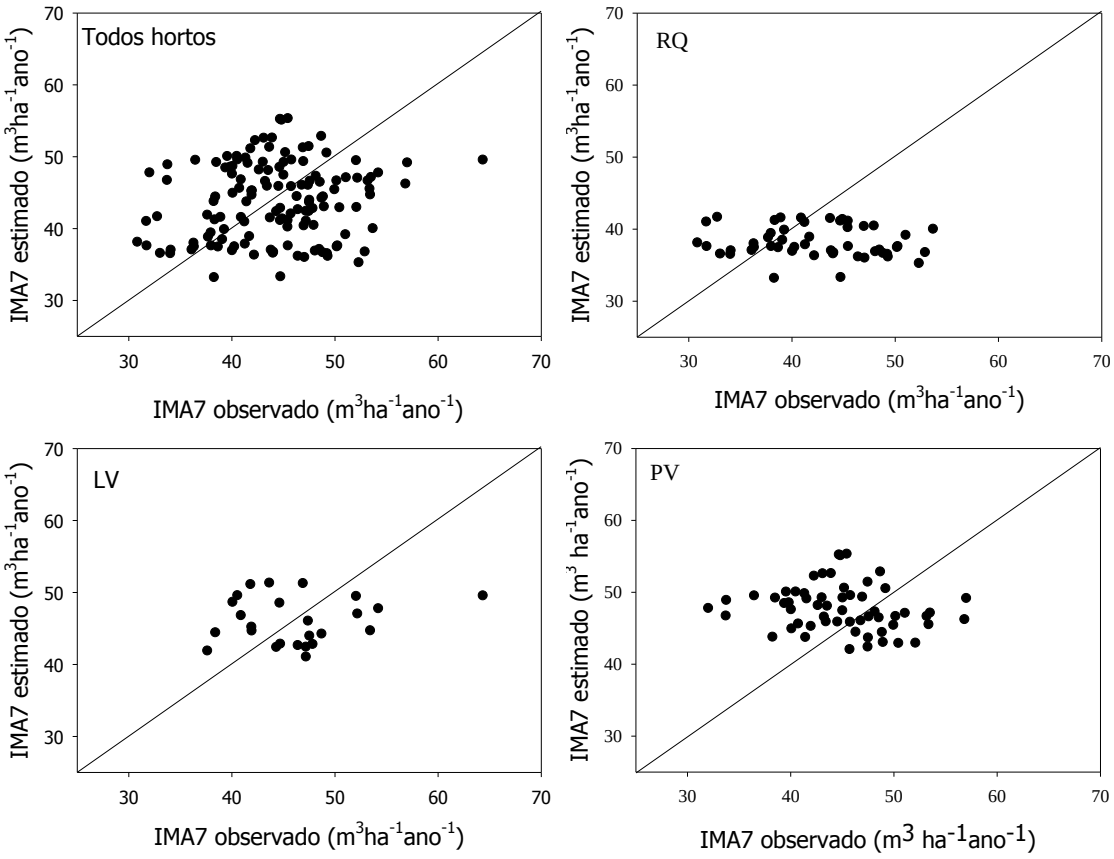

Figura 46 - Relação entre o incremento médio anual aos 7 anos projetado pelo inventário florestal (IMA7 observado) e o estimado pelo modelo 3-PG (IMA7 estimado) médio analisado por fazenda, para toda a área analisada e por tipo de solo: Neossolo (RQ), Latossolo (LV) e Argissolo (PV)

Estas variações nos valores estimados em relação ao projetado podem ter sido influenciadas por alguns aspectos tais como: i) os dados climáticos usados no modelo são estimativas provenientes da normal climática, não contemplando as variabilidades climáticas entre os anos e condições específicas dos sítios; ii) nível de detalhamento do mapa pedológico de solo é baixo, não contempla as especificidade de cada fazenda; iii) o modelo não estima a adaptação de diferentes clones à região; e iv) o modelo não contempla os tratos silviculturais específicos por sítio.

O incremento anual corrente (ICA) superestimado pelo modelo devido ao uso de dados climáticos médio foi observado por Almeida et al. (2004a), devido a influencia as flutuações climáticas não capturadas nos dados climáticos médio, principalmente em época seca.

Ao longo do ciclo do plantio de *Eucalyptus* avaliados, ocorreram dois eventos climáticos de grande realce não capturado pelo modelo com uso de dados climáticos médios. Em 2007 houve o excedente hídrico e em 2010 houve uma seca prolongada. A seca ocorrida

em 2010 resultou na redução no crescimento florestal (constatado pelo inventário nas áreas) e desfolha não natural provocada pelo ataque de pragas em reboleiras de maneira desuniforme em extensas áreas de plantio.

Na validação foi constatado que o detalhamento do mapa pedológico não foi suficiente para classificar corretamente o solo de todas as fazendas trabalhadas, necessitando reclassificar e corrigir a quantidade de água no solo para algumas áreas para posterior inferência sobre o crescimento. Além disso, adotaram-se valores de retenção máxima de água do solo médio em toda a área trabalhada, variando somente em função do tipo de solo e textura, segundo a descrição do mapa pedológico; o mesmo ocorreu para a determinação da profundidade do solo. A utilização de valores médios resulta na perda da especificidade de cada fazenda, uma vez que as características do solo são muito variáveis na escala espacial.

O tipo de solo influencia o crescimento da floresta estimada pelo modelo em duas maneiras: por meio da partição de carbono assimilado e disponibilidade hídrica à planta, esta última representada pelo modificador água no solo (f_{Θ}) que atua na eficiência quântica do dossel. Neste estudo, a parametrização foi estratificada por tipo de solo, devido à diferença na partição de carbono para o sistema radicular, tronco e folhas. Considerou-se que em solos arenosos há maior partição de carbono para o sistema radicular do que em solos mais argilosos (REIS, 1985, GONÇALVES, 1994, GONÇALVES; MELLO, 2000), resultando assim diminuição no crescimento em biomassa do tronco. Esta influência na partição de carbono não é resultado somente da textura do solo, mas também pela disponibilidade de água. Para os solos analisados, os RQ em sua maioria adotaram valores inferiores na retenção máxima de água no solo, em relação aos solos PV e LV.

A área estudada foi composta por vários materiais genéticos não somente o clone da calibração o que pode ter influenciado nesta diferenciação do crescimento. Almeida et al. (2010) ao fazerem o zoneamento espacial estratificaram a parametrização por tipo de clone, os quais se diferenciavam na densidade da madeira e relação alométricas entre biomassa de tronco e DAP. Com o rápido progresso do melhoramento genético, na busca de “clones superiores” em produtividade selecionado para alta performance em determinados sítios, pode ter influenciado, por exemplo, a alta produtividade de clones plantado no RQ chegando a 55 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. Os tratos silviculturais estão diretamente ligados à produtividade, e operações como controle de mato-competição, formiga quando não realizada adequadamente nos

plantios florestais resultam na perda de produtividade. Neste estudo, a avaliação é por fazenda, há fortes indícios que a falha provocada pela silvicultura seja mascarada pelo uso da produtividade média, o que não acontece ao nível de parcela.

Em termos de fertilidade, o uso de um valor FR médio provoca penalização no crescimento em áreas mais férteis ou ganhos produtivos em áreas menos férteis.

Ao comparar a validação do modelo do zoneamento da produtividade de parcelas instaladas no nordeste do estado de São Paulo em relação à validação das parcelas gêmeas (figuras 31 e 36), verifica-se que a precisão das estimativas de crescimento do modelo 3-PG dependem muito do tipo, qualidade e escala das informações. No caso das parcelas gêmeas, o material genético, clima e solo eram bem conhecidos e controlados ao longo da experimentação proporcionando estimativas ao nível de escala espacial, mais precisas. Por outro lado, neste estudo, o controle climático, edáfico, clonal e tratos silviculturais foi menor com nível de detalhamento e com menos informações específicas proporcionando menor precisão. Isso evidencia que para o uso do modelo 3-PG é necessário a boa caracterização da área de estudo como foi sugerido por Coops et al., 2001, Tickle et al. 2001, Almeida et al. 2003, 2004b, 2010. Segundo Coops et al. 2001 e Tickle et al. 2001 o maior desafio para a aplicação do modelo espacialmente é a variabilidade das propriedades do solo.

Uma alternativa para possível melhoria na precisão em estimar a produtividade seria o uso do IAF como dado de entrada do modelo. Este IAF poderia ser medido em campo usando amostragem não destrutiva (BRENDÁ, 2003); ou estimado por sensoriamento remoto (COOPS; WARING; LANDSBERG, 1998).

4.2.2.2 Produtividade e restrições ao crescimento no nordeste do estado de São Paulo

A produtividade média geral para o nordeste do estado de São Paulo foi de 45,0 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, variando de 32 a 70 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, sendo que as áreas mais produtivas (média 47,9 m^3 ha^{-1} ano^{-1}) concentraram-se no solo PV, o qual correspondeu por apenas 10% da área. O PV também foi caracterizado por apresentar a maior variação na produtividade de 35,9 a 70 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. A maioria da área concentrou-se nos solo LV (71%) com produtividade média de 44,9 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. As menores produtividades foram encontradas no solo NQ, média de 39,9 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (figura 47).

O índice de área foliar (IAF) estimado pelo modelo 3-PGIS para o nordeste do estado de São Paulo variou de 2,5 a 4,5 m^2folha m^{-2}solo, estando muito relacionado com à produtividade florestal, áreas mais produtivas obtiveram maiores IAF, e se localizam em sua

maioria ao sudeste da região, em regiões com altitudes um pouco mais elevadas que a média (figura 48). A variação do IAF foi similar aos dados encontrados para as parcelas gêmeas instaladas nestas áreas, evidenciando as estimativas corretas pelo modelo.

A retenção máxima de água disponível no solo média por solos variou LV> PV> RQ, com valores de 342, 300 e 288 mm respectivamente, sendo que cerca de 66% da área de estudo foi composta por solos profundos (OLIVEIRA et al., 1999), profundidade variando de 100 a 200 cm (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 1999). Sendo bem alinhado com a sequência por tipo de solo determinados para as parcelas gêmeas no estudo anterior.

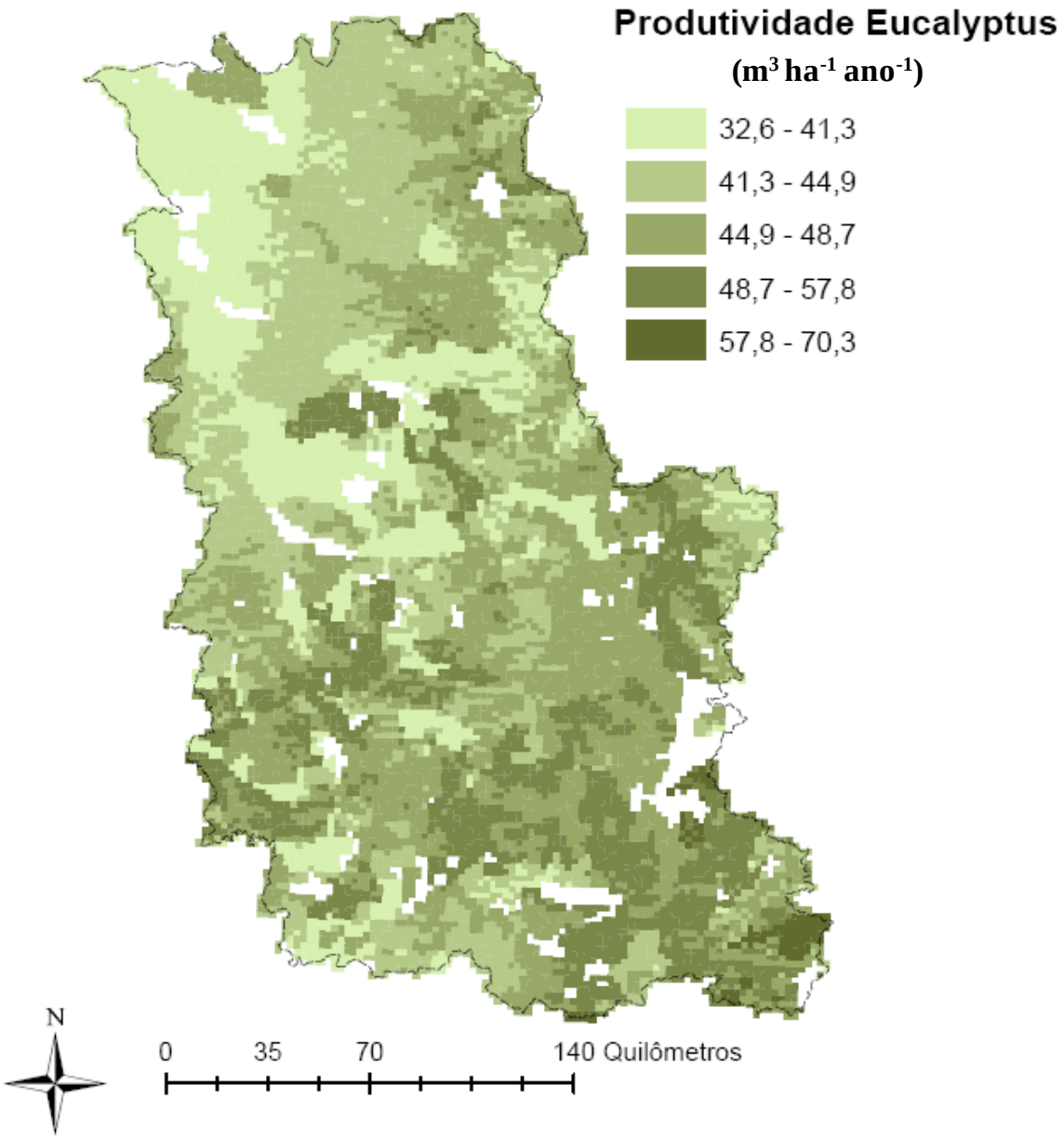

Figura 47 – Mapa de produtividade (m^3 ha^{-1} ano^{-1}) do *Eucalyptus* aos 7 anos no nordeste do estado de São Paulo estimada pelo modelo 3-PGIS

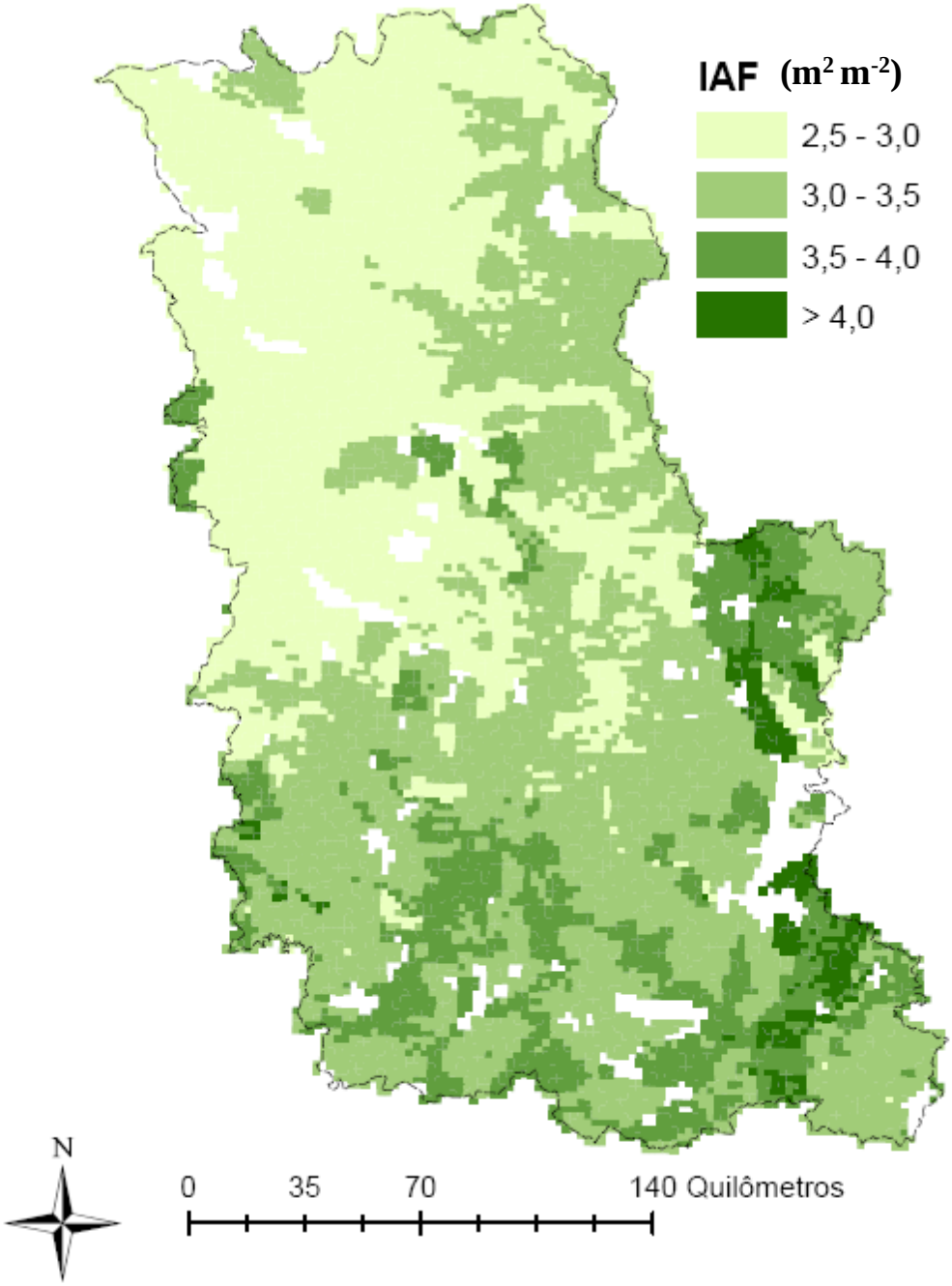

Figura 48 – Mapa de índice de área foliar (IAF m^2 m^{-2}) em janeiro do nordeste do estado de São Paulo estimado pelo modelo 3-PGIS

4.2.2.3 Fatores limitantes do crescimento florestal

Os modificadores do modelo 3-PG foram utilizados para determinação dos fatores limitantes ao crescimento florestal. Os modificadores de temperatura (f_t), geada (f_{frost}) fisiológico (f_{phy}), composto pelo mínimo entre os modificadores déficit de pressão de vapor (f_{dpv}) e água no solo (f_Θ), e fertilidade (FR) atuam na restrição da eficiência quântica do dossel, ou seja, na eficiência do *Eucalyptus* em capturar a luz. Analisando-se 10% da área estudada, verificou-se que os fatores mais restritivos ao crescimento do *Eucalyptus* no nordeste do estado de São Paulo são déficit de pressão de vapor e água no solo. Os modificadores f_{dpv} e f_Θ adotaram valores médios de 0,65 ± 0,02 e 0,65 ± 0,05, respectivamente; ambos compondo o f_{phy}, com valores médios de 0,48 ± 0,03. Fatores similares aos observados por Almeida et al. (2010) em estudo realizado no estado o Espírito Santos, em que o f_{dpv}, f_Θ e FR, com valores médios de 0,65, 0,64 e 0,76 foram mais limitantes à produtividade. O FR médio neste estudo foi de 0,87, foi o terceiro fator mais restritivo.

Graficamente (figura 49), nota-se uma tendência de aumento em produtividade com a diminuição do f_{dpv}, f_Θ e consequentemente o f_{phy}. As áreas mais produtivas concentram-se em locais de altitude mais elevadas e temperatura média máxima menos elevadas, no sul e sudeste da área de estudo, em que o DPV também é mais ameno. Já as áreas menos produtivas concentraram-se no noroeste da área de estudo, onde as temperaturas médias máximas e mínimas são mais elevadas do que o restante da área.

No 3-PG o DPV é calculado em função da temperatura máxima e mínima. O DPV está diretamente relacionado ao efeito da condutância estomática, o seu aumento ocasiona o fechamento do estômato, levando a redução na condutância estomática e diminuição da transpiração e crescimento. Karasawa (2006) e Stape, Binkley e Ryan (2008) estudando experimentos controlados em espécie arbórea (café e eucalipto, respectivamente) verificaram que mesmo o estresse hídrico sendo nulo, através da inclusão de água no sistema via irrigação, o DPV limita a atividade fisiológica da planta e diminui a capacidade da planta em ganhar vantagens produtivas com a irrigação.

A disponibilidade de água é considerada por alguns autores como o fator mais limitante ao crescimento florestal (GONÇALVES; DEMATTÊ; COUTO, 1990; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004a; 2004b; GONÇALVES et al., 2008), na região nordeste do Brasil em um estudo conduzido por Stape; Binkley, Ryan (2004a) constataram que a cada 100 mm de acréscimo de chuva havia um ganho de aproximadamente 2,3 Mg $ha^{-1}ano^{-1}$ em produtividade e 0,3 m^2folha m^{-2}solo de IAF.

O FR, terceiro fator limitante, foi determinado de acordo com a classificação de fertilidade descrita no mapa pedológico, onde 77% da área é composta por solos com fertilidade média, a qual adotou-se um valor constante de 0,85, baseado na resposta à fertilização dos pares de parcelas gêmeas instaladas em parte da área zoneada, no entanto, o FR adotou valores de 1 em solos férteis e 0,75 para pouco férteis. Dos pares de parcelas gêmeas avaliados, 66% (68 parcelas) responderam à fertilização, resultando no ganho de 13% em produtividade devido a fertilização extra. O FR tem o potencial de ser aumentado, visto que no Brasil, o manejo nutricional é amplamente conhecido e bem difundindo no setor florestal. Um exemplo é o estudo realizado por Stape et al. (2010) em oito sítios distribuídos no Brasil e pertencente ao projeto BEPP, o aumento das taxas de adubação na floresta em relação a convencionalmente utilizada para o plantio de eucalipto não resultaram no aumento de incremento para a floresta, em escala experimental. O FR no estudo de Almeida et al. (2010) variou de 0,48 a 0,84, no entanto para o cálculo deste modificador os autores levam em consideração não somente a fertilização, mas também a limitação por água, oxigênio, manejo e topografia cada qual com um peso diferente, onde a fertilização adota peso máximo de 0,4 em relação ao valor máximo do modificador que é 1.

O f_t e f_{frost} adotaram padrões semelhantes de distribuição dos valores observados em relação à produtividade (figura 49) com médias elevada do fator de 0,97 para ambos os casos, isso se deve ao fato da geada ser calculada com base na temperatura mínima, e a temperatura máxima da média mensal que foi estimada para a região não ultrapassou da máxima temperatura suportada para o crescimento do *Eucalyptus* que é 40ºC. Nota-se que em algumas áreas, apesar da temperatura não ser um fator limitante na produtividade, adotando valor do f_t igual a 1, o IMA7 não foi o maior, demonstrando que há outros fatores mais limitantes de crescimento, como o DPV ou água no solo.

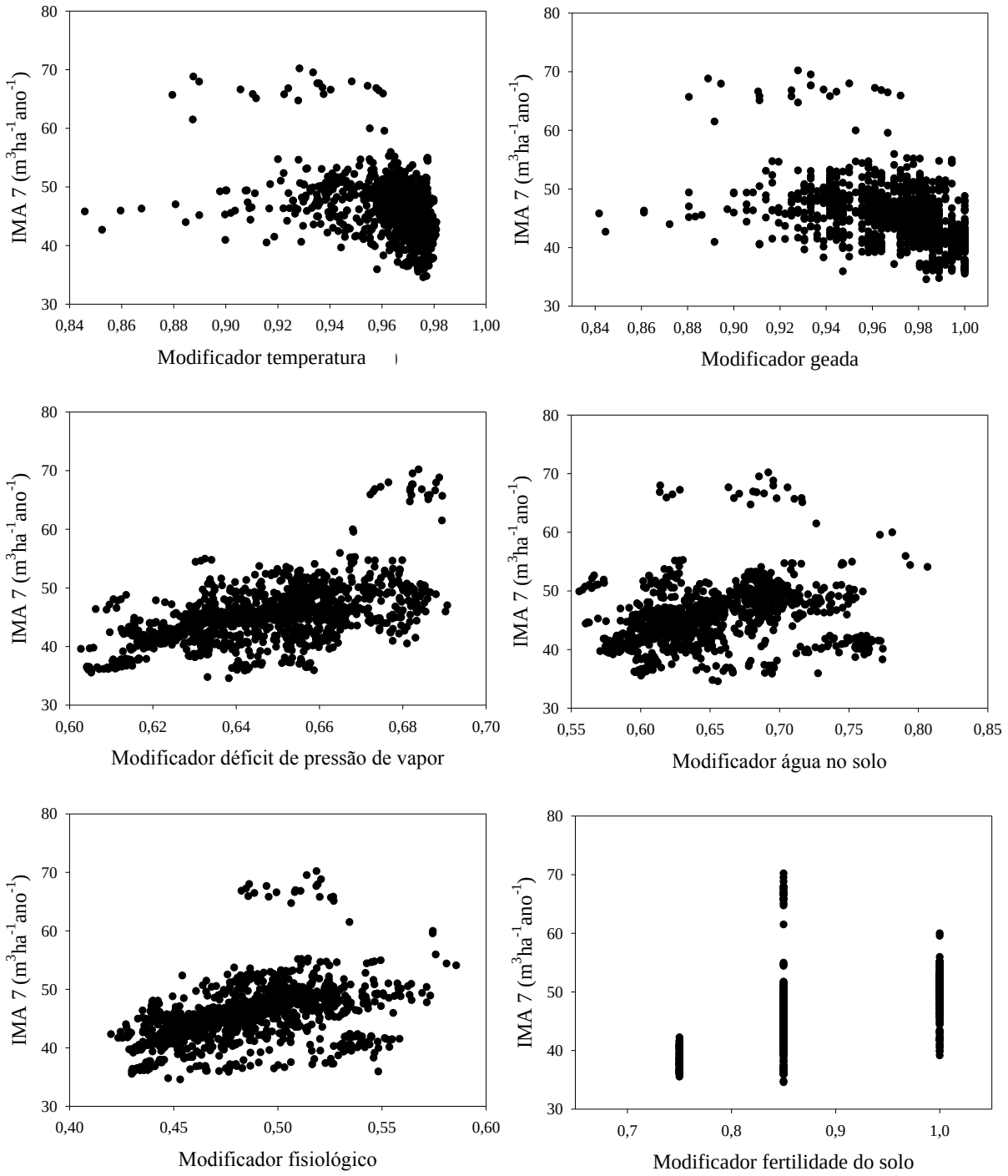

Figura 49 – Valores médios de modificadores da eficiência quântica do dossel em relação a produtividade (IMA7 em $m^3 ha^{-1}ano^{-1}$) estimado pelo modelo 3-PG para 1.200 unidades amostrais

Os fatores limitantes de crescimento analisados por tipo de solo demonstram que apesar da parametrização ser diferenciada, a restrição do crescimento é provocada pelos mesmos fatores nos diferentes tipos de solo: déficit de pressão de vapor e água no solo (tabela 15). Como estes fatores não são controlados pelos silvicultores, o zoneamento da

produtividade dá suporte na orientação de terras mais produtivas ao cultivo *Eucalyptus*, úteis no plano de expansão florestal. Para os melhoristas genéticos, a orientação seria ao realizar a seleção genética e recomendação de clones tolerantes ao déficit hídrico para as áreas com alto DPV e/ ou baixa retenção de água, evitando assim, a perda em produtividade e até morte parcial ou total do povoamento pelo déficit hídrico.

Tabela 15 – Valores médios de modificadores da eficiência quântica do dossel: temperatura (ft), déficit de pressão de vapor (f_{dpv}), água no solo (f_{asw}), geada (f_{frost}), fisiologia (f_{phy}) e fertilidade do solo por tipo de solo: Neossolo (RQ), Latossolo (LV) e Argissolo (PV) para 1.200 unidades amostrais

Solo	**N.obs**	$\mathbf{f_t}$	$\mathbf{f_{dpv}}$	$\mathbf{f_{asw}}$	$\mathbf{f_{frost}}$	$\mathbf{f_{phy}}$	**FR**
RQ	108	0,97	0,65	0,70	0,97	0,51	0,89
LV	825	0,97	0,64	0,63	0,97	0,47	0,85
PV	267	0,95	0,67	0,67	0,96	0,51	0,90
Geral	1.200	0,97	0,65	0,65	0,97	0,48	0,87

Este estudo comprova a potencialidade do uso do modelo 3-PG no zoneamento da produtividade florestal. De forma espacial para obter o zoneamento produtivo como suporte nas tomadas de decisões florestais. Pode-se também ser usada para estabelecimento de uma política pública de incentivo ao reflorestamento em áreas marginalizadas ou abandonadas, e garantir o suprimento de madeira aos centros consumidores, servindo como embasamento técnico de produtividade média para determinação da oportunidade do uso da terra.

Além da produtividade, este tipo de modelo permite compreender a dinâmica do sistema florestal em termos de balanço hídrico, por exemplo, permitindo ao usuário avaliar o efeito do cultivo do *Eucalyptus* em algumas situações climáticas ou mesmo na microbacia.

4.3 Conclusão

Utilizando-se do modelo 3-PG aprimorado nesta tese, fez-se a estimativa da produtividade florestal no nordeste do Estado de Sao Paulo a nível espacial, em pixels de 400 ha, confrontando-os posteriormente com os dados reais de produtividade, medidos em campo. O modelo 3-PG se valeu de dados médios históricos de clima e valores médios de solo. Com base neste estudo, pode-se concluir que:

- O modelo 3-PG aplicado espacialmente foi capaz de estimar a produtividade florestal para o nordeste do estado de São Paulo com relativa precisão do valor médio, que foi de cerca de 45 $m^3ha^{-1}ano^{-1}$;

- O modelo também capturou adequadamente a maior expectativa de produção nos solos mais argilosos e férteis, comparativamente aos mais arenosos e com menor soma de bases;

- Apesar do ajuste da média, ainda há dispersão entre os valores reais e os simulados, creditados à perda de sensibilidade do modelo às nuâncias de variabilidade da produtividade do *Eucalyptus* frente ao clima, solo e manejo específico ao que é submetido. O uso do IAF medido em campo ou estimado pelo sensoriamento remoto pode ser uma alternativa para aumentar a precisão na estimativa de produtividade; e

- Os fatores que mais restringe o crescimento do *Eucalyptus* para esta região são o déficit de pressão de vapor e quantidade de água no solo, no caso de plantios comerciais rotineiramente fertilizados.

Referências

AB'SABER, A.; GOLDEMBERG, J.; RODES, L. Identificação de áreas para o reflorestamento no espaço total do Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v.4, n.9, p.63-119,1990.

ALMEIDA, A.C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T.R.; BEADLE, C.; FONSECA, S.; LOOS, R. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p.1730-1740, 2010.

ALMEIDA, A.C.; LANDSBERG, J.J.; SANDS, P.J.; Parameterisation of 3-PG model for fast-growing Eucalyptus grandis plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.1993, p179-195, 2004a.

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 Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.167-177, 2004b.

ALMEIDA, A. **Application of a process-based model for predicting and explaining growth in Eucalyptus plantations**. 2003. 232 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - The Australian National University, Canberra, 2003.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; GONÇALVES, J.L.M.; SENTELHAS, P.C. Modeling mean air temperature for Brazil using linear models with integrated variables. Submitted (2011a).

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. High-resolution mapping of Köppen climate classification for Brazil. Submitted (2011b).

BRÉDA, N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 54, n. 392, p. 2043-2417, 2003.

COOPS, N.C.; WARING, R.H. The use of multiscale remote sensing imagery to derive regional estimates of forest growth capacity using 3-PGS. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v.75, p.324–334, 2001.

COOPS, N.C.;WARING, R.H.; BROWN, S.R.;RUNNING, S.W. Comparison of predictions of net primary production and seasonal patterns in water use derived with two forest growth models in Southwestern Oregon. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.142, p. 61–81, 2001.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Brasília: EMBRAPA Produção de informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306p.

GOLFARI, L.; CASER, R.L.; MOURA, V.P.G. Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil. **Série Técnica PRODEPEF**, Brasília, n.11, p.1-66, 1978.

GONÇALVES, J.L.M.; DEMATTÊ, J.L.I.; COUTO, H.T.Z. Relações entre a produtividade de sítios florestais de Eucalyptus grandis e E. saligna com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no Estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, v.43/44, p.24-39, 1990.

GONÇALVES, J.M.L **Características do sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas.** 1994. 84p. Tese (Tese de Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura, Piracicaba, 1994.

GONÇALVES, J.L.M..; STAPE, J.L.; LACLAU, J.L.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, Menlo Park, v.70, p.105-118, 2008.

GONÇALVES, J.L. M.; MELLO, S. L.M. O sistema radicular das árvores. In:GONÇALVES, J.L.M.; MIRANDA, S.M. **Nutrição e Fertilidade Florestal.** Piracicaba: IPEF, 2000, p.219-268.

_____Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Atlas do Brasil**. Rio de Janeiro, 1959.

_____Instituto Economico Agricola – IEA. Mercado de Produtos de *Eucalyptus* em São Paulo. São Paulo, 2010. Disponível em http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=12059.

KARASAWA S. **Evapotranspiração de cafezal semi-adensado irrigado por gotejamento e sua relação com a evapotranspiração de referência**. 2006. 96p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

_____Ministério da Agricultura. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo.**, São Paulo: Ministério da Agricultura,1960. p.24.

_____Ministério de Minas e Energia (MME), 2008, Disponível em: http://www.mme.gov.br. Acesso em: 15 jun. 2011.

NIGHTINGALE, J.M.; HILL, M.J.; PHINN, S.R.; DAVIES, I.D.; HELD, A.A.; ERSKINE, P.D. Use of 3-PG and 3-PGS to simulate forest growth dynamics of Australian tropical rainforests: I. Parameterisation and calibration for old-growth, regenerating and plantation forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 254, p.107 -121, 2008a.

NIGHTINGALE, J.M.; HILL, M.J.; PHINN, S.R.; DAVIES, I.D.; HELD, A.A. Use of 3-PG and 3-PGS to simulate forest growth dynamics of Australian tropical rainforests: II. An integrated system for modelling forest growth and scenario assessment within the wet tropics bioregion. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.254, p.122 -133, 2008b.

OLIVEIRA, J.B. de; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. Mapa Pedológico do Estado de São Paulo. Legenda Expandida. Campinas: Instituto Agronômico; Rio de Janeiro: EMBRAPA – Solos, 1999. 64 p. Escala 1:500.000.

RYAN, M.G.; STAPE, J.L., BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA C. R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M. A. ; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C. Factors controlling Eucalyptus productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, p.1695-1703, 2010.

REIS, M.G.F.; KIMMINS, J.P.; REZENDE, G.C. DE; BARROS, N.F. DE. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de Eucalyptus grandis plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, v.9, p.149-162,1985.

STAPE, J.L. BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.17-31, 2004a.

STAPE, J.L. BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; 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**, Amsterdam, v.193, p.219 - 234, 2004b.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam,v.255, p. 920-930, 2008.

STAPE J.L.; BINKLEY, D.; RAYAN, M.G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA C. R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M. A. ; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam,v.259, p.1684-1694, 2010.

TICKLE, P.K.; COOPS, S.D. ;HAFNER,S.D. ;BAGO SCIENCE TEAM.; Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using a process model, 3PG-SPATIAL. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.152, p.275-291, 2001.

WHITE , J.D.; COOPS, N.C.; SCOTT, N.A. Estimates of New Zealand forest and scrub biomass from the 3-PG model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.131, p.175–190, 2000.

4 CONCLUSÕES GERAIS

Assim, retomando as hipóteses iniciais do estudo, verifica-se que:

i. O modelo 3-PG poderá ser calibrado com adequada acurácia para as diferentes produtividades no nordeste do estado de São Paulo, à semelhança de outras regiões do Brasil (STAPE, 2002; ALMEIDA et al., 2004a; SILVA, 2006; BEHLING, 2009; BORGES, 2009; ALVARES, 2011): **Corroborada**

ii. A adequação do modelo 3-PG para modificar a quantidade máxima de água no solo aumentará a precisão com que o crescimento é estimado, uma vez que a quantidade máxima de água disponível no solo para planta não é constante ao longo do ciclo da floresta, face ao crescimento em profundidade do sistema radicular (CHRISTINA et al., 2011): **Corroborada.**

iii. A incorporação das variáveis climáticas na dinâmica da taxa de queda de folhedo do modelo 3-PG aumentará a precisão de sua estimava, atualmente baseada apenas na idade de fechamento do dossel (HENNESSEY et al., 1992, DOUGHERTY et al. 1995): **Corroborada.**

iv. Os modificadores de fertilidade propostos pelo modelo 3-PG podem ser objetivamente relacionados com atributos químicos do solo (STAPE, 2002; FERREIRA; STAPE 2009): **Corroborada.**

v. O uso do 3-PG de forma espacializada após as devidas calibrações e validações permite efetuar inferências acerca da produtividade real a nível regional para tomadas de decisões (ALMEIDA et al.; 2004 ALMEIDA et al., 2010): **Corroborada**

vi. O fator que mais restringirá o crescimento das plantações fertilizadas de *Eucalyptus* no estado de São Paulo será a quantidade de água no solo disponível para a planta (STAPE et al., 2010): **Corroborada, no entanto assim como a água do solo, o déficit de pressão de vapor tem importante influência no crescimento das plantações de *Eucalyptus*.**