

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
FLORESTAL**

**Jean Pierre Cavalli**

**Produtividade de *Eucalyptus saligna* com base nas  
propriedades físico-hídricas do solo e  
parametrização do modelo ecofisiológico 3-PG**

Santa Maria, RS  
2017



Jean Pierre Cavalli

**PRODUTIVIDADE DE *Eucalyptus saligna* COM BASE NAS  
PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E  
PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO ECOFISIOLÓGICO 3-PG**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. PhD José Miguel Reichert

Santa Maria, RS  
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Cavalli, Jean Pierre

Produtividade de *Eucalyptus saligna* Smith com base nas propriedades físico-hídricas do solo e parametrização do modelo ecofisiológico 3-PG / Jean Pierre Cavalli. – 2017.

149 p.; 30 cm

Orientador: José Miguel Reichert

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2017

1. Crescimento e produtividade do eucalipto. 2. Propriedades físico-hídricas do solo. 3. Modelagem do crescimento. 4. NEOSSOLO QUARTZARÊNICO. 5. ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico. I. Reichert, José Miguel II. Título.

© 2017

Todos os direitos reservados a Jean Pierre Cavalli. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: [jeancavalli@gmail.com](mailto:jeancavalli@gmail.com)

Jean Pierre Cavalli

**PRODUTIVIDADE DE *Eucalyptus saligna* COM BASE NAS  
PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E  
PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO ECOFISIOLÓGICO 3-PG**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Florestal**.

Aprovado em 23 de fevereiro de 2017:

  
\_\_\_\_\_  
**José Miguel Reichert, PhD (UFSM)**  
**(Presidente/Orientador)**

  
\_\_\_\_\_  
**Eduardo Pagel Floriano, Dr. (UNIPAMPA)**

  
\_\_\_\_\_  
**Gabriel Paes Marangon, Dr. (UFAL)**

  
\_\_\_\_\_  
**Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki, Dr. (UFPeI)**

  
\_\_\_\_\_  
**Thomé Lovato, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2017



*Dedico à minha família, Jorge, Sônia, Jaques, Jefe, Mano e, especialmente, à minha esposa e companheira Silvia, pelo apoio e incentivo durante o desenvolvimento deste projeto.*





## RESUMO

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

Universidade Federal de Santa Maria

### PRODUTIVIDADE DE *Eucalyptus saligna* COM BASE NAS PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO ECOFISIOLÓGICO 3-PG

AUTOR: JEAN PIERRE CAVALLI

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 23 de fevereiro de 2017.

O presente estudo foi realizado nas regiões fisiográficas da Serra do Sudeste e Encosta do Sudeste do estado do Rio Grande do Sul. O objetivo do estudo foi identificar as propriedades físico-hídricas dos solos relacionadas à produtividade dos sítios florestais, distintos quanto às propriedades físico-estruturais e à água disponível (AD), caracterizados pela presença de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico (ARG) e de Neossolo Quartzarênico Órticos típicos (NEO), e ainda, realizar a parametrização do modelo Physiological Principles to Predicted Growth (3-PG). A caracterização do crescimento e produtividade dos povoamentos foi realizada por meio de inventários florestais e pela amostragem destrutiva e cubagem, pelo método de Smalian, de 30 árvores de diâmetro médio quadrático (dg). As propriedades físico-hídricas dos solos foram determinadas em amostras de solos de estrutura preservada e alterada, coletadas nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80, 0,80-1,00 e 1,00-1,20 m, em 12 pontos amostrais. A produtividade foi distinta nas áreas ARG e NEO, com média de 373,9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e 272,3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, aos 89 meses de idade. Nos solos ARG (classe textural franco arenosa a muito argilosa), a AD variou entre 0,100 e 0,304 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, e os maiores valores de densidade do solo (Ds; 1,64 Mg m<sup>-3</sup>) foram observados nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m. Pela análise de regressão múltipla a Ds e a macroporosidade (Mac) da camada 0,40-0,60 m tiveram eficiência estatística com r<sup>2</sup> ~ 0,22 na estimativa da variância do incremento médio anual em volume (IMA<sub>V</sub>). A permeabilidade do solo ao ar (K<sub>ar</sub>) foi a principal propriedade do solo relacionada à produtividade dos povoamentos das áreas ARG. Nas áreas NEO (classe textural areia) a AD variou entre 0,025 e 0,04 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e a maior Ds foi observada na camada 0,80-1,00 m (1,60 Mg m<sup>-3</sup>). A Ds determinada nas camadas acima de 0,60 m de profundidade explicou 14% da variância observada no IMA<sub>V</sub> e 27% da variância da altura total (h). Pela regressão múltipla a Ds e a K<sub>ar</sub> das camadas superficiais explicaram em torno de 23% da variância observada no incremento médio anual em biomassa de lenho (IMA<sub>BL</sub>). Na parametrização do modelo 3-PG foram obtidas estimativas caracterizadas por r<sup>2</sup> superior a 0,9 para o volume com casca (V; m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), biomassa de lenho (BL; Mg ha<sup>-3</sup>) e altura total (h; m), e igual a 0,78 para o dap (cm). O indicador estatístico Nash-Sutcliffe teve valores superiores a 0,8, enquanto o indicador Bias percentual (PBIAS) apontou tendência de subestimativa inferior a 12%. No processo de validação do modelo, realizado em parcelas não utilizadas na parametrização, os resultados foram semelhantes aos obtidos na avaliação da eficiência, com exceção para a variável dap, que foi subestimada nas menores idades. Solos com alta disponibilidade de água podem ter sua qualidade física, com base na produtividade, determinada pelas propriedades que representam o fluxo de solutos e gases, enquanto solos de textura grossa, altamente drenáveis, têm sua capacidade produtiva inversamente relacionada a Ds. O modelo 3-PG foi eficiente e preciso para a estimativa da produtividade do *E. saligna* nas condições climáticas observadas, com maior sensibilidade para os solos de textura grossa.

Palavras-chave: qualidade do sítio, potencial produtivo, permeabilidade do solo ao ar.



## ABSTRACT

Forest Engineering Post-Graduation Program  
Federal University of Santa Maria

### ***Eucalyptus saligna* YIELD BASED ON PHYSIC-HYDRIC SOIL PROPERTIES AND ECOFISIOLOGICAL MODEL 3-PG PARAMETERIZATION**

AUTHOR: JEAN PIERRE CAVALLI

ADVISOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Date and Local: Santa Maria, February 23<sup>th</sup>, 2017.

This study was developed in Serra do Sudeste and Encosta do Sudeste physiographic regions of Rio Grande do Sul state. The objective was to identify the physical and hydraulic soil properties related to forest yield sites in two distinct areas, including physical-structural properties and soil available water capacity (AW) of Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico (ARG) and Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NEO), as well as perform parameterization of the Physiological Principles to Predicting Growth model (3-PG). In the two sites with high (ARG) and low (NEO) productive potential capacity, the growth and productivity of stands characterization was based on data from forest inventories and from destructive sampling and cube by Smalian method of 30 trees of medium quadratic mean diameter (dg). Soil properties were determined in undisturbed and disturbed soil samples, taken from 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, 0.40-0.60, 0.60-0.80, 0.80-1.00 e 1.00-1.20 m soil depths, in 12 sampling points. *Eucalyptus* yield was different in the ARG (from clay loam to clay texture) and NEO (sandy texture) areas, characterized by mean values of 373.9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> and 272.3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, for 89-months-old stands. In the ARG, AW ranged from 0.100 up to 0.304 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. The highest soil bulk density (BD; 1.64 Mg m<sup>-3</sup>) was observed in the 0.00-0.10 and 0.10-0.20 m soil layers. Multiple regression analysis with BD and macroporosity (Mac) of the 0.40-0.60 m soil layer had  $r^2 \sim 0.22$  in variance estimation of mean annual volume increment (MAI<sub>v</sub>). Soil air permeability (K<sub>ar</sub>) was the main soil property related to productivity in ARG stands. In the NEO (sandy texture) areas, AW ranged from 0.025 up to 0.04 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> and BD had the highest values (1.60 Mg m<sup>-3</sup>) in the 0.80-1.00 m soil layer. The BD determined from surface up to 0.60 m explained 14% of MAI<sub>v</sub> variance and 27% of the total height variance (h). Multiple regression that included BD and K<sub>ar</sub> of the surface layers explained around 23% of mean annual stem biomass increment (MAI<sub>SB</sub>) variance. In the parameterization of the model 3-PG we obtained estimates characterized by  $r^2$  higher than 0.9 for the wood volume with bark (V; m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), wood biomass (BL; Mg ha<sup>-3</sup>) and total height (h), and equal to 0.78 for the diameter at breast high (dbh; cm). The statistical efficiency described by the Nash-Sutcliffe indicator had values higher than 0.8, while the PBIAS indicator showed a tendency of underestimation of less than 12%. In the validation process of the model, performed in unused portions in the parameterization, the results were similar to those obtained in the efficiency evaluation, except for the variable dbh, which was underestimated at the lowest ages. The results showed that the soils with high water availability have their physical quality, based on productivity, determined by the properties that represent the flow of solutes and gases, while coarse soils, highly drainable, have their productive capacity inversely related to BD. The 3-PG model was efficient and accurate for the estimation of *E. saligna* productivity in the observed climatic conditions, with a higher sensitivity for coarse textured soils.

Keywords: site quality, productive potential, air permeability.



## LISTA DE FIGURAS

<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>23</b>
Figura 1 - Estrutura simplificada do modelo Physiological Principals Predicting Growth (3-PG).....	37
<b>3 CAPITULO 1 - PRODUTIVIDADE DO <i>EUCALYPTUS SALIGNA SMITH</i> COM BASE NAS PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DOS SOLOS.....</b>	<b>49</b>
Figura 1 - Áreas de estudo nos municípios de Eldorado do Sul-RS (1) e Barra do Ribeiro-RS (2), com a delimitação dos povoamentos florestais das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO).....	55
Figura 2 - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico latossólico (a), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (b) e NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico (c) que ocorrem nas áreas com capacidade de potencial produtivo alta (a e b) e baixa (c). ....	56
Figura 3 – Distribuição das unidades amostrais e dos pontos de coleta de solo em um talhão da área de NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico (NEO). ....	58
Figura 4 – Curva de retenção de água (CRA) dos solos representativos das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO).....	65
Figura 5 – Resistência do solo à penetração (RP) em diferentes tensões de água (1, 6, 10, 33 e 100 kPa) e umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ; $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), das áreas com capacidade de potencial produtivo alta, em povoamentos de 89 meses (ARG <sub>89</sub> ; a) e 58 meses de idade (ARG <sub>58</sub> ; b). ....	72
Figura 6 – Resistência do solo à penetração (RP) em diferentes tensões de água (1, 6, 10, 33 e 100 kPa) e umidade volumétrica do solo, das áreas com capacidade de potencial produtivo baixa, com povoamentos de 89 (NEO <sub>89</sub> ; a) e 58 meses de idade (NEO <sub>58</sub> ; b). ....	73
Figura 7 – Índice de cone (RPIC) nos solos com capacidade de potencial produtivo alta (ARG; a) e baixa (NEO; b), em povoamentos com idade entre 33 (ARG <sub>33</sub> , NEO <sub>33</sub> ) e 89 (ARG <sub>89</sub> , NEO <sub>89</sub> ) meses de idade. ....	74
Figura 8 – Biomassa de lenho (BL; a) e volume de madeira com casca (V; b), observado (Obs) e estimado (Est) em função do diâmetro a altura do peito (dap), da altura (h), densidade (N ha <sup>-1</sup> ) e idade, para as áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO). ....	75
Figura 9 – Índice de sítio das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 58 (NEO <sub>58</sub> e ARG <sub>58</sub> ) e 89 (NEO <sub>89</sub> e ARG <sub>89</sub> ) meses de idade dos povoamentos.....	77
Figura 10 - Incremento médio anual em diâmetro a 1,30 m de altura (dap) e altura (a), e em biomassa de lenho e volume de madeira (b), das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 58 (ARG <sub>58</sub> e NEO <sub>58</sub> ) e 89 (ARG <sub>89</sub> e NEO <sub>89</sub> ) meses de idade dos povoamentos. ....	77
Figura 11 - Incremento médio anual em volume (IMA <sub>V</sub> ) e em biomassa de lenho (IMA <sub>BL</sub> ) em função da macroporosidade (Mac) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta aos 58 (ARG <sub>58</sub> ) e 89 (ARG <sub>89</sub> ) meses de idade dos povoamentos. ....	79
Figura 12 - Incremento médio anual em volume (IMA <sub>V</sub> ) em função da permeabilidade do solo ao ar à 6 kPa (K <sub>ar</sub> ) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta aos 58 (ARG <sub>58</sub> ) e 89 (ARG <sub>89</sub> ) meses de idade dos povoamentos. ....	79
Figura 13 – Altura (h) e incremento médio anual em volume (IMA <sub>V</sub> ) em função da microporosidade (Mic) da área com capacidade de potencial produtivo alta aos 58 (ARG <sub>58</sub> ) e 89 (ARG <sub>89</sub> ) meses de idade dos povoamentos. ....	80

Figura 14 – Altura (h) e incremento médio anual em volume (IMA <sub>v</sub> ) em função da macroporosidade (Mac) e da densidade do solo (Ds) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta aos 58 (ARG <sub>58</sub> ) e 89 (ARG <sub>89</sub> ) meses de idade dos povoamentos. ....	82
Figura 15 – Incremento médio anual em volume (IMA <sub>v</sub> ) e em biomassa de lenho (IMA <sub>BL</sub> ) em função da densidade do solo (Ds) e da permeabilidade do solo ao ar à 10 kPa (K <sub>ar10</sub> ) das áreas com capacidade de potencial baixa aos 58 (NEO <sub>58</sub> ) e 89 (NEO <sub>89</sub> ) meses de idade dos povoamentos. ....	84
<b>4 CAPÍTULO 2 - PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO 3-PG PARA <i>Eucalyptus saligna</i> SMITH CULTIVADOS EM NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS ÓRTICOS TÍPICOS E EM ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS DISTRÓFICOS.....</b>	<b>101</b>
Figura 1 – Precipitação pluvial, insolação e temperaturas máxima e mínima ocorridas nas áreas de estudo, no período entre 2010 e 2016. ....	119
Figura 2 – Incremento médio anual volumétrico sem casca (a) e em biomassa do fuste (b) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 33 (ARG <sub>33</sub> e NEO <sub>33</sub> ), 58 (ARG <sub>58</sub> e NEO <sub>58</sub> ) e 89 (ARG <sub>89</sub> e NEO <sub>89</sub> ) meses de idade dos povoamentos. ....	121
Figura 3 – Biomassa média das áreas ARG e NEO, por compartimento (a) e biomassa média proporcional por árvore (b), aos 33, 60 e 83 meses de idade. ....	123
Figura 4 – Altura total, biomassa de lenho e volume de madeira em função do diâmetro a 1,30 m de altura das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 33 (ARG <sub>33</sub> e NEO <sub>33</sub> ), 58 (ARG <sub>58</sub> e NEO <sub>58</sub> ) e 89 (ARG <sub>89</sub> e NEO <sub>89</sub> ) meses de idade dos povoamentos. ....	125
Figura 5 – Relação entre a biomassa de lenho (BL), a altura, o volume e o diâmetro a 1,30 m de altura (dap) estimados com o modelo 3-PG (BL <sub>Est</sub> , h <sub>Est</sub> , V <sub>Est</sub> , dap <sub>Est</sub> ) em função dos valores observados (linha 1:1), das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG; a) e baixa (NEO; b).....	130
Figura 6 - Altura (h), diâmetro a 1,30 m de altura (dap), volume (V) e biomassa de lenho (BL) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), observados (Obs) aos 33 (ARG <sub>33</sub> e NEO <sub>33</sub> ), 58 (ARG <sub>58</sub> e NEO <sub>58</sub> ) e 89 (ARG <sub>89</sub> e NEO <sub>89</sub> ) meses de idade dos povoamentos, estimados (Est) com o modelo 3-PG.....	132

## LISTA DE TABELAS

### **3 CAPÍTULO 1 - PRODUTIVIDADE DO *EUCALYPTUS SALIGNA* SMITH COM BASE NAS PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DOS SOLOS.....49**

Tabela 1 – Distribuição granulométrica e classe textural dos solos com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO) cultivadas com povoamentos de *E. saligna* aos 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade.....57

Tabela 2 – Água retida no solo saturado ( $\theta_s$ ), na capacidade de campo (CC), no ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (AD) e água drenável (ADr) dos solos com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO) em povoamentos de *E. saligna* aos 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade. ....65

Tabela 3 – Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT) e condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) em diferentes camadas dos solos com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos de *E. saligna*.....68

Tabela 4 – Altura (h), altura dominante ( $h_{dom}$ ), diâmetro à 1,3 m de altura (dap), volume (V) e biomassa de lenho (BL) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos. ....76

### **4 CAPÍTULO 2 - PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO 3-PG PARA *Eucalyptus saligna* SMITH CULTIVADOS EM NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS ÓRTICOS TÍPICOS E EM ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS DISTRÓFICOS ..... 101**

Tabela 1 – Altura (h), diâmetro a 1,3 m de altura (dap), volume sem casca ( $V_{sc}$ ) e biomassa de madeira do fuste (WS) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 33 (ARG<sub>33</sub> e NEO<sub>33</sub>), 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 meses de idade (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) dos povoamentos. .... 120

Tabela 2 – Parâmetros de calibração do modelo 3-PG..... 127

Tabela 3 – Indicadores estatísticos para a estimativa da altura (h), do diâmetro a 1,30 m de altura (dap), do volume (V) e da biomassa de lenho (BL) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 33 (ARG<sub>33</sub> e NEO<sub>33</sub>), 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.....131

Tabela 4 – Indicadores estatísticos para a estimativa da altura (h), do diâmetro a 1,30 m de altura (dap), do volume (V) e da biomassa de lenho (BL) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 33 (ARG<sub>33</sub> e NEO<sub>33</sub>), 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.....131





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD	Água disponível nos solos
AD	Água disponível no solo
ADr	Água drenável
AFE	Área foliar específica
ARG	Argissolos Vermelho-Amarelo Distrófico típico e latossólico
BL	Biomassa de lenho
BRF	Biomassa de raízes finas
BRG	Biomassa de raízes grossas
CAD	Capacidade de água disponível no solo
cap	Circunferência à altura do peito (1,3 m)
CC	Capacidade de campo
CRA	Curva de retenção de água
CV	Coefficiente de variação
dap	Diâmetro à altura do peito (1,3 m)
Db	Densidade básica da madeira
dg	Diâmetro médio quadrático
DPV	Déficit de pressão de vapor da água
Ds	Densidade do solo
fage	Modificador do crescimento pela idade dos povoamentos
fCA	Modificador do crescimento pelo CO <sub>2</sub> atmosférico
fDPV	Modificador do crescimento pelo DPV
fg	Modificador do crescimento pelo número de geadas no ano
fN	Modificador do crescimento pela densidade dos povoamentos
FR	Fertilidade do solo no modelo 3-PG
fracBB0	Fração de casca e galhos na idade inicial
fracBB1	Fração de casca e galhos na idade adulta
fT	Modificador do crescimento pela temperatura
fθ	Modificador do crescimento pela água disponível no solo
gammaF0	Taxa mensal de queda de serapilheira em povoamentos jovens
gammaFx	Taxa mensal de queda de serapilheira em povoamentos adultos
gs	condutância estomática
h	Altura total
hdom	Altura dominante
IAF	Índice de área foliar
IC	Índice de cone
IHO	Intervalo hídrico ótimo
IMA	Incremento médio anual
IMABL	Incremento médio anual em biomassa de lenho
IMAV	Incremento médio anual em volume de madeira
Ins	Insolação total diária
Is	Irradiação extraterrestre
K <sub>ar</sub>	Permeabilidade do solo ao ar
K <sub>sat</sub>	Condutividade do solo saturado
MEb	Massa específica básica da madeira
Mg	Megagrama
Mic	Microporosidade do solo
nage	Potência do modificador de crescimento fage

nf, BF	Partição de biomassa para as folhas
Nh	Número de árvores por hectare
NEO	Neossolo Quartzarênico Órtico típico
nr	Partição de biomassa para raízes
ns	Partição de biomassa para galhos, casca e madeira (stem)
pfS2	Relação biomassa folhar/biomassa de lenho em árvores de dap = 2 cm
pfS20	Relação biomassa folhar/biomassa de lenho em árvores de dap = 20 cm
PMP	Ponto de murcha permanente
Pp	Precipitação
PPB	Produção primária bruta
PPL	Produção primária líquida
pRn	Fração mínima de biomassa radicular
pRx	Fração máxima de biomassa radicular
PSR	Profundidade efetiva do sistema radicular
PT	Porosidade total do solo
Qx	Radiação total diária
rage	Idade relativa dos povoamentos
RFA	Radiação fotossinteticamente ativa
RFAA	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida
RFAInc	Radiação fotossinteticamente ativa incidente
RP	Resistência do solo à penetração
SQR	Soma dos quadrados dos resíduos
Tm	Temperatura média do ar
tMAX	Idade máxima de rotação de corte
Tmax	Temperatura máxima do ar
Tmin	Temperatura mínima do ar
UA	Unidade amostral
UR	Umidade relativa do ar
V	Volume de madeira com casca
VSC	Volume de madeira sem casca
$\alpha C$	Eficiência quântica do dossel
$\alpha CX$	Máxima eficiência quântica do dossel
$\delta s$	Declinação solar
$\theta S$	Água retida no solo saturado
$\lambda$	Latitude local
3-PG	Modelo Physiological Principles to Predicting Growth

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>23</b>
2.1 <i>Eucalyptus saligna</i> : descrição da espécie .....	23
2.2 Dinâmica do crescimento florestal .....	24
2.2.1 Assimilação e fixação de carbono .....	26
2.2.2 Condutância estomática .....	27
2.3 Manejo do solo e sua influência na relação solo-planta .....	29
2.4 Modelagem do crescimento e produtividade florestal .....	31
2.4.1 Modelos empíricos .....	32
2.4.2 Modelos mecanísticos .....	33
2.4.3 Modelos híbridos .....	34
2.5 Modelo ecofisiológico 3-PG (Physiological Principles to Predicting Growth).....	35
2.6 Referências Bibliográficas .....	41
<b>3 CAPÍTULO 1 - PRODUTIVIDADE DO <i>Eucalyptus saligna</i> SMITH COM BASE NAS PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DOS SOLOS</b> .....	<b>49</b>
3.1 Introdução .....	52
3.2 Material e métodos .....	55
3.2.1 Áreas de estudo .....	55
3.2.2 Delineamento experimental e amostragem .....	57
3.2.2.1 Variáveis dendrométricas e produtividade do eucalipto .....	58
3.2.2.2 Propriedades físico-hídricas do solo .....	60
3.2.3 Análise estatística e elaboração do modelo de crescimento .....	63
3.3 Resultados .....	64
3.3.1 Propriedades físico-hídricas .....	64
3.3.1.2 Densidade, porosidade do solo e condutividade hidráulica do solo saturado	66
3.3.1.3 Permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) .....	69
3.3.1.4 Resistência do solo à penetração (RP) .....	70
3.3.2 Caracterização dendrométrica e da produção dos povoamentos florestais .....	74
3.3.3 Efeito das propriedades físico-hídricas dos sítios sobre a produtividade do <i>E. saligna</i> .....	78
3.4 Discussão.....	84
3.4.1 Propriedade físico-hídricas dos solos das áreas ARG .....	84
3.4.2 Propriedades físico-hídricas dos solos das áreas NEO .....	88
3.4.3 Relação entre o crescimento a produtividade e o solo .....	90
3.5 Conclusões.....	93
3.6 Referências Bibliográficas .....	94
<b>4 CAPÍTULO 2 - PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO 3-PG PARA <i>Eucalyptus saligna</i> SMITH CULTIVADOS EM NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS ÓRTICOS TÍPICOS E EM ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS DISTRÓFICOS</b> .....	<b>101</b>
4.1 Introdução .....	104
4.2 Material e métodos .....	106
4.2.1 Área de estudo .....	106
4.2.2 Modelo 3-PG .....	106
4.2.3 Delineamento experimental e amostragem .....	108
4.2.4 Dendrometria e produtividade dos povoamentos .....	108
4.2.5 Propriedades espécie-específicas.....	110

4.2.5.1 Índice de área foliar (IAF) e área foliar específica (AFE) .....	110
4.2.5.2 Modulador da produtividade em função da idade ( $f_{age}$ ).....	112
4.2.5.3 Condutância estomática .....	112
4.2.5.4 Profundidade efetiva do sistema radicular (PSR) .....	112
4.2.5.5 Fração galhos e casca (fracBB0; fracBB1) .....	112
4.2.6 Variáveis meteorológicas .....	113
4.2.6.1 Temperatura, precipitação, umidade relativa e radiação solar .....	113
4.2.6.2 Radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA) .....	114
4.2.6.3 Eficiência quântica do dossel ( $\alpha_c$ ).....	114
4.2.7 Propriedades físico-hídricas do solo .....	114
4.2.7.1 Capacidade de armazenamento de água do solo (CAD).....	115
4.2.7.2 Granulometria .....	116
4.2.7.3 Modificador hídrico de crescimento ( $f\theta$ ) .....	116
4.2.8 Parametrização do modelo 3-PG.....	117
4.2.9 Calibração do modelo .....	117
4.2.10 Eficiência e validação do modelo.....	118
4.3 Resultados .....	118
4.3.1 Clima.....	118
4.3.2 Crescimento e produtividade florestal.....	119
4.3.3 Dinâmica foliar .....	123
4.3.4 Taxa de mortalidade .....	124
4.3.5 Parametrização do modelo 3-PG.....	124
4.3.5.1 Relações alométricas.....	124
4.3.5.2 Fração máxima ( $pRx$ ) e mínima ( $pRn$ ) de biomassa radicular .....	126
4.3.5.3 Modificador do crescimento em função da idade ( $f_{age}$ ) .....	126
4.3.5.4 Capacidade de armazenamento de água (CAD) .....	126
4.3.5.5 Partição folha/lenho ( $pfS2$ , $pfS20$ ) .....	126
4.3.5.6 Fração galhos e casca (fracBB0; fracBB1) .....	127
4.3.5.7 Massa específica básica da madeira (MEb) .....	127
4.3.5.8 Taxa de queda de serapilheira .....	127
4.3.6 Eficiência e validação do modelo.....	129
4.4 Discussão .....	133
4.5 Conclusões .....	141
4.6 Referências Bibliográficas .....	142
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>147</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e a expansão das atividades florestais no Brasil levaram à elaboração e execução de grandes projetos, esses que envolvem grandes extensões territoriais e têm sido implantados por empresas com amplo aporte técnico. Em projetos de florestas de eucalipto, analistas de distintas áreas e uma complexidade de parâmetros de análise abrangem as atividades, desde o planejamento inicial até a finalização de cada rotação. Esses trabalhos têm proporcionado rápidas e substanciais inovações referentes às metodologias de análise e maior produtividade.

A interação entre analistas, estimulada pela expansão das áreas de florestas comerciais e pela inclusão de novas companhias no mercado produtor de biomassa madeireira, tem aproximado diferentes áreas de conhecimento como pedologia, climatologia, silvicultura e manejo florestal, na busca da máxima eficiência produtiva. Pesquisas integradoras de variáveis climáticas, edáficas e fisiológicas de espécies cultivadas favorece as inovações tecnológicas e a difusão de novas ferramentas de trabalho, mais complexas e específicas e com resultados precisos e consistentes.

O mapeamento pedológico, a análise das propriedades dos solos de áreas cultivadas com florestas comerciais de eucalipto e a obtenção de relações entre espécie e clima consistem em um procedimento padrão de grandes projetos de produção florestal. Entretanto, a avaliação das propriedades dos solos e das variáveis climáticas para a descrição do potencial produtivo dos sítios ainda é incipiente, sendo principalmente representada por modelos de crescimento empíricos e de base fisiológica. Poucas pesquisas que relacionam propriedades nutricionais e físicas dos solos vêm sendo realizadas e propõem relacionar, de forma mais precisa, os parâmetros que descrevem a variância do potencial produtivo dos sítios, com base em diferentes condições hídricas e, principalmente, distintas propriedades dos solos. Muitas dessas pesquisas possuem uma base empírica de aplicação, na qual equações de crescimento são ajustadas para reescrever o comportamento de um fenômeno passado.

Os modelos empíricos têm como vantagem a simplicidade e facilidade de construção, mas não consideram o sistema gerador dos resultados, o que faz com que os parâmetros de saída do modelo sejam, usualmente, sem significado físico ou biológico. Apesar de serem construídos com poucas variáveis explanatórias, se comparados aos modelos processuais, modelos empíricos têm sua eficiência

diretamente relacionada à sua fórmula, sendo muitas vezes obtidos resultados mais confiáveis a partir de equações mais simples.

As relações alométricas utilizadas na representação e estimativa da biomassa, por exemplo, possuem alta acurácia e eficiência nas estimativas, geralmente em função apenas de variáveis como altura e/ou diâmetro das árvores. Muitas dessas expressões matemáticas compõem parte fundamental de modelos mais complexos, denominados de modelos processuais ou mecanísticos, que associam as análises de predição empírica aos processos fisiológicos que descrevem um comportamento ou resultado. Esses modelos são utilizados para entender a dinâmica de um sistema, sendo o método mais apropriado baseado no ajuste de modelos mecanísticos, pois os seus parâmetros têm significado científico e fornecem algum entendimento do sistema real.

Os modelos mecanísticos podem ser fisiológicos, geralmente muito complexos e construídos a partir de uma extensa variedade de parâmetros, ou híbridos, também definidos como ecofisiológicos, que são significativamente mais simples e menos onerosos quanto às variáveis necessárias à sua parametrização. Os modelos híbridos possibilitam a avaliação de variáveis de forma separada, mas dentro de um contexto geral onde a variação de uma variável tem influência direta na resposta de todo o sistema. Essa dinâmica de análise proporciona a obtenção de prioridades que indicam quais os parâmetros medidos que devem ser alterados para a obtenção de melhores resultados.

Esses modelos possibilitam o entendimento da complexa interação entre os ciclos de energia, água e nutrientes, dentro do ecossistema florestal, o que proporciona a obtenção de respostas a respeito da influência do ambiente sobre as plantas. Além disso, viabilizam ao manejador prever as possíveis consequências das mudanças climáticas sobre o crescimento florestal e determinar o potencial produtivo de áreas nunca cultivadas sendo, portanto, um instrumento imprescindível para uma gestão florestal cada vez mais eficiente.

Com essa perspectiva de análise e com referência à relevância dessas ferramentas, esta pesquisa tem por objetivo avaliar a relação entre as propriedades físicas do solo e as características fisiológicas e de crescimento da espécie *Eucalyptus saligna* e, com base nesses fatores, ajustar os parâmetros do modelo híbrido *Physiological Principles to Predicting Growth* (3-PG) para as condições ambientais das

regiões fisiográficas do estado do Rio Grande do Sul, denominadas de Serra do Sudeste e Encosta do Sudeste.





## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 *Eucalyptus saligna*: descrição da espécie

O gênero *Eucalyptus* ssp., nativo das florestas Australianas, possui mais de 700 espécies que se desenvolvem em condições diversas de clima e solo. No Brasil, plantios comerciais de eucalipto podem produzir até  $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , enquanto a produção média gira em torno de  $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (GONÇALVES et al., 2013). Em povoamentos localizados na região de Guaíba-RS, diferentes procedências de *E. saligna* foram avaliadas aos 7 anos de idade, tendo sido observados valores de incremento médio anual (IMA) superiores a  $72 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (SHIMIZU et al., 1988).

A espécie *E. saligna* ocorre naturalmente na Austrália, principalmente em vales férteis, em uma faixa de cerca de 160 km de largura da costa pacífica australiana, entre as latitudes 28°-35° S. Nas zonas mais ao sul da área de ocorrência, povoa regiões de altitude entre 0 e 300 m acima do nível do mar, podendo ser encontrado em altitude de até 1100-1200 m. Apresenta melhor crescimento em áreas com níveis pluviométricos acima de  $550 \text{ mm ano}^{-1}$  e ocorre naturalmente em regiões caracterizadas por chuvas estivais entre 800 a 1800 mm no verão, com temperaturas subtropicais apresentando máximas médias entre 28 e 30 °C e mínimas médias entre 3 e 4 °C, suportando até temperaturas negativas (-2 °C), com esporádicas geadas (LAMPRECHT, 1990; WAC, 2015).

As árvores possuem troncos retilíneos e podem atingir altura de 35 a 65 m e diâmetro a 1,30 m de altura (dap) de até 250,0 cm. Possuem folhas alternas lanceoladas e madeira de tom rosado a vermelho, densa, dura, com textura grossa, moderadamente durável e fácil de ser trabalhada. A madeira é apropriada para a construção civil, escoras, dormentes e assoalhos, e a espécie tem sido cultivada em plantações madeireiras com curtas durações, em regiões montanhosas dos trópicos, assim como, em áreas entre os paralelos 25° e 35° (FAO, 1979; LAMPRECHT, 1990; WAC, 2015).

A espécie é representada por árvores heliófilas de rápido crescimento, muito sensíveis à matocompetição nos dois primeiros anos, sendo de fácil regeneração em sua área de ocorrência natural. Pode apresentar incremento médio anual entre 36 e  $53 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , em rotação de até 25 anos, sendo que em ambientes menos favoráveis, como em solos pobres por exemplo, a produção reduz-se drasticamente.

A rotação para a produção de lenha e fibra oscila entre 6 e 8 anos (STAPE et al., 2004a).

É considerada uma das espécies mais versáteis, utilizada para usos múltiplos, adaptando-se a solos hidromórficos ou arenosos. Exigente em termos nutricionais, ocorre em solos com boa retenção de umidade, mas não encharcados, nem com alta salinidade ou muito argilosos, desenvolvendo-se preferencialmente em solos francos até levemente argilosos, com material de origem, na maioria dos casos, formado por arenitos ricos em bases, conglomerados ou basaltos terciários (LAMPRECHT, 1990; ROB, 2004).

No Brasil, muitas espécies pertencentes ao gênero *Eucalyptus* ssp. possuem excelente potencial produtivo, mas ainda se observam valores de crescimento e produção aquém das taxas biológicas máximas atingíveis, devido ao ineficiente aproveitamento dos recursos ambientais que influenciam a dinâmica de crescimento destes indivíduos (STAPE et al., 2010).

## **2.2 Dinâmica do crescimento florestal**

O crescimento de uma floresta reflete o potencial produtivo dos sítios, sendo caracterizado como as mudanças de peso e volume individual das árvores, e tem sua magnitude relacionada à espécie, às propriedades edáficas e às condições climáticas. Para uma mesma espécie e mesma condição climática, a variabilidade das propriedades morfológicas e físicas dos solos podem representar alterações significativas nas taxas de crescimento, principalmente por apresentarem relação direta com o fluxo de água, nutrientes, trocas gasosas e com o desenvolvimento do sistema radicular das árvores (VANCLAY, 1994; PRETZSCH, 2009).

Os principais fatores ambientais que atuam sobre o desenvolvimento das plantas são a radiação solar, a temperatura e a disponibilidade de água no solo, sendo que destes, o último apresenta maior importância por influenciar as propriedades físicas do solo que podem ser restritivas ao crescimento das plantas, como a aeração e a resistência do solo à penetração de raízes (LETEY, 1985; MOTA et al., 2012). As propriedades químicas dos solos também são importantes, principalmente nos estágios iniciais de crescimento das plantas; contudo, sua condição natural pode ser facilmente alterada por meio de ações de manejo, o que a torna um fator menos importante na análise do potencial produtivo dos sítios.

Em uma perspectiva onde o solo e a espécie não diferem, o que se verifica com maior nitidez é a influência das condições climáticas sobre a dinâmica de crescimento das florestas. Fatores como o fotoperiodismo, a temperatura e a pluviosidade anual, além de uma série de outras variáveis climáticas, estão diretamente relacionadas às taxas de crescimento dos povoamentos, destacando-se a distribuição e o volume das chuvas anuais, as quais, por afetarem as condições hídricas e o metabolismo das plantas, têm seu déficit diretamente relacionado às perdas em crescimento e produtividade (NOGUEIRA et al., 2001; STAPE et al., 2004a; SOUZA et al., 2006).

O crescimento florestal apresenta-se como resultado da interação das distintas variáveis climáticas com as características biológicas das espécies, sendo observadas maiores taxas de crescimento anual nas situações onde o solo e o clima apresentam pouco ou nenhum fator limitante ao desenvolvimento das plantas. Nesses cenários, a estrutura dos indivíduos e dos povoamentos pode apresentar forte correlação com as taxas de crescimento, pois, dependendo das condições de órgãos como folhas e raízes, altera-se de forma significativa a dinâmica de atividades como a transpiração e a fotossíntese e, por consequência, o aproveitamento dos recursos disponíveis.

A estrutura foliar apresenta ainda maior importância, pois nela encontram-se os pigmentos fotossintetizantes (clorofila) que reagem à ação da luz e transformam energia solar em energia química (RAVEN et al., 1996; TAIZ; ZEIGER, 2004), e também, os estômatos, que controlam a saída de água e as trocas gasosas. As espécies de eucalipto necessitam de 200 a 600 m<sup>3</sup> de água para produzir 1 m<sup>3</sup> de madeira (STAPE et al., 2004a; FORRESTER et al., 2010) e uma melhor estrutura foliar poderá representar ganhos significativos na produtividade dos povoamentos, principalmente devido ao maior aproveitamento da água em menor período de tempo.

A magnitude dessa eficiência no aproveitamento dos recursos pode ser determinada pelos monitoramentos do crescimento florestal, frequentemente realizado por meio de avaliações temporais que consideram a variação dos valores dendrométricos médios de um povoamento. Tais análises proporcionam informações sobre o volume e a distribuição diamétrica das florestas, assim como, sobre o potencial produtivo dos sítios, com base no volume de biomassa acumulado acima e baixo do solo (fustes, galhos, folhas e raízes). Esses valores de biomassa frequentemente são descritos como volume de carbono fixado, com base na relação média de 45 a 50% de carbono por unidade de biomassa (WANG et al., 2001; RITSON; SOCHACKI, 2003; FAO, 2006). A relação biomassa/ carbono pode variar

para cada espécie, tanto nos totais como nos valores relativos, descritos como as partições de madeira, folhas e raízes. Espécies altamente produtivas podem fixar até 9,2 t de carbono ha<sup>-1</sup> anualmente, conforme é observado com *Eucalyptus* spp., cultivados nas distintas regiões do Brasil (SBS, 2006).

### 2.2.1 Assimilação e fixação de carbono

Em escala global, o carbono apresenta-se estocado em três principais reservatórios: terra, atmosfera e oceanos. Dos estoques totais de carbono, a maior parte encontra-se nos solos e nas florestas, sendo que o montante presente nos solos, classificado como necromassa, representa 58% do total de carbono presente no ecossistema do carbono (PAN et al., 2011). O carbono atmosférico, encontrado na forma de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), representa um dos principais componentes relacionado aos processos primários do crescimento das plantas, tendo sido comprovado que maiores concentrações de CO<sub>2</sub> atmosférico apresentam correlação positiva com as taxas de fotossíntese (ALMEIDA et al., 2009).

A fixação de carbono pelas florestas influencia diretamente as taxas e a dinâmica do elemento na atmosfera, sendo resultado da atividade fotossintética que, durante o processo de crescimento das plantas, reduz o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) presente na atmosfera para a produção dos compostos energéticos ATP e NADPH. Esses são utilizados na síntese dos açúcares necessários às reações de fixação de carbono, ou seja, na conversão do CO<sub>2</sub> em compostos orgânicos, descrito como o único processo de importância biológica capaz de aproveitar energia solar (RAVEN et al. 1996; TAIZ; ZEIGER, 2004).

As taxas de assimilação de carbono variam sob a influência de diversos fatores, dentre os quais se destaca a radiação solar, a temperatura, a disponibilidade de água e a concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico (PRETZSCH, 2009). Outro fator que exerce influência sobre a dinâmica de assimilação são as técnicas de manejo, como os desbastes e o espaçamento inicial de plantio. Em povoamentos de maior densidade as árvores geralmente tendem a incrementar a alocação de biomassa no fuste em detrimento ao sistema radicular e folhas, porém sendo a variação em alocação no fuste bem menor que a variação morfológica (POORTER et al., 2012).

Juntamente com fatores relacionados ao clima e ao manejo, uma variável de notável influência sobre o potencial de assimilação de carbono pelas árvores está

relacionada à área foliar, pois considerando que a radiação solar representa a energia de ativação do sistema fotossintético, tal sistema tornar-se-á tão mais produtivo quanto maior for sua área, quantificada na planta pelo índice de área foliar (CARON et al., 2012). Nas folhas, além dos pigmentos fotossintetizantes, também estão presentes as estruturas denominadas estômatos, que possibilitam e controlam a entrada e saída de gases, como o gás carbônico, e a água, com sua atividade diretamente relacionada ao potencial hídrico do solo e ao déficit de pressão de vapor da atmosfera (DPV).

### 2.2.2 Condutância estomática

A condutância estomática ( $g_s$ ) é definida como a medida de regulação da abertura estomática e quantificada pela taxa de difusão das moléculas de vapor de água para fora da cavidade subestomática (LANDSBERG; SANDS, 2010). Conhecido como o primeiro recurso da planta para controlar o estresse hídrico, a abertura estomática ocorre normalmente na presença da luz, em condições ideais de disponibilidade hídrica, o que potencializa a atividade fotossintética e maximiza a difusão de  $CO_2$  para o interior da folha através dos poros estomáticos. Nesse processo, a relação entre o volume de entrada de  $CO_2$  e a perda de água é denominado de eficiência no uso da água, sendo em plantas C3 verificada uma relação em torno de 1/500, onde uma molécula de  $CO_2$  é fixada para cada 500 moléculas de água perdidas (TAIZ; ZEIGER, 2004; BUCKLEY; WARREN, 2014).

Dessa forma, o decréscimo do volume de água disponível no solo, resultante de distintos níveis pluviais ou diferentes propriedades edáficas, acarreta na diminuição do potencial de água nas folhas, que influencia de forma negativa a condutância máxima do dossel, o que diminui a taxa de transpiração e, por consequência, o crescimento da planta (WHITEHEAD; BEADLE, 2004).

Fatores ambientais como a radiação solar, concentração de  $CO_2$  atmosférico, temperatura do ar e disponibilidade de água no solo têm comprovada correlação com as taxas de condutância estomática (FLEXAS et al., 2008). Destes, a água atua proporcionando a turgescência necessária para que as células-guarda abram suas cavidades estomáticas, enquanto o  $CO_2$ , quando em altas concentrações na atmosfera, pode influenciar negativamente a atividade dos estômatos, por exercer um

efeito radioativo de aquecimento (TAIZ; ZEIGER, 2004; AINSWORTH; ROGERS, 2007).

O aumento na influência do déficit de pressão de vapor da água (DPV) resulta em redução na condutância estomática (WHITEHEAD; BEADLE, 2004; WARREN, 2008). Durante a transpiração foliar, a água localizada nas paredes celulares do mesófilo foliar evapora e aloca-se nos espaços intercelulares das folhas de onde é eliminada para a atmosfera por difusão, através dos poros estomáticos. A magnitude desse processo está diretamente relacionada à diferença de concentração do vapor de água entre o interior da folha e a atmosfera e à resistência a difusão entre estes meios (TAIZ e ZEIGER, 2004). A influência do DPV sobre a taxa transpiratória do dossel pode variar, sendo sua grandeza dependente do nível de sensibilidade do decréscimo da condutância estomática com o aumento do DPV.

As taxas de transpiração da floresta apresentam correlação com o índice de área foliar (IAF), com a condutância estomática e com o conteúdo de água no solo. Assim, em condições ideais de disponibilidade hídrica, espera-se que a taxa de transpiração seja amplamente explicada somente em função do DPV e do IAF (LEUNING et al., 1991; WHITEHEAD; BEADLE, 2004). O aumento do DPV de 1 kPa para 2 kPa pode ter como consequência a diminuição de aproximadamente 30% e 10% nos valores da condutância estomática ( $g_s$ ) e taxa fotossintética, respectivamente (WARREN, 2008).

A dinâmica da  $g_s$  também varia de acordo com a localização das folhas no perfil vertical das copas, sendo normalmente verificados maiores valores de  $g_s$  nas folhas presentes na parte superior, em relação às folhas da porção inferior (WARREN et al., 2007). Porém, em algumas situações pode se verificar o inverso, com redução de  $g_s$  nas porções superiores das copas devido à diminuição do potencial hídrico foliar (BUCKLEY; WARREN, 2014).

A diminuição do potencial hídrico influencia diretamente a produtividade, com o comprometimento da condução hidráulica das plantas, principalmente devido à diminuição do potencial hídrico do xilema (MARTORELL et al., 2014). Com isso, é necessário entender os fatores que influenciam a dinâmica foliar e a atividade fotossintética, para melhor orientar as atividades de manejo dos solos, com base nas suas propriedades e na relação entre a produtividade e uso da água pelas plantas.

### 2.3 Manejo do solo e sua influência na relação solo-planta

O manejo do solo para o estabelecimento de povoamentos florestais, por intervenção mecânica ou fertilização, muitas vezes é a primeira atividade silvicultural desenvolvida, podendo alterar tanto as condições físicas como nutricionais dos sítios. Propriedades edáficas, estruturais e o nível de compactação dos solos exercem influência significativa sobre o desenvolvimento das plantas, principalmente relacionado ao desenvolvimento do sistema radicular (VOCANSON et al., 2006; WATSON; KELSEY, 2006; STRUDLEY et al., 2008).

A estrutura do solo tem relação direta com a sua capacidade de manutenção de água, sua aeração e com a sua densidade, sendo uma condição ideal para essas propriedades denominada de intervalo hídrico ótimo (IHO), o qual consiste na faixa onde as limitações ao crescimento vegetal associadas ao potencial da água no solo, aeração e resistência mecânica à penetração de raízes são mínimas (SILVA et al., 1994). Solos com maior IHO expõem com menor frequência as culturas a situações limitantes ao crescimento, sendo o IHO um importante parâmetro de análise relacionado ao crescimento e manejo dos solos (TORMENA et al., 1998; REICHERT et al., 2007). Apesar de ser considerado um indicador da qualidade física dos solos, o IHO possui limitações que possibilitam o questionamento da sua real eficiência, devido a sua incapacidade de contemplar condições de caráter fenológicas e pedológicas comuns (VAN LIER; GUBIANI, 2015).

Em solos com condições estruturais inadequadas ao crescimento de plantas, intervenções mecânicas e técnicas de cultivo podem alterar a condição do solo e reduzir sua densidade, acelerando o crescimento radicular e a absorção de nutrientes e água (GONÇALVES et al., 2004). As atividades de origem mecânica visam mobilizar as camadas compactadas do solo e restabelecer a porosidade, reduzir a densidade e reduzir a estabilidade dos agregados (REIS; REIS, 1995).

A compactação no solo compromete os fluxos de gases, água e calor, alterando também propriedades como a resistência do solo à penetração (RP), o crescimento radicular das plântulas e, por consequência, a produtividade das culturas (BOTTA et al., 2006; VOCANSON et al., 2006). Camadas compactadas muitas vezes são responsáveis pelo mau desempenho de projetos de plantio, bem como, da regeneração natural dentro de florestas existentes (SINNETT et al., 2008). Alterações em propriedades relacionadas à porosidade, como quantidade e qualidade dos poros,

afetam a continuidade, forma e distribuição do sistema poroso, responsável pela retenção e transporte de água no solo, e pela condutividade hidráulica do solo saturado, a última apresentando elevada variabilidade e devendo ser analisada juntamente com outros atributos do solo (HORTON et al., 1994; REICHERT et al., 2004).

Avaliações de crescimento de espécies arbóreas já comprovaram a importância das propriedades do solo com a produção de biomassa. Bécel et al., (2012) verificaram que a redução do teor de água do solo e o aumento da densidade do solo acarretam na redução da biomassa de todos os componentes das plantas (folhas, ramos, tronco, raízes). Os mesmos autores observaram a influência da resistência do solo à penetração (RP) sobre o desenvolvimento das árvores. Altos valores de RP afetam o alongamento e o padrão de ramificação do sistema radicular, o que compromete a produtividade. O aumento da RP também pode acarretar em significativa redução do número de raízes, com inviabilização do seu desenvolvimento com valores da RP entre 2 e 3 MPa (SINNET et al., 2008; BÉCEL et al., 2012).

As propriedades estruturais e físicas alteradas nos processos de mecanização também exercem influência sobre a disponibilidade dos nutrientes para as plantas, principalmente devido ao melhor desenvolvimento do sistema radicular e a maior mobilidade dos solutos. Em sítios considerados de baixa fertilidade, além das boas condições estruturais do solo, faz-se necessário recorrer à fertilização, sendo esta a principal intervenção direcionada à reposição nutricional do ecossistema e à manutenção da produção florestal, especialmente se considerado o total de nutrientes exportado ao final dos ciclos (GATTO et al., 2003).

A adição de fertilizantes estimula a expansão da área foliar, aumentando as taxas de interceptação de luz e transpiração, o volume de água utilizada e de madeira produzido, este último resultante do aumento na relação entre a produção de biomassa acima do solo e a biomassa total (HUBBARD et al., 2004; FORRESTER et al., 2012). A fertilização dos solos apresenta ainda maior importância quando consideradas as florestas comerciais nacionais de eucalipto, as quais são implantadas principalmente em solos com baixa fertilidade e pouca reserva de minerais, predominando áreas com Latossolos de textura média e Neossolos Quartzarênicos (ABRAF, 2013; GONÇALVES et al., 2013).

O aporte nutricional dos solos reflete diretamente no desenvolvimento dos povoamentos, especialmente no período inicial de crescimento, que antecede ao



fechamento do dossel, quando as plantas estão mais suscetíveis aos fertilizantes, a matocompetição e ao método de cultivo. Nessa fase de crescimento, em condições ideais de espaçamento e de disponibilidade de nitrogênio (N), fósforo (P) e água, observam-se ganhos significativos no IAF em povoamento de eucalipto (SCHÖNAU; COETZEE, 1989; STAPE, 2002; GONÇALVES et al., 2004; FORRESTER et al., 2012).

Apesar da necessidade observada na maioria dos sítios, as recomendações nutricionais devem levar em consideração, além da condição de fertilidade dos solos, o material genético utilizado, pois a eficiência nutricional varia entre diferentes genótipos de eucalipto. As propriedades fisiológicas das plantas também expressam os limites de aproveitamento de cada espécie, sendo tal característica responsável pela não efetividade dos tratamentos de fertilização em sítios onde se observam condições nutricionais mínimas para o desenvolvimento das árvores (STAPE et al., 2010; PINTO et al., 2011).

#### **2.4 Modelagem do crescimento e produtividade florestal**

Os métodos de predição do crescimento e da produção florestal baseiam-se principalmente na construção de modelos, empíricos ou mecanísticos, a partir de variáveis biológicas, climáticas e edáficas que se relacionam à dinâmica de crescimento das espécies arbóreas (LANDSBERG; WARING, 1997; WANG et al., 2011). A expressão “modelo”, comumente é conhecida na área florestal como uma ou mais equações de derivação estatística que, tendo como referência as medições de povoamentos florestais, buscam descrever uma variável de interesse e fornecer subsídios para o manejo e a sustentabilidade (LANDSBERG; SANDS, 2010; LAROCQUE et al., 2011).

Na construção e ajuste de equações de crescimento, parâmetros como o volume individual, o diâmetro médio de área basal, o número de árvores por hectare e a altura total ou dominante, apresentam maior utilização nas estimativas do rendimento de um indivíduo ou de uma floresta (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008). Todavia, considerando que as taxas de crescimento são resultado das condições do meio, muitas variáveis climáticas também têm sido incorporadas aos modelos; destas, a luz ou radiação fotossinteticamente ativa (RFA) destaca-se como o principal recurso

limitante ao crescimento individual em povoamentos florestais (CANNEL; GRACE; 1993).

A modelagem do crescimento e produção de uma floresta pode ser desenvolvida a partir de variáveis de fácil obtenção, as quais, na maioria das vezes, buscam descrever de forma empírica a produtividade. Essas variáveis podem ser obtidas por diferentes metodologias, sendo as mais usuais descritas como análise de tronco completa ou parcial, parcelas temporárias e parcelas permanentes (CAMPOS; LEITE, 2002).

Com maior nível de detalhamento, contemplando uma significativa variedade de dados climáticos, de sítio e da espécie, os métodos processuais ou mecanísticos descrevem a produtividade com base em toda a dinâmica do sistema, levantando hipóteses relacionadas ao comportamento dos distintos ecossistemas florestais (LANDSBERG; SANDS, 2010). Esses procedimentos de construção e ajuste de equações podem variar para cada caso, sendo que para modelo processuais, empíricos ou híbridos, o período de projeção e nível de detalhamento será independente da metodologia utilizada, enquanto sua performance relativa dependerá de muitos fatores além dos mecanismos que estão representados em sua arquitetura (DANIELS; BURKHART, 1988; MÄKELÄ, 2007).

#### 2.4.1 Modelos empíricos

A utilização de modelos empíricos como ferramentas de análise e predição do crescimento apresenta-se amplamente difundida na área das ciências agrárias e, especificamente, no setor florestal de produção em curtas rotações (PRETZSCH et al., 2008). Sua aplicação primária baseia-se na prescrição da produção a partir de curvas de regressão analítica entre a idade e a altura, para distintas condições de sítio (PRETZSCH, 2009), tendo como princípio representar estatisticamente um fenômeno passado.

Um maior conhecimento dos processos relacionados à variável de interesse resulta, normalmente, em melhor determinação quanti e qualitativa das variáveis explanatórias (LANDSBERG, 2003a). Tal metodologia consiste na simplificação da condição real observada e admite a criação de modelos com limitadas variáveis de entrada e saída (GARDINER et al., 2008; PRETZSCH, 2009), podendo a mesma ser aplicada para diferentes produtos, como, por exemplo, estimar a probabilidade e a

proporção de danos naturais em uma floresta, com base nos atributos individuais das árvores e de todo o povoamento (LANQUAYE; MITCHELL, 2005). Com ampla utilização na atividade florestal, a modelagem empírica produz informações quantitativas para o planejamento e manejo, com acurácia dentro de limites pré-definidos e com seu emprego geralmente restrito a condições locais específicas, podendo algumas vezes servir para áreas diferentes daquelas que originaram os respectivos parâmetros (LANDSBERG, 2003a; LANQUAYE; MITCHELL, 2005).

Apesar da grande e difundida aplicabilidade, o método empírico de análise apresenta-se sensível pelo baixo potencial de extrapolação, sendo inadequado para abordar diversas questões de interesse dos gestores florestais e para predições sob as quais se observam mudanças climáticas (WEISKITTEL et al., 2009; WANG et al., 2011). Sua utilização de forma mais abrangente pode ser viável somente quando as análises empíricas apresentarem funcionalidade para uma escala menor que a escala de interesse (GARDINER et al., 2008). Contudo, esses modelos não têm base nos mecanismos ou nas teorias que descrevem o crescimento das florestas, sendo tais análises observadas em modelos de maior complexidade, denominados de processuais ou mecanísticos (LANDSBERG; SANDS, 2010).

#### 2.4.2 Modelos mecanísticos

Os modelos processuais ou modelos mecanísticos descrevem um sistema a partir do entendimento dos mecanismos que compreendem o mesmo e, por isso, possuem alto poder explicativo. Contemplam um maior conjunto de variáveis de entrada, com análises relacionadas aos processos fisiológicos que governam o crescimento das árvores, e proporcionam um amplo conjunto de respostas aos manejadores. Tais ferramentas produzem estimativas do potencial produtivo de sítios ainda não povoados, assim como, podem ser utilizados na avaliação dos efeitos de tratamentos silviculturais e das mudanças climáticas sobre a produtividade (PRETZSCH et al., 2008; LANDSBERG; SANDS, 2010).

Esses modelos podem ser utilizados para simular o crescimento florestal em várias escalas temporais e espaciais, mas suas limitações devem sempre ser consideradas, como, por exemplo, a impossibilidade de estimativa das tradicionais variáveis dendrométricas do povoamento, amplamente utilizadas por manejadores florestais (PENG, 2000; ZHANG et al., 2008).

Os modelos mecanísticos, por terem um caráter ecológico, podem apresentar alto nível de complexidade, com extensivas variáveis fisiológicas, sendo necessária a obtenção de dados iniciais para a estimativa dos múltiplos parâmetros, os quais, muitas vezes, são de difícil acesso devido aos cenários observados a campo (WEISKITTEL et al., 2009; LAROCQUE et al., 2011). Esta característica faz com que, frequentemente, algumas variáveis de entrada não sejam avaliadas e sim estimadas, o que pode comprometer o entendimento de um processo ou sistema (PRETZSCH et al., 2008).

Apesar disso, os modelos mecanísticos ou processuais são cada vez mais importantes, pois proporcionam um amplo conjunto de variáveis resposta para os gestores, muito úteis na análise do desenvolvimento das florestas numa larga escala temporal, sob influência de inúmeras alterações ambientais (LANDSBERG, 2003b; MONSERUD, 2003; WEISKITTEL et al., 2009).

#### 2.4.3 Modelos híbridos

Modelos menos complexos e com elevado grau explicativo têm surgido para minimizar a diferença existente entre os modelos de produção baseados em medições e os modelos mecanísticos, baseados em processos fisiológicos. Denominados de modelos híbridos, apresentam-se como ferramentas promissoras para a predição de povoamentos florestais em escala regional, sendo constituídos geralmente por um reduzido número de parâmetros, se comparados aos modelos mecanísticos, associando elementos processuais com elementos empíricos (PENG, 2000; SANDS, 2004; MÄKELÄ, 2007; ZHAO et al., 2013).

Os modelos híbridos proporcionam um acréscimo de informações relacionadas aos processos biológicos, em relação aos modelos tradicionais de crescimento e produção. Por isso, talvez sejam mais precisos que os métodos tradicionais considerando sua maior sensibilidade às variações ambientais que atuam sobre o crescimento (BATTAGLIA; SANDS, 1998). Entretanto, em muitas regiões sua aplicação é preterida em relação aos modelos empíricos, principalmente onde os modelos híbridos não se apresentam como ferramentas suficientemente confiáveis e flexíveis para o manejo (PRETZSCH et al. 2008).

Assim como os modelos processuais, modelos híbridos são frequentemente utilizados na predição da produção primária líquida dos povoamentos (PPL), com base

nos processos fisiológicos e na sua interação com as variações ambientais. Abrangem essencialmente os processos acima e abaixo do solo e proporcionam a obtenção de informações altamente relevantes para o manejo sustentável, requerendo para isso, variáveis de vegetação e dos processos relacionados aos solos (PRETZSCH et al., 2008).

Modelos híbridos como o ProMod-NitGro (BATTAGLIA et al., 1999), Forest 5 (ROBINSON; HEK, 2003), TRIPLEX (PENG et al., 2002) e 3-PG (LANDSBERG; WARING, 1997) têm sua aplicação difundida mundialmente, tendo como principal vantagem em relação aos modelos empíricos, a capacidade de obtenção de respostas às variações climáticas, ao manejo florestal (preparo de solo, adubação, controle da matocompetição) e aos riscos associados ao ataque de pragas e doenças. Destinam-se também à análise do sistema de manejo, às predições das produtividades atingível e potencial, no auxílio na aquisição de novas áreas, na quantificação do efeito ambiental e do manejo, e na estimativa de parâmetros como dap e altura total (LANDSBERG, 2003b; ALMEIDA et al., 2004; ZHAO et al., 2013).

O menor número de parâmetros faz com que os modelos híbridos apresentem uma relativa perda na representação das especificidades dos sítios, mas estes modelos devem refletir as implicações dos tratamentos silviculturais sobre as relações alométricas e as consequências dos processos fisiológicos relacionados (WEISKITTE et al., 2009).

## **2.5 Modelo ecofisiológico 3-PG (Physiological Principles to Predicting Growth)**

O modelo ecofisiológico 3-PG (Physiological Principles to Predicting Growth) é atualmente denominado de 3-PGxl, anterior 3-PGpjs, o modelo descrito como uma ferramenta de simulação do crescimento florestal, tem sua programação desenvolvida em linguagem *Visual Basic* do excel (VB), com código de acesso livre e disponibilizado via internet. Construído com o objetivo de auxiliar de forma prática e gratuita, a pesquisadores, modeladores e administradores florestais, o modelo 3-PG pode associar técnicas de sensoriamento remoto nas análises e estimativas do crescimento florestal (LANDSBERG; SANDS, 2010).

O 3-PG é um modelo de crescimento de base fisiológica desenvolvido a partir de experimentos e medições realizadas por longos períodos em povoamentos e florestas, podendo ser rodado para qualquer número de anos, com dados climáticos

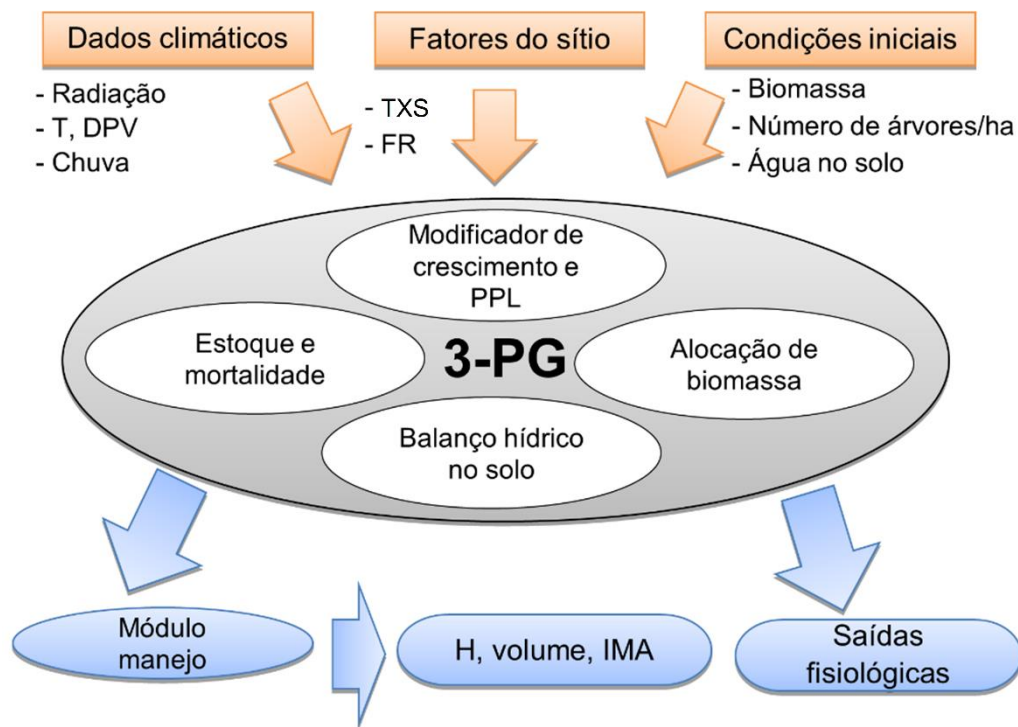
mensais ou anuais históricos, os quais compõem-se na radiação solar ( $\text{MJ m}^{-2}$ ), temperaturas mínima, média e máxima ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa do ar (%), precipitação média ( $\text{mm mês}^{-1}$ ), déficit de pressão de vapor (DPV;  $\text{mbar dia}^{-1}$ ) e número de geadas por mês (SANDS, 2004; ALMEIDA et al., 2004; LANDSBERG; SANDS, 2010).

Utilizado com grande sucesso em distintas regiões e condições climáticas, contemplando uma grande variedade de florestas, o modelo apresenta-se eficiente na estimativa dos efeitos do manejo, clima e características dos sítios sobre distintos atributos dos povoamentos, tendo em sua composição descrições simplificadas dos processos fisiológicos combinadas com relações de natureza empírica (LANDSBERG; WARING, 1997; LANDSBERG et al., 2001; SANDS; LANDSBERG, 2002; ALMEIDA et al., 2004; BRYARS et al., 2013; GONZALEZ-BENECKE et al., 2014).

O modelo 3-PG possibilita avaliar os riscos das variações climáticas para a produção e obter previsões dinâmicas referentes à biomassa florestal e a utilização da água do solo, que, por consequência, resultam em informações importantes à gestão e manejo das florestas. Com uma dinâmica simplificada de utilização, o modelo roda com dados de entrada que descrevem as condições climáticas, as propriedades dos sítios, a condição dos povoamentos e as propriedades fisiológicas da espécie, sendo os mesmos obtidos em passo temporal mensal (LANDSBERG et al., 2001; STAPE et al., 2004b; LANDSBERG; SANDS, 2010).

O 3-PG apresenta-se como um modelo geral direcionado à estimativa da produção primária líquida dos povoamentos (PPL,  $\text{Mg ha}^{-1}$ ), com uma arquitetura modular que possibilita o refinamento dos ajustes relacionados aos sub processos espécie-específicos, definidos como mortalidade do povoamento, fechamento do dossel (interceptação de luz) e índice de fertilidade do solo. Tem em sua composição cinco submodelos (Figura 1) que descrevem a produção de biomassa total, a partição de biomassa em folhas, troncos e raízes, a taxa de mortalidade, o balanço hídrico do solo e o módulo para converter a biomassa dos fustes em variáveis de interesse ao manejo florestal (SANDS; LANDSBERG, 2002; SANDS, 2004; GONZALEZ-BENECKE et al., 2014).

Figura 1 - Estrutura simplificada do modelo Physiological Principals Predicting Growth (3-PG).



Sendo: T = temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ); DPV = déficit de pressão de vapor; TX = textura do solo; FR = fertilidade do solo; H = altura das árvores; IMA = incremento médio anual; PPL = produção primária líquida do povoamento.

Os dados de entrada do modelo referem-se especificamente aos totais ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) de biomassa de folhas, *stem* (galhos, tronco e casca) e raiz, número de árvores por hectare e disponibilidade hídrica do solo, os quais, relacionadas às propriedades fisiológicas e climáticas, possibilitam a obtenção da dinâmica de desenvolvimento do povoamento associada à disponibilidade e utilização da água no solo, assim como, a estimativa dos parâmetros essenciais ao manejo, como a área basal do povoamento, o volume médio de madeira, o incremento médio anual em volume e o diâmetro médio (dap) (SANDS; LANDSBERG, 2002; ALMEIDA et al., 2004; LANDSBERG; SANDS, 2010).

O modelo basicamente quantifica a eficiência quântica do dossel ( $\alpha_c$ ,  $\text{mol C mol}^{-1}$  fóton), descrita pelo volume total de carbono fixado ( $\text{CO}_2$ ) para cada unidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA,  $\text{mol m}^{-2}$ ). A variável eficiência quântica do dossel ( $\alpha_c$ ) resulta dos valores de condutância estomática ( $g_s$ ) multiplicados ao índice de área foliar (IAF,  $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ ), que representa a área de

interceptação da luz, enquanto a RFAA tem seu valor computado como parte da radiação fotossinteticamente ativa incidente ( $RFA_{inc}$ , MJ m<sup>-2</sup>).

Os valores de  $\alpha_c$  são estimados a partir de um valor teórico espécie-específico da máxima eficiência quântica do dossel ( $\alpha_{cx}$ ;  $\pm 0,08$ ), o qual é atenuado pela influência dos modificadores de crescimento, representados pelo déficit de pressão de vapor ( $f_{DPV}$ ), a temperatura ( $f_T$ ), as geadas ( $f_g$ ), a disponibilidade hídrica ( $f_\theta$ ), a nutrição do solo ( $f_N$ ), a concentração de CO<sub>2</sub> ( $f_{Ca}$ ) e a idade ( $f_i$ ), quando estes apresentarem valores inferiores a 1 (LANDSBERG; WARING, 1997; BAESSO et al., 2010; LANDSBERG; SANDS, 2010).

Dentre os moduladores do crescimento mencionados, a disponibilidade hídrica ( $f_\theta$ ) é descrito como um dos mais importantes, apresentando relação direta com o crescimento e a produtividade, além de exercer influência determinante sobre a dinâmica da condutância estomática ( $g_s$ ). O  $f_\theta$  tem seu valor relacionado ao conteúdo de água disponível para as plantas (CAD), que varia com a taxa de transpiração relativa do dossel e com as propriedades texturais do solo, assim como, com fatores como a precipitação, o escoamento, a evaporação e a percolação da água do solo. A CAD está relacionada ao potencial hídrico, descrito pelos componentes mátrico e osmótico, e à profundidade do solo, considerada como a média de profundidade atingível pelo sistema radicular das plantas (LANDSBERG; SANDS, 2010).

Na determinação da eficiência quântica do dossel ( $\alpha_c$ ), os modificadores de crescimento que atuam de forma independente do processo fotossintético são adicionados ao modelo de maneira multiplicativa, enquanto os moduladores  $f_{DPV}$ ,  $f_\theta$  e o  $f_i$  formam o chamado modulador fisiológico (Equação 1), que tem seu valor definido pela lei dos mínimos, ou seja, pela limitação mais restritiva entre o DPV e a disponibilidade hídrica (LANDSBERG et al., 2001; SANDS; LANDSBERG, 2002).

$$\varphi = fI \min.\{f_{DPV}, f_\theta\} \quad (1)$$

A partir do valor ajustado de  $\alpha_c$  (Equação 2) e da quantificação da RFAA, o 3-PG estima a produção florestal bruta, denominada de produção primária bruta (PPB, Mg ha<sup>-1</sup>), sendo deste valor obtida a produção total de biomassa líquida (PPL, Mg ha<sup>-1</sup>) assumindo-se uma constante proporcional à respiração de 0,47 ( $\pm 0,04$ ) (WARING et al., 1998). A PPL tem sua soma distribuída em três partições distintas,



caracterizadas como folhas ( $\eta_f$ ), *stem* ( $\eta_s$ ) e raízes ( $\eta_r$ ), sendo as duas primeiras baseadas em relações alométricas em função do dap, enquanto  $\eta_r$  tem seu valor dependente da taxa de fertilidade do solo e da disponibilidade hídrica do solo (LANDSBERG; WARING, 1997).

$$\alpha c = fTfNfF\varphi \alpha \max \quad (2)$$

Assim como os modificadores de crescimento e as relações alométricas para biomassa já citadas, o modelo 3-PG possui na sua arquitetura distintas equações e submodelos, muitos destes passíveis de alterações. Essa flexibilidade do modelo possibilita, por exemplo, que se alterem as metodologias de análise das variáveis estimadas de forma empírica, quando as mesmas apresentarem inconsistência nos seus resultados.

Problemas dessa natureza já foram detectados por alguns pesquisadores, apesar do modelo ser uma ferramenta altamente eficiente para a simulação do crescimento e da produção florestal. Dois pontos bastante sensíveis referem-se ao método de estimativa da mortalidade e à utilização da variável fertilidade do solo (FR) pelo ranqueamento de 0 a 1. Em ambos os casos são observados resultados insatisfatórios, com as metodologias demonstrando ser problemáticas e ineficientes (LANDSBERG et al., 2003; BRYARS et al., 2013).

Algumas alternativas para esses dois pontos já foram disponibilizadas por alguns autores, sendo que, para contornar o problema relacionado ao auto desbaste que é descrito como uma equação em função da densidade e com base no princípio de auto desbaste de -3/2 (REINEKE, 1933), Sands (2004) propôs que tal variável fosse estimada a partir de uma equação independente da densidade. Para a questão da variável fertilidade do solo (FR), bons resultados foram observados com sua utilização como um parâmetro ajustável (FONTES et al., 2006), o que fortalece a afirmativa de que o modelo se apresenta como um mecanismo eficiente, principalmente devido à sua adaptabilidade às necessidades de cada situação.

Outro parâmetro que apresenta certa sensibilidade no ajuste do modelo, diz respeito à determinação da disponibilidade de água no solo, relacionada à área de abrangência do sistema radicular. No modelo 3-PG, a profundidade do sistema radicular a ser utilizada pode ser definida por método de amostragem, por modelos

empíricos que relacionam a parte aérea à profundidade das raízes, ou ainda, a partir de bibliografias, como as utilizadas na parametrização do 3-PG em florestas brasileiras, onde a profundidade efetiva do sistema radicular foi definida como entre 2 e 2,5 metros (STAPE, 2002; ALMEIDA et al., 2004; STAPE et al., 2004b; ALMEIDA et al., 2010; CHRISTINA et al., 2011).

O pouco conhecimento relacionado à dinâmica e expansão do sistema radicular, principalmente devido à dificuldade de medição desta variável, pode comprometer os resultados relacionados à capacidade de armazenamento de água do solo (CAD). Sabe-se que o sistema radicular do eucalipto não se limita a dois metros de profundidade, podendo chegar a marcas superiores a 15 m. Pesquisas comprovam que, aos 3 anos de idade, as raízes podem atingir até 6 metros de profundidade. Destes, os primeiros 5 m podem representar aproximadamente 95% das raízes finas, principais responsáveis à captação de água, podendo até 53% deste total estar localizados nos primeiros 0,25 m de solo (BOUILLET et al., 2002; LACLAU et al., 2010; CHRISTINA et al., 2011). Portanto, na determinação da CAD observa-se a necessidade de adequação da metodologia aos fatores ambientais locais, para buscar a máxima eficiência estatística do modelo.

Apesar de seus pontos sensíveis, o modelo 3-PG apresenta-se como uma ferramenta eficiente na determinação do potencial produtivo dos sítios e na descrição do processo de crescimento em uma determinada região, com uma interface que possibilita a inclusão de variáveis medidas e de propriedades relacionados aos solos e ao clima local.

## 2.6 Referências Bibliográficas

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico, ano base 2012**. Brasília, 148p., 2013.

AINSWORTH, E.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO<sub>2</sub>]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell and Environmental**, v.30, p.258-270, 2007.

ALMEIDA, A.C. 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, 2004.

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

ALMEIDA, A.; SANDS, P.; BRUCE, J.; et al. Use of a spatial process-based model to quantify forest plantation productivity and water use efficiency under climate change scenarios. **18th World IMACS/ MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009**, , n. July, p. 1816–1822, 2009.

ALMEIDA, A.C. et al. 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**, v.259, p.1730-1740, 2010.

BAESSO, R. C. E. Modelagem do comportamento ecofisiológico de plantios de eucalipto submetidos a aumentos na concentração de CO<sub>2</sub>. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 128 p., 2011.

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

BATTAGLIA, M.; SANDS, P.J. Process-based forest productivity models and their application in forest management. **Forest Ecology and Management**, v.102, p.13-32, 1998.

BATTAGLIA, M. et al. Hybrid growth model to predict height and volume growth in young *Eucalyptus globulus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v.120, p.193-201, 1999.

BÉCEL, C.; VERCAMBRE, G.; PAGÉS, L. Soil penetration resistance, a suitable soil property to account for variations in root elongation and branching. **Plant Soil**, p.169–180, 2012.

BOUILLETA, J.P. et al. Changes with age in the spatial distribution of roots of Eucalyptus clone in Congo impact on water and nutrient uptake. **Forest Ecology and Management**, v.171, p.43-47, 2002.

BOTTA, G.F. et al. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. **Soil and Tillage Research**, v.101, p.44-51, 2008.

BRACELPA – Associação Brasileira de celulose e papel. Relatório de Sustentabilidade, 31p. 2009.

BRYARS, C. et al. Fixed physiological parameters in the 3-PG model produced accurate estimates of loblolly pine growth on sites in different geographic regions. **Forest Ecology and Management**, v.289, p.501-514, 2013.

BUCKLEY, T.N.; WARREN, C.R. The role of mesophyll conductance in the economics of nitrogen and water use in photosynthesis. **Photosynthesis research**, n.119, p. 77-88, 2014.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração Florestal: Perguntas e Respostas**, 1ed. Viçosa, MG, 407p., 2002.

CANNEL, M.G.R.; GRACE J. Competition for light: detection, measurement and quantification. **Canadian Journal of Forest Research**, v.23, p. 1969-1979, 1993.

CARON et al. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada em fitomassa de mudas de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, Minas Gerais, v.36, n.5, p. 833-842, 2012.

CHRISTINA, M. et al. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forest. **Ecosphere**, v.2, p.27-30, 2011.

DANIELS, R.F.; BURKHART, H.E. An Integrated System of Forest Stands Models. **Forest Ecology and Management**, v.23, p.159-177, 1988.

DILLEY, A.C. On the computer calculation of vapour pressure and specific humidity gradients from psychrometric data. **Journal of Applied Meteorology**, v.7, p.717-719, 1968.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises dos solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 212 p., 1997.

FAO. Food Agriculture Organization of United Nations, **Eucalypts for planting**. Rome, 677 p., 1979.

FAO. Food Agriculture Organization of United Nations, **Global Assessment of Growing stock, biomass and carbon stock – Forestry Resources Assessments**, Rome, 55p., 2006.

FLEXAS, J.; BOTA, J.; ESCALONA, J.M.; SAMPOL, B.; MEDRANO, H. Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions. **Functional Plant Biology**, v.29, p. 461-471, 2002.

FLEXAS, J. et al. Mesophyll Conductance to CO<sub>2</sub>: current knowledge and future prospects. **Plant Cell Environ**, v.31, n.5, p.602-621, 2008.

FONTES, L. et al. Calibration and testing of a generalized process-based model for use in Portuguese eucalyptus plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, ProQuest Agriculture Journal, v.36, n.12, p.3209-3221, 2006.

FORRESTER, D.I. et al. Enhanced water efficiency in a mixed *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* plantation. **Forest Ecology and Management**. v.259, p.1761-1770, 2010.

FORRESTER, D.I. et al. Interactive effects of simultaneously applied thinning, pruning and fertilizer application treatments on growth, biomass production and crown architecture in a young *Eucalyptus nitens* plantation. **Forest Ecology and Management**, v.267, p.104-116, 2012.

GARDINER, B. et al. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. **Forestry**, v.81, n.3, p.447-463, 2008.

GATTO, A. et al. Efeito do método de preparo do solo em área de reforma, nas suas características, na composição mineral e na produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.27, n.5, p.635-646, 2003.

GONÇALVES, J.L.M. et al. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v.193, p.45-61, 2004.

GONÇALVES, J.L.M. et al. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v.301, p.6-27, 2013.

GONZALEZ-BENECKE, C. A.; JOKELA, E. J.; CROPPER JR. W. P.; BRACHO, R.; LEDUC, D. J. Parameterization of the 3-PG model for *Pinus elliottii* stands using alternative methods to estimate fertility rating, biomass partitioning and canopy closure. **Forest Ecology and Management**, v. 327, p. 55-75, 2014.

HORTON, R.; ANKENY, M.D.; ALMARAS, R.R. Effects of Compaction on Soil Properties. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. (eds). **Soil Compaction in Crop Production**. Amsterdam, Holland, Elsevier Science B. V., p.91-111, 1994.

HUBBARD, R. et al. The effect of fertilization on sap flux and canopy conductance in a *Eucalyptus saligna* experimental forest. **Global Change Biology**, v.10, p.427-436, 2004.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos**. Eschborn: GTZ, 343p., 1990.

LANDSBERG, J. Physiology in forest models: History and the future. **Forestry Biometry, Modelling and Information Sciences**, v.1, p.49-63, 2003a.

LANDSBERG, J. Modelling forest ecosystems: state of the art, challenges and future directions. **Canadian Journal of Forest Research**, v.33, p.385-397, 2003b.

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

LANDSBERG, J.J. et al. Applying 3-PG, a Simple Process-Based Model Designed to Produce Practical Results, to Data from Loblolly Pine Experiments. **Forest Science**, v.47, n.1, p.43-51, 2001.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H.; COOPS, N.C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. **Forest Ecology and Management**, v.172, p.199-214, 2003.

LANDSBERG, J.; SANDS, P. **Physiological Ecology of Forest Production: Principles, Processes and Models**, 352p., 2010.

LANQUAYE, N.O.; MITCHELL, S.J. Portability of stand-level empirical windthrow risk models. **Forest Ecology and Management**, v.216, p.134-148, 2005.

LAROCQUE, G.R. et al. Common challenges for ecological modelling: Synthesis of facilitated discussion held at the symposia organized for the 2009 conference of the International Society for Ecological Modelling in Quebec City, Canada. **Ecological Modelling**, v.222, n.14, p.2456-2468, 2011.

LEUNING, R.; KRIEDMANN, P.E.; MCMURTRIE, R.E. Simulation of evapotranspiration by trees. **Agriculture Water Manage**, v.19, p.205-221, 1991.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, v1, p.277-293, 1985.

MÄKELÄ, A. Hybrid Models of Forest Stand Growth and Production. *Forest Growth and Timber Quality: Crown Models and simulation methods for Sustainable Forest Management*. **Proceedings of an International Conference**. Portland, OR., 267p., 2007.

MARTORELL, S. et al. Rapid hydraulic recovery in *Eucalyptus paciflora* after drought: linkages between stem hydraulics and leaf gas exchange. **Plant, Cell and Environmental**, v.37, p.617-626, 2014.

MONSERUD, R.A. Evaluating forest models in a sustainable forest management context. **Forest Biometry, Modelling and Sciences**, v.1, p.35-47, 2003.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, 42p., 1961.

MOTA, F.O.B.; NESS, R.L.L.; MOTA, J.C.A.; C, C.A.; SOUZA, S.C. Physical quality of an oxisol under different uses. **R. Bras. Ci. Solo**, 36, p.1828-1835, 2012.

NOGUEIRA, R.J.M.C. et al. Alteração na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceloreiras submetidas à déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.13, p.75-87, 2001.

PAN, Y. et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v.333, p. 988-993, 2011.

PENG, C.H. Understanding the role of forest simulation models in sustainable forest management. **Environmental Impact Assessment Review**, v.20, p.481-501, 2000.

PENG, C. et al. TRIPLEX: a generic hybrid model for predicting forest growth and carbon and nitrogen dynamics. **Ecological Modelling**, v.153, p.109-130, 2002.

PINTO, S.I.C. et al. Eficiência nutricional de clones de eucalipto na fase de mudas, cultivados em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.523-533, 2011.

POORTER, H.N. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, v.193, p.30-50, 2012.

PRETZSCH, H. et al. Models for forest ecosystem management: a European perspective. **Annals of botany**, v.101, n.8, p.1065-1087, 2008.

PRETZSCH, H. **Forest Dynamics, Growth and Yields**, 684p., 2009.

REINEKE, L.H. Perfecting stand-density index for even-aged forests. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v.46, n.7, p.627-638, 1933.

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. **Biologia Vegetal**, 5ed. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 738 p., 1996.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SILVA, V.R. Compactação do solo em sistema de plantio direto: Limites críticos de mitigação. In: COUTO, E.G.; BUENO, J.F. **Os (des) caminhos do uso da água na agricultura brasileira**. Cuiabá, UFMT, SBCS, p.167-198, 2004.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 1-48, 2007.

REIS, G.G.; REIS, M.G.F. Reflexo do cultivo mínimo no ambiente e na fisiologia da árvore. 1º Seminário sobre Cultivo Mínimo do Solo em Florestas, Curitiba. **Anais 1º Seminário sobre cultivo mínimo do solo em florestas**. Piracicaba: CNPFloresta/IPEF/UNESP/SIF/FUPEF, 1995.

RITSON, P.; SOCHACKI, S. Measurement and prediction of biomass and carbon content of *Pinus pinaster* trees in farm forestry plantations, south-western Australia. **Forest Ecology and Management**, v.175, p.103-117, 2003.

ROB, C. Sydney blue gum (*Eucalyptus saligna*) for salogs in the 450-650 mm rainfall zone. **Departament of Agriculture - Farmnote**, State of Western, Australia, n.61, 2p., 2004.

ROBINSON AP, EK AR. Description and validation of a hybrid model of forest growth and stand dynamics for the Great Lakes region. *Ecological Modelling* 170, p. 73–104, 2003.

SANDS, P.J. Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data collection and parameter assignment. **Cooperative Research Center for Sustainable Production Forestry**, Hobart, Australia, 34p., 2004.

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

SBS. Sociedade Brasileira de Silvicultura, **Fatos e Números do Brasil**, São Paulo, 105 p., 2006.

SCHNEIDER, P.R.; SCHNEIDER, P.S.P. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: Ed. da FACOS, 566p., 2008.

SCHÖNAU, A.P.G.; COETZEE, J. Initial Spacing, Stand Density and Thinning in *Eucalyptus* Plantations. **Forest Ecology and Management**, v.29, p.245-266, 1989.

SHIMIZU, J.Y.; ONUKI, M.; CÉSAR, E.R.G. Crescimento de procedência de *Eucalyptus saligna* Smith ao longo dos anos em Guaíba, RS. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.17, p.39-46, 1998.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1775-1781, 1994.

SINNETT, D. et al. Soil penetration resistance and tree root development. **Soil Use and Management**, p.273–280, 2008.

SOUZA, M.J.H. et al. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da Bacia do Rio Doce. **Revista Árvore**, v.30, p.399-410, 2006.

SOUZA, M. J. H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P. ; MINUZZI, R. B. Relação entre disponibilidade hídrica e produtividade do eucalipto em diferentes idades, em Guanhães, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 629-638, 2006.

STAPE, J.L. **Production ecology of clonal eucalyptus plantations in northeastern Brazil**. 2002. 212p. Tese (Doutorado), Department of Forest Sciences, Unicersity Fort Collins, Colorado, 2002.

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



STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; BINKLEY, D. Testing de 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**, n.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**, v.255, p.920-930, 2008.

STAPE, J.L. et al. The Brazilian Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v.259, p.1684-1694, 2010.

STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2ª. ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 222 p., 2008.

STRUDLEY, M.W.; GREEN, T.R.; ASCOUGH, J.C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. **Soil & Tillage Research**, v.99, p.4-48, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**, Porto Alegre: Artmes, 719 p., 2004.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do Intervalo Hídrico Ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.573-581, 1998.

VANCLAY, J.K. **Modelling forest growth and yield**: applications to mixed tropical forests. Wallingford: CAB International, 312p., 1994.

VAN LIER, Q.J; GUBIANI, P.I. Beyond the “Least limiting water range”: rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p. 925-939, 2015.

VOCANSON, A. et al. Effects of soil structure on pea (*Pisum sativum* L.) root development according to sowing date and cultivar. **Plant and Soil**, v.281, p.121-135, 2006.

VOSSOBRINK, J. **Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren**. Schriftenreihe (Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde) - Christian Albrechts Universität Kiel, Kiel. 126p., 2004.

WAC. Word Agroforestry Centre, **Agroforestry Database 4.0**, Disponível em: <<http://www.worldagroforestry.org>> Acesso em: 12 fev. 2015.

WANG, X.; FENG, Z.; OUYANG, Z. The impact of human disturbance on vegetative carbon storage in forest ecosystem in China. **Forest Ecology and Management**, v.148, p.117-123, 2001.

WANG, W. et al. Developmento of TRIPLEX-Management model for simulating the response of forest growth to pre-commercial thinning. **Ecological Modelling**. v.222, n.14, p.2249-2261, 2011.

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

WARREN, C.R. Soil water deficits decrease the internal conductance to CO<sub>2</sub> transfer but atmospheric water deficits do not. **Journal Experimental Botany**, v.59, n.2, p. 327-334, 2008.

WARREN, C.R. et al. Internal conductance to CO<sub>2</sub> transfer of adult *Fagus sylvatica*: variation between sun and shade leaves and due to free air ozone fumigation. **Environmental Experimental Botany**, v.59, n.2, p. 130-138, 2007.

WATSON, G.W.; KELSEY, P. The impact of soil compaction on soil aeration and fine root density of *Quercus palustris*. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.4, p.69-74, 2006.

WEISKITTEL, A.R. et al. A hybrid model for intensively managed Douglas-fir plantations in the Pacific Northwest, USA. **European Journal of Forest Research**, v.129, n.3, p.325-338, 2009.

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

ZHANG, J. et al. TRIPLEX model testing and application for predicting forest growth and biomass production in the subtropical forest zone of China's Zhejiang Province. **Ecological Modelling**, v.219, p.264-275, 2008.

ZHAO, M. et al. Application of TRIPLEX model for predicting *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* forest stand production in Hunan Province, southern China. **Ecological Modelling**, v.250, p.58-71, 2013.

### 3 CAPITULO 1 - PRODUTIVIDADE DO *Eucalyptus saligna* SMITH COM BASE NAS PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DOS SOLOS

#### Resumo

O estudo teve como objetivo identificar as propriedades físico-hídricas dos solos que descrevem a variância da produtividade dos sítios. O estudo foi conduzido em povoamentos de *Eucalyptus saligna* Smith localizados nas regiões fisiográficas da Serra do Sudeste e Encosta do Sudeste do Rio Grande do Sul, em duas situações edáficas distintas quanto à estrutura e à água disponível dos solos (AD). Essas condições foram caracterizadas por: (i) Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico com classes texturais franco arenosa a muito argilosa e com capacidade de potencial produtivo alta (ARG), e (ii) por Neossolo Quartzarênico Órtico típico, com classe textural areia e com capacidade de potencial produtivo baixa (NEO). A avaliação do crescimento dos povoamentos, da produção volumétrica e de biomassa, foi obtida a partir de dados de inventários florestais, constituídos pelas variáveis circunferência a 1,30 m de altura (cap) e alturas média (h) e dominante ( $h_{dom}$ ), e a partir da cubagem e amostragem destrutiva de 30 árvores de diâmetro médio quadrático (dg). As propriedades físico-hídricas permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ), condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ), densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Mac), Microporosidade (Mic), resistência do solo à penetração (RP), curva de retenção de água (CRA) e distribuição granulométrica dos solos foram avaliadas em amostras de solos de estrutura preservada e alterada, coletadas nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80, 0,80-1,00 e 1,00-1,20 m, em 12 pontos de amostragem. A produção volumétrica de madeira aos 89 meses de idade das áreas ARG foi de  $422,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  ( $195,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; biomassa de lenho). Nos solos ARG, os maiores valores de Ds ( $1,64 \text{ Mg m}^{-3}$ ) foram observados nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m. A  $K_{sat}$  das áreas ARG variou entre 1,0 e  $13,4 \text{ cm h}^{-1}$ , e teve correlação positiva com a  $K_{ar}$  e com a Mac, e negativa com a Ds. A Mac da camada 0,00-0,10 m descreveu, aproximadamente, 32% da variância no incremento médio anual em biomassa de lenho ( $\text{IMA}_{BL}$ ) e 26% da variância no incremento média anual em volume de madeira ( $\text{IMA}_V$ ). As taxas de produtividade tiveram correlação negativa com a Ds e com a RP das camadas acima de 0,60 m de profundidade e positiva com a Ds e com a RP nas camadas abaixo de 0,80 m de profundidade. Pela análise de regressão múltipla, a Ds e a Mac da camada 0,40-0,60 m tiveram eficiência estatística significativa ( $r^2 \sim 0,22$ ) na estimativa da variância do  $\text{IMA}_V$ . A  $K_{ar}$  foi a principal propriedade do solo relacionada à produtividade dos povoamentos das áreas ARG. Nas áreas NEO foi verificada produção de  $288 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  ( $134,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; biomassa de lenho). A maior Ds nesses solos foi observada na camada 0,80-1,00 m ( $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$ ). A RP variou de 0,16 a 0,31 MPa, sem variação significativa com a profundidade. A produtividade foi diretamente relacionada a  $K_{ar}$  e indiretamente relacionada a Ds. O  $\text{IMA}_V$  teve relação positiva com a PT e com a Mac da camada 0,00-0,10 m. A Ds das camadas acima de 0,60 m de profundidade explicou 14% da variância observada no  $\text{IMA}_V$  e 27% da variância da altura total (h). Pela regressão múltipla a Ds e a  $K_{ar}$  das camadas superficiais explicaram aproximadamente 23% da variância observada no  $\text{IMA}_{BL}$ . Os resultados obtidos mostraram que os solos florestais com alta capacidade de armazenamento de água podem ter a produtividade relacionada às propriedades que representam o fluxo de solutos e gases, enquanto nos solos baixa capacidade de armazenamento de água, altamente drenáveis, a capacidade produtiva pode ter relação inversa com a Ds.

Palavras-chave: estrutura do solo, textura, condutividade hidráulica do solo saturado.



## Abstract

The study objective was to identify the physic-hydraulic soil properties that describe the sites productive variance. The study was conducted at *Eucalyptus saligna* Smith stands located at Southeast Sierra and Southeast Coast physiographic regions of Rio Grande do Sul state, in two different edaphic situations regarding the soil structure and available soil water (ASW). This two situations were characterized as (i) Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico and Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico, with textural classes sandy loam to clay and with high productive potential capacity (ARG), and (ii) with Neossolo Quartzarênico Órtico típico, with textural class sand and with low productive potential capacity (NEO). Stands growth, volumetric production and biomass were obtained from forest inventory data, which sampled the circumference at the 1.3 m height (cbh), total height, dominant height and by destructive sampled and cubing by Smalian method of 30 trees of quadratic mean diameter (dg). The physic-hydraulic soil properties soil permeability ( $K_{ar}$ ), hydraulic permeability ( $K_{sat}$ ), soil bulk density (BD), water retention curve (WRC) and soil texture were evaluated in undisturbed samples collected in 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, 0.40-0.60, 0.60-0.80, 0.80-1.00 and 1.00-1.20 m soil layers, in 12 sampling points. Volumetric wood production at 89-months-old in the ARG areas was  $422.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  ( $195.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; wood biomass). The highest soil bulk density (BD;  $1.64 \text{ Mg m}^{-3}$ ) was observed in the 0.00-0.10 and 0.10-0.20 m soil layers in the ARG soils. Soil hydraulic conductivity ( $K_{sat}$ ) in the ARG ranged from 1.0 up to  $13.4 \text{ cm h}^{-1}$ , and showed positive relationship with soil air permeability ( $K_{ar}$ ) and macroporosity (Mac), and negative with BD. In 0.00-0.10 m soil layer, Mac described about 32% of the variance in the annual mean increase in wood biomass ( $\text{IMA}_{BL}$ ) and 26% of the variance in the  $\text{IMA}_V$ . The productivity rates had a negative relationship with BD and penetration resistance (PR) in layers from surface up to 0.60 m and positive with BD and PR obtained below 0.80 m soil depth. Multiple regression analysis with BD and Mac of the 0.40-0.60 m soil layer had statistical efficiency characterized by  $r^2 \sim 0.22$  in variance estimation of  $\text{IMA}_V$ .  $K_{ar}$  was the main soil property related to productivity in ARG stands. In NEO areas, was verified a production of  $288 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  ( $134.6 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; wood biomass). With sandy loam texture, BD in these soils had higher values in 0.80-1.00 m ( $1.60 \text{ Mg m}^{-3}$ ) soil layer. The PR ranged from 0.16 up to 0.31 MPa, without significant variation with soil depth. Productivity was directly related to  $K_{ar}$  and indirectly related to BD. The  $\text{IMA}_V$  had a positive relationship with total porosity (TP) and Mac in 0.00-0.10 m soil layer. BD determined from surface up to 0.60 m soil depth explained 14% of  $\text{IMA}_V$  variance and 27% of mean height variance (h). Multiple regression including BD and  $K_{ar}$  in surface layers explained around 23% of  $\text{IMA}_{BL}$  variance. Our results showed that forest soils with high water storage capacity have productivity related to the properties that represent solutes and gases flow, while in highly drainable soils, productive capacity may have an inverse relationship with soil bulk density.

Keywords: soil structure, texture, conductivity, hydraulic conductivity of saturated soil.

### 3.1 Introdução

A alta produtividade do eucalipto cultivado em florestas comerciais no Brasil é considerada uma das maiores do setor florestal mundial por proporcionar a obtenção de elevados estoques de biomassa em menor espaço de tempo (IBA, 2015). Os sítios florestais com melhores propriedades do solo podem proporcionar taxas de incremento médias de eucalipto entre 39 e 46 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (STAPE, et al., 2010; IBÁ, 2015), e em situações pontuais de sítio pode atingir até 65 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (STAPE et al., 2010), pode ser maximizado. Essa alta produtividade, combinada com os incentivos de origem privada e governamental (BRACELPA, 2009), tem estimulado a expansão das áreas florestais para atender a demanda de produtos de origem florestal exigida pelo setor industrial (MILANEZ et al., 2013).

A expansão das áreas de produção florestal tem duas consequências principais. A primeira está relacionada ao impacto causado sobre a paisagem de muitas regiões e estados, devido à substituição de campos subtropicais (OVERBECK et al., 2009), de florestas comerciais de pinus (ABRAF, 2013) e de áreas agrícolas, por plantios comerciais de eucalipto. A segunda está relacionada à maior utilização, para cultivo de eucalipto, de áreas de baixa produtividade, pouco utilizadas com culturas agrícolas, constituídas por solos frágeis fisicamente (textura grossa), suscetíveis à degradação e, muitas vezes, com limitações relacionadas à dinâmica e à disponibilidade de água, apesar das suas adequadas características de fluxo de ar (GELAIN, 2012) e solutos.

O aumento ou a manutenção das taxas produtivas médias para atender as demandas do mercado, nesses solos frágeis e de baixa produtividade, podem ser obtidos mediante conhecimento da capacidade produtiva desses solos. A capacidade produtiva das áreas de cultivo florestal tem sido avaliada por meio do método das curvas de índice de sítio, que classifica os sítios com referência na altura das árvores mais grossas dos povoamentos, denominada de altura dominante ( $h_{dom}$ ). A classificação pela  $h_{dom}$  representa uma opção bastante prática e precisa, principalmente por esta variável não ser influenciada pelos desbastes e pela densidade do povoamento (ROVEDDER et al., 2013).

Entretanto, a qualidade de um sítio para a produção de eucalipto tem como base a totalidade das condições fisiológicas (fatores internos) e ambientais locais (fatores externos) (PRITCHETT; FISCHER, 1987). A identificação das propriedades

edáficas que se relacionam à produtividade pode proporcionar ganhos significativos na classificação dos sítios e possibilitar determinação do potencial produtivo dessas áreas. A classificação dos sítios com base nas propriedades edáficas associada ao método das curvas de índice de sítio é uma estratégia que vem sendo utilizada nos empreendimentos florestais, na maximização do aproveitamento do potencial produtivo dos sítios.

A capacidade produtiva dos sítios é influenciada por fatores edáficos em geral (MORALES, 2013), por propriedades físico-hídricas proporcionadas pelo manejo (PREVEDELLO et al., 2013a; MORALES, 2014; PREVEDELLO et al., 2014) e pela textura (GELAIN, 2012; MORALES, 2013). O preparo do solo para o cultivo de povoamentos de eucalipto proporciona alterações na resistência mecânica, na macroporosidade e na condutividade e permeabilidade do solo, em função do maior volume de solo mobilizado no preparo, com efeito positivo sobre a produtividade (PREVEDELLO et al., 2013b; PREVEDELLO et al., 2014; MORALES, 2014).

As principais propriedades edáficas relacionadas à capacidade produtiva dos sítios florestais estão associadas à dinâmica da água no solo, pois a água representa o principal componente do sistema produtivo diretamente relacionado às alterações da produtividade (STAPE et al., 2010). Em florestas comerciais onde os tratamentos nutricionais seguem um padrão semelhante, solos com maior disponibilidade de água geralmente são mais produtivos. Nessas condições, um maior volume de água, disponibilizado por irrigação pode proporcionar ganhos significativos na produção, enquanto o aumento do aporte nutricional sem a alta disponibilidade de água não tem efeito significativo sobre a produção (HUBBARD et al., 2004; STAPE et al., 2010; SILVA et al., 2013).

Povoamentos localizados em solos de textura grossa, com elevada macroporosidade e altamente drenáveis, têm sua baixa produtividade associada às propriedades edáficas. Reichert et al. (2009a, 2016) quantificaram baixa retenção de água a 10 kPa de tensão (capacidade de campo) e 1500 kPa (ponto de murcha permanente), assim como, baixa disponibilidade de água às plantas para classes arenosas, devido à baixa área superficial específica destes solos.

Em sítios onde os solos possuem alta estabilidade dos agregados e alta proporção de microporos, que aumentam a retenção de água, a  $D_s$ , a resistência mecânica e o fluxo de gases e solutos podem ser parâmetros de diferenciação na qualificação físico-estrutural dessas áreas produtivas (HORN; FLEIGE, 2009). Como

a qualidade dos solos resulta da interação de diferentes propriedades, pois o valor de uma é afetado por uma ou mais propriedade distinta (ARSHAD; MARTIN, 2002), a identificação de um único fator limitante ao crescimento não pode ser considerada um método preciso de qualificação física do solo.

As propriedades relacionadas à qualidade física dos solos podem ter maior ou menor significância ou sensibilidade no processo de avaliação. Classificados em dois grupos (níveis), definem-se como baixos indicadores a resistência mecânica, a resistência de cisalhamento e a  $D_s$ , enquanto os altos indicadores da qualidade física referem-se à capacidade de aeração, condutividade hidráulica do solo saturado e a taxa de infiltração (HORN; FLEIGE, 2009). A permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) também pode ser considerada um bom indicador da qualidade física, pois apresenta relação direta com a  $D_s$  e a RP (DÖRNER et al., 2010), propriedade esta que representam o grau de compactação do solo. A permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) está diretamente relacionada à  $K_{sat}$  e à macroporosidade, que pode ser considerada limitante ao crescimento radicular em proporções inferiores a 10% (SUZUKI et al., 2007; DÖRNER; HORN, 2009).

A identificação das propriedades mais sensíveis na avaliação da qualidade física do solo, com base na produtividade das culturas, tem significativa importância para a classificação do potencial produtivo dos sítios florestais. As relações observadas entre as distintas propriedades físico-hídricas e entre tais propriedades e a produtividade e o padrão de crescimento dos povoamentos podem proporcionar informações aplicáveis em modelos empíricos e mecanísticos ou híbridos utilizados para estimar o potencial produtivo dos sítios cultivados com eucalipto.

O objetivo deste estudo foi identificar as propriedades físico-hídricas dos solos que melhor explicam a variância da produtividade observada em sítios cultivados com *E. saligna*. Para representar a grande variabilidade edáfica que caracteriza os solos ocupados por floresta de eucalipto no Rio Grande do Sul, o estudo se propôs a descrever os distintos padrões de produção e relacionamento entre solo e floresta, em Argissolos Vermelho-Amarelo Distrófico típico e latossólico e em Neossolo Quartzarênico Órtico típico.



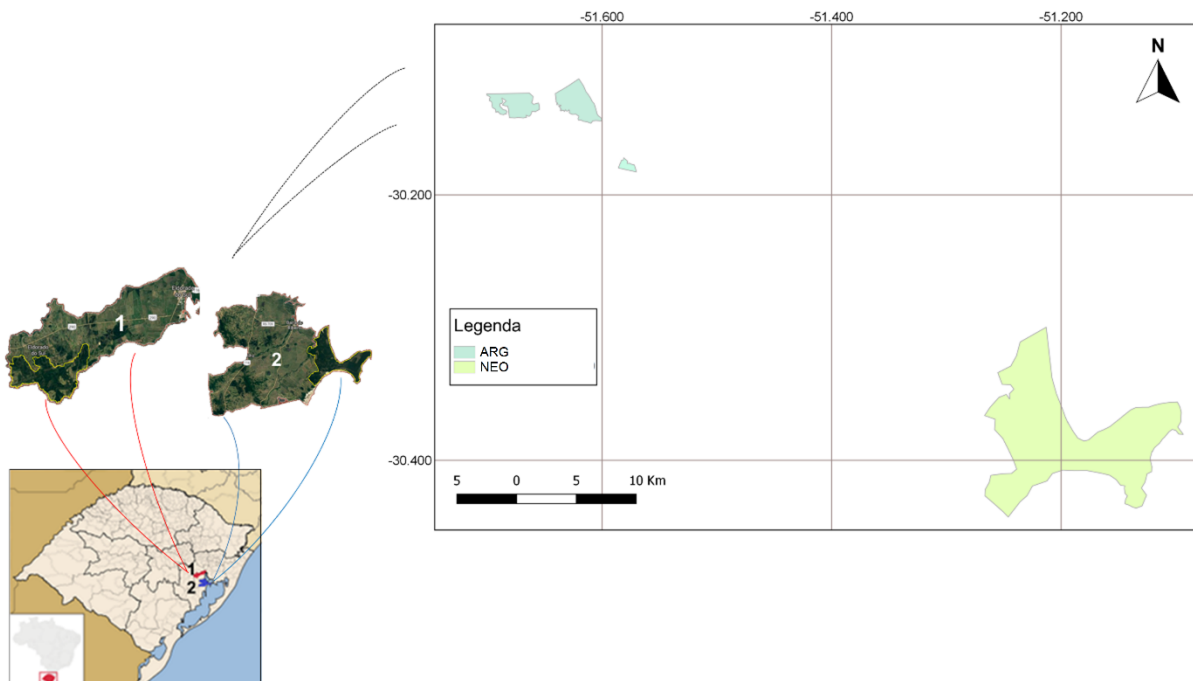
### 3.2 Material e métodos

#### 3.2.1 Áreas de estudo

O estudo foi conduzido em áreas com povoamentos comerciais de *E. saligna*, pertencentes à empresa Celulose Riograndense do Brasil (CMPC). Os povoamentos estão localizados nos municípios de Eldorado do Sul e Barra do Ribeiro, nas regiões fisiográficas da Serra do Sudeste e Encosta do Sudeste do estado do Rio Grande do Sul, respectivamente (Figura 1), entre as coordenadas geográficas 30° 06" e 30° 25" de Latitude Sul e 51° 05" e 51° 40" de Longitude Oeste.

O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo "Cfa", subtropical úmido sem estiagem. A precipitação anual varia de 111 a 1355 mm (MORENO, 1961), com temperatura média anual de 18 °C, em que o mês mais quente apresenta valores superiores a 22 °C e o mês menos quente oscila entre 3 e 18 °C.

Figura 1 - Áreas de estudo nos municípios de Eldorado do Sul-RS (1) e Barra do Ribeiro-RS (2), com a delimitação dos povoamentos florestais das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO).

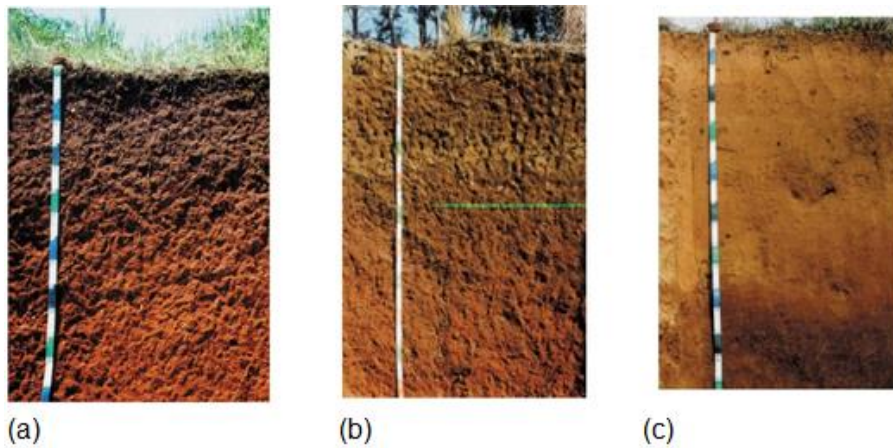


Fonte: GoogleEarth, 2017.

As áreas possuem relevo, predominantemente, plano a suave ondulado (declividade < 3°) e abrangem florestas com povoamentos comerciais de *E. saligna*

(clone 2864) de 58 e 89 meses de idade. Os critérios para a seleção das áreas foram a idade dos povoamentos, em meio (58 meses) e final (89 meses) do ciclo de 8 anos, e as propriedades edáficas que caracterizam os solos, distintos principalmente pela textura e estrutura. Os solos selecionados são: Argissolo Vermelho-Amarelo Distófico típico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distófico latossólico e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (Figura 2).

Figura 2 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico (a), Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (b) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (c) que ocorrem nas áreas com capacidade de potencial produtivo alta (a e b) e baixa (c).



Fonte: Streck et al., (2008)

Os solos possuem as classes texturais areia, franco arenosa, franco argilo-arenosa, franco argilosa, argila e muito argilosa (Tabela 1), e comportamento distinto nas curvas de retenção de água no solo (CRA).

Tabela 1 – Distribuição granulométrica e classe textural dos solos com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO) cultivadas com povoamentos de *E. saligna* aos 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade.

Solo	Camada (m)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classe textural
ARG <sub>58</sub>	0,00-0,10	54,44	16,75	28,82	Franco argilo-arenosa
	0,10-0,20	45,34	17,24	37,42	Franco arenosa
	0,20-0,40	37,89	16,37	45,73	Argila
	0,40-0,60	35,10	16,50	48,40	Argila
	0,60-0,80	23,89	17,13	58,98	Argila
	0,80-1,00	28,49	17,02	54,48	Argila
	1,00-1,20	34,79	18,31	46,90	Argila
NEO <sub>58</sub>	0,00-0,10	98,12	0,84	1,03	Areia
	0,10-0,20	98,45	0,28	1,27	Areia
	0,20-0,40	98,44	0,40	1,17	Areia
	0,40-0,60	98,26	0,41	1,33	Areia
	0,60-0,80	98,64	0,53	0,83	Areia
	0,80-1,00	98,63	0,14	1,23	Areia
	1,00-1,20	98,01	0,59	1,40	Areia
ARG <sub>89</sub>	0,00-0,10	56,38	24,87	18,75	Franco arenosa
	0,10-0,20	53,13	23,77	23,10	Franco argilo-arenosa
	0,20-0,40	36,63	23,27	40,10	Argila
	0,40-0,60	25,82	22,16	52,03	Argila
	0,60-0,80	19,78	20,65	59,57	Argila
	0,80-1,00	27,28	19,79	52,92	Argila
	1,00-1,20	18,70	18,40	62,90	Muito argilosa
NEO <sub>89</sub>	0,00-0,10	97,61	1,42	0,97	Areia
	0,10-0,20	98,18	1,02	0,80	Areia
	0,20-0,40	97,24	1,76	1,00	Areia
	0,40-0,60	97,61	1,02	1,37	Areia
	0,60-0,80	98,13	0,87	1,00	Areia
	0,80-1,00	97,69	0,94	1,37	Areia
	1,00-1,20	98,13	1,14	0,73	Areia

Sendo: ARG = Argissolos Vermelho-Amarelo Distróficos; NEO = Neossolo Quartzarênico Órtico típico.

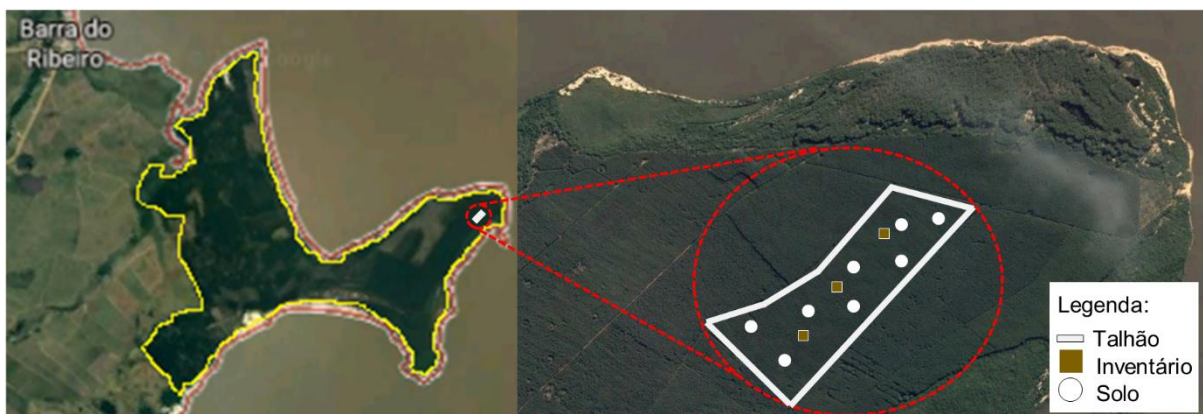
### 3.2.2 Delineamento experimental e amostragem

O estudo teve a condição de potencial produtivo, determinada por distintas classes de solo, como critério de seleção das áreas. As classes de solo foram dispostas em dois grupos: (i) constituído por Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NEO), de textura grossa, estrutura fraca, baixa capacidade de armazenamento de

água e com capacidade de potencial produtivo baixa, e (ii) com ocorrência de Argissolos Vermelho-Amarelo Distróficos (ARG), de textura fina, com boa condição estrutural, média a alta capacidade de armazenamento de água e capacidade de potencial produtivo alta.

Para cada grupo de solo (ARG, NEO) foram selecionadas 4 áreas florestais (talhões), sendo 2 com povoamentos de *E. saligna* de 58 meses e 2 com 89 meses de idade. Em cada área, foram demarcadas aleatoriamente 8 unidades amostrais (UA) circulares de 400 m<sup>2</sup>, com raio de 11,28 m, para a realização dos inventários, e 3 pontos de coleta de amostras de solo em 3 pontos de amostragem até 1,20 m de profundidade, distribuídas espacialmente de acordo com a alocação das UAs (Figura 3).

Figura 3 – Distribuição das unidades amostrais e dos pontos de coleta de solo em um talhão da área de Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NEO).



A estrutura final do estudo, constituído por duas condições de potencial produtivo (ARG e NEO), teve um total de 64 UAs e 24 pontos de amostragem das propriedades físico-hídricas.

### 3.2.2.1 Variáveis dendrométricas e produtividade do eucalipto

As 64 parcelas circulares (oito em cada talhão) de 400 m<sup>2</sup> foram utilizadas para a realização de inventários florestais em intervalos bimestrais, durante o período de 02/2015 a 02/2016. Nos inventários, foram mensuradas a circunferência à altura de 1,3 m (cap; cm), a altura das 10 primeiras árvores de cada parcela (h; m) e a altura dominante ( $h_{dom}$ ; m), esta obtida nas 9 árvores de maior cap de cada parcela.

Para a obtenção da altura total (h) das demais árvores foram utilizadas equações exponenciais ajustadas em função do dap e das idades dos povoamentos (Equações 2 e 3), uma para cada condição de capacidade de potencial produtivo (ARG e NEO).

$$h_{ARG} = 2,781015 * dap^{0,482654} * Idade^{0,439923} \quad (2)$$

$$h_{NEO} = 1,681356 * dap^{0,641948} * Idade^{0,422327} \quad (3)$$

A determinação do crescimento, da produtividade e da taxa de incremento médio anual (IMA) foi realizada com base nas dimensões das árvores, no volume e na biomassa estimados e na idade dos povoamentos. O potencial produtivo dos sítios também foi determinado pela avaliação da altura dominante ( $h_{dom}$ ), com base nas curvas de índice de sítio, com a utilização de equações ajustadas para *E. saligna* por Tonini et al. (2006).

O ajuste de equações volumétricas e a determinação da biomassa de madeira foram realizados com dados provenientes da cubagem e pesagem de um total de trinta (30) árvores com diâmetro médio quadrático (dg; cm). O método de seleção das árvores (dg) foi o método utilizado para representar o padrão médio de desenvolvimento dos povoamentos, pois esses indivíduos apresentam dap correspondente à área basal média individual das árvores. A estimativa do volume por hectare para cada UAs, talhão e condição de potencial produtivo (ARG, NEO) foi realizada com o uso de duas equações ajustadas em função do dap, da altura total (h) e da idade das árvores, com  $r^2 = 0,98$  e  $CV = 12\%$  (Equações 4 e 5).

$$V_{ARG} = -0,21008 + 0,0008488 * dap^2 + 0,00866 * h + 1,2063/Idade \quad (4)$$

$$V_{NEO} = -0,04203 + 0,0005324 * dap^2 + 0,00637 * h - 1,78928/Idade \quad (5)$$

O método de Smalian foi utilizado na cubagem das árvores. Esse método consiste na medição do cap na base da árvore (0,3 m; volume do toco), na altura do dap (1,3 m) e sucessivamente a cada 1,0 m até o diâmetro correspondente à altura comercial, sendo essa última medida de diâmetro também utilizada na determinação do volume da ponteira (cone). O volume de massa seca foi definido após a quantificação do volume de água presente em amostras das partições casca, galho, folhas e lenho.

Duas UAs em cada ponto de amostragem do solo foram selecionadas para a análise da relação entre a produtividade e as propriedades do solo, necessária para o ajuste das equações de crescimento. A localização dos pontos de amostragem entre as UAs de inventário possibilitou a correlação do crescimento observado em duas UAs para com as propriedades de um ponto de amostragem de solo, o que proporcionou maior representatividade da variabilidade das relações entre as propriedades do solo e o crescimento florestal. As variáveis  $dap$  e  $h$  e as taxas de IMA em volume ( $IMA_v$ ) e biomassa de lenho ( $IMA_{BL}$ ), estimadas ou medidas em cada UA, foram relacionadas às propriedades físico-hídricas dos solos, com duas repetições, uma parcela de solos para duas de inventário, nas distintas camadas, para a realização dos procedimentos estatísticos e da análise de regressão.

### 3.2.2.2 Propriedades físico-hídricas do solo

Amostras de solos como estrutura preservada e não preservada foram coletadas em 24 pontos de amostragens, constituídos por trincheiras de 1,20 m de profundidade. Foram alocados 3 pontos de amostragem por talhão, o que totalizou 12 pontos de amostragem no Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NEO) e 12 pontos de amostragem nas áreas ARG, sendo 6 no Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico e 6 no Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico.

Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas em 8 anéis volumétricos (5,7 cm de diâmetro e 4 cm de altura), nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80, 0,80-1,00 e 1,00-1,20 m. Três anéis de cada camada foram utilizados para a determinação da densidade do solo, da macroporosidade, da microporosidade e da porosidade total, da permeabilidade do solo ao ar, da condutividade hidráulica saturada e da curva de retenção de água. Os demais anéis coletados, um anel por camada para cada tensão de equilíbrio (1, 6, 10, 33 e 100 kPa), foram utilizados na avaliação da resistência do solo à penetração (RP), com três repetições (penetrações) por anel.

Nas mesmas camadas, amostras de solo com estrutura não preservada foram coletadas para a determinação da distribuição granulométrica e a para a estimativa da retenção de água nas tensões de 500, 1000 e 1500 kPa, em psicrômetro (WP4 – *Dewpoint Potential Meter*).

Para a determinação da granulometria as amostras de solo com estrutura não preservada foram secas ao ar, peneiradas em peneira com abertura de malha de 2 mm e posteriormente utilizadas para a determinação da distribuição granulométrica, conforme o método da pipeta (EMBRAPA, 1997), modificado (SUZUKI et al., 2015). A determinação da distribuição do tamanho de partículas iniciou-se pelo processo da dispersão, realizado em agitador horizontal com 120 rpm durante 4 horas, utilizando vidros de 100 mL contendo 20 g de solo, 10 mL de NaOH 6% (dispersante químico), 50 mL de água destilada e duas esferas de nylon com peso de 3,04 g, diâmetro de 1,71 cm e densidade de  $1,11 \text{ Mg m}^{-3}$  (SUZUKI et al., 2015). Posteriormente, os teores de argila (fração menor que 0,002 mm), de silte (0,002 – 0,05 mm) e de areia (0,05 – 2,00 mm) foram quantificados.

Amostras de solo com estrutura preservada foram utilizadas para a determinação da curva de retenção de água no solo (até a tensão de 100 kPa), da macroporosidade, da microporosidade, da porosidade total, da capacidade de campo, da permeabilidade do solo ao ar e da densidade do solo. Para tanto, as amostras foram saturadas por capilaridade durante 48 h, pesadas e submetidas às tensões de 1, 6 e 10 kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), e de 33 e 100 kPa em câmara de Richards (KLUTE, 1986).

Após o equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas para a caracterização da curva de retenção de água, e em seguida foi determinada a permeabilidade do solo ao ar em um permeômetro de fluxo de ar constante, composto por uma série de fluxímetros com diferentes vazões por onde o ar flui antes de passar pelo solo (VOSSOBRINK, 2004). O fluxo de ar foi aplicado a baixa pressão (0,1 kPa) para evitar o fluxo turbulento, e o gradiente de pressão entre o ambiente e o ar que flui pela amostra foi medido em um manômetro de água.

Ao final, as amostras foram a estufa e mantidas a 105 °C até atingirem peso constante, para a determinação da densidade do solo ( $D_s$ ).

A umidade gravimétrica para as tensões de 500, 1000 e 1500 kPa foi analisada com psicrômetro (WP4 – *Dewpoint Potential Meter*), em amostras com estrutura não preservada (KLEIN et al., 2013). A umidade gravimétrica determinada foi multiplicada pela densidade do solo correspondente à camada amostrada, para obtenção da umidade volumétrica. Por meio de equações de regressão obtidas pela relação entre a umidade volumétrica e a tensão de água no solo, foi feita a estimativa da retenção de água nas tensões de 500, 1000 e 1500 kPa.

A porosidade total (Pt) foi calculada com base na densidade do solo (Ds) e na densidade de partículas (Dp;  $Pt = 1 - Ds/Dp$ ), sendo utilizado o valor de  $Dp = 2,65$ . A microporosidade foi determinada com base na água retida na tensão de 6 kPa, enquanto a macroporosidade foi determinada pela diferença entre o volume de água retido na saturação e o volume de água retido na microporosidade.

A capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) foram calculados como o volume de água retido nas tensões de 10 kPa e de 1500 kPa, respectivamente. A água disponível (AD) foi determinada pela diferença entre o volume de água retido na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, enquanto a água drenável foi obtida pela diferença entre o volume de água no solo saturado e na capacidade de campo (CC).

A condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) foi determinada por meio de duas técnicas distintas, devido à significativa diferença textural entre os solos, por consequência, à grande distinção no comportamento da  $K_{sat}$ . Primeiramente, todas as amostras de solos com estrutura preservada foram preparadas e saturadas por capilaridade durante 48 h. Após a saturação, a  $K_{sat}$  das amostras de solo das áreas NEO foram analisadas em um permeâmetro de carga constante, no qual o volume de água quantificado em cada amostra, em intervalos de 5 minutos e com três repetições, foi utilizado para o cálculo da  $K_{sat}$  segundo a equação de Darcy (Equação 3).

$$k_{\phi} = \frac{a L}{A (\Delta t)} \ln \left( \frac{H_1}{H_2} \right) \quad (3)$$

Sendo:  $\Delta t = t_2 - t_1$  (intervalo de tempo para a diferença de potencial total, entre os extremos da amostra, diminuir de  $H_1$  para  $H_2$ );  $A$  = área da seção transversal da coluna de solo;  $L$  = comprimento da amostra de solo;  $a$  = área da seção transversal do tubo onde se mede  $H$ .

Para a determinação da  $K_{sat}$  nas amostras de solos das áreas ARG, foi utilizado um permeâmetro de carga decrescente associado a um programa computacional (GUBIANI et al., 2010). O processo consistiu-se na avaliação do tempo gasto para a passagem pela amostra de solo, de volume de água conhecido, com carga hidráulica definida, onde o valor da  $K_{sat}$  é obtido pela resolução da Equação 3.

A resistência do solo (RP) à penetração foi determinada a campo, pelo Índice de Cone ( $RP_{IC}$ ), e em laboratório. No campo, a RP foi determinada bimestralmente em seis oportunidade ao longo do ano, a partir de março de 2015, dentro das mesmas



UAs utilizadas para a amostragem de solo e vegetação. Os pontos para a avaliação da RP foram definidos de forma aleatória dentro da UA, com a realização de duas plotagens, uma na linha e uma na entre linha de plantio. Para tanto, foi utilizado um penetrômetro manual digital com ponta cônica, ângulo de penetração de 30° e armazenamento eletrônico dos dados (*Penetrologer Eijkelkamp* - Remik CP 20 Ultrasonic Cone Penetrometer). A RP foi registrada em intervalos de 1,5 cm, até a profundidade de 120 cm, com velocidade de penetração de 1 m min<sup>-1</sup>. Como a haste do penetrômetro atinge 0,8 m, foram necessárias duas penetrações em um mesmo ponto para alcançar a profundidade de 1,2 m, uma na superfície do solo e outra dentro de uma trincheira de 0,4 m. As leituras feitas a cada 1,5 centímetro foram agrupadas por camadas, definidas como 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80, 0,80-1,00 e 1,00-1,20 m. A RP para as camadas entre 0,40-0,80 m do perfil foi determinada a partir da média das leituras feitas nas camadas entre 0,40-0,80 m da primeira penetração e nas camadas entre 0,00-0,40 m da segunda penetração.

No laboratório, as amostras de solo com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade durante 48 h e submetidas às tensões de 1, 6 e 10 kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006) e de 33 e 100 kPa em câmara de Richards (KLUTE, 1986). Para cada tensão de equilíbrio e camada, seguindo a delimitação das camadas conforme aplicada na RP a campo, foi determinada a RP em um penetrômetro eletrônico de bancada, modelo MA933, dotado de variador eletrônico de velocidade e sistema de registro de dados (TORMENA et al., 2007). Em cada amostra de solo foram realizadas três repetições (penetrações), das quais se obteve a média aritmética, definida como a RP da amostra. Após o procedimento da RP, as amostras foram mantidas em estufa a 105 °C até atingirem peso constante, para a determinação da  $D_s$  e do teor de água do solo ( $\theta$ ; cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>).

### 3.2.3 Análise estatística e elaboração do modelo de crescimento

A análise dos dados e ajuste do modelo de crescimento foram realizadas com os softwares Office 2013 e o sistema estatístico SAS V.9.3 (SAS Institute Inc. 2009). A análise estatística baseou-se na análise de variância (ANOVA), com utilização de testes de médias ( $p < 0.05$ ) para a quantificação dos efeitos e análise do comportamento das variáveis de interesse.

No ajuste das equações, a seleção dos termos independentes foi realizada pelo método *STEPWISE FORWARD*, no SAS V.9.3. A eficiência estatística de cada equação teve como critérios a avaliação do coeficiente de determinação ( $r^2$ ), a soma dos quadrados dos erros (SQR), o coeficiente de variação (CV), o valor e significância de F para o modelo e de  $t$  para os coeficientes ( $p < 0,05$ ) e, por fim, a distribuição dos resíduos.

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Propriedades físico-hídricas

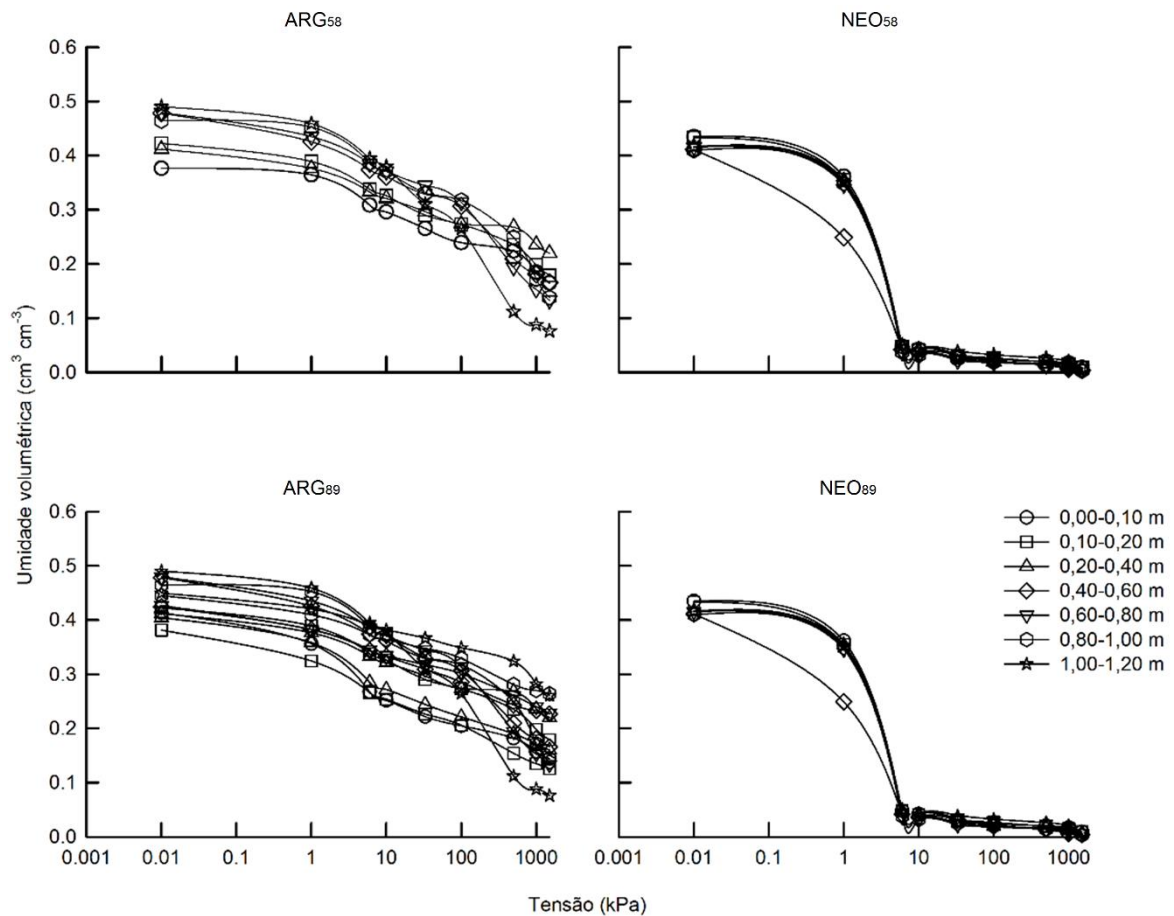
As propriedades físico-hídricas dos solos estão apresentadas separadamente para as áreas ARG e NEO, devido às diferenças nas propriedades dos solos.

##### 3.3.1.1 Disponibilidade hídrica dos solos

Os solos ARG<sub>58</sub> tiveram maior capacidade de armazenamento de água (CRA; Figura 4), com água disponível (AD) entre 0,131 e 0,304 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (Tabela 2). Os solos ARG<sub>89</sub> tiveram maior AD (0,128 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) na camada 0,10-0,20 m (Tabela 2).

Nas áreas NEO (solos NEO<sub>58</sub> e NEO<sub>89</sub>) a AD variou pouco em função da profundidade, com os valores máximo e mínimo de 0,034 e 0,025 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, respectivamente.

Figura 4 – Curva de retenção de água (CRA) dos solos representativos das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO).



Sendo: ARG = Argissolos Vermelho-Amarelo Distróficos em povoamentos de 58 (ARG<sub>58</sub>) e 89 meses de idade (ARG<sub>89</sub>); NEO = Neossolo Quartzarênico Órtico típico em povoamentos de 58 (NEO<sub>58</sub>) e 89 meses de idade (NEO<sub>89</sub>).

Tabela 2 – Água retida no solo saturado ( $\theta_s$ ), na capacidade de campo (CC), no ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (AD) e água drenável (ADr) dos solos com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO) em povoamentos de *E. saligna* aos 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade.

Solo	Camada (m)	$\theta_s$	CC	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>		
				PMP	AD	ADr
ARG <sub>58</sub>	0,00-0,10	0,376	0,296	0,165	0,131	0,080
	0,10-0,20	0,422	0,326	0,179	0,147	0,096
	0,20-0,40	0,412	0,321	0,220	0,101	0,091
	0,40-0,60	0,478	0,362	0,166	0,196	0,117
	0,60-0,80	0,479	0,371	0,133	0,238	0,109
	0,80-1,00	0,464	0,372	0,138	0,234	0,092
	1,00-1,20	0,490	0,380	0,076	0,304	0,110
NEO <sub>58</sub>	0,00-0,10	0,435	0,042	0,009	0,033	0,393

	0,10-0,20	0,433	0,041	0,009	0,032	0,393
	0,20-0,40	0,416	0,041	0,007	0,034	0,375
	0,40-0,60	0,411	0,036	0,004	0,032	0,375
	0,60-0,80	0,416	0,031	0,006	0,025	0,385
	0,80-1,00	0,410	0,032	0,003	0,029	0,378
	1,00-1,20	0,417	0,041	0,009	0,032	0,375
ARG <sub>89</sub>	0,00-0,10	0,413	0,252	0,144	0,108	0,162
	0,10-0,20	0,381	0,254	0,126	0,128	0,127
	0,20-0,40	0,404	0,272	0,160	0,112	0,132
	0,40-0,60	0,424	0,333	0,227	0,106	0,092
	0,60-0,80	0,427	0,334	0,228	0,106	0,092
	0,80-1,00	0,445	0,364	0,264	0,100	0,081
	1,00-1,20	0,450	0,382	0,261	0,121	0,068
NEO <sub>89</sub>	0,00-0,10	0,302	0,046	0,009	0,037	0,256
	0,10-0,20	0,413	0,044	0,009	0,035	0,368
	0,20-0,40	0,397	0,047	0,007	0,040	0,351
	0,40-0,60	0,402	0,040	0,004	0,036	0,361
	0,60-0,80	0,397	0,040	0,006	0,034	0,357
	0,80-1,00	0,406	0,044	0,003	0,041	0,362
	1,00-1,20	0,405	0,037	0,009	0,028	0,368

Sendo:  $\theta_s$  = volume de água no solo saturado; CC = Capacidade de campo (10 kPa); PMP = Ponto de murcha permanente (1500 kPa); AD = Água disponível; ADr = Água drenável.

### 3.3.1.2 Densidade, porosidade do solo e condutividade hidráulica do solo saturado

A densidade do solo ( $D_s$ ) máxima das áreas ARG foi observada em distintas camadas de acordo com a idade, onde a  $D_s$  foi de  $1,59 \text{ Mg m}^{-3}$  na camada 0,00-0,10 m das áreas ARG<sub>58</sub> e de  $1,64 \text{ Mg m}^{-3}$  na camada 0,10-0,20 m nas áreas ARG<sub>89</sub>. A  $D_s$  observada nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m foi significativamente superior ( $p < 0,05$ ) aos valores das camadas abaixo de 0,40 m de profundidade (Tabela 3).

A maior porosidade total (PT) foi observada nas camadas de 0,60-0,80, 0,80-1,00 e 1,00-1,20 m, o que é coerente ao decréscimo da  $D_s$  observado com o aumento da profundidade (Tabela 3). A PT variou de  $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m) a  $0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (1,00-1,20 m), sendo que, em média, 23 e 77% da PT corresponderam à porção de macroporos e microporos, respectivamente.

A macroporosidade (Mac) foi maior na camada 0,80-1,00 m das áreas ARG<sub>58</sub> (Mac =  $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), e na camada 0,00-0,10 m dos solos ARG<sub>89</sub> (Mac =  $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). A Mac foi inferior a 10% nas camadas entre 0,40 e 1,20 m dos solos ARG<sub>89</sub> e nas

camadas entre 0,00 e 0,40 m dos solos ARG<sub>58</sub>. A microporosidade (Mic) teve o mesmo comportamento da Ds em relação à profundidade, em que as maiores Mic foram observadas nas camadas 0,40-0,60, 0,60-0,80, 0,80-1,00 e 1,00-1,20 m, com variação entre 0,29 e 0,39 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. As áreas ARG<sub>58</sub> tiveram maiores Mac, Mic e PT em relação às áreas ARG<sub>89</sub> (Tabela 3).

Nos solos NEO, a Ds foi maior do que os valores observados nas áreas ARG. Com pouca variação em função da profundidade, a maior Ds foi de 1,56 Mg m<sup>-3</sup> nas camadas 0,40-0,60 e 0,80-1,00 m dos solos NEO<sub>58</sub>, enquanto nas áreas NEO<sub>89</sub>, nas mesmas camadas, a Ds máxima foi de 1,60 Mg m<sup>-3</sup>.

A porosidade total (PT) dos solos NEO variou de 0,39 a 0,43 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, valores estes observados na camada 0,00-0,10 m das áreas NEO<sub>58</sub> e 1,00-1,20 m dos solos NEO<sub>89</sub>, respectivamente. Nas áreas NEO<sub>58</sub>, a PT teve relação inversa com a Ds e direta com a profundidade, a partir da camada 0,20-0,40 m. A PT teve aproximadamente 80% do seu volume composto por Mac em todas as camadas avaliadas. O predomínio de macroporos resultou em microporosidade extremamente baixa e, assim como as demais propriedades, pouco variável em função da profundidade.

A condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) variou de 1,0 e 13,4 cm h<sup>-1</sup> nos solos das áreas ARG. Os solos ARG<sub>89</sub> tiveram alta  $K_{sat}$  até a camada 0,40-0,60 m, com valores superiores a 9,6 cm h<sup>-1</sup> e significativamente superiores aos obtidos nos solos ARG<sub>58</sub>, que tiveram os maiores valores de condutividade nas camadas 0,00-0,10 m (5,54 cm h<sup>-1</sup>), 0,40-0,60 m (4,3 cm h<sup>-1</sup>) e 0,80-1,00 m (5,2 cm h<sup>-1</sup>) (Tabela 3).

Nos solos das áreas ARG foi observada tendência de correlação positiva entre a  $K_{sat}$  e a Mac, e negativa entre a  $K_{sat}$  e a Ds. Nessas áreas o coeficiente de variação (CV; %) da  $K_{sat}$  variou de 75 a 208%, com os maiores valores observados nas camadas 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m.

Nas áreas NEO, a variabilidade da  $K_{sat}$  foi menor em relação à das áreas ARG, com CV inferior a 25%. A  $K_{sat}$  foi superior a 190 cm h<sup>-1</sup> em todas as camadas dos solos NEO. As camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m tiveram  $K_{sat}$  significativamente superior ao observado nas camadas inferiores, com exceção da camada 1,00-1,20 m das áreas NEO<sub>89</sub>.

Tabela 3 – Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT) e condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) em diferentes camadas dos solos com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos de *E. saligna*.

Solo	Ds (CV%)	Mac	Mic	PT	$K_{sat}$
	Mg m <sup>-3</sup>		m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>		cm h <sup>-1</sup>
<b>Camada 0,00-0,10 m</b>					
ARG <sub>58</sub>	1,60 (5,9)	0,10 (55,2)	0,30 (8,5)	0,38 (23,8)	5,54 (206,2)
NEO <sub>58</sub>	1,51 (3,8)	0,38 (5,4)	0,05 (19,5)	0,43 (5,4)	369,46 (9,6)
ARG <sub>89</sub>	1,52 (6,0)	0,20 (35,3)	0,23 (21,1)	0,43 (8,2)	13,44 (85,7)
NEO <sub>89</sub>	1,55 (7,3)	0,33 (25,1)	0,06 (64,2)	0,39 (22,1)	257,17 (11,1)
<b>Camada 0,10-0,20 m</b>					
ARG <sub>58</sub>	1,54 (10,3)	0,09 (50,9)	0,33 (14,2)	0,42 (14,3)	2,03 (152,3)
NEO <sub>58</sub>	1,54 (5,0)	0,36 (5,8)	0,06 (54,0)	0,42 (6,9)	403,78 (12,3)
ARG <sub>89</sub>	1,57 (6,5)	0,18 (42,6)	0,23 (22,3)	0,41 (9,7)	11,93 (86,0)
NEO <sub>89</sub>	1,56 (3,8)	0,36 (4,7)	0,05 (35,7)	0,41 (5,4)	261,37 (14,2)
<b>Camada 0,20-0,40 m</b>					
ARG <sub>58</sub>	1,54 (5,1)	0,09 (44,4)	0,33 (13,6)	0,42 (7,1)	1,76 (113,7)
NEO <sub>58</sub>	1,55 (0,8)	0,38 (4,2)	0,04 (40,1)	0,42 (1,1)	320,62 (23,8)
ARG <sub>89</sub>	1,58 (2,7)	0,12 (21,5)	0,28 (12,6)	0,40 (4,0)	9,54 (125,3)
NEO <sub>89</sub>	1,60 (1,4)	0,35 (2,2)	0,05 (3,0)	0,40 (2,0)	204,57 (15,0)
<b>Camada 0,40-0,60 m</b>					
ARG <sub>58</sub>	1,39 (7,0)	0,10 (37,2)	0,37 (7,9)	0,47 (7,8)	4,32 (148,8)
NEO <sub>58</sub>	1,56 (1,9)	0,35 (13,0)	0,05 (21,6)	0,40 (11,6)	338,55 (15,0)
ARG <sub>89</sub>	1,47 (6,9)	0,11 (30,4)	0,34 (5,8)	0,45 (8,8)	9,57 (205,8)
NEO <sub>89</sub>	1,60 (2,8)	0,35 (4,2)	0,04 (15,3)	0,40 (4,5)	192,77 (11,8)
<b>Camada 0,60-0,80 m</b>					
ARG <sub>58</sub>	1,40 (7,4)	0,09 (71,4)	0,38 (8,6)	0,47 (8,2)	2,47 (77,4)
NEO <sub>58</sub>	1,55 (0,7)	0,39 (1,1)	0,03 (10,2)	0,41 (1,0)	310,89 (10,0)
ARG <sub>89</sub>	1,52 (2,6)	0,09 (23,0)	0,34 (5,1)	0,43 (3,5)	0,70 (91,0)
NEO <sub>89</sub>	1,60 (2,1)	0,36 (4,7)	0,04 (7,8)	0,40 (3,2)	204,77 (10,9)
<b>Camada 0,80-1,00 m</b>					
ARG <sub>58</sub>	1,43 (14,5)	0,10 (47,5)	0,38 (7,1)	0,46 (17,1)	5,22 (88,6)
NEO <sub>58</sub>	1,57 (1,9)	0,36 (4,2)	0,05 (20,0)	0,41 (2,9)	401,87 (1,7)
ARG <sub>89</sub>	1,47 (5,7)	0,09 (40,9)	0,35 (6,7)	0,44 (6,9)	1,00 (73,9)
NEO <sub>89</sub>	1,61 (8,4)	0,33 (16,3)	0,05 (68,2)	0,39 (13,1)	206,54 (17,0)
<b>Camada 1,00-1,20 m</b>					
ARG <sub>58</sub>	1,32 (5,7)	0,11 (26,9)	0,39 (7,5)	0,50 (5,7)	2,00 (96,2)
NEO <sub>58</sub>	1,54 (2,1)	0,37 (2,2)	0,05 (11,5)	0,42 (2,9)	301,67 (21,7)
ARG <sub>89</sub>	1,46 (6,0)	0,07 (23,7)	0,38 (11,9)	0,45 (7,4)	2,59 (110,1)
NEO <sub>89</sub>	1,58 (2,5)	0,36 (3,2)	0,04 (10,0)	0,40 (13,9)	296,44 (15,0)

Os solos NEO<sub>58</sub> tiveram  $K_{sat}$  maior em relação aos dos solos NEO<sub>89</sub>. Nas camadas 0,10-0,20 e 1,00-1,20 m foram observadas, respectivamente, a maior (403,8  $\text{cm h}^{-1}$ ) e a menor (301,7  $\text{cm h}^{-1}$ )  $K_{sat}$  dos solos NEO<sub>58</sub>. Nas áreas NEO<sub>89</sub> a menor  $K_{sat}$  foi de 192,7  $\text{cm h}^{-1}$ , na camada 0,40-0,60 m, enquanto a maior foi de 296,4  $\text{cm h}^{-1}$ , observada na camada 1,00-1,20 m. A relação negativa entre  $K_{sat}$  e Ds somente foi significativa na camada 0,80-1,00 m das áreas NEO<sub>89</sub>. Não foi verificada correlação entre a  $K_{sat}$  e a Mac e PT.

### 3.3.1.3 Permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ )

A permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) dos solos ARG teve valores médios entre 1,6 e 31,2  $\mu\text{m}^2$ , obtidos nas tensões de 6 e 100 kPa, respectivamente. A  $K_{ar}$  inferior a 2,0  $\mu\text{m}^2$  foi obtida nas tensões de 6 e 10 kPa e nas camadas 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m das áreas ARG<sub>89</sub> avaliadas nas tensões de 33 e 100 kPa.

Nas camadas 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 1,00-1,20 m dos solos ARG<sub>89</sub>, a  $K_{ar}$  foi inferior a 1,4  $\mu\text{m}^2$ . Nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, a  $K_{ar}$  superior a 12  $\mu\text{m}^2$  foi significativamente distinta ao observado nas demais camadas, em todas as tensões avaliadas. Na tensão de 10 kPa (capacidade de campo-CC), as camadas 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m tiveram  $K_{ar}$  inferior a 1,5  $\mu\text{m}^2$ , enquanto a camada 0,10-0,20 m teve  $K_{ar}$  de 27,5  $\mu\text{m}^2$ .

A  $K_{ar}$  aumentou com o aumento da profundidade, a partir da camada 0,00-0,10 m, nos solos ARG<sub>58</sub>, o que proporcionou valores de 4,1 a 15,3  $\mu\text{m}^2$  nas camadas abaixo de 0,60 m de profundidade, na tensão de 6 kPa. As camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m tiveram as menores  $K_{ar}$ , sendo inferiores a 2  $\mu\text{m}^2$  e distintos ( $p < 0,05$ ) ao observado nas demais camadas, nas tensões de 6 e 10 kPa. A camada superficial (0,00-0,10 m) teve  $K_{ar}$  alta, com valor médio superior a 8,0  $\mu\text{m}^2$  a partir da tensão de 6 kPa. Nas tensões de 33 e 100 kPa, nenhuma camada dos solos ARG<sub>58</sub> teve  $K_{ar}$  inferior a 2  $\mu\text{m}^2$ . A relação positiva entre a  $K_{ar}$  e a Mac foi significativa nas camadas 0,20-0,40 e 1,00-1,20 m dos solos ARG<sub>89</sub>, e nas camadas 0,10-20, 0,40-0,60 e 0,60-80 m dos solos ARG<sub>58</sub>. A  $K_{ar}$  teve relação negativa significativa com a Ds nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,60-0,80 m, enquanto na camada 0,10-0,20 m dos solos ARG<sub>89</sub> a correlação foi positiva entre a  $K_{ar}$  e a Ds. O CV da  $K_{ar}$  foi de 227% e 150%, nas tensões de 6 e 100 kPa, respectivamente.

A  $K_{ar}$  teve pouca variação em função da profundidade nas áreas NEO, exceto na tensão de 100 kPa, onde os solos NEO<sub>89</sub> tiveram relação positiva com a profundidade. Na CC (10 kPa), a  $K_{ar}$  das áreas NEO variou de 61,8 a 82,0  $\mu\text{m}^2$ , nas camadas 0,20-0,40 e 1,00-1,20 m, respectivamente. A menor e a maior  $K_{ar}$  foram de 61,8 e 149,0  $\mu\text{m}^2$ , quantificados nas camadas 0,20-0,40 m dos solos NEO<sub>89</sub> e 0,40-0,60 m dos solos NEO<sub>58</sub>, nas tensões de 10 kPa e 100 kPa, respectivamente.

Os solos das áreas NEO<sub>58</sub> tiveram  $K_{ar}$  entre 96,0 e 149,0  $\mu\text{m}^2$ , nas camadas 0,00-0,10 e 0,40-0,60 m e nas tensões de 6 e 100 kPa. Nesses solos, considerando todas as tensões, as maiores  $K_{ar}$  foram observadas nas camadas 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Na tensão de 10 kPa, a  $K_{ar}$  variou de 101,0 a 121,3  $\mu\text{m}^2$ , enquanto na tensão de 100 kPa a variação foi de 117,5 a 149,0  $\mu\text{m}^2$ .

Em ambas situações, NEO<sub>58</sub> e NEO<sub>89</sub>, esses valores representaram a máxima variação em profundidade, ocorrida desde a camada 0,00-0,10 até a camada 0,40-0,60 m. A maior variação (CV = 37,9%) da  $K_{ar}$  foi observada na tensão de 100 kPa, na camada 0,40-0,60 m. A máxima variação (CV = 26%) da  $K_{ar}$  dentro da camada foi observada na camada 0,00-0,10 m, na tensão de 6 kPa, enquanto a variação total para as áreas NEO<sub>89</sub>, considerando todas as camadas, foi obtida nessa mesma tensão (CV = 17%).

As áreas NEO<sub>89</sub> tiveram menores valores de  $K_{ar}$  em relação as NEO<sub>58</sub>, e pouca variação em função da tensão de equilíbrio. Nas tensões de 6 e 33 kPa, a  $K_{ar}$  na camada 1,00-1,20 m variou de 88,2 a 96,8  $\mu\text{m}^2$ , esse último valor representou a maior  $K_{ar}$  entre todas as tensões e camadas avaliadas nos solos NEO<sub>89</sub>. A correlação positiva entre  $K_{ar}$  e  $M_{ac}$  somente foi verificada na camada 0,00-0,10 m dos solos NEO<sub>89</sub>, na tensão de 6 kPa. Enquanto na tensão de 10 kPa, a correlação foi negativa ( $p < 0,05$ ) entre a  $K_{ar}$  e a  $D_s$ . A  $K_{ar}$  teve correlação positiva com a  $K_{sat}$  nas camadas 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,60-0,80 m nos solos ARG, e nas camadas 0,10-0,20 e 1,00-1,20 m dos solos NEO.

#### 3.3.1.4 Resistência do solo à penetração (RP)

A RP variou de 0,16 (áreas NEO) a 5,4 MPa (áreas ARG), nas tensões de 1, 6, 10, 33 e 100 kPa. As maiores RPs foram observadas nas camadas entre 0,40 e 1,20 m, nos solos do ARG<sub>89</sub>, nas tensões de 33 e 100 kPa (Figuras 5 e 6).



Nos solos das áreas ARG, a RP foi superior a 3 MPa quando a umidade volumétrica foi de, aproximadamente, 30% e a Ds de, aproximadamente,  $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$ , ou em condições de umidade próximas a 20% e Ds de  $1,59 \text{ Mg m}^{-3}$ . Relação negativa entre a RP e a Mac foi observada nas camadas 0,00-0,10, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 1,00-1,20 m.

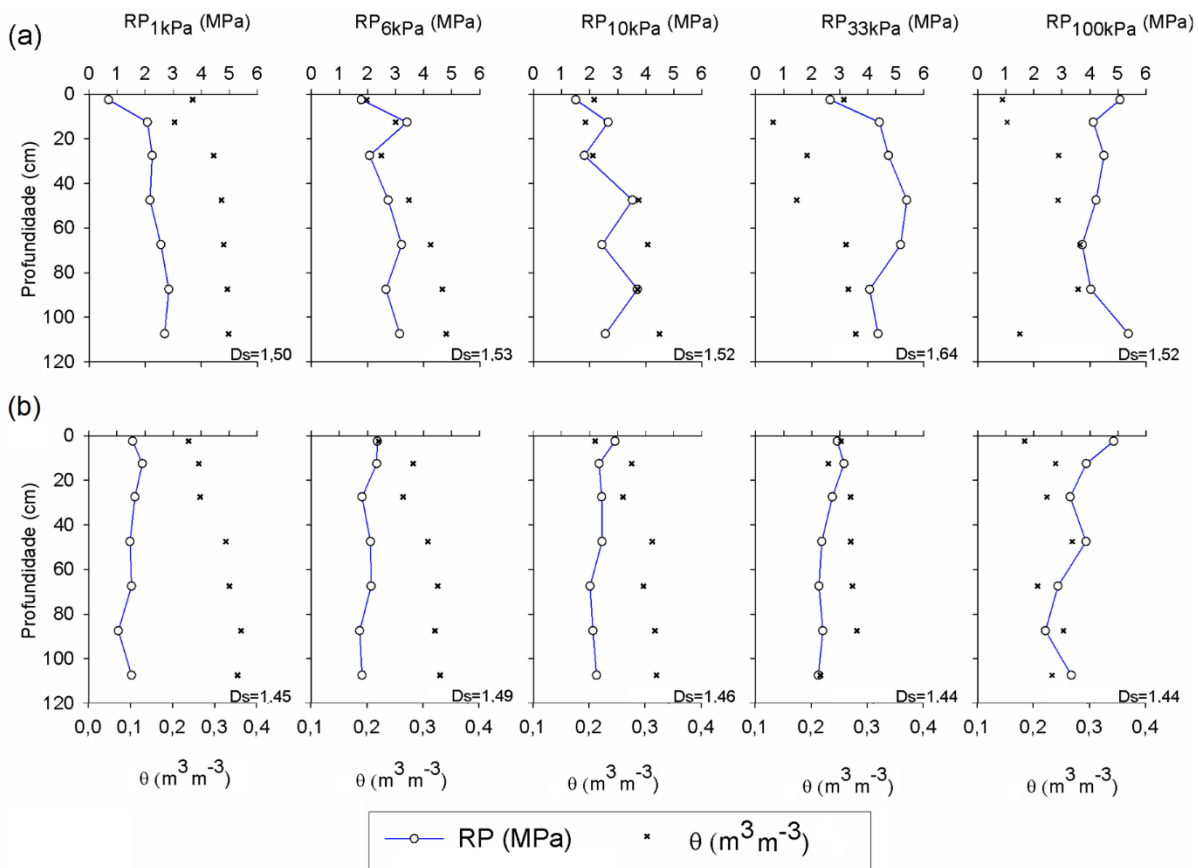
A RP teve relação positiva com a profundidade nos solos ARG<sub>89</sub>, nas distintas tensões, com exceção da tensão de 100 kPa, onde a RP foi superior a 4 MPa em todas as camadas (Figura 5a). Houve um decréscimo significativo na RP, de aproximadamente 50%, com a variação do conteúdo de água de 0,30 para  $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , em função da variação nas tensões de 100 para 10 kPa (Figura 5). Com menor variação e tendência negativa em função da profundidade, a RP observada nos solos ARG<sub>58</sub> foi superior a 2,5 MPa, nas tensões de 33 e 100 kPa (Figura 5b).

A correlação negativa entre a RP e o volume de água dos solos (Pearson;  $p < 0,05$ ), representada também graficamente (Figura 5a), foi verificada principalmente nas camadas 0,80-1,00 e 1,00-1,20 m, com a umidade na tensão de 1 e 6 kPa. Nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, a RP teve relação positiva com o volume de água, assim como, com a microporosidade.

Nas áreas NEO, a RP foi significativamente inferior à observada nos solos ARG, com variação entre 0,16 e 0,31 MPa, nas distintas camadas e tensões avaliadas. Devido aos baixos valores verificados em ambas as tensões de equilíbrio e camadas, nos solos NEO, a RP apresentou variação menos significativa em função da profundidade. Nessas áreas, as maiores RPs foram observadas entre 0,30 e 0,70 m de profundidade, principalmente nas áreas NEO<sub>89</sub>, nas tensões de 6, 33 e 100 kPa, onde a RP foi igual ou superior a 0,3 MPa (Figura 6a).

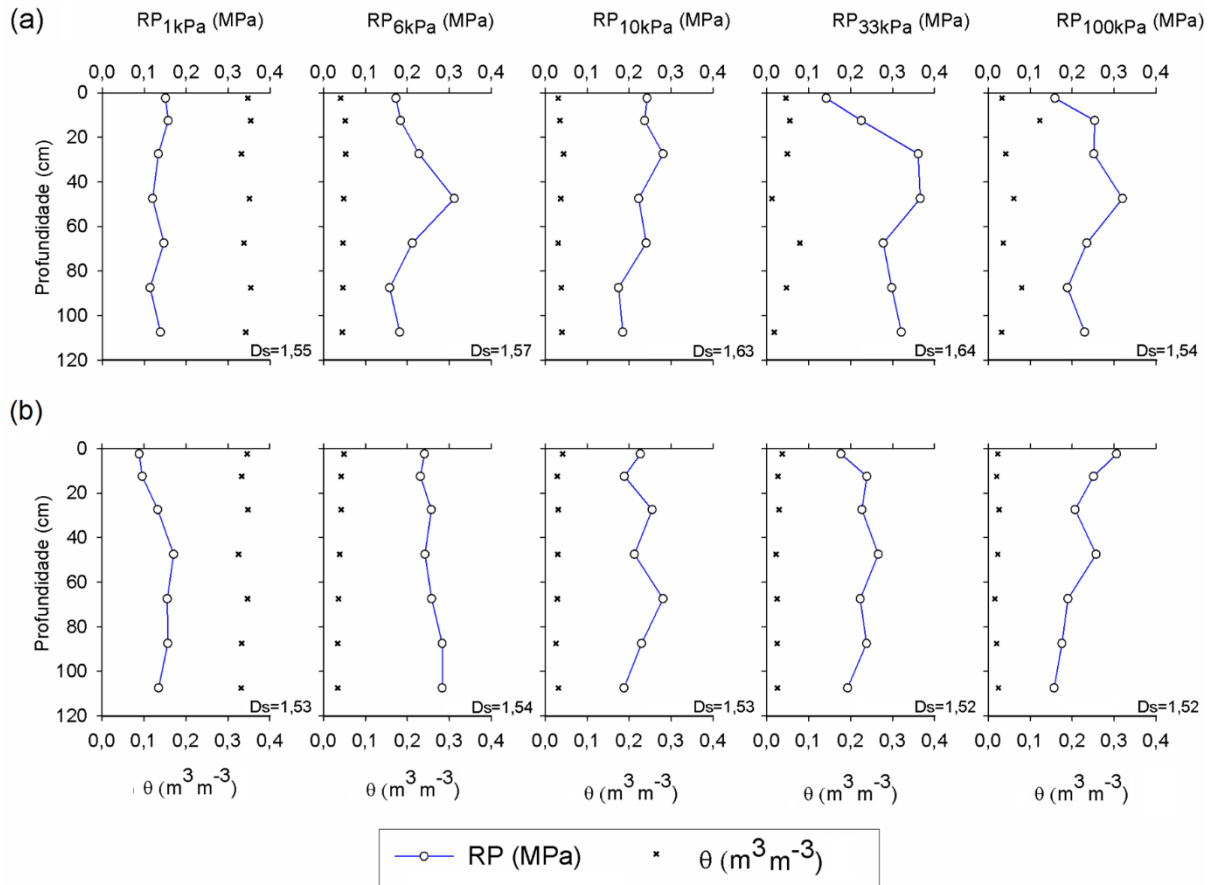
Em função da umidade dos solos NEO, na tensão de 1 kPa, onde o volume de água foi três vezes maior do que nas demais tensões, a RP foi menor e não ultrapassou 0,2 MPa (Figura 6). Nos solos NEO não foi verificada relação significativa entre a RP e as propriedades Mac e PT.

Figura 5 – Resistência do solo à penetração (RP) em diferentes tensões de água (1, 6, 10, 33 e 100 kPa) e umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ;  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), das áreas com capacidade de potencial produtivo alta, em povoamentos de 89 meses (ARG<sub>89</sub>; a) e 58 meses de idade (ARG<sub>58</sub>; b).



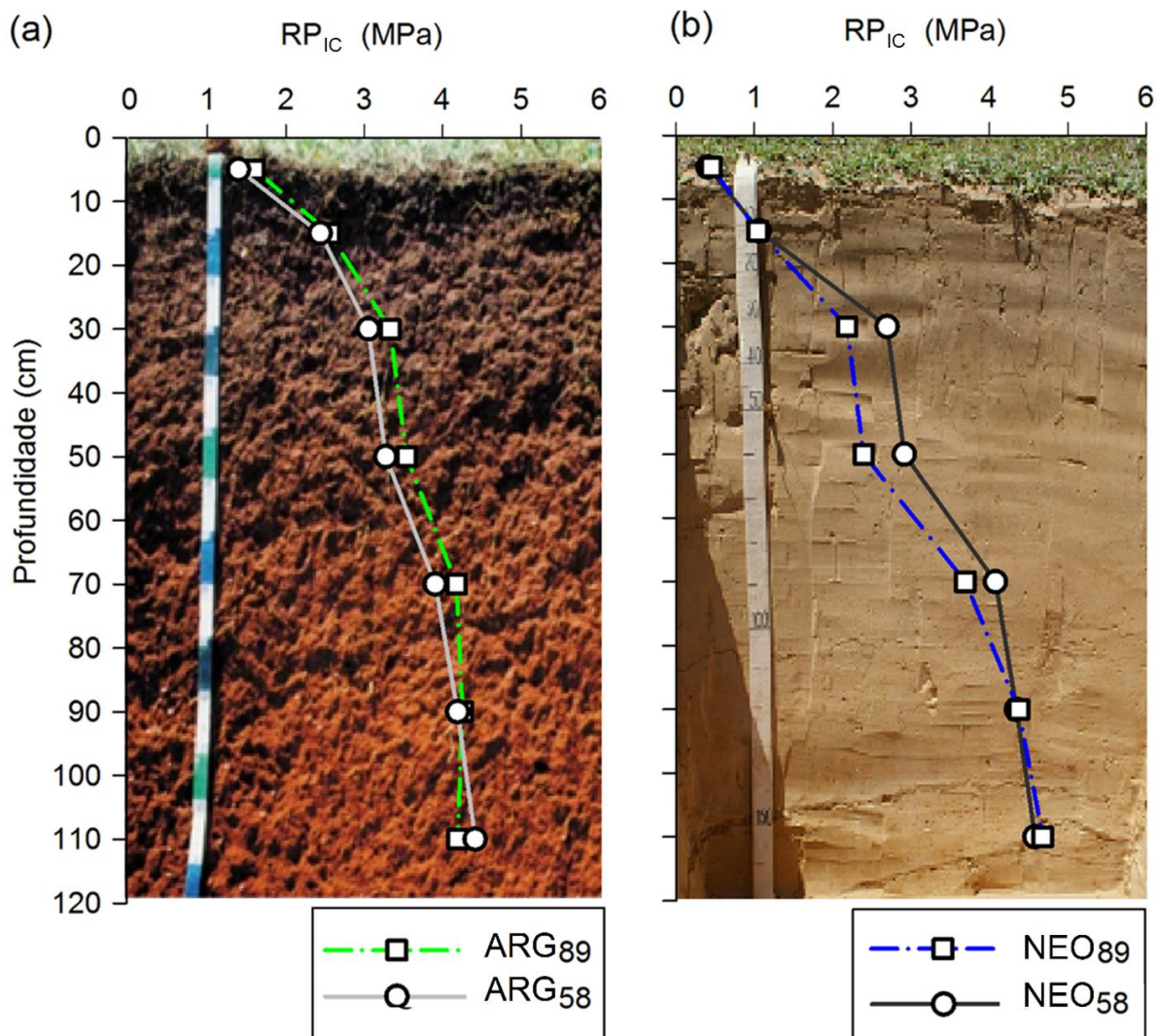
Em ambas áreas, ARG e NEO, o principal fator relacionado à variação da RP foi a volume de água presente nos solos. A importância do volume de poros para a dinâmica da RP foi verificada pelos resultados de correlação negativa significativa entre a RP e as propriedades físicas  $K_{ar}$  e  $K_{sat}$ , que expressam o volume e funcionalidade do espaço poroso dos solos.

Figura 6 – Resistência do solo à penetração (RP) em diferentes tensões de água (1, 6, 10, 33 e 100 kPa) e umidade volumétrica do solo, das áreas com capacidade de potencial produtivo baixa, com povoamentos de 89 (NEO<sub>89</sub>; a) e 58 meses de idade (NEO<sub>58</sub>; b).



O índice de cone (RP<sub>IC</sub>) variou de 0,31 a 5,41 MPa nas camadas entre 0,00 e 1,20 m de profundidade, em ambas as condições de potencial produtivo (ARG e NEO), na avaliação em campo. O IC na linha de plantio foi inferior ao observado na entre linha e as diferenças significativas foram observadas, principalmente, nas camadas entre 0,00 e 0,40 m. O efeito da sazonalidade sobre o IC, para o período 2015-2016, proporcionou maiores valores de IC em março de 2015, ocasião em que todas as áreas amostradas tiveram médias superiores a 3,0 MPa a partir da camada 0,20 e 0,40 m. O IC teve relação positiva com a profundidade dos perfis (Figura 7), principalmente nas áreas NEO, onde o IC variou de 0,65 a 5,0 MPa, nas camadas 0,10-0,20 e 1,00-1,20 m, respectivamente (Figura 7b). Esses valores das áreas NEO foram muito superiores aos observados na avaliação da RP em laboratório, com condição de umidade controlada.

Figura 7 – Índice de cone ( $RP_{IC}$ ) nos solos com capacidade de potencial produtivo alta (ARG; a) e baixa (NEO; b), em povoamentos com idade entre 33 (ARG<sub>33</sub>, NEO<sub>33</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub>, NEO<sub>89</sub>) meses de idade.



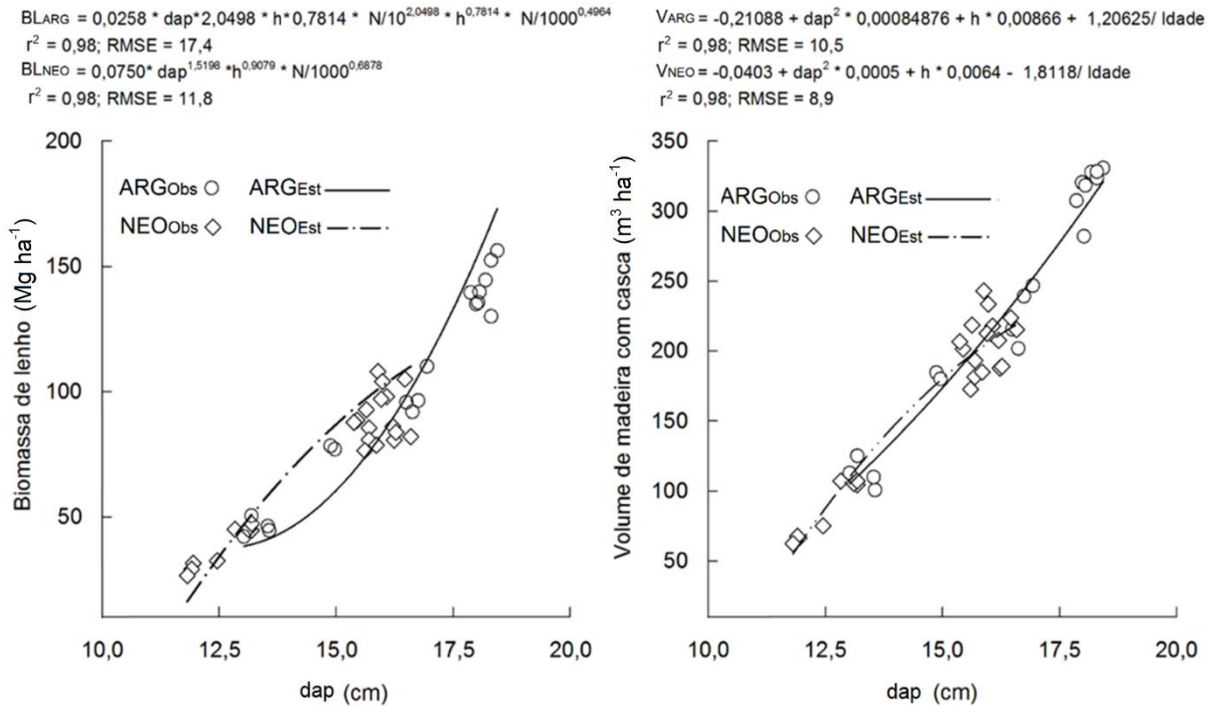
Fonte: (a) Embrapa Informações Técnicas, Tony Jarbas F. Cunha, 2010 – Neossolo Quartzarênico Órtico típico; (b) Streck et al. 2008 – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico.

### 3.3.2 Caracterização dendrométrica e da produção dos povoamentos florestais

Os povoamentos avaliados ao final do ciclo, com idade de 89 meses, tiveram dap e altura médios de 17,4 cm e 24,1 m, respectivamente, o que resultou em um estoque de madeira de 321,3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e 141,8 Mg ha<sup>-1</sup> de biomassa de lenho (casca, galhos e madeira do tronco). A produtividade, em função do dap, da altura, da idade e da densidade dos povoamentos, foi distinta entre as condições de potencial

produtivo (Figura 8), sendo que nas áreas ARG a produção volumétrica superou em, aproximadamente, 50% a produção das áreas NEO.

Figura 8 – Biomassa de lenho (BL; a) e volume de madeira com casca (V; b), observado (Obs) e estimado (Est) em função do diâmetro a altura do peito (dap), da altura (h), densidade (N ha<sup>-1</sup>) e idade, para as áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO).



As curvas de crescimento evidenciaram que a maior capacidade produtiva das áreas ARG deve-se à manutenção das taxas de incremento após os 58 meses. Nessa idade, as duas condições de solo (ARG e NEO) tiveram o mesmo padrão de crescimento de acordo com o volume, a biomassa e o dap médio, mas tiveram diferentes alturas média e dominante (Tabela 4).

A dispersão dos dados de crescimento indicou que, além das superiores taxas de incremento, as áreas ARG tiveram seu crescimento associado à maior estabilidade dos povoamentos (CV; %), alterada de forma significativa a partir dos 58 meses.

Na avaliação do potencial produtivo dos sítios com base na altura dominante, a área ARG<sub>89</sub> teve maior índice de sítio, seguido da área ARG<sub>58</sub> e das áreas NEO<sub>89</sub> e NEO<sub>58</sub>, que foram similares (Figura 9).

A taxa de incremento médio anual em volume (IMA<sub>V</sub>; m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) foi de 48,1 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e representou a média das taxas de 37,6 e 58,6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> observadas

nas áreas NEO e ARG, respectivamente, ao final do ciclo de corte de 8 anos. As duas condições de solo (ARG e NEO), até os 58 meses de idade, tiveram taxas de IMA<sub>v</sub> de, aproximadamente, 44 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e de 18,0 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de IMA<sub>BL</sub> (Figura 10b). O crescimento do dap e da h teve tendência negativa nas suas taxas de incremento dos 58 para os 89 meses de idade, em ambas as condições de potencial produtivo (Figura 10a).

Tabela 4 – Altura (h), altura dominante (h<sub>dom</sub>), diâmetro à 1,3 m de altura (dap), volume (V) e biomassa de lenho (BL) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.

Solo	h* (m)	h <sub>dom</sub> * (m)	dap* (cm)	V* (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	BL* (Mg ha <sup>-1</sup> )
ARG <sub>58</sub>	20,9 <sup>b</sup>	22,9 <sup>b</sup>	16,0 <sup>a</sup>	220,4 <sup>a</sup>	88,5 <sup>a</sup>
NEO <sub>58</sub>	19,6 <sup>a</sup>	21,2 <sup>a</sup>	16,0 <sup>a</sup>	212,6 <sup>a</sup>	92,1 <sup>a</sup>
ARG <sub>89</sub>	27,3 <sup>b</sup>	29,2 <sup>b</sup>	18,9 <sup>b</sup>	422,3 <sup>b</sup>	195,4 <sup>b</sup>
NEO <sub>89</sub>	23,6 <sup>a</sup>	27,6 <sup>a</sup>	16,5 <sup>a</sup>	288,0 <sup>a</sup>	134,6 <sup>a</sup>

Sendo: \* Médias seguidas de mesma letra, na mesma classe de idade, não se diferenciam estatisticamente ( $p < 0,05$ ); h = altura total; h<sub>dom</sub> = altura dominante; dap = diâmetro à altura de 1,3 m; V = volume de madeira com casca, por hectare; BL = biomassa de lenho (casca, galhos, madeira) por hectare.

Figura 9 – Índice de sítio das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 58 (NEO<sub>58</sub> e ARG<sub>58</sub>) e 89 (NEO<sub>89</sub> e ARG<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.

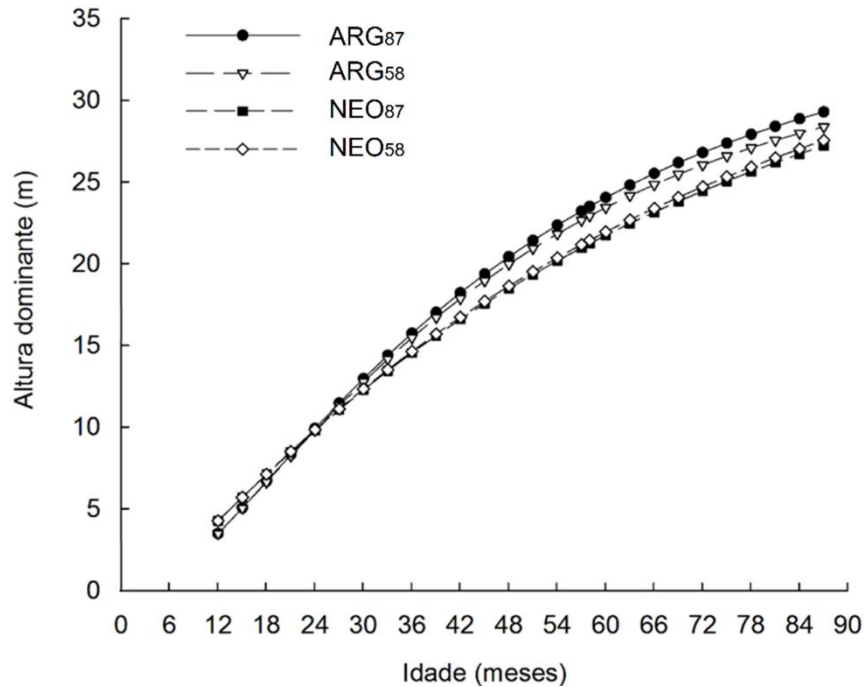
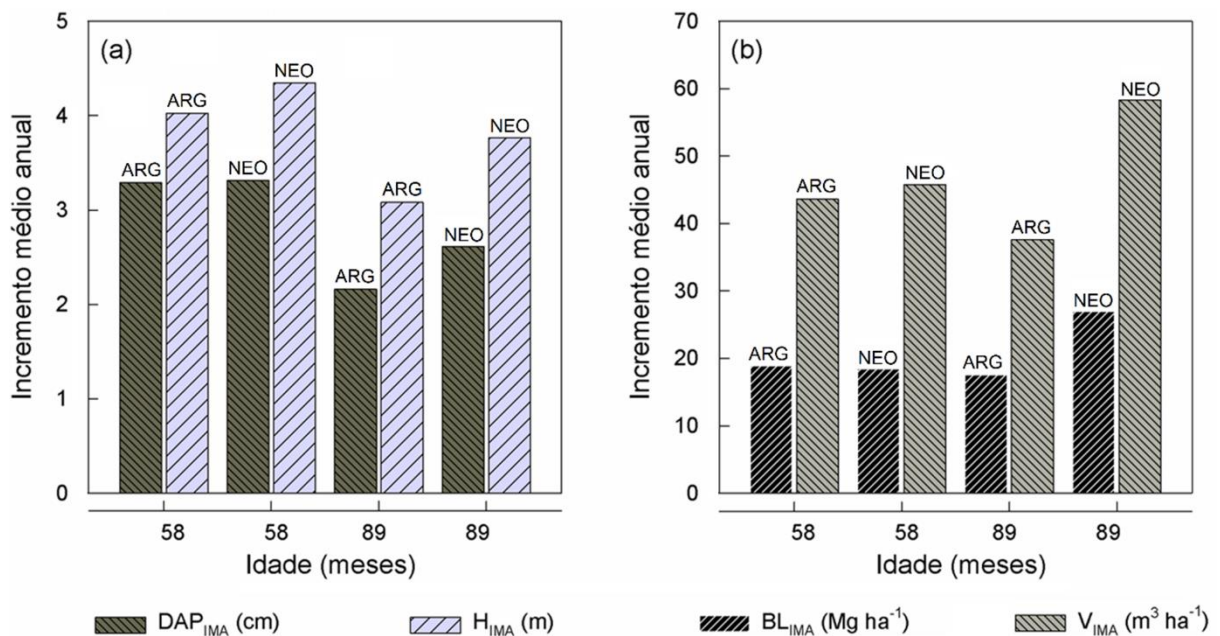


Figura 10 - Incremento médio anual em diâmetro a 1,30 m de altura (dap) e altura (a), e em biomassa de lenho e volume de madeira (b), das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.



O crescimento das áreas ARG, dos 58 para os 89 meses de idade, teve um decréscimo de, aproximadamente, 21 e 13% na h e no dap, respectivamente. Nas áreas NEO, esse déficit foi mais significativo, de aproximadamente 34% para o dap e 24% para a h. A maior taxa produtiva observada nas áreas ARG<sub>89</sub> representou um incremento em biomassa de lenho (IMA<sub>BL</sub>) de 26,9 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

### 3.3.3 Efeito das propriedades físico-hídricas dos sítios sobre a produtividade do *E. saligna*

O crescimento (dap e h) e a produtividade (IMA<sub>VSC</sub>; fuste principal e IMA<sub>BL</sub>; fuste, casca, galhos) tiveram correlação significativa ( $r$ ;  $p < 0,05$ ) com a RP, a Ds, a K<sub>ar</sub>, a K<sub>sat</sub>, a Mac e a Mic.

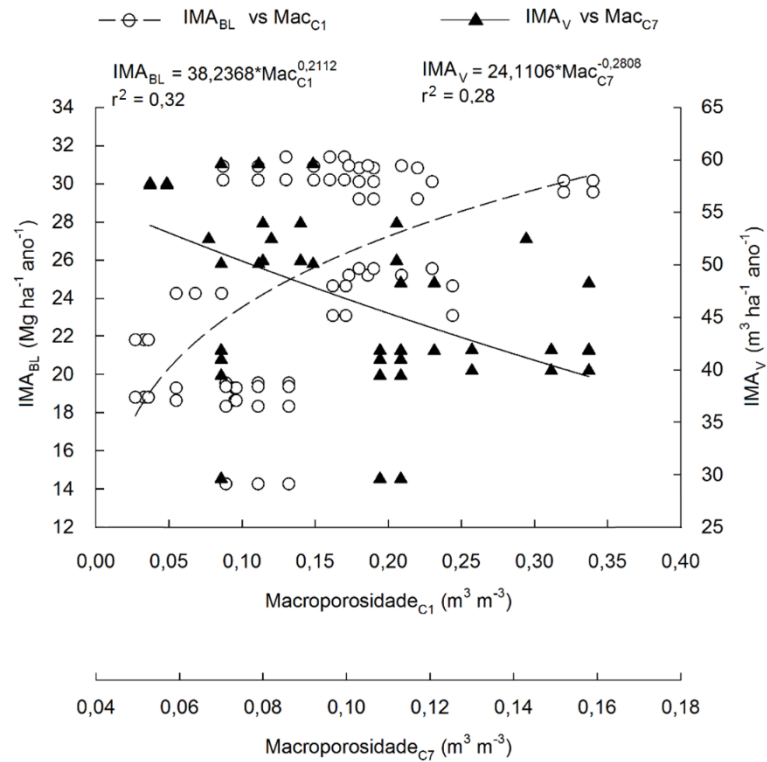
A relação entre as propriedades físico-hídricas dos solos e a produtividade foi diferente em função da profundidade dos perfis, em todas as áreas ARG. Nas camadas até 0,60 m de profundidade, a Mac, a K<sub>ar</sub> e a K<sub>sat</sub> tiveram correlação positiva com a produtividade e com o crescimento dos povoamentos. Nessas áreas, a Mac na camada 0,00-0,10 m explicou, aproximadamente, 32% da variância do IMA<sub>BL</sub>, enquanto nas camadas mais profundas (0,60-0,80 e 1,00-1,20 m) a Mac explicou, aproximadamente, 28% da variância do IMA<sub>V</sub> (Figura 11).

A descrição das variáveis de crescimento em função da K<sub>ar</sub> teve melhores resultados com a K<sub>ar</sub> determinada nas tensões de 10 e 33 kPa. Com a utilização de relações lineares, a K<sub>ar</sub> nas tensões de 10 e 33 kPa, nas camadas 0,60-0,80, 0,80-1,00 e 1,00-1,20 m explicou, aproximadamente, 66% da variação do IMA<sub>V</sub> e do IMA<sub>BL</sub>, 73% da variação da h e 65% da variação do dap.

As menores RPs, observadas na camada 0,20-0,40 m e na tensão de 10 kPa, estiveram associadas às maiores taxas de incremento, com precisão estatística de  $r^2 \sim 0,52$  para o IMA<sub>V</sub> e  $r^2 \sim 0,45$  para o IMA<sub>BL</sub>. Nas camadas abaixo de 0,60 m de profundidade, a Ds e a RP tiveram relação direta, enquanto a Mac, a K<sub>sat</sub> e a K<sub>ar</sub> tiveram relação inversa com as taxas de IMA. A K<sub>ar</sub> na camada 0,80-1,00 m, na tensão de 10 kPa, possibilitou estimar as das taxas de incremento com precisão estatística descrita por  $r^2$  superior a 0,30 (Figura 12).

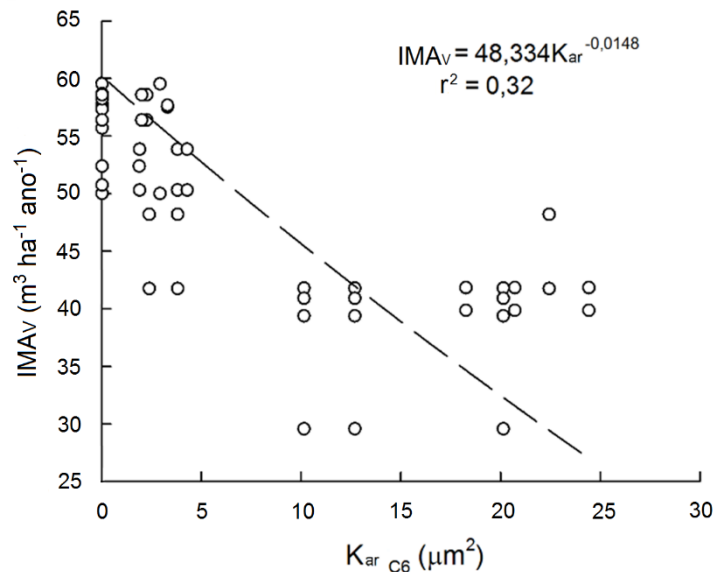


Figura 11 - Incremento médio anual em volume (IMA<sub>V</sub>) e em biomassa de lenho (IMA<sub>BL</sub>) em função da macroporosidade (Mac) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta aos 58 (ARG<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.



Sendo: C1 = camada 1 do solo (0,00-0,10 m); C7 = camada 7 do solo (1,00-1,20 m).

Figura 12 - Incremento médio anual em volume (IMA<sub>V</sub>) em função da permeabilidade do solo ao ar à 6 kPa (K<sub>ar</sub>) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta aos 58 (ARG<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.

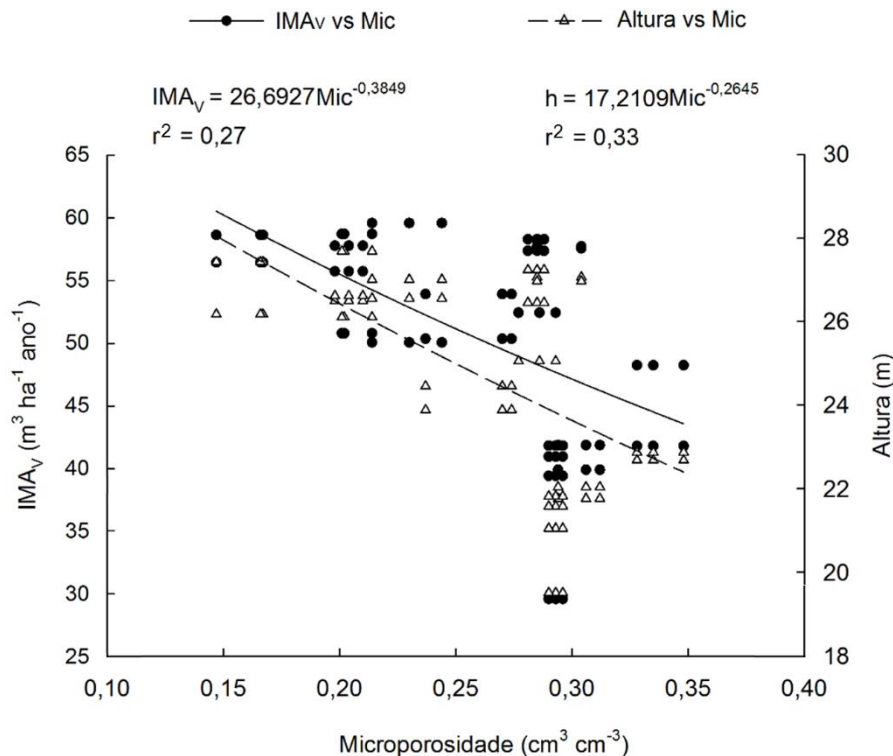


Sendo:  $K_{ar\ C6}$  = permeabilidade do solo ao ar na camada 6 (0,80 – 1,00 m).

A densidade do solo ( $D_s$ ) explicou, aproximadamente, 13 e 46% da variação do  $IMA_{BL}$  observada nas camadas 0,60-0,80 e 1,00-1,20 m, respectivamente, pela análise de regressão linear simples. A RP determinada nas tensões de 1, 6, 33 e 100 kPa e nas camadas 0,60-0,80, 0,80-1,00 e 1,00-120 m teve alta significância na estimativa das taxas de incremento, capaz de explicar 55, 65 e 68% do  $IMA_v$ ,  $dap$  e  $h$ , respectivamente.

A microporosidade nas camadas 0,20-0,40 e 0,60-0,80 m não teve variação em função da profundidade. Sua relação negativa significativa com as taxas de incremento possibilitaram a descrição de 33% do  $IMA_v$  e 42% da  $h$ . Na maior parte das camadas, as menores  $Mic$  estiveram associadas com os solos de maior capacidade de potencial produtivo. A  $Mic$  da camada 0,00-0,10 m teve eficiência estatística com  $r^2$  superior a 30% na descrição da  $h$ , e superior a 25% na estimativa do  $IMA_{BL}$  (Figura 13).

Figura 13 – Altura ( $h$ ) e incremento médio anual em volume ( $IMA_v$ ) em função da microporosidade ( $Mic$ ) da área com capacidade de potencial produtivo alta aos 58 ( $ARG_{58}$ ) e 89 ( $ARG_{89}$ ) meses de idade dos povoamentos.



A regressão linear múltipla para as camadas até 0,60 m de profundidade das áreas ARG, com base nos valores de RP e  $K_{ar}$  obtidos nas tensões de 10 e 33 kPa, indicou a  $K_{ar}$  como a principal variável selecionada pelo procedimento *stepwise*, seguido da RP e da Mic. A  $K_{ar}$  e a RP da camada 0,10-0,20 m foram significativas na descrição de aproximadamente 34% da variância do  $IMA_V$ . Pelo processo não linear de regressão múltipla, aproximadamente 31% da variância da h foi explicada pela  $K_{ar}$  e pela RP na camada 0,40-0,60 m e na tensão de 33 kPa.

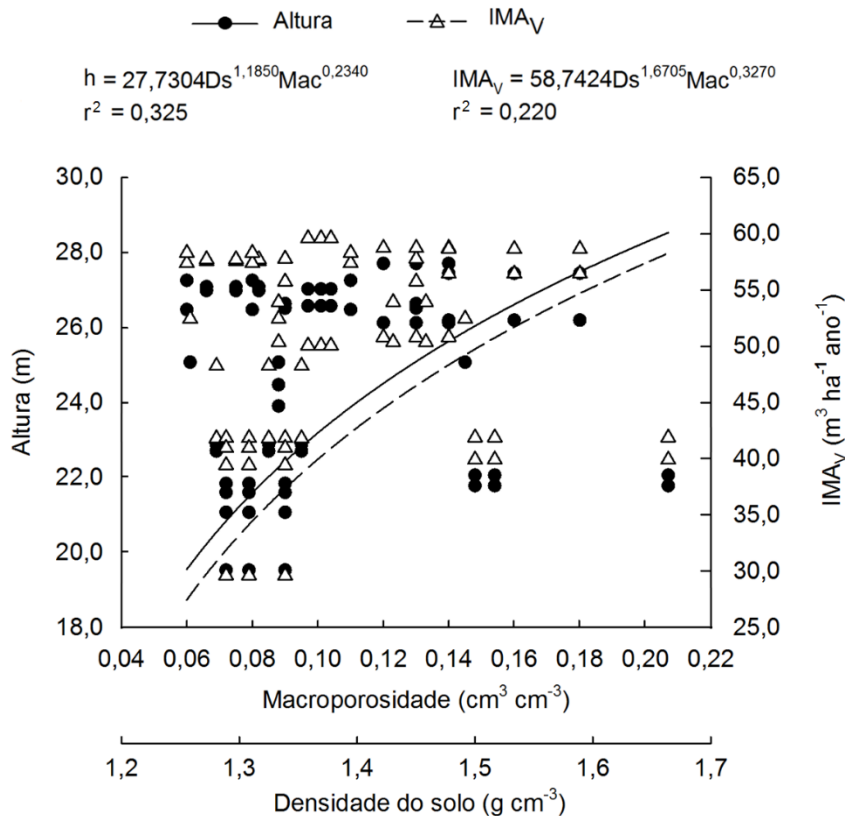
Os resultados obtidos nas análises das camadas entre 0,00 e 0,60 m indicaram a Mic como altamente significativa, com sinal negativo, na descrição da variância do crescimento dos povoamentos.

Abaixo de 0,60 m de profundidade, a  $K_{ar}$ , a Ds, a Mac e a Mic dos solos ARG tiveram alta significância na análise de regressão múltipla, principalmente na descrição da variância da h e do  $IMA_{BL}$ . A  $K_{ar}$ , a Mac e a Mic nas camadas 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m dos solos ARG, na tensão de 10 kPa, foram as principais propriedades associadas com as taxas de incremento, com a altura total (h) e com o dap. Na tensão de 10 kPa, a Ds e a  $K_{ar}$  da camada 1,00-1,20 m descreveram mais de 55% da variância da h e do  $IMA_{BL}$ .

As propriedades dos solos mais importantes na descrição do crescimento dos povoamentos, pela análise de regressão múltipla, foram a  $K_{ar}$  e a RP das camadas mais profundas que 0,60 m, na tensão de 33 kPa. A Mic e a Ds dos solos ARG também foram significativas, porém, somente nas camadas 0,60-0,80 e 1,00-1,20 m. Aproximadamente 55% da variância das taxas de  $IMA_V$  e  $IMA_{BL}$  foram descritas pela  $K_{ar}$  e pela RP na camada 1,00-1,20 m. Nessa mesma camada, a Ds e a  $K_{ar}$  tiveram eficiência estatística com  $r^2$  superior a 0,70 para o dap e para a h.

Os valores médios de Ds,  $K_{ar}$ , Mc e RP, observados nas camadas 0,60-0,80, 0,80-1,00 e 1,00-1,20 m dos solos ARG, proporcionaram o ajuste de equações capazes de descrever mais de 50% da variância das taxas de incremento e das variáveis dendrométricas dap e h. Pela regressão linear múltipla, a  $K_{ar}$ , a Ds e a Mac da camada 0,40-0,60 m na tensão de 10 kPa descreveram, aproximadamente, 28% da variância do  $IMA_V$ . Os valores de Ds e a Mac obtidos nessa camada foram significativos na descrição de 33 e 22% da variância da altura total (h) e do  $IMA_V$ , respectivamente (Figura 14).

Figura 14 – Altura (h) e incremento médio anual em volume (IMA<sub>V</sub>) em função da macroporosidade (Mac) e da densidade do solo (Ds) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta aos 58 (ARG<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.



O procedimento *Stepwise* selecionou a  $K_{ar}$ , a RP e a Ds como mais significativas na estimativa das taxas de incremento, na camada 1,00-1,20 m na tensão de 33 kPa. Equações não lineares ajustadas em função da  $K_{ar}$  e da RP explicaram mais de 60% da variância das variáveis de crescimento e produtividade. Quando se associou a  $K_{ar}$  com a Ds, a estimativa do crescimento e da produtividade teve  $r^2$  superior a 0,70. Nas equações ajustadas a análise do Fator Inflacionário da Variância (FIV) não indicou presença de colinearidade entre as variáveis.

Nos solos das áreas NEO, a produtividade (IMA<sub>V</sub> e IMA<sub>BL</sub>) teve relação direta com a  $K_{ar}$  nas tensões de 10 e 33 kPa, em todas as camadas avaliadas. A Ds das camadas 0,00-0,10, 0,20-0,40 e 0,60-0,80 m teve correlação negativa com as taxas de IMA e o dap, e positiva com a h. A Mac e a Mic, nas mesmas camadas, tiveram correlação positiva e negativa, respectivamente, com o dap e com o IMA. A altura total (h) teve correlação significativa com as propriedades do solo avaliadas, porém inversa ao observado entre as demais variáveis de crescimento e as propriedades do solo.

Na avaliação dentro de cada classe de idade, as áreas NEO<sub>58</sub> tiveram correlação positiva entre o IMA e as propriedades Mac e PT, e negativa com a Ds da camada 0,00-0,10 m. A Ds e a PT da camada 0,10-0,20 m tiveram correlação negativa e positiva, respectivamente, com a h. Na camada 0,40-0,60 m, foi verificada relação inversa entre as taxas de IMA e a Mic. Nos povoamentos NEO<sub>89</sub>, não foram observadas correlações significativas entre as variáveis dendrométricas (dap, h), as taxas de IMA e as propriedades físico-hídricas dos solos.

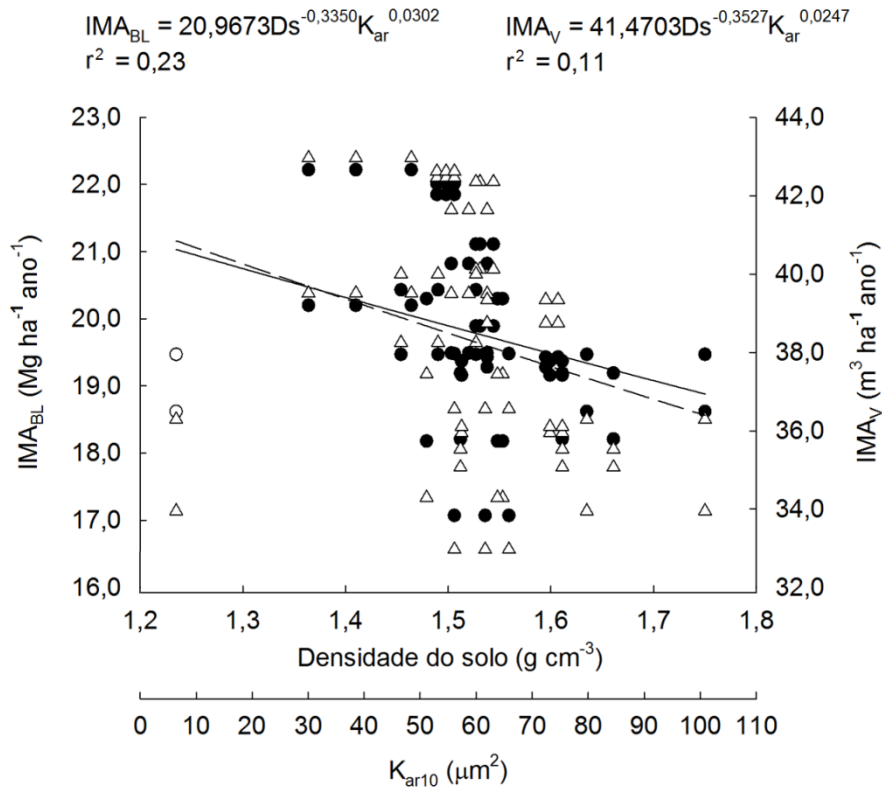
Pela análise de regressão simples, a Ds das camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,40-0,60 m teve significância quando relacionada às taxas de IMA. Na camada 0,40-0,60 m, a Ds teve eficiência estatística com  $r^2$  de 0,14 e 0,27 na estimativa do IMA<sub>v</sub> e da altura total (h), respectivamente.

A Mac nas camadas 0,00-0,10 e 0,80-1,00 m, relacionada positivamente com as taxas de incremento e negativamente com a h, descreveu entre 7 e 12% da variância de tais variáveis produtivas. Nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,40-0,60 a K<sub>ar</sub> teve eficiência caracterizada por  $r^2$  entre 0,12 e 0,23 na estimativa da variância das taxas de IMA<sub>v</sub> e IMA<sub>BL</sub>.

A adição da Mac à equação proporcionou um aumento de precisão de aproximadamente 12%, com base no valor do  $r^2$ , com eficiência estatística final de  $r^2 = 0,35$ . Pelo método não linear, em amostras de solos da camada 0,00-0,10 m, os valores da K<sub>ar</sub> obtidos na tensão de 10 kPa associados à densidade do solo (Ds) proporcionaram estimativas que representaram em torno 11% da variância do IMA<sub>v</sub> e 23% da variância do IMA<sub>BL</sub> (Figura 15).

Pelo método da regressão linear com procedimento *stepwise*, a Ds da camada 0,40-0,60 m a foi a principal variável relacionada ao IMA<sub>v</sub>, caracterizada por  $r^2$  parcial de 0,17. A adição da K<sub>ar</sub>, determinada em amostras de solos com umidade referente à tensão de 33 kPa, a equação teve ganho de eficiência de aproximadamente 6%, de acordo com a magnitude do  $r^2$  (0,23).

Figura 15 – Incremento médio anual em volume (IMA<sub>V</sub>) e em biomassa de lenho (IMA<sub>BL</sub>) em função da densidade do solo (Ds) e da permeabilidade do solo ao ar à 10 kPa (K<sub>ar10</sub>) das áreas com capacidade de potencial baixa aos 58 (NEO<sub>58</sub>) e 89 (NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.



### 3.4 Discussão

A análise físico-hídrica dos solos possibilitou a identificação das principais propriedades que distinguem os sítios com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e com capacidade de potencial produtivo baixa (NEO). Devido à textura grossa do solo nas áreas NEO, com menos de 5% de argila, as maiores diferenças entre os sítios foram observadas nas propriedades que refletem a capacidade de manutenção de água e representam a permeabilidade do solo ao ar e à água.

#### 3.4.1 Propriedade físico-hídricas dos solos das áreas ARG

Nas áreas ARG, caracterizadas pela presença de Argissolos, a densidade do solo (Ds) foi superior às Ds observadas por Suzuki et al. (2012) em florestas de *E. saligna* cultivadas em Argissolos Vermelho-Amarelo Distróficos. O predomínio de maiores Ds nas camadas superficiais corrobora com os resultados obtidos por

Prevedello et al., (2013b), que observaram Ds entre 1,33 e 1,62 Mg m<sup>-3</sup> até a profundidade de 0,5 m, em povoamentos de *E. grandis* cultivado em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico.

A Ds das camadas superficiais dos solos ARG<sub>89</sub> e na camada superficial dos solos ARG<sub>58</sub> foi superior à 1,5 Mg m<sup>-3</sup>, valor considerado superior ao limite crítico para o adequado crescimento e desenvolvimento das plantas para solos de textura franco-argilosa (REICHERT et al., 2003).

A redução na Ds e o aumento da microporosidade (Mic) nas camadas mais profundas do solo (abaixo da camada 0,40-0,60 m) podem estar associados ao maior potencial produtivo dos solos ARG, principalmente porque aproximadamente 60% das raízes finas do eucalipto estar localizadas até 1,0 m de profundidade do solo (LACLAU et al., 2013), assim como, aproximadamente, 70% do sistema radicular poder estar concentrado na camada 0,00-0,20 m (TEIXEIRA et al., 2001). A maior Mic pode ter favorecido a retenção de um maior volume de água por um maior período de tempo, o que favorece o desenvolvimento radicular e maximiza a produtividade, pois a água é um dos principais fatores relacionados ao crescimento das plantas (STAPE et al., 2010; SILVA, 2011).

A relação negativa entre a Ds e a macroporosidade (Mac), já observada em outros estudos (CAVENAGE et al., 1999; BERTOL et al., 2004), teve como consequência a obtenção de Mac inferior a 10%, a partir da Ds de 1,4 Mg m<sup>-3</sup>, em distintas camadas dos solos ARG. Esse comportamento evidencia que os solos ARG, com maior capacidade de potencial produtivo, podem restringir o crescimento das raízes das plantas pela restrição da aeração do solo e de trocas gasosas, mesmo que a Ds não seja restritiva. A Mac é uma propriedade do solo relacionada ao fluxo vertical e lateral de ar, água e solutos, e por isso, o volume mínimo de 10% é definido como o necessário para garantir as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera e, por consequência, garantir o bom desenvolvimento e a funcionalidade do sistema radicular das árvores (KOZLOWSKY 1985; STARTSEV; McNABB, 2009).

O padrão de distribuição vertical do sistema poroso dos solos ARG<sub>58</sub> mostrou que, apesar dos valores de Mac próximos ao limite de 10%, a pouca variação dessa propriedade em função da profundidade pode ter proporcionado boas condições de aeração e drenagem até a profundidade de 1,2 m. Essas características tendem a favorecer o desenvolvimento radicular, mas, por outro lado, o menor valor da Mac nas camadas abaixo dos 0,80 m, como observado nas áreas ARG<sub>89</sub>, sem compactação

excessiva, talvez possa ter proporcionado menor fluxo descendente e melhor aproveitamento da água pelas raízes.

Em situações onde a macroporosidade possa representar um fator limitante para o desenvolvimento das plantas, a conectividade, a tortuosidade e continuidade do sistema poroso, principais fatores relacionados à  $K_{sat}$  e à  $K_{ar}$  podem garantir as trocas gasosas e a movimentação de soluções e água no solo (DORNER; HORN, 2009; SILVA et al., 2009; ZHAO et al., 2010; COSTA, 2013). A  $K_{sat}$  e a  $K_{ar}$ , caracterizadas pela relação direta com a  $Mac$  e  $PT$ , e indireta com a  $Ds$  (MESQUITA; MORAES, 2004; REICHERT et al., 2007; SUZUKI, 2008; VOGELMANN et al., 2012), descrevem a capacidade do solo de transmitir e absorver soluções, água e gases (DÖRNER; HORN, 2006; REYNOLDS et al., 2008; SILVA et al., 2009).

Os valores de  $K_{sat}$  superiores  $4,5 \text{ cm h}^{-1}$  (0,00-0,10 m do ARG<sub>58</sub>) e superiores a  $10,5 \text{ cm h}^{-1}$  (0,00-0,20 m do ARG<sub>89</sub>) corroboram com os resultados obtido por Prevedello et al., (2013b), e possibilitam afirmar que estes solos se caracterizam como bem drenados superficialmente, o que diminui a sua susceptibilidade à erosão (REYNOLDS et al., 2003). Por outro lado, a  $K_{sat}$  inferior a  $1,8 \text{ cm h}^{-1}$  (0,10-0,40 m do ARG<sub>58</sub>) e inferior a  $1,0 \text{ cm h}^{-1}$  (0,60-1,00 m do ARG<sub>89</sub>) pode limitar a capacidade de fluxo de água e nutrientes nestes solos, nos sentidos lateral e vertical, além de acarretar no excesso de umidade na zona radicular, o que normalmente compromete o desenvolvimento das culturas (CASTELLINI et al., 2013). Nas camadas abaixo da profundidade de 0,80 m, limite a partir do qual o volume radicular do eucalipto diminui substancialmente, a menor  $K_{sat}$  pode retardar o movimento de percolação e favorecer o aproveitamento da água pelas raízes; porém, altos valores de  $K_{sat}$ , como observado na camada 0,80-1,00 m dos solos ARG<sub>58</sub> ( $7,2 \text{ cm h}^{-1}$ ), podem induzir ao fluxo preferencial (descendente) da água nos solos (DÖRNER; HORN, 2006). Os valores de  $K_{sat}$  superiores a  $2,1 \text{ cm h}^{-1}$ , obtidos nas camadas acima e abaixo da profundidade de 0,4 m, nos respectivos solos ARG<sub>89</sub> e ARG<sub>58</sub>, encontram-se dentro do limite considerado ideal ( $1,8$  a  $18 \text{ cm h}^{-1}$ ) para a eficiente redução da água superficial e drenagem da água em excesso (REYNOLDS et al., 2003; REYNOLDS et al., 2008).

Dada a alta correlação existente entre a  $K_{sat}$  e a  $K_{ar}$ , devido às suas dinâmicas estarem relacionadas às mesmas propriedades dos solos, foram obtidos padrões semelhantes de permeabilidade e condutividade em função da profundidade e da classe de solo. Assim como a  $K_{sat}$ , a  $K_{ar}$  também representa a continuidade e efetividade do sistema poroso para a mobilidade de soluções e gases, porém, a  $K_{ar}$



se caracteriza como uma variável de mais fácil e rápida obtenção, e menos sujeita a erros experimentais, sendo muitas vezes utilizada na estimativa da  $K_{sat}$  (IVERSEN et al., 2001; WELLS et al., 2006; HUANG et al., 2015). A qualidade físico-estrutural dos solos e sua importância em relação à produtividade das culturas pode ser adequadamente representada pelas avaliações que descrevem a dinâmica da  $K_{ar}$  no solo (SILVA et al., 2009).

A  $K_{ar}$  teve valores considerados críticos para o adequado desenvolvimento das culturas somente nas camadas 0,40-0,60 e 0,80-1,00 m dos solos ARG<sub>89</sub>. Nessas camadas, com umidade na tensão de 100 kPa, a  $K_{ar}$  foi inferior ou igual a  $1 \mu\text{m}^{-2}$ , valor sugerido como limite crítico por McQueen e Shepherd (2002). Os resultados da  $K_{ar}$  obtidos na tensão de 100 kPa são bons parâmetros de avaliação da qualidade física dos solos (RESSURECCION et al., 2007). O efeito do maior adensamento do solo (maior  $D_s$ ) sobre a condutividade e a  $Mac$  justifica os menores valores de  $K_{ar}$  observados na camada 0,20-0,40 m dos solos ARG<sub>58</sub>. Nesse solo o aumento de aproximadamente 5% na  $D_s$  proporcionou um decréscimo da  $K_{ar}$  entre 20 e 60%.

Em solos mais compactados ou adensados, a capacidade de fluxo dos solos pode diminuir até 70% em função do aumento de aproximadamente 8% na  $D_s$  (KIM et al., 2010). Devido à relação negativa entre a  $D_s$  e a  $K_{ar}$ , foram obtidos valores de  $K_{ar}$  inferiores a  $1 \mu\text{m}^{-2}$  em solos com  $D_s$  a partir de 1,26 e 1,39  $\text{Mg m}^{-3}$  nas áreas ARG<sub>58</sub> e ARG<sub>89</sub>, respectivamente. As relações negativas da  $K_{ar}$  com a  $D_s$ , a porosidade total (PT) e a  $Mac$  estão associadas à compactação (SWEENEY et al., 2006; SUZUKI et al., 2007; SILVA et al., 2009). Camadas do solo mais compactadas ou adensadas (com maior  $D_s$ ), além de terem sua qualidade física comprometida pela diminuição do fluxo de água e ar, também podem representar limitações ao desenvolvimento do sistema radicular devido à resistência mecânica à penetração (RP). Valores de RP superiores a 2,0 MPa, observados nas camadas mais superficiais dos solos das áreas ARG<sub>58</sub> e mais profundas dos solos das áreas ARG<sub>89</sub>, podem ser considerados restritivos ao crescimento do sistema radicular. Porém, como essa propriedade também está relacionada diretamente com a  $Mic$ , ela representa a porção do solo responsável pelo armazenamento de água, muitas culturas podem não sofrer os efeitos da RP por influência da ação da umidade (WHALLEY et al., 2007).

O aumento da RP associado ao decréscimo da macroporosidade pode ser resultado da compactação do solo, o qual quando compactado tem sua estrutura porosa alterada, com o aumento da  $Mic$  em relação a  $Mac$  (BERGAMIN et al., 2015),

ou ainda, ser consequência do adensamento natural proporcionado por maiores teores de argila nas camadas mais profundas dos solos ARG. Dessa forma, valores elevados de RP podem representar inadequada condição física dos solos ao crescimento e desenvolvimento de plantas, não só devido à resistência mecânica à qual o sistema radicular está exposto, mas também, pela pouca efetividade do sistema poroso, neste caso caracterizado pela Mac, na dinâmica do fluxo de ar e água.

A RP observada nas camadas e tensões avaliadas, com variação entre 1,0 e 5,0 MPa, apesar de ser considerada extremamente alta (ARSHAD et al., 1996), pode não ter representado resistência mecânica que comprometesse o desenvolvimento radicular, se considerado os resultados obtidos por Laclau et al. (2001).

#### 3.4.2 Propriedades físico-hídricas dos solos das áreas NEO

A Ds das áreas NEO (mínima de 1,51 Mg m<sup>-3</sup> e máxima de 1,65 Mg m<sup>-3</sup>) foi maior em relação à observada nos solos ARG, não devido à compactação, mas principalmente pelo predomínio de solos com textura arenosa (OSMAN, 2013). Esse padrão de densidade assemelha-se ao observado por Rodrigues et al. (2012), em florestas de *E. grandis* implantadas em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico, que tiveram Ds entre 1,51 e 1,61 Mg m<sup>-3</sup>.

As maiores Ds observadas a partir da camada 0,20-0,40 m das áreas NEO pode ter sido resultado do adensamento natural do solo por efeito das camadas subjacentes (CAVENAGE, 1999; PREVEDELLO et al., 2013b), enquanto os menores valores observados próximo à superfície pode estar associada ao acúmulo de matéria orgânica, abundante em ambientes florestais, e ainda, devido à alta densidade de raízes finas (RIGATTO et al., 2005; SOARES, 2011). Apesar dos elevados valores da Ds desses solos, nenhuma camada avaliada teve densidade do solo próxima ou superior a 1,75 Mg m<sup>-3</sup>, considerado crítico em solos de textura arenosa (REICHERT et al., 2003).

Devido à textura ter alta influência sobre o volume de microporos (REICHERT; REINERT, 2006), nas áreas NEO, a Mic teve valores muito abaixo do considerado ideal para o crescimento das plantas, definido como em torno de 2/3 da porosidade total (PT) (KIEHL, 1979). A alta proporção de macroporos favorece a infiltração da água; porém, devido a essa condição ser contínua em todo o perfil, ela também pode ter favorecido os fluxos de água e ar no solo. De acordo com Stepniewski et al. (1994),

a  $M_{ac}$  de  $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  é considerada como o limite superior para manter uma adequada aeração no solo, enquanto em uma  $M_{ac}$  entre  $0,10$  e  $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  a difusão de oxigênio pode ser limitada e abaixo de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  talvez ocorra deficiência na aeração do solo. Reichert et al. (2016) também observaram, em solo arenoso,  $M_{ac}$  superior a  $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , considerado como o limite superior para as adequadas trocas gasosas.

A baixa  $M_{ic}$  associada à quase ausência de matéria orgânica e, principalmente, ao volume de macroporos (aproximadamente 85% da porosidade total), proporcionou altas taxas de  $K_{ar}$  e  $K_{sat}$  em todas as camadas dos solos das áreas NEO. Tais características remetem à baixa capacidade de manutenção de água e à alta susceptibilidade destas áreas ao estresse hídrico. A alta correlação observada entre a  $K_{ar}$  e a  $K_{sat}$  ( $r > 0,9$ ;  $p < 0,05$ ) decorre dessas variáveis terem seu comportamento relacionado às mesmas propriedades dos solos, como a textura, a  $D_s$  e o volume de macroporos (HILLEL, 1972; VOGELMANN et al., 2012; BRAGA et al., 2015, MENTGES et al., 2016).

O grande volume de macroporos e a baixa qualidade estrutural dos solos das áreas NEO, em decorrência da textura e do baixo teor de argila, explicam os valores da resistência do solo à penetração (RP) obtidos em todas as camadas avaliadas (DEXTER et al., 2007; VAZ et al., 2011). A pouca variação da RP em função da umidade talvez esteja associada à quase ausência do efeito lubrificante da água sobre este material (BRUAND et al., 2004). A RP máxima de  $0,32 \text{ MPa}$ , medida da tensão de  $100 \text{ kPa}$ , onde o volume de água ficou próximo a  $2/3$  da microporosidade, indica uma compactação do solo classificada como baixa, segundo Arshad et al. (1996).

O Índice de Cone ( $RP_{IC}$ ), que teve valores muito acima dos obtidos na RP de bancada, apesar da semelhança nos teores de umidade das avaliações da RP em laboratório, pode ter seu comportamento relacionado ao efeito das camadas subjacentes dos solos, principalmente se considerada a relação direta verificada entre o IC e a profundidade (MARTINEZ et al., 2008). Solos de textura arenosa possuem um grande volume de macroporos, mas estes poros possuem alta rigidez, o que proporciona maior resistência mecânica à penetração (PUMPHREY et al., 1980).

A resistência mecânica superior a  $2,0 \text{ MPa}$  tem sido considerada restritiva para o desenvolvimento radicular da maioria das espécies agrícolas (SILVA, 2003). Para espécies florestais, a resistência mecânica considerada restritiva ao desenvolvimento radicular foi definida como igual ou superior a  $3,0 \text{ MPa}$  (ZOU et al., 2000), valores somente obtidos a partir da camada  $0,60-0,80 \text{ m}$  deste estudo. Mesmo que a RP a

partir de 2,0 e 3,0 Mpa seja considerada crítica, valores significativamente superiores com resistência mecânica de 6 MPa foram observados em situações com plantas visualmente saudáveis, sem restrições ao desenvolvimento radicular, devido à influência da umidade do solo (LACLAU et al., 2001; WHALLEY et al., 2007).

A qualidade físico-hídrica do solo das áreas NEO teve suas limitações relacionadas à textura grossa e ao baixo teor de matéria orgânica, o que pode ter influenciado de forma negativa a dinâmica da água e sua disponibilidade, com consequente perda do potencial produtivo desses sítios, pois o estresse hídrico é o principal fator relacionado a perdas de produtividade em povoamentos florestais (FLEXAS et al., 2002).

### 3.4.3 Relação entre o crescimento a produtividade e o solo

O crescimento e a produtividade médios dos povoamentos de *E. saligna* observados neste estudo ( $IMA = 47,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e  $V = 356 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) tiveram um padrão de incremento e estoque de madeira superior à média verificada em florestas comerciais do Brasil (IBÁ, 2015), e semelhante à produtividade verificada por outros autores (SCHUMACHER et al., 2011; ROCHA, 2014; IBÁ, 2015; MACHADO et al., 2015). O volume total de madeira produzido aos 89 meses proporcionou um estoque de biomassa de madeira de  $150,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , o que representa uma proporção de 0,22 Mg de biomassa produzida por  $\text{m}^3$  de madeira. Esse valor ficou abaixo do resultado obtido por povoamentos de *E. saligna* implantado no sudeste do Brasil (LEMOS, 2012; KLIPPEL, 2015), possivelmente devido às diferenças na massa específica da madeira que, no presente estudo, variou entre 0,421 e 0,458.

As variáveis dendrométricas que descrevem a dimensão das árvores na idade próxima ao fechamento do ciclo de corte de 8 anos, caracterizaram as áreas ARG<sub>89</sub> como a mais produtiva, com dap médio de 18,9 cm. Esse crescimento em diâmetro, semelhante ao resultado observado em povoamentos de *E. saligna* na região sudeste do Brasil, que aos 84 meses de idade apresentaram dap médio de 18,4 cm (LEMOS, 2012), foi significativamente superior ao valor médio de 16,5 cm verificado nas áreas NEO<sub>89</sub>. Schumacher et al. (2011) obteve dap médio de 13,2 cm em povoamentos de eucalipto avaliados aos 96 meses de idade.

A altura dominante ( $h_{\text{dom}}$ ), considerada uma variável indicadora da capacidade produtiva dos sítios (SCHNEIDER; FINGER, 1993; MACHADO et al., 1997;

SCOLFORO, 1998), teve o maior valor médio de 29,2 m observado nos povoamentos ARG<sub>89</sub>, o que representou uma diferença de aproximadamente 6% superior à das áreas NEO<sub>89</sub>. Ambos resultados foram inferiores ao obtido em povoamentos de híbridos *E. grandis* x *E. urophylla*, que aos 72 meses de idade tiveram  $h_{dom}$  de 34,8 m (CASTRO et al., 2013).

A relação entre as propriedades dos solos e a produtividade foi ao encontro das expectativas do estudo, pois as maiores taxas produtivas foram características das áreas ARG, as quais apresentam solos de melhores condições estruturais e maior capacidade de armazenamento de água. Nestas áreas, a estrutura dos solos foi o principal fator associado às maiores taxas produtivas. A estrutura refere-se ao arranjo das partículas dos solos em unidades de diferentes tamanhos e formas. Por estar relacionada ao tamanho, número, distribuição e volume de poros do solo, representa adequadamente a capacidade de armazenamento e fluxo das soluções e gases dentro e entre o solo e a atmosfera (OSMAN, 2013).

Os altos valores de microporosidade observados em todas as camadas dos solos ARG possibilitaram afirmar que a capacidade de manutenção de água não foi um fator limitante ao crescimento; portanto, a mobilidade de ar e de solutos parece ter sido o fator decisivo para uma melhor qualidade físico-hídrica dos solos. Os resultados da avaliação da  $K_{ar}$ , assim como, da  $K_{sat}$ , podem ser considerados na avaliação da qualidade física dos solos (MOSADDEGUI et al., 2007). Solos com maior Mic tendem a apresentar menor permeabilidade em relação a solos com menor fração de microporos, para uma mesma PT (COSTA, 2013).

A baixa proporção de macroporos, inferior a 10% em algumas camadas dos solos das áreas ARG, pode ter comprometido o crescimento das plantas (SUZUKI et al., 2007), pois esta propriedade representa a porção do solo responsável pela infiltração, movimento e, por consequência, pela acessibilidade à água e nutrientes pelas raízes (ALAOUI et al., 2011; OSMAN, 2013). Até 0,60 m de profundidade, a  $K_{sat}$  e a  $K_{ar}$  foram as principais propriedades associadas à produtividade, principalmente porque a disponibilidade de água, ar e nutrientes para as plantas não depende somente do volume de macroporos, mas também das características relacionadas à continuidade, e por consequência, à efetividade da macroporosidade.

A relação direta observada entre a RP na camada 0,20-0,40 m e a produtividade, pode ser explicada pela correlação positiva existente entre a RP, a Mic e a capacidade de armazenamento de água (BERGAMIN et al., 2015). Em condições

onde a resistência mecânica não compromete o desenvolvimento das raízes, maiores valores de RP podem representar maior retenção e disponibilidade de água para as plantas.

A Ds e a RP, positivamente correlacionadas entre si (BOLAT et al., 2015), estão inversamente relacionadas à Mac e, por consequência, à  $K_{ar}$  e à  $K_{sat}$  (BRAGA et al., 2015; MENTGES et al., 2016). Solos de maior Ds apresentam uma menor proporção de Mac e maior de Mic, o que interfere na capacidade de armazenamento de água dos solos e na disponibilidade de ar e nutrientes para as plantas, devido à menor mobilidade de ar e soluções (OSMAN, 2013).

A relação direta entre as taxas de incremento e a RP e a Ds, nas camadas 0,60-0,80 e 1,00-1,20 m, e a relação negativa do IMA com a PT, Mac,  $K_{sat}$  e  $K_{ar}$  indicam que menores taxas de fluxo em profundidade talvez tenham favorecido o crescimento e a produtividade das árvores, pois o menor volume de água perdido por percolação pode resultar na manutenção da umidade no solo por um maior período de tempo.

A não observância de correlação negativa entre a RP e a produção mostra que, apesar da obtenção de valores de RP superiores a 5 MPa em algumas camadas, o desenvolvimento radicular parece não ter sido comprometido por influência da resistência mecânica do solo (LACLAU et al., 2001).

A produtividade das áreas NEO foi negativamente influenciada pelas propriedades dos solos  $K_{ar}$ ,  $K_{sat}$  e Mac, que por terem apresentado valores muito elevados caracterizam esses solos como altamente drenáveis e com baixa capacidade de armazenamento de água.

Os resultados que descreveram a relação positiva entre a produtividade e entre as propriedades Mac,  $K_{ar}$  e  $K_{sat}$  não têm coerência física e biológica, pois nesses solos o alto valor destas propriedades os tornam extremamente suscetíveis ao déficit hídrico (CARMINATI et al., 2008) e à perda de nutrientes por percolação (STONE, 2005).

Nas áreas onde a Ds teve relação negativa com a produtividade, talvez a ciclagem da serapilheira e, por consequência, o aporte de matéria orgânica no solo (MO) possam ter alterado a condição estrutural do solo e aumentando sua capacidade de manutenção de água. Não foi realizada a quantificação da MO; porém, nas condições avaliadas, esta é uma das principais propriedades que poderiam alterar a Ds dos solos.

Em todas as áreas avaliadas não foram observados valores de  $D_s$  e de RP próximo ao limite máximo considerado crítico para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (REICHERT et al., 2003; REICHERT et al., 2009b).

### 3.5 Conclusões

A produtividade do eucalipto é significativamente influenciada pelas propriedades edáficas associadas à dinâmica da água e ar no solo, para uma mesma condição climática e mesmo material genético.

Dentre classes distintas de solos, o principal fator relacionado à maior produtividade é a capacidade de armazenamento de água, que está intimamente relacionada à textura e estrutura do solo.

Em situações onde a resistência mecânica não é um fator limitante ao crescimento das plantas e a macroporosidade está próxima ao limite mínimo de 10%, menores valores de resistência do solo à penetração podem estar associados à maior produtividade.

As propriedades dos solos associadas ao fluxo de água e gases representam adequadamente a condição físico-estrutural dos solos e, por isso, podem ser utilizadas na avaliação da qualidade física do solo em relação à produtividade do eucalipto.

Em solos com boa capacidade de armazenamento de água (CAD), os povoamentos de eucalipto tendem a apresentar maior produtividade relacionada às maiores taxas de fluxo nas camadas acima de 0,60 m de profundidade.

Nesses mesmos solos, representados neste estudo pelo Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico e pelo Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico, a produtividade teve relação direta com a resistência do solo à penetração (RP) e com a densidade do solo ( $D_s$ ) e inversa com a permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ), observadas nas camadas abaixo da profundidade de 0,80 m, talvez devido a influência dessas propriedades sobre a dinâmica dos solutos em profundidade (percolação).

Maiores valores de  $K_{ar}$ , condutividade do solo saturado ( $K_{sat}$ ) e macroporosidade (Mac), verificadas nas camadas do solo abaixo da profundidade de 0,8 m, podem resultar no fluxo preferencial no solo e maximizar a perda de água por percolação.

### 3.6 Referências Bibliográficas

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B. & GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, **Soil Science Society of America**, p.123- 141, 1996.

ARSHAD, M. A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, p. 153–160, 2002.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JÚNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.155-163, 2004.

BOLAT, I.; MELEMEZ, K.; ÖZER, D. The influence of skidding operations on forest soil properties and soil compaction in Bartın, Turkey. **Eur J Forest Eng**, 1(1), p. 1-8, 2015.

BRAGA, F.V.A.; REICHERT, J.M.; MENTGES, M.I.; VOGELMANN, E. SALDANHA ; P.; RICHARD, A.R. Propriedades mecânicas e permeabilidade ao ar em topossequência Argissolo-Gleissolo: variação no perfil e efeito de compressão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (online), v. 39, p. 1025-1035, 2015.

BRUAND, A.; HARTMANN, C.; RATANA-ANUPAP, S.; SINDHUSEN, P.; POSS, R.; HARDY, M. Composition, fabric, and porosity of an Arenic Haplustalf in Northeast Thailand: Relation to penetration resistance. *Soil Science Society of America Journal*, v. 68, p. 185-193, 2004.

CARMINATI, A.; KAESTNER, A.; LEHMANN, P.; FLÜHLER, H. Unsaturated water flow across soil aggregate contacts. *Adv. Water Resour*, v. 31, p. 1221–1232, 2008.

CASTRO, R.V.O.; SOARES, C.P.B.; MARTINZ, F.B.; LEITE, H.G. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.48, n.3, p.287-295, mar. 2013.

CASTELLINI, M.; PIRASTRU, M.; NIEDDA, M.; VENTRELLA, D. Comparing physical quality of tilled and no-tilled soils in an almond orchard in southern Italy. **Italian Journal of Agronomy**, v. 8, n. 3, p. 149–157, 2013.

CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C. A.; CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. .M.; BUZETTI, S Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 997-1003, 1999.

COSTA, C.D.O Faculdade de Ciências Agronômicas Campus de Botucatu Perdas de solo e deposição de sedimentos em duas sub-bacias hidrográficas no entorno da Hidrelétrica de Ilha Solteira-Sp, 2013.

DEXTER, A. R.; CZYŻ, E. A.; GAJE, O. P. A method for prediction of soil penetration resistance. **Soil and Tillage Research**, v. 93, n. 2, p. 412–419, 2007.



DÖRNER, J., HORN, R. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the weichselian moraine region in N Germany. **J. Plant Nutr. Soil Sci.** 169, p.213-220, 2006.

DÖRNER, J.; HORN, R. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 225–232, 2009.

DORNER, J.; SANDOVAL, P.; DEC, D. The role of soil structure on the pore functionality of an Ultisol. **Journal of Soil Science Plant Nutrition**, v. 10, n. 4, p. 495–508, 2010.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises dos solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ, 212 p., 1997.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório 2015. Ano base 2014. Brasília, 2015.

GELAIN, N.S. Monitoramento da água do solo em plantio de Eucalyptus spp. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; LACLAU, J. P.; 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**, v. 70, n. 2, p. 105–118, 2008.

GONÇALVES, J. L. D. M.; ALVARES, C. A.; GONÇALVES, T. D. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de Eucalyptus grandis , com uso de sistema de informação geográfica Soil and productivity mapping of Eucalyptus grandis plantations , using a geographic information system. **Sci. For.**, v. 40, n. 94, p. 187–201, 2012.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; GELAIN, N.S.V.; MINELLA, J.P.G. Permeâmetro de carga decrescente associado à programa computacional para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. **R. Bras. Ci. Solo**, v.34, p. 993-997, 2010.

HORN, D.; ERNANI, P.R.; SANGOI, L.; SCHWEITZER, C. & CASSOL, P.C. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **R. Bras. Ci. Solo**, 30:77-85, 2006.

HORN, R.; FLEIGE, H. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. **Soil and Tillage Research** v.102, p. 201-208, 2009.

HUANG, M.; RODGER, H.; BARBOUR, S. L. An evaluation of air permeability measurements to characterize the saturated hydraulic conductivity of soil reclamation covers. , p. 15–27, 2015.

IVERSEN, B.V.; MOLDRUP, P.; SCHJONNING, P.; LOLL, P. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. **Soil Sci.**, 166:643-659, 2001.

IVERSEN, B. V., MOLDRUP, P. AND LOLL, P. Runoff modeling at two field slopes: Use of in situ measurements of air permeability to characterize spatial variability of saturated hydraulic conductivity. **Hydrol. Proc.** 18, p.1009-1026, 2004.

KIEHL, E.J. Manual de edafologia. São Paulo: **Agronômica Ceres**, 1979.

KIM, H.; ANDERSON, S. H.; MOTAVALLI, P. P.; GANTZER, C. J. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. **Geoderma**, v. 160, n. 2, p. 244–251, 2010.

KLEIN, V. A.; MADALOSSO, T.; REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; VEIGA, M.; ALBUQUERQUE, J.A.; PAULETTO, E.A. Metodologias de controle de qualidade de análises granulométricas do solo. **Ciência Rural** (UFSC. Impresso), v. 43, p. 850-853, 2013.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: Methods of soil analysis: **Physical and mineralogical methods** (Ed A Klute) 2.ed. Part. 1 p 635-662, 1986.

KOZLOWSKI, T. Soil aeration, flooding and tree growth. **Journal of Arboriculture**. V.11, p.85-96, 1985.

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.

LACLAU, J-P.; DA SILVA, E.A.; RODRIGUES LAMBAIS, G.; BERNOUX, M.; LE MAIRE, G.; STAPE, J.L.; BOUILLET, J-P.; GONÇALVES, J.L.M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in Eucalyptus grandis plantations. **Frontiers in Plant Science** v.4, 243p. 2013.

LE MOS, C.C.Z. Aprimoramentos, teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de Eucalyptus no nordeste do estado de São Paulo. (Tese) Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2012.

MACHADO, S. A.; OLIVEIRA, E. B. de; CARPANEZZI, A. A.; BARTOSZECK, A. C. P. S. Classificação de sítio para bracatingais na Região Metropolitana de Curitiba. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo. N. 35. p. 21-37. 1997.

MACHADO, R. R.; CONCEIÇÃO, S. V.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. DE; WOLFF, E. Evaluation of forest growth and carbon stock in forestry projects by system dynamics. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 520–530, 2015.

McQUEEN, D.J. & SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil Till. Res.**, 25:217-230, 2002.

MARTINEZ, E.; FUENTES, J. P.; SILVA, P.; VALLE, S.; ACEVEDO, E. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. **Soil and Tillage Research**, v. 99, n. 2, p. 232–244, 2008.

MENTGES, M.I.; REICHERT, J.M.; RODRIGUES, M.F.; AWE, G.O.; MENTGES, L. R. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. **Geoderma** (Amsterdam), v. 263, p. 47-59, 2016.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

MILANEZ, D. H., Roniberto Morato do Amaral, Leandro Innocentini Lopes de Faria, José Angelo Rodrigues Gregolin. Assessing nanocellulose developments using science and technology indicators. **Materials research**, v. 16, n. 3, p. 635–341, 2013.

MORALES, C.A.; Preparos e atributos físicos de solos para plantio de eucalipto. UFSM, 2014.

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 50(3):885-900, 2007.

MOSADDEGUI, M.R.; KOOLEN, A.J.; AJABBASI, M.A.; HEMMAT, A.; KELLER, T. Suitability of pre-compression stress as the critical real stress on unsaturated agricultural soils. *Biosys. Eng.* 98, p.90-101, 2007.

OSMAN, K.T. Physical Properties of Forest Soils, **Forest Soils: Properties and Management**, 217p. 2013.

PREVEDELLO, J.; KAISER, D. R.; REINERT, D.J.; VOGELMANN, E. S.; FONTANELA, E.; REICHERT, J. M. Manejo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em argissolo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 129-138, 2013a.

PREVEDELLO, J.; VOGELMANN, E. S.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J. A funcionalidade do sistema poroso do solo em floresta de eucalipto sob Argissolo. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 41, n. 100, p. 557–566, 2013b.

PREVEDELLO, J.; VOGELMANN, E.S.; KAISER, D.R.; FONTANELA, E.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Agregação e matéria orgânica de um argissolo sob diferentes preparos do solo para plantio de Eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira** (Impresso), v. 34, p. 149-158, 2014.

PUMPHREY, F.V.; KLEPPER, B.L.; RICKMAN, R.W.; HANE, D.C. Sandy soil and soil compaction. Oregon State University Agricultural Experiment Station Circular of Information n. 687. Oregon State University, Corvallis, OR., 1980.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. ; BRAIDA, J.A. . Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria-RS, v. 27, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J.M., ALBUQUERQUE, J.A., KAISER, D.R., REINERT, D.J., URACH, F.L., CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Cienc. Solo** 33, 1547–1560, 2009a.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. ; REINERT, D.J. ; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v. 102, p. 242-254, 2009b.

REICHERT, J.M.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J.; RODRIGUES, M.F.; SUZUKI, L.E.A.S. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandyization/desertification processes. **Agriculture, Ecosystems & Environment** (Print) **JCR**, v. 233, p. 370-380, 2016.

REINERT, D.J. ; REICHERT, J.M. . Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1931-1935, 2006.

RESSURECCION, A.C.; KAWAMOTO, K.; KOMATSU, T.; MOLDRUP, P.; OZAKI, N.; ROLSTON, D.E. Gas transport parameters along field transects of a volcanic soils. **Soil Sci.**, 172:3-16, 2007.

REYNOLDS, W.D.; YANG, X.M.; DRURY, C.F.; ZHANG, T.Q.; TAN, C.S. Effects of selected conditioners and tillage on the physical quality of a clay loam soil. **Can. J. Soil Sci.** 83 p., 2003.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; TAN, C.S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma** 146, p.466-74, 2008.

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATTOS, J. L. M. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 701-709, 2005.

ROCHA, J.H.T. Reflexos do manejo de resíduos florestais na produtividade, nutrição e fertilidade do solo em plantações de *Eucalyptus grandis*. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “ Luiz de Queiroz ”, Piracicaba, 2014.

RODRIGUES, V. A.; FENNER, P. T.; SANSIGOLO, C. A.; MORAES, M. H. Estimativa da água no solo em floresta de *Eucalyptus grandis*. **Irriga, Botucatu**, v. 17, n. , p. 523 - 533, 2012.

ROVEDDER, A. P. M. ; SUZUKI, L. E. A. ; DALMOLIN, R.S.D. ; Reichert, J. M. ; SCHENATO, R. B. . Compreensão e aplicabilidade do conceito de solo florestal. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 517-528, 2013.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Influência da intensidade do desbaste sobre o crescimento em altura de *Pinus elliottii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 20-28, jan./jun. 1993

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N. Biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. de pequenas propriedades rurais de Vera Cruz, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 17-22, jan./mar. 2011.

SILVA, V. R. Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Biodinâmica do solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SCOLFORO, J. R. S., Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas. Lavras: UFLA/FAEPE, 441 p. 1998.

STARTSEV, A D.; MCNABB, D. H. Effects of compaction on aeration and morphology of boreal forest soils in Alberta, Canada. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 89, n. 1, p. 45–56, 2009.

STONE, L.F. Eficiência do Uso da Água na Cultura do Arroz Irrigado. **Documentos Embrapa** 176P. 2005.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade Dos Solos E Sustentabilidade De Sistemas Agrícolas. **Ciência & Ambiente**, p. 20, 2003.

SUZUKI, L.E.A.S. qualidade físico-hídrica de um argissolo sob floresta e pastagem no sul do Brasil. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 131p., 2008.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 1159-1167, 2007.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 963-973, 2008.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A., REINERT, D.J.; KAISER, D.R. Dispersion and flocculation of Vertisols, Alfisols and Oxisols in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, p. 64-70, 2015.

SAS. Statistical Analyses Software. **SAS Institute**, Software version 9.3, Cary, NC, 2009.

SILVA, A.P. et al. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1535-1545. 2009.

SILVA, D.A.; SOUZA, L.C.F.; VITORINO, A.C.T.; GONÇALVES, M.C. Aporte de fitomassa pelas sucessões de culturas e sua influência em atributos físicos do solo no sistema plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 1, p.147-156, 2011.

SILVA, P. H. M. DA; POGGIANI, F.; LIBARDI, P. L.; GONÇALVES, A. N. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 67–78, Elsevier B.V., 2013.

STEPNIEWSKI, W.; GLIŃSKI, J.; BALL, B. C. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, p. 45-69, 1994.

SWEENEY, D.W.; KIRKHAM, M.B. & SISSON, J.B. Crop and soil response to wheel-track compaction of a claypan soil. **Agron. J.**, 98:637-643, 2006.

TONINI, H.; SCHNEIDER, PR.; FINGER C.A.G. Curvas de índice de sítio para povoamentos clonais de *Eucalyptus saligna* Smith para a depressão central e serra do sudeste, Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v.16(1) p. 27-43, 2006.

VAZ, C. M. P.; MANIERI, J. M.; MARIA, I. C. DE; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 92–101, 2011.

VOGELMANN, E.S.; MENTGES, M.I.; REICHERT, J.M.; ROSA, D.P.; BARROS, C.A.P.; REINERT, D.J. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo trafegado e escarificado. **Ciência Rural** (UFSC. Impresso) **JCR**, v. 42, p. 291-297, 2012.

WELLS, T.; FITYUS, S.; SMITH, D.W.; MOE, H. The indirect estimation of saturated hydraulic conductivity of soils, using measurements of gas permeability. I. Laboratory testing with dry granular soils. **Aust. J. Soil Res.**, 44:719725, 2006.

ZEWDIE, M.; OLSSON, M.; VERWIJST, T. Above-ground biomass production and allometric relations of *Eucalyptus globulus* Labill. coppice plantations along a chronosequence in the central highlands of Ethiopia. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 421–428, 2009.

ZHAO, Y.; PETH, S.; HORN, R.; et al. Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland. **Soil and Tillage Research**, v. 109, n. 2, p. 75–86, 2010.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, 38, p.947- 958, 2000.

## 4 CAPÍTULO 2 - PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO 3-PG PARA *Eucalyptus saligna* SMITH CULTIVADOS EM NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS ÓRTICOS TÍPICOS E EM ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS DISTRÓFICOS

### Resumo

A produtividade das florestas de eucalipto no Brasil tem evoluído graças ao desenvolvimento de novas tecnologias e à aplicação de novas ferramentas de análise. O modelo Physiological Principles to Predicted Growth (3-PG) tem sido utilizado na estimativa do potencial produtivo dos sítios, para uma grande diversidade edáfica, de espécies e de condições climáticas. Este estudo teve como objetivo parametrizar o modelo 3-PG para duas situações edáficas distintas quanto à estrutura e à água disponível (AD) dos solos. O estudo foi conduzido em áreas constituídas por Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico considerados com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e por Neossolo Quartzarênico Órtico típico considerado com capacidade de potencial produtivo baixa (NEO), localizados nas regiões fisiográficas da Encosta do Sudeste e Serra do Sudeste do Rio Grande do Sul. Em povoamentos de 36, 58 e 89 meses de idade, as variáveis diâmetro à 1,3 m de altura (dap), altura total (h) e volume (v), necessárias à parametrização do modelo 3-PG, foram obtidas de inventários florestais realizados em intervalos bimestrais. Nas mesmas áreas, propriedades físico-hídricas dos solos foram obtidas por meio da coleta e análise de amostras de solos com estrutura preservada e não preservada. As propriedades físico-hídricas dos solos avaliadas foram a densidade do solo ( $D_s$ ), permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ), condutividade do solo saturado ( $K_{sat}$ ) e a capacidade de armazenamento de água (CAD). A produtividade volumétrica de madeira sem casca e de biomassa do fuste foi distinta nas áreas ARG e NEO foi de  $373,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  ( $177,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e  $272,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  ( $130,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), aos 89 meses de idade. O modelo parametrizado apresentou boa precisão estatística, com  $r^2$  superior a 0,9 para o volume de madeira com casca ( $V$ ;  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ), biomassa de lenho (BL;  $\text{Mg ha}^{-3}$ ) e altura total (h; m), e igual a 0,78 para o diâmetro a 1,30 m de altura (dap; cm). A eficiência estatística do 3-PG na estimativa das variáveis dap, h e volume, descrita pelo indicador Nash-Sutcliffe (NSC) foi superior a 0,8, enquanto o indicador BIAS Percentual (PBIAS) mostrou tendência de subestimativa máxima de 12% para o dap. Na validação do modelo, realizado em parcelas não utilizadas na parametrização, os resultados foram semelhantes aos obtidos na avaliação da eficiência, com exceção para a variável diâmetro à 1,3 m de altura (dap), que foi subestimada nas idades abaixo dos 50 meses. O erro percentual observado na validação, descrito pela raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM), foi inferior a 5% para o dap e a h, e inferior a 17% para o V e a BL. O modelo 3-PG mostrou-se eficiente e preciso para a estimativa da produtividade do *E. saligna* nas condições climáticas observadas, com maior sensibilidade para os solos de menor capacidade de armazenamento de água.

Palavras-chave: capacidade de campo, biomassa de madeira, produtividade.





## Abstract

The productivity of eucalyptus forests in Brazil has evolved due to the development of new technologies and the application of new analysis tools. The 3-PG model has been used to estimate productive potential of sites, for a great edaphic, species and climatic diversity. The aim of this study was to parameterize the 3-PG model for two different soil conditions in soil structure and available soil water (ASW). The study was conducted in areas located in two physiographic regions of Rio Grande do Sul state named Southeast Coast and Southeast Sierra. The areas are constituted of Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico and Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico, with textural classes sandy loam to clay and with high productive potential capacity (ARG), and (ii) with Neossolo Quartzarênico Órtico típico, with textural class sand and with low productive potential capacity (NEO). At eucalyptus stands of 36, 58 and 89 months old the variables diameter at 1.3 m height (cbh), total height (h) and volume (v) were obtained by bimonthly forest inventories to 3-PG model parameterization. The soil variables were obtained by collected soil samples of preserved and non-preserved structure. The volumetric productivity of bark and biomass of the stem was distinct in the areas ARG and NEO, characterized by average values of  $373.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  ( $177.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) and  $272.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  ( $130.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), determined for 89-months-old stands. The parameterized model presented good statistical accuracy, with  $r^2$  higher than 0.9 for the volume with bark (V;  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ), wood biomass (BL;  $\text{Mg ha}^{-3}$ ) and total height (h; m), and equal to 0.78 for the diameter at 1.3 m height (dbh; cm). The statistical efficiency of 3-PG to estimate dbh, h and volume variables, described by the Nash-Sutcliffe indicator (NSC) had values greater than 0.8, while the PBIAS indicator showed a tendency of maximum underestimation of 12% for dbh. In the validation process of the model, performed by employing unused sampling units (SU) in the parameterization process, the results were similar to those obtained in the efficiency evaluation, except for the variable dbh, which was underestimated at the ages lowest 50 months. The percentage error observed in the validation, described by square root mean square error (RQEM), was less than 5% for dap and h, and less than 17% for V and BL. The 3-PG model was efficient and accurate for estimating the productivity of *E. saligna* in the observed climatic conditions, with a higher sensitivity for the soils of lower available soil water (ASW).

Keywords: field capacity, wood biomass, high productivity.

## 4.1 Introdução

A produtividade dos povoamentos comerciais de eucalipto no Brasil aumentou significativamente na última década, e nos últimos anos teve uma taxa média de aproximadamente  $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (ABRAF, 2013; IBÁ, 2015). Devido à grande demanda por matéria prima, principalmente, direcionada ao mercado interno e externo de celulose e papel, muitas empresas têm direcionado recursos para o desenvolvimento de pesquisas que possibilitem a obtenção da máxima capacidade produtiva do gênero *Eucalyptus* ssp. Em situações pontuais, com condições experimentais de irrigação e fertilização, a capacidade biológica máxima teve incremento corrente anual volumétrico de  $83 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , nas condições edafoclimáticas nacionais (STAPE et al., 2010).

A maximização da produtividade média tem sido buscada por meio do melhoramento genético, da seleção de clones, do manejo dos solos, do aprimoramento de técnicas de implantação e inovação de tratamentos nutricionais. Essas técnicas vêm sendo incorporadas à rotina de desenvolvimento tecnológico das grandes empresas florestais para abranger a complexidade do sistema, composto pelas propriedades edáficas, climáticas e fisiológicas das culturas (STAPE et al., 2010; LACLAU et al., 2013; GONÇALVES et al., 2013).

A produção e a determinação da capacidade produtiva dos sítios tem sido estimada por meio de modelos empíricos, com base em variáveis de fácil obtenção, mas com baixo poder de extrapolação, principalmente relacionado às alterações climáticas (WEISKITTEL et al., 2009; WANG et al., 2011), e ainda, modelos mistos ou mecanísticos, que se baseiam em todo o sistema e são capazes de simular cenários realísticos e o efeito de tratamentos, assim como, de estimar a produtividade ao longo do tempo (PRETZSCH et al., 2008). Os modelos x nome por extenso x (Forest 5; ROBINSON; EK, 2003), x nome por extenso x (TRIPLEX; PENG et al., 2002) e Physiological Principles in Predicting Growth (3-PG; LANDSBERG; WARING, 1997) têm grande aplicabilidade e funcionalidade, pois podem ser utilizados para análise no sistema de manejo, predições das produtividades atingida e potencial e na estimativa de variáveis de interesse para o gerenciamento florestal como o volume, a produção de biomassa, o diâmetro à 1,30 m de altura e a altura (LANDSBERG, 2003b; ALMEIDA et al., 2004; ZHAO et al., 2013).

O modelo 3-PG (LANDSBERG; WARING, 1997) é uma opção eficiente, considerada fácil de ser trabalhada se comparada aos modelos fisiológicos, e disponibilizada gratuitamente em programação *Visual Basic Application* (VBA), no software Excel. É um modelo de crescimento de base fisiológica capaz de ser utilizado a partir de qualquer idade do povoamento e para o número de anos desejado, com base em dados climáticos, edáficos e dos povoamentos (SANDS, 2004; ALMEIDA et al., 2004; LANDSBERG; SNADS, 2010). O modelo apresenta pontos sensíveis relacionadas à determinação da taxa de mortalidade, à utilização da variável fertilidade do solo, definida por valores entre 0 e 1, e à determinação da profundidade efetiva do sistema radicular, apesar de alguns autores já terem sugestões capazes de minimizar tais problemas (SANDS, 2004; FONTES et al., 2006; CHRISTINA et al., 2011).

O 3-PG deve ser parametrizado para a condição climática e material genético de interesse, podendo ser calibrado para determinada região a partir de parâmetros gerados em outra situação. A ferramenta já comprovou ser bastante eficaz na estimativa da produtividade e na obtenção de uma série de variáveis de interesse, com resultados significativamente precisos, tanto para o gênero *Eucalyptus* spp. (LEMOS, 2012; KLIPPEL, 2015) como para outras espécies e condições climáticas mundiais (LANDSBERG et al., 2003; NOLÉ et al., 2009; GONZALEZ-BENECKE et al., 2014).

No Brasil o modelo tem ampla utilização e foi parametrizado para diferentes sítios e espécies (SOUZA, 2006; BORGES, 2012; RASCON, 2012; LONDERO et al., 2015), principalmente em pesquisas direcionadas ao aprimoramento da ferramenta. Devido a sua estrutura, no modelo ainda é possível a inclusão de informações e parâmetros, especialmente relacionados às propriedades físicas dos solos, que proporcionem melhores estimativas e melhor correlação entre o sítio e a produtividade.

Por ser utilizado para uma grande diversidade de sítios dentro de uma mesma condição climática, o 3-PG tem grande praticidade na estimativa da produção em grandes áreas, a partir de uma única parametrização e com alterações de parâmetros pontuais de entrada, relacionados principalmente à textura e à capacidade de armazenamento de água (CAD).

O objetivo deste estudo foi estimar a produtividade de duas áreas cultivadas com *E. saligna*, distintas quanto às suas propriedades físico-hídricas e parametrizar o

modelo e validar a sua eficiência dentro dessa variabilidade edáfica, nas condições climáticas locais.

## 4.2 Material e métodos

### 4.2.1 Área de estudo

O presente estudo foi conduzido em povoamentos comerciais de *Eucalyptus saligna* Smith pertencentes à empresa Celulose Riograndense do Brasil (CMPC), localizados nos municípios de Barra do Ribeiro-RS e Eldorado do Sul-RS, entre as coordenadas geográficas 30° 06" e 30° 25" de Latitude Sul e 51° 05" e 51° 40" de Longitude Oeste (Ver Figura 1, Cap. 1).

O clima da região é do tipo "Cfa" subtropical úmido sem estiagem, de acordo com a classificação climática de Köppen (Álvares et al., 2013). A precipitação pluvial anual média varia entre 111 e 1355 mm (Moreno, 1961), com temperatura média anual de 18 °C e os meses mais quente e menos quente com temperaturas superiores a 22 °C e oscilando entre 3 e 18 °C, respectivamente.

A seleção dos povoamentos foi realizada de forma a representar florestas comerciais de *E. saligna* com rotação de 8 anos, em sítios com maior e menor produtividade. Assim, em 12 áreas florestais de *E. saligna* (clone 2864) foram selecionados 12 povoamentos com idades de 36, 58 e 89 meses, para representar a série cronológica de crescimento observada em uma rotação de 8 anos. Nessas 12 áreas com diferentes idades, os sítios mais e menos produtivos foram classificados com base nas propriedades físico-hídricas que caracterizam os solos, relacionadas à textura e à capacidade de armazenamento de água do solo (CAD).

Em cada uma das áreas foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e de plantas, a partir de inventários florestais, para a parametrização do modelo 3-PG.

### 4.2.2 Modelo 3-PG

O Physiological Principles in Predicting Growth (3-PG) é um modelo processual ecofisiológico, de fácil ajuste e parametrização, constituído por um conjunto de equações empíricas que integram variáveis climáticas, fisiológicas das culturas, o padrão dendrométrico dos povoamentos, os estoques de biomassa iniciais e as

propriedades de solos relacionadas ao armazenamento de água no solo e à condição nutricional. O modelo é amplamente utilizado para determinar o potencial produtivo dos sítios e estimar um amplo conjunto de variáveis que descrevem a dinâmica do crescimento e a produtividade, em um espaço de tempo definido pelo gestor florestal.

No processo de parametrização do modelo foram utilizadas como variáveis de entrada os dados relacionados à temperatura, precipitação, insolação, déficit de pressão de vapor (DPV), volume inicial de água no solo, textura do solo, capacidade de armazenamento de água do solo (CAD), condutância estomática máxima ( $g_s$ ), área foliar específica (AFE;  $m^2 kg^{-1}$ ), índice de área foliar (IAF;  $m^2 m^{-2}$ ), volume de madeira por hectare (V;  $m^3 ha^{-1}$ ) e estoques iniciais de biomassa de lenho (BL;  $Mg ha^{-1}$ ; casca + fuste + galhos), folhas (BF;  $Mg ha^{-1}$ ) e raízes (BR;  $Mg ha^{-1}$ ).

Com esse conjunto de dados, o 3-PG estima a eficiência quântica do dossel ( $\alpha_c$ ;  $mol C mol fóton^{-1}$ ), que representa o total de biomassa produzido por hectare (PPB;  $Mg ha^{-1}$ ) por fóton de luz solar absorvida (RFAA;  $mol m^{-2}$ ). Para a obtenção da eficiência quântica do dossel ( $\alpha_c$ ), o modelo inicia o processo de predição com um valor de eficiência máximo ( $\alpha_{cx}$ ), que é alterado por moduladores do crescimento que representam fatores ambientais e fisiológicos relacionados ao crescimento, definidos por valores de 0 (limitante) a 1 (sem limitação).

No modelo 3-PG, as variáveis de saída que representam o padrão de crescimento dos povoamentos são resultados de equações alométricas, que consistem em uma relação empírica entre a variável de interesse e as variáveis de fácil mensuração, como a altura e o diâmetro a 1,30 m de altura (dap). Assim, a estimativa da produtividade pelo modelo foi obtida a partir do ajuste das equações alométricas (Equação 4) em função do diâmetro médio quadrático (LANDSBERG; WARING, 1997; SANDS; LANDSBERG, 2002), processo no qual foram obtidas as constantes  $a_{BL}$ ,  $a_V$ ,  $a_H$ , e as potências  $n_{BL}$ ,  $n_V$ ,  $n_H$ , utilizadas na parametrização do modelo.

$$y = a * dap^n \quad (4)$$

Sendo: dap = diâmetro à 1,3 m de altura; a = constantes alométricas  $a_{BL}$ ,  $a_V$ ,  $a_H$ ; n = potências alométricas  $n_{BL}$ ,  $n_V$ ,  $n_H$ .

#### 4.2.3 Delineamento experimental e amostragem

O delineamento experimental deste estudo foi inteiramente casualizado, em um experimento fatorial composto por duas condições de potencial produtivo (capacidade de potencial produtivo alta – ARG; capacidade de potencial produtivo baixa - NEO), distintos quanto às propriedades edáficas relacionadas à classe, à textura e à estrutura dos solos.

Em cada condição de potencial produtivo foram instaladas 48 unidades amostrais circulares (UA) de 400 m<sup>2</sup>, sendo 8 por área, o que acarretou num total de 96 unidades amostrais circulares para o estudo.

Nas respectivas UAs foram obtidas as variáveis dendrométricas que descrevem o crescimento e a produtividade dos povoamentos, os índices de vegetação necessário para a caracterização da dinâmica foliar e obtenção do índice de área foliar (IAF), e ainda, amostras de solos para a determinação da textura, da curva de retenção de água (CRA) e da capacidade de armazenamento de água dos solos (CAD).

#### 4.2.4 Dendrometria e produtividade dos povoamentos

Para a avaliação do crescimento florestal, inventários florestais foram realizados bimestralmente com a medição da circunferência à 1,30 m de altura (cap; cm) de todas as árvores dentro de cada UA, da altura das dez (10) primeiras árvores de cada parcela (altura total; h), e da altura das 9 árvores de maior CAP em cada UA (altura dominante; h<sub>dom</sub>).

A altura das demais árvores foi estimada por meio de equações exponenciais ajustadas em função do dap e das idades dos povoamentos (Equações 5 e 6), tendo sido utilizada uma equação para cada condição de potencial produtivo (ARG e NEO), dada às diferenças na inclinação das curvas, avaliada por meio da análise de covariância.

$$h_{ARG} = 2,781015 * dap^{0,482654} * Idade^{0,439923} \quad (5)$$

$$h_{NEO} = 1,681356 * dap^{0,641948} * Idade^{0,422327} \quad (6)$$

O volume de madeira individual foi obtido por meio da cubagem, pelo método de Smalian, de 48 árvores de diâmetro médio quadrático (dg; cm). Foi amostrada uma árvore “dg” para cada duas UAs, sendo 24 árvores nas áreas ARG e 24 nas áreas NEO. A estimativa do volume por hectare para cada UAs, talhão e condição de potencial produtivo (ARG, NEO) foi obtida a partir de duas equações (Equações 4 e 5) ajustadas em função do dap, da h e das idades dos povoamentos ( $r^2 \geq 0,98$  e  $CV \leq 12\%$ ).

$$V_{ARG} = -0,21008 + 0,0008488 * dap^2 + 0,00866 * h + 1,2063/Idade \quad (4)$$

$$V_{NEO} = -0,04203 + 0,0005324 * dap^2 + 0,00637 * h - 1,78928/Idade \quad (5)$$

Na mesma ocasião em que foram realizadas as cubagens, foi determinada a biomassa seca individual e das partições lenho (BL) e folhas (BF), pelo método de pesagem do material úmido a campo e posterior determinação do teor de água do material, realizado em laboratório em amostras representativas de cada partição. Para a determinação da densidade básica da madeira (Db;  $Mg\ m^{-3}$ ), amostras do fuste principal (cunhas) foram coletadas nas posições do dap, 10, 50 e 75% da altura total das plantas, e analisadas em laboratório pelo método da balança hidrostática.

A estimativa da produção de biomassa por hectare, caracterizada pela biomassa de lenho (BL; Equação 7), biomassa de casca e galhos (BCG; Equação 8) e biomassa de folhas (BF; Equação 9), nas respectivas áreas e condição de potencial produtivo, foi realizada por meio equações exponenciais e logarítmicas ajustadas em função do dap, da h, da densidade (Nh) e da idade dos povoamentos (I). Dentre as 3 equações utilizadas, o modelo ajustado para a BF teve menor precisão estatística ( $r^2 = 0,50$ ) devido à grande variação dos dados.

$$BL = 0,025755 * dap^{2,04982} * h^{0,78143} * (N/10^3)^{0,49638} \quad (7)$$

$$BCG = 0,022356 * (dap^2 * h)^{0,971704} * I^{-0,458670} \quad (8)$$

$$BF = -20,75781 + 11,3104 * \log(dap) * h - 0,40542 * I \quad (9)$$

A biomassa do sistema radicular foi estimada com base em modelos ajustados para *E. grandis*, no estado de São Paulo, Brasil (MELLO; GONÇALVES et al., 2008). Considerando que os autores ajustaram equações distintas para a biomassa de raízes finas (BR<sub>F</sub>) e para a biomassa de raízes grossas (BR<sub>G</sub>), e para dois sítios distintos

quanto à classe de solo, definidos como Argissolos Vermelho-Amarelo Distróficos (Equação 10 e 11) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (Equação 12 e 13), neste estudo, as equações 9 e 10 foram utilizadas para estimar a biomassa de raízes das áreas ARG, enquanto nas áreas NEO foram utilizadas as equações 12 e 13.

$$\text{LnBR}_F = -12,2075 + (\ln(\text{dap}^2 * h) * 1,37722) \quad (10)$$

$$\text{LnBR}_G = -4,61798 + (\ln(\text{dap}^2 * h) * 0,850577) \quad (11)$$

$$\text{LnBR}_F = -1,92205 + (\ln(\text{dap}^2 * h) * 0,401959) \quad (12)$$

$$\text{LnBR}_G = -5,76663 + (\ln(\text{dap}^2 * h) * 1,00325) \quad (13)$$

A biomassa de serapilheira foi quantificada pela amostragem realizada por dois coletores instalados em cada UA, um posicionado na linha e outro na entrelinha de plantio. Os coletores de serapilheira foram construídos em madeira e tela de sombreamento com dimensões de 0,5 x 0,5 m (0,25 m<sup>2</sup>). Para quantificar o material depositado bimestralmente, o folheto depositado em cada coletor foi pesado a campo, e uma amostra foi retirada e encaminhada para laboratório para a determinação da umidade.

A biomassa final de serapilheira (Mg ha<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>) foi estimada considerando-se a área superficial de cada coletor, o número de dias entre a instalação e a coleta e a taxa de decomposição da serapilheira de 0,0072 dia<sup>-1</sup> (Stape et al., 2008).

#### 4.2.5 Propriedades espécie-específicas

##### 4.2.5.1 Índice de área foliar (IAF) e área foliar específica (AFE)

O índice de área foliar (IAF) foi calculado por meio da análise de imagens orbitais digitais do satélite Landsat 8, (Operational Land Imagem – OLI), órbita/ponto 218/72, com resolução espacial de 30 m, disponibilizadas gratuitamente pelo Serviço de Levantamento Geológico Americano (USGS Earth Explorer). Para a obtenção dos índices foram utilizadas cenas referentes aos meses de fevereiro, junho e novembro de 2015, das quais se utilizou as bandas 4 (vermelho; 0,64-0,67μ), 5 (infravermelho próximo; 0,85-0,88 μ) e o arquivo de dados (MTL; .txt) que acompanha as cenas.

A partir da conversão dos dados digitais em radiância espectral de cada banda, o processamento das imagens foi realizado com a conversão da radiância no topo da



atmosfera para reflectância da superfície no topo da atmosfera, com base na Equação 14 e nos dados obtidos no arquivo de dados MTL.

$$\rho_{\lambda} = (0,00002 * B - 0,1) / \text{sen}(AES) \quad (14)$$

Sendo:  $\rho_{\lambda}$  = reflectância planetária corrigida; B = bandas (4 e 5); AES = ângulo de elevação solar.

Os valores de reflectância planetária corrigida ( $\rho_{\lambda}$ ) das bandas 4 e 5 foram utilizados no cálculo dos Índices de Vegetação Ajustado para o Solo (*Soil-adjusted Vegetation Index – SAVI*), que surgiu em substituição ao índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), como opção para minimizar o efeito do solo no seu valor final (Equação 15; HUETE et al., 1988).

$$SAVI = (1 + L) * (B4 - B5) / (L + B5 - B4) \quad (15)$$

Sendo: L = fator de ajuste para o solo (0,5); B4, B5 = refletâncias das bandas B4 e B5.

Com os índices SAVI, foi, então, determinado o IAF para cada unidade amostral inventariada, localizadas nas imagens por suas coordenadas centrais (Equação 16).

$$IAF = \log((0,69 - SAVI) / 0,59) / 0,91 \quad (16)$$

Sendo: log = logaritmo na base 10.

A área foliar específica (AFE;  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ) foi obtida por meio da relação entre o IAF ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ), a biomassa total de folhas por unidade amostral ( $\sum wF_{UA}$ ; kg) e a área de cada unidade amostral ( $A_{UA}$ ;  $\text{m}^2$ ) (Equação 17).

$$AFE = (A_{UA} * IAF) / (\sum BF_{UA}) \quad (17)$$

Sendo: AFE = área foliar específica ( $\text{kg m}^{-2}$ );  $A_{UA}$  = área da unidade amostral ( $\text{m}^2$ ); BF = biomassa foliar ( $\text{kg m}^{-2}$ ); IAF = índice de área foliar ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ );  $\sum BF_{UA}$  = somatório da biomassa foliar por unidade amostral.

#### 4.2.5.2 Modulador da produtividade em função da idade ( $f_{age}$ )

O efeito da idade sobre a produtividade dos povoamentos foi representado por meio dos parâmetros  $r_{age}$ ,  $n_{age}$  e  $t_{MAX}$  (Equação 18), que representam a idade relativa ( $r_{age}$ ) onde se observa 50% da produtividade total, a idade máxima definida para a rotação ( $t_{Max}$ ) e uma potência ajustável ( $n_{age}$ ).

$$f(t)_{age} = 1 / \left( 1 + \frac{t}{r_{age}} * t_{Max} \right)^{n_{age}} \quad (18)$$

#### 4.2.5.3 Condutância estomática

A condutância estomática foi obtida a partir da literatura, com base nos resultados do estudo realizado por Klippel (2015), no mesmo período (2013 a 2015), com o mesmo material genético e nas mesmas áreas onde se localizam as áreas ARG deste estudo.

#### 4.2.5.4 Profundidade efetiva do sistema radicular (PSR)

A profundidade efetiva do sistema radicular (PSR) foi definida com base na literatura, mas de forma distinta para cada uma das condições de potencial produtivo, devido à grande diferença entre os solos.

Para os solos ARG, a PSR foi de 2,5 m de profundidade, conforme sugerido como medida padrão no processo de parametrização do 3-PG (SANDS; LANDSBERG, 2004).

Para as áreas NEO, onde as árvores tendem a desenvolver e alongar seu sistema radicular devido à menor disponibilidade nutricional e hídrica dos solos (LEITE, 2001; GATTO et al., 2003), a PSR utilizada foi de 4,0 m, definida como um valor médio com base nos resultados obtidos em outros trabalhos (CANADELL et al., 1996; LACLAU et al., 2001; CHRISTINA et al., 2011).

#### 4.2.5.5 Fração galhos e casca ( $fracBB0$ ; $fracBB1$ )

A variável  $fracBB1$ , que corresponde à relação entre a biomassa de galhos e casca e a biomassa de lenho, em povoamentos adultos, foi definida com base nos

valores a campo, enquanto a mesma relação para povoamentos jovens (fracBB0) foi estimado segundo metodologia sugerida por Sands e Landsberg (2002).

#### 4.2.6 Variáveis meteorológicas

##### 4.2.6.1 Temperatura, precipitação, umidade relativa e radiação solar

Os dados climáticos necessários à parametrização do modelo 3-PG foram obtidos de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponíveis na plataforma online do Banco de Dados Meteorológico para o Ensino e Pesquisa (BDMEP). O banco de dados composto pelas médias diárias das variáveis temperatura máxima, mínima e média ( $T_{max}$ ;  $T_{min}$ ;  $T$ ; °C), precipitação ( $P_p$ ; mm), umidade relativa média (UR; %) e insolação total diária ( $I_{ns}$ ; h) teve como base o período de 2008 a 2015.

A radiação total diária ( $Q_x$ ; MJ m<sup>-2</sup>; Equação 19) foi determinada com base na declinação solar diária (Equação 20), necessária para a obtenção do comprimento dos dias e do ângulo zenital solar, e na radiação solar extraterrestre para cada dia do ano (Equação 21). A partir dos valores de radiação total diária ( $Q_x$ ) se estimou a radiação fotossinteticamente ativa incidente ( $RFA_{inc}$ ; mol m<sup>-2</sup>), assumindo que 1 MJ de radiação solar representa 2,3 mols de  $RFA_{inc}$ .

$$Q_x = \frac{0,0864}{\pi} * I_s * \left[ \left( \frac{\pi}{24} hd \right) \text{sen} \delta_s * \text{sen} \lambda + \text{cos} \delta_s * \text{cos} \lambda * \text{sen} \left( \frac{\pi}{24} hd \right) \right] \quad (19)$$

$$\delta_s = \arccos(0,4 \text{ sen}((2\pi * (dn - 82/365))) \quad (20)$$

$$I_s = I_{SC} * (1 + 0,033 \text{ cos} (2\pi * dn/365)) \quad (21)$$

Sendo:  $Q_x$  = radiação total diária (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);  $\delta_s$  = declinação solar;  $I_s$  = irradiação solar extraterrestre;  $I_{SC}$  = constante solar (1367 ± 1,6 W m<sup>-2</sup>);  $\pi$  = número PI;  $\lambda$  = latitude local;  $d_n$  = dia do ano.

A umidade relativa do ar (UR; %) e a temperatura média do ar ( $T_m$ ; °C) foram utilizadas nas estimativas do déficit de pressão de vapor (DPV), que está diretamente relacionado ao processo de transpiração foliar e é definido como a diferença entre a pressão de vapor de saturação do ar ( $e_s$ ) e a pressão de vapor atual do ar ( $e_a$ ). Os valores diários de  $e_s$  (kPa) (Equação 22; DILLEY, 1968) e  $e_a$  (Equação 23) foram estimados e, posteriormente, o DPV diário foi estimado para o período entre 2008 e 2016 (Equação 24).

$$e_s = 0,61078 e^{(17,269*T)} \quad (22)$$

$$e_a = e_s * (UR/100) \quad (23)$$

$$DPV = e_s - e_a \quad (24)$$

Sendo:  $e_s$  = pressão de vapor de saturação do ar (kPa);  $T_m$  = temperatura média do ar (°C);  $e_a$  = pressão de vapor atual do ar (kPa);  $UR_m$  = umidade relativa média (%).

#### 4.2.6.2 Radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA)

A radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA), definida como uma fração da radiação que atinge a superfície terrestre (radiação solar global - RSG), foi determinada pela equação de Lambert-Beer (Equação 25), com os valores do IAF, do coeficiente de extinção da luz ( $k$ ; 0,5) e da radiação fotossinteticamente ativa incidente ( $RFA_{inc}$ ).

$$RFAA = RFA_{inc} * (1 - (e^{(-k*IAF)})) \quad (25)$$

Sendo: RFAA = radiação fotossinteticamente ativa absorvida ( $\text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $k$  = (0,5) coeficiente de extinção da luz; IAF = índice de área foliar ( $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ );  $RFA_{inc}$  = radiação fotossinteticamente ativa incidente ( $\text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ).

#### 4.2.6.3 Eficiência quântica do dossel ( $\alpha_c$ )

A eficiência quântica do dossel ( $\alpha_c$ ), que representa a relação entre a quantidade de carbono ( $\text{CO}_2$ ) fixado por unidade de energia radiante absorvida (fótons), foi definida com base em dados obtidos na literatura, que descrevem para eucalipto valores entre 0,5 e 0,8  $\text{molC molRFA}^{-1}$  (STAPE et al., 2008; STAPE et al., 2010; BAESSO, 2011). Na definição do valor inicial da  $\alpha_c$  antes da calibração, foram considerados, também, os resultados da pesquisa realizada com o mesmo material genético e na mesma condição climática e edáficas das áreas ARG (KLIPPEL, 2015), situação na qual foi obtida  $\alpha_c = 0,074 \text{ molC molRFA}^{-1}$ .

#### 4.2.7 Propriedades físico-hídricas do solo

Amostras de solo como estrutura preservada e não preservada foram coletadas em 24 pontos de amostragens. Em cada condição de capacidade de potencial produtivo ARG e NEO, foram alocados 12 pontos de amostragem, sendo 3 pontos

(repetições) por talhão, o que resultou em 12 pontos de amostragem nas classes de solo que correspondem aos solos NEO (Neossolo Quartzarênico Órtico típico) e 6 pontos de amostragem em cada uma das duas classes de solo do local ARG (Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico).

As amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas em 3 anéis volumétricos (5,7 cm de diâmetro por 4 cm de altura) por camada, nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80, 0,80-1,00 e 1,00-1,20 m, para a determinação da densidade do solo e da retenção de água na tensão de 10 kPa (capacidade de campo-CC).

Nas mesmas camadas, amostras de solo com estrutura não preservada foram coletadas para a determinação da distribuição granulométrica e a para a estimativa da retenção de água na tensão de 1500 kPa (ponto de murcha permanente-PMP), em psicrômetro (WP4 – Dewpoint PotentiaMeter).

#### 4.2.7.1 Capacidade de armazenamento de água do solo (CAD)

A capacidade de armazenamento de água CAD ( $\text{mm m}^{-1}$  de solo) foi estimada considerando a profundidade efetiva do sistema radicular (PSR) e a disponibilidade total de água no solo (DTA;  $\text{mm m}^{-1}$ ) (Equação 26).

A DTA (Equação 27) foi determinada com base na densidade do solo ( $D_s$ ;  $\text{Mg m}^{-3}$ ) e no conteúdo de água nas tensões de 10 kPa, que corresponde à capacidade de campo (CC), e de 1500 kPa, que corresponde ao ponto de murcha permanente (PMP).

$$DTA = \frac{CC - PMP}{10} * D_s \quad (26)$$

$$CAD = DTA * PSR \quad (27)$$

Sendo: CAD = capacidade de armazenamento de água no solo ( $\text{mm m}^{-2}$  de solo); DTA = disponibilidade total de água no solo ( $\text{mm m}^{-2}$  de solo); e PSR = profundidade efetiva do sistema radicular (cm); CC = capacidade de campo (% em peso); PMP = ponto de murcha permanente (% em peso);  $D_s$  = densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ).

A  $D_s$  e a CC foram determinadas nas amostras de solo com estrutura preservada, enquanto o PMP foi determinado por meio de amostras com estrutura não

preservada. As amostras com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade durante 48 horas e posteriormente pesadas para a determinação da umidade inicial ( $\theta_s$ ) submetidas à tensão de equilíbrio de água de 10 kPa, em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), para a determinação da capacidade de campo (CC). Ao final, as amostras foram mantidas em estufa a 105 °C até atingirem peso constante, para a determinação da densidade do solo ( $D_s$ ).

A umidade gravimétrica para a tensão de 1500 kPa foi analisada com psicrômetro (WP4 – Dewpoint Potential Meter), em amostras de solo com estrutura não preservada (KLEIN et al., 2013). A umidade gravimétrica determinada foi multiplicada pela  $D_s$  correspondente à camada amostrada para obtenção da umidade volumétrica. Por meio de equações de regressão, obtidas pela relação entre a umidade volumétrica e a tensão de água no solo, foi feita a estimativa da retenção de água na tensão de 1500 kPa, equivalente ao ponto de murcha permanente (PMP).

#### 4.2.7.2 Granulometria

As amostras de solo com estrutura não preservada foram secas ao ar, peneiradas em peneira com abertura de malha de 2 mm e posteriormente utilizadas para a determinação da distribuição granulométrica, conforme o método da pipeta (EMBRAPA, 1997), modificado por Suzuki et al., 2015. A determinação da distribuição do tamanho de partículas iniciou-se pelo processo de dispersão, realizado em agitador horizontal com 120 rotações por minuto, durante 4 horas, em embalagens de vidro de 100 mL contendo 20 g de solo, 10 mL de NaOH 6% (dispersante químico), 50 mL de água destilada e duas esferas de nylon com peso de 3,04 g, diâmetro de 1,71 cm e densidade de 1,11 Mg m<sup>-3</sup> (SUZUKI et al., 2015). Após as 4 horas de dispersão foi determinada a fração areia (0,05 – 2,00 mm) por peneiramento da solução, e posteriormente, após a decantação do silte, foram determinados os teores de argila (fração menor que 0,002 mm) e silte (0,002 – 0,05 mm).

#### 4.2.7.3 Modificador hídrico de crescimento ( $f\theta$ )

O modulador hídrico do solo ( $f\theta$ ) é definido com base na CAD e no volume de água disponível no solo no momento inicial ( $\theta$ ), e foi calculado para o modelo 3-PG (Equação 28) com a utilização das constantes  $c\theta = 0,7, 0,6, 0,5, 0,4$  e das potências

$n\theta = 9, 7, 5$  e  $3$ , para solos de textura arenosa, areno-argilosa, argilo-arenosa e argilosa, respectivamente (LANDSBERG; WARING, 1997).

$$f\theta = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - r\theta}{c\theta}\right)^{n\theta}} \quad (28)$$

Sendo:  $r\theta$  = razão entre  $\theta_s$  (t) e a CAD;  $c\theta$  = constantes do modelo;  $n\theta$  = potências do modelo.

#### 4.2.8 Parametrização do modelo 3-PG

A parametrização do modelo 3-PG foi realizada com o uso de dados medidos a campo (dap, h, V, BL, BF), de dados estimados por análise de regressão a partir de resultados experimentais (biomassa de raiz; BR), e ainda, de dados de pesquisas realizadas com espécie análoga ( $g_s$ ,  $f_{DPV}$ ,  $g_{sx}$ ), com base no entendimento da fisiologia do gênero *Eucalyptus* spp.

Os parâmetros foram classificados em três grupos conforme proposto por Sands (2004), onde o primeiro se referiu à eficiência quântica do dossel ( $g_s$ ), o segundo compreendeu os parâmetros relacionados à alocação de biomassa (tais como: partição folha tronco para os dap's de 2,0 e 20,0 cm, partição máxima e mínima de biomassa para as raízes) e o terceiro foi composto pelos modificadores do crescimento relacionados com a água disponível no solo ( $f\theta$ ), com o déficit de pressão de vapor da água ( $f_{DPV}$ ) e os demais anteriormente citados.

Os parâmetros foram estimados seguindo-se uma sequência aplicada para *E. globulus* e *E. grandis* (SANDS; LANDSBERG, 2002; ALMEIDA et al., 2004), na qual primeiramente se acessaram os valores obtidos de forma direta (inventários) e aqueles ajustados a partir dos dados observados. Os parâmetros faltantes ( $f_{DPV}$ ,  $g_{sx}$ ) foram definidos com base na literatura, sem ultrapassar os limites que caracterizam o padrão biológico observado para a espécie.

#### 4.2.9 Calibração do modelo

No processo de calibração, foram realizadas estimativas sequenciais com o modelo parametrizado, nas quais os parâmetros foram sendo alterados pontual e manualmente, com base na distribuição gráfica dos valores observados em função

dos estimados. Essas etapas de ajuste foram realizadas somente em parcelas sem limitações hídrica e nutricional, determinadas com base na CAD, na classe do solo e nos tratamentos nutricionais realizados pela empresa.

#### 4.2.10 Eficiência e validação do modelo

O procedimento de validação do modelo foi realizado após a sua calibração. Com o modelo calibrado, foram estimados valores de dap, h, volume de madeira e biomassa de lenho (casca, galho e madeira do fuste) para parcelas que não haviam sido incluídas no banco de dados, e posteriormente, a análise dos erros entre os valores observado e estimados em cada parcela.

A precisão estatística e a eficiência do modelo foram avaliadas pela análise gráfica e por meio da regressão linear simples ( $O = b_0 + b_1 E$ ), com base na afirmativa de que hipoteticamente, num modelo ideal, os valores observados se igualam aos estimados ( $O = E$ ), onde  $b_0 = 0$  e  $b_1 = 1$ , para uma significância de 5%.

As estimativas do modelo também foram avaliadas pelos testes de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE; Equação 29) e pelo Percentual BIAS (PBIAS; Equação 30), que descreve a tendência de sub ou superestimativas dos resultados.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(y_{Obs} - y_{Est})^2}{\sum(y_{Obs} - y_{Med})^2} \quad (29)$$

$$PBIAS = \frac{\sum(y_{Obs} - y_{Est}) * 100}{\sum(y_{Obs})} \quad (30)$$

### 4.3 Resultados

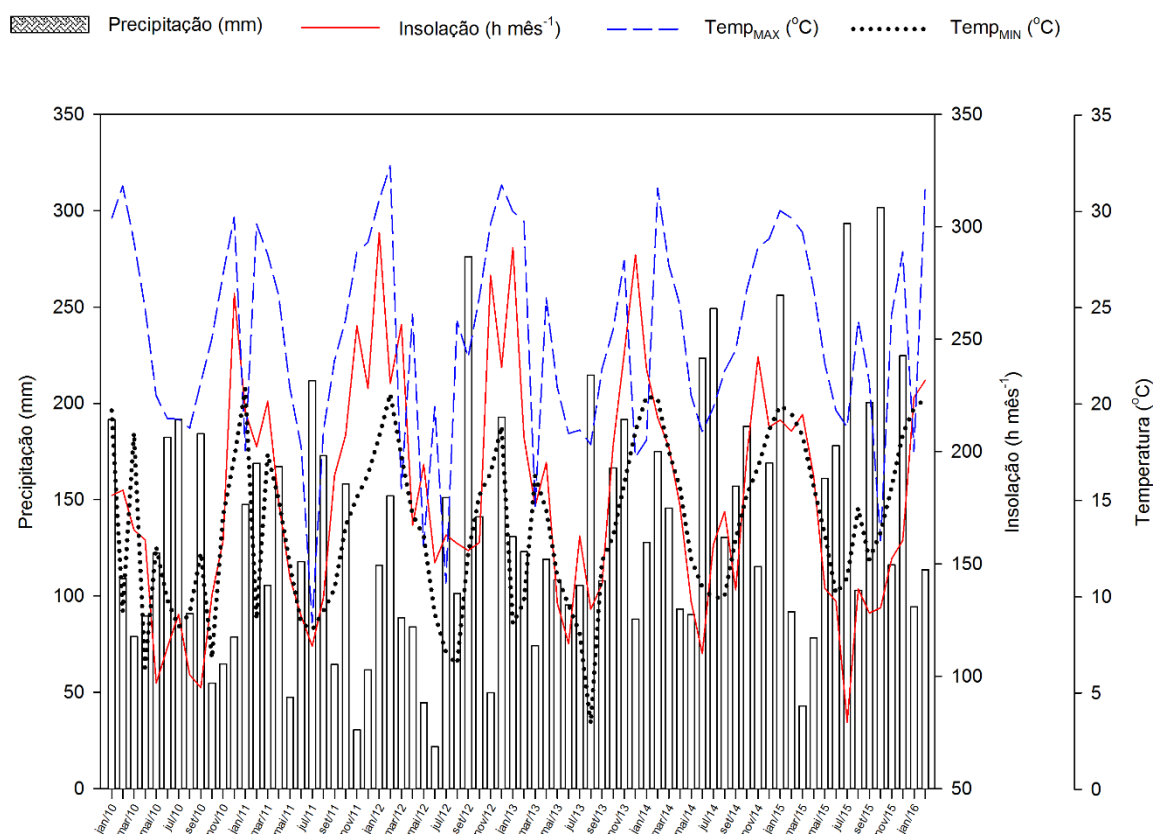
#### 4.3.1 Clima

A precipitação pluvial variou entre 1400 e 2000 mm anuais entre 2010 e 2016, e foi crescente a partir de 2013. Os meses entre dezembro e fevereiro, apesar de terem apresentado altas temperatura máxima e insolação, tiveram precipitação pluvial superior a 100 mm mês<sup>-1</sup>. Os maiores volumes de chuva mensais ocorreram entre junho e agosto, período no qual também foram registradas as menores taxas de insolação e temperaturas mínimas, que ficaram abaixo de 5 °C em 2013 (Figura 1).



Os anos de 2010 e 2015 tiveram as mais baixas taxas de insolação mensal, devido à ocorrência de grandes volumes de chuvas, bem distribuídas ao longo do ano por influência do fenômeno El Niño.

Figura 1 – Precipitação pluvial, insolação e temperaturas máxima e mínima ocorridas nas áreas de estudo, no período entre 2010 e 2016.



#### 4.3.2 Crescimento e produtividade florestal

Os povoamentos florestais avaliados aos 33 meses de idade tiveram dap e altura total média de 13,0 cm e 13,9 m, respectivamente. Nessa idade, a produtividade volumétrica de madeira de 73,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> representou um estoque de biomassa do fuste de 27,4 Mg ha<sup>-1</sup> que, aos 7 anos (84 meses), foi quantificada como valor superior a 153 Mg ha<sup>-1</sup>. Próximo à idade de corte, de 96 meses, os povoamentos tiveram dap médio de 17,8 cm e altura total média de 25,4 m, o que resultou num estoque volumétrico de madeira de 323,7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

As avaliações individuais das diferentes condições de potencial produtivo evidenciaram padrões de desenvolvimento diferenciados, com maior crescimento e

produtividade nas áreas ARG, com maiores dap (cm), h (m), estoques volumétricos ( $V$ ;  $m^3 ha^{-1}$ ) e de biomassa de madeira do tronco ( $WS$ ;  $Mg ha^{-1}$ ) ao final do ciclo de corte (Tabela 1).

Tabela 1 – Altura (h), diâmetro a 1,3 m de altura (dap), volume sem casca ( $V_{sc}$ ) e biomassa de madeira do fuste ( $WS$ ) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 33 (ARG<sub>33</sub> e NEO<sub>33</sub>), 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 meses de idade (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) dos povoamentos.

Solo	h* (m)	dap* (cm)	$V_{sc}$ * ( $m^3 ha^{-1}$ )	$WS$ * ( $Mg ha^{-1}$ )
ARG <sub>33</sub>	14,2 <sup>b</sup> (CV=9%)	13,1 <sup>a</sup> (CV=16%)	80,6 <sup>a</sup> (CV=42%)	27,5 <sup>a</sup> (CV=32%)
NEO <sub>33</sub>	13,5 <sup>a</sup> (CV=17%)	13,0 <sup>a</sup> (CV=18%)	70,8 <sup>a</sup> (CV=57%)	27,4 <sup>a</sup> (CV=42%)
ARG <sub>58</sub>	20,9 <sup>b</sup> (CV=19%)	16,0 <sup>a</sup> (CV=12%)	193,8 <sup>a</sup> (CV=40%)	78,2 <sup>a</sup> (CV=41%)
NEO <sub>58</sub>	19,6 <sup>a</sup> (CV=15%)	16,0 <sup>a</sup> (CV=10%)	195,9 <sup>a</sup> (CV=32%)	79,6 <sup>a</sup> (CV=35%)
ARG <sub>89</sub>	27,3 <sup>b</sup> (CV=10%)	18,9 <sup>b</sup> (CV=17%)	373,9 <sup>b</sup> (CV=32%)	177,2 <sup>b</sup> (CV=35%)
NEO <sub>89</sub>	23,5 <sup>a</sup> (CV=21%)	16,5 <sup>a</sup> (CV=28%)	272,3 <sup>a</sup> (CV=55%)	130,0 <sup>a</sup> (CV=56%)

Sendo: \*Médias seguidas de mesma letra, na mesma classe de idade, não se diferenciam estatisticamente ( $p < 0,05$ ); h = altura total; dap = diâmetro à 1,30 m de altura;  $V_{sc}$  = volume de madeira sem casca por hectare;  $WS$  = biomassa de madeira do fuste principal por hectare.

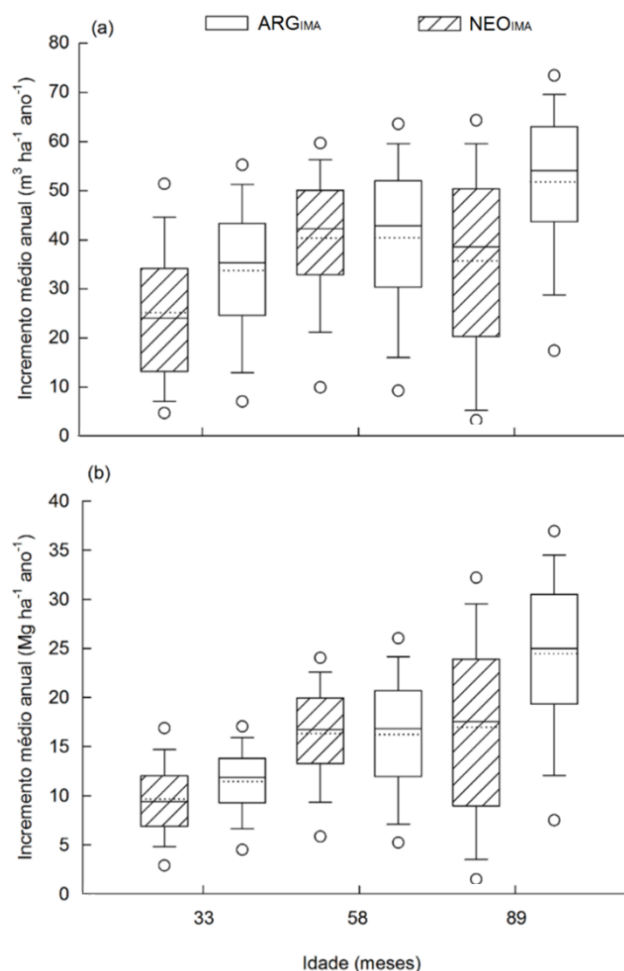
O coeficiente de variação (CV%) indicou que os povoamentos do ARG tendem a ser mais equilibrados quanto a distribuição da relação h/dap, com maior homogeneidade entre os indivíduos, o que impacta na produção final devido a menor ocorrência de árvores suprimidas.

O incremento médio anual de madeira sem casca ( $IMA_{vsc}$ ;  $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ ) teve taxa média próxima a  $43,7 m^3 ha^{-1} ano^{-1}$  ao final do ciclo de 96 meses, que aos 33 meses já representava  $IMA$  superior a  $29 m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ . A taxa produtiva avaliada pela biomassa de madeira do tronco ( $IMA_{ws}$ ) de  $10,1 Mg ha^{-1} ano^{-1}$  aos 33 meses de idade evoluiu e atingiu  $20,8 Mg ha^{-1} ano^{-1}$  nos povoamentos avaliados próximo a idade de corte.

O NEO teve taxas de  $IMA_{vsc}$  descritas por uma função exponencial com assíntota aos 58 meses e, por consequência, menores incrementos nos povoamentos de maior idade. No ARG o  $IMA_v$  não teve decréscimo até a idade de corte, o

comportamento linear crescente em função da idade resultou em taxas de incremento de aproximadamente 34 e 52  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ , aos 33 e 89 meses de idade (Figura 2a). O incremento em biomassa do tronco do ARG, aos 89 meses, foi de 24,6  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ; essa taxa representou um acréscimo próximo a 50% em relação ao observado aos 58 meses. O  $\text{IMA}_{\text{WS}}$  no NEO atingiu valor máximo aos 58 meses e permaneceu praticamente constante até o final do ciclo, quando foi verificada taxa de 16,5  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  (Figura 2b).

Figura 2 – Incremento médio anual volumétrico sem casca (a) e em biomassa do fuste (b) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 33 (ARG<sub>33</sub> e NEO<sub>33</sub>), 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.



A evolução das taxas de incremento em função da idade proporcionou um estoque de biomassa total de 145,2  $\text{Mg ha}^{-1}$  aos 83 meses de idade. A partição, em madeira do tronco (121,8), casca (14,2  $\text{Mg ha}^{-1}$ ), galhos (5,9  $\text{Mg ha}^{-1}$ ), folhas (3,4  $\text{Mg ha}^{-1}$ ).

ha<sup>-1</sup>) e raízes (33,5 Mg ha<sup>-1</sup>) teve sua dinâmica em função da idade caracterizada pela diminuição da biomassa foliar e pelo significativo aumento da biomassa de madeira (Figura 3a).

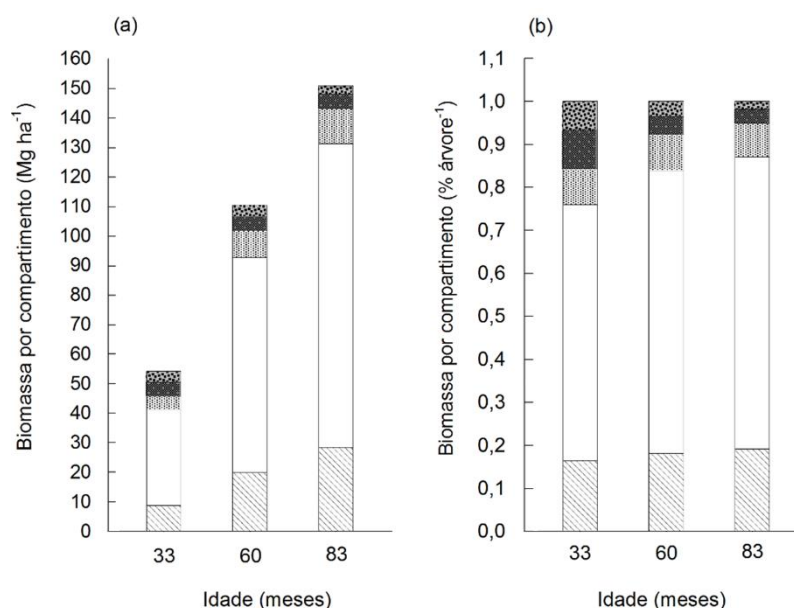
Nas estimativas da biomassa por hectare, onde a densidade dos povoamentos está associada à produtividade, foi observado um acréscimo de aproximadamente 10% na produção de biomassa de madeira dos 33 para os 83 meses de idade, com significativo decréscimo na proporção de cascas e galhos. A biomassa radicular de 3,7, 3,9 e 2,9 Mg ha<sup>-1</sup>, estimada aos 33, 60 e 83 meses de idade, e a biomassa da partição casca tiveram uma evolução proporcional as demais partições das árvores em função da idade, representada por aproximadamente 20 e 10% da biomassa total por hectare (Figura 3).

As partições individuais de biomassa determinadas aos 33 meses de idade tiveram, aproximadamente, 70% da biomassa total representada pela biomassa de madeira, enquanto a partição de folhas foi próxima a 8%. Com o desenvolvimento dos povoamentos, essas relações se alteraram e a proporção da partição de madeira passou a representar mais de 84% da biomassa total, com um total de biomassa de folhas inferior a 2,5%.

A produção de biomassa por hectare proporcionou, aos 83 meses de idade, um acumulado de resíduos, constituído por casca, folhas e galhos, de aproximadamente 30% da biomassa total.

As duas áreas (ARG e NEO) apresentaram diferenças significativas na produtividade de cada partição, principalmente aos 33 e 82 meses, idade na qual foi quantificado um estoque de biomassa total de 1473,4 Mg ha<sup>-1</sup> no ARG, o que representou, aproximadamente, 50% a mais da produção verificada no NEO.

Figura 3 – Biomassa média das áreas ARG e NEO, por compartimento (a) e biomassa média proporcional por árvore (b), aos 33, 60 e 83 meses de idade.



#### 4.3.3 Dinâmica foliar

O índice de área foliar (IAF; m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>) variou entre 2,0 e 4,9 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>. Nas áreas NEO, o IAF foi crescente até os 60 meses de idade, quando atingiu 3,2 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>, enquanto no ARG a relação linear com a idade resultou no valor de IAF de 4,1 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> aos 78 meses de idade. Os maiores IAF foram verificados nas áreas ARG, o que indica a influência do fator local, e nos meses de janeiro e fevereiro de 2015, em ambas as áreas ARG e NEO, o que comprova a variação do IAF em função da sazonalidade.

Os povoamentos tiveram correlação positiva do IAF com a produtividade e com as taxas de deposição de serapilheira. A deposição de serapilheira teve a mesma dinâmica ao IAF em função da sazonalidade, com a taxa máxima de queda de 1,0 Mg ha<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>, estimada no período entre dezembro e fevereiro.

A serapilheira média foi de 0,64 Mg ha<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>, com os períodos e áreas de maior e menor deposição, e produziu um acumulado de serapilheira de, aproximadamente, 0,72 e 0,51 Mg ha<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>, nas áreas ARG<sub>89</sub> e ARG<sub>33</sub>, respectivamente. A serapilheira não diferiu significativamente entre as áreas NEO e as ARG e a taxa de queda anual foi próxima a 7,8 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. A serapilheira teve tendência de menor deposição em florestas mais jovens, com taxa média de 6,2 Mg

ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, e maiores valores nos povoamentos próximos a idade de corte, com 8,6 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

A área foliar específica (AFE) variou de 4,4 a 9,0 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>, com valores superiores a 8 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> tendo sido observados apenas em povoamentos com idade acima de 80 meses. A AFE entre 4 e 5 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> foi estimada em povoamentos com idade entre 30 e 60 meses e a dinâmica da AFE foi descrita por uma relação positiva com a idade dos povoamentos.

#### 4.3.4 Taxa de mortalidade

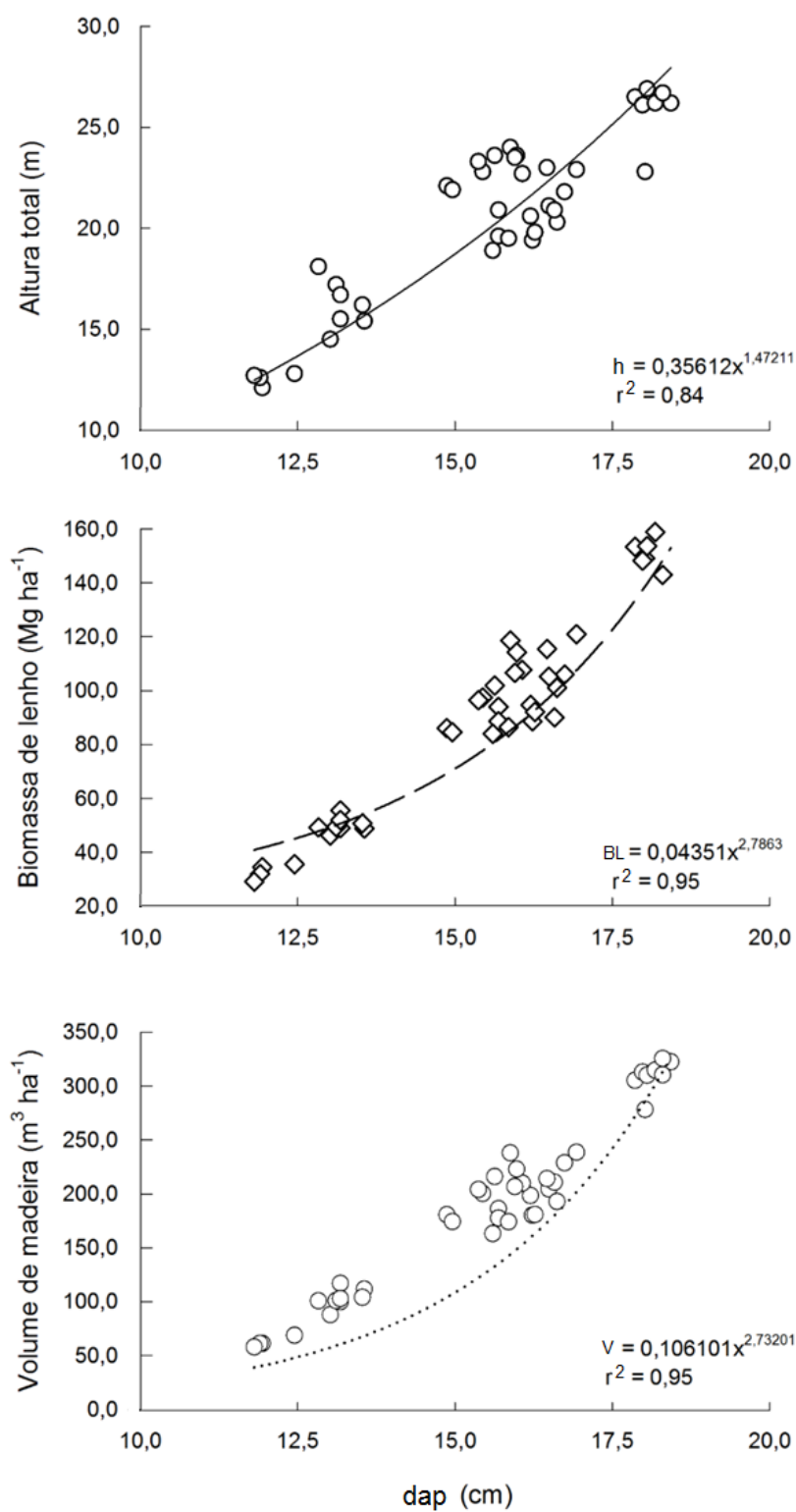
A taxa de mortalidade (falhas e árvores mortas) nas áreas até a idade de corte foi de 3,3% ano<sup>-1</sup>, o que representou uma perda anual de, aproximadamente, 34 árvores<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. A taxa de mortalidade nos povoamentos jovens foi de 3,2% ano<sup>-1</sup>, enquanto nos povoamentos adultos, com idade acima dos sete anos, a taxa de mortalidade foi próxima a 1,2% ano<sup>-1</sup>. No processo de parametrização não foram considerados os valores de mortalidade.

#### 4.3.5 Parametrização do modelo 3-PG

##### 4.3.5.1 Relações alométricas

As relações alométricas que descrevem a dinâmica da altura total, do volume por hectare e da biomassa de madeira (tronco, casca e galhos) em função do dap, ajustadas para a obtenção das constantes ( $a_S$ ,  $a_V$  e  $a_H$ ) e potências ( $n_S$ ,  $n_V$  e  $n_H$ ), apresentaram resultados dentro da margem definida como biologicamente correta para a espécie, com base em valores referencias de espécies análogas, e as funções tiveram alta precisão estatística, de acordo com os valores do  $r^2$  e da soma dos quadrados dos resíduos (SQR) (Figura 4).

Figura 4 – Altura total, biomassa de lenho e volume de madeira em função do diâmetro a 1,30 m de altura das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 33 (ARG<sub>33</sub> e NEO<sub>33</sub>), 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.



#### 4.3.5.2 Fração máxima (pRx) e mínima (pRn) de biomassa radicular

Os valores de pRx e pRn foram determinados com base em valores da literatura (SANDS, 2004; LANDSBERG; SANDS, 2010), associados aos resultados obtidos nas estimativas da biomassa radicular, tendo sido utilizado para as áreas NEO valores de 0,5 e 0,1 para o pRx e pRn, respectivamente, enquanto para as áreas ARG se utilizou pRx = 0,25 e pRn = 0,14.

#### 4.3.5.3 Modificador do crescimento em função da idade ( $f_{age}$ )

O modificador de crescimento em função da idade ( $f_{age}$ ) teve seus parâmetros definidos com base em parâmetros disponibilizados na literatura e, principalmente, na dinâmica dos povoamentos avaliados, que se caracterizam por rotação curta, entre 7 e 9 anos de idade. No 3-PG foram utilizados  $n_{age} = 4$ ,  $r_{age} = 0,95$  e 9 para a idade máxima de rotação.

#### 4.3.5.4 Capacidade de armazenamento de água (CAD)

A CAD, que representa o volume de água disponível (entre a CC e o PMP), foi significativamente distinta entre os solos ARG e NEO, sendo de 172 e 40 mm m<sup>-1</sup>, respectivamente. Com base no valor de PSR de 1,6 e 4,0 m para ARG e NEO, a CAD determinada para cada local foi de 275 e 158 mm.

#### 4.3.5.5 Partição folha/lenho (pfS2, pfS20)

A relação entre as partições de biomassa foliar (BF) e biomassa de lenho (BL), estimada com referência ao diâmetro do tronco de 2,0 (pfS2) e 20,0 cm (pfS20), que representam as idades dos povoamentos, teve resultados distintos nos povoamentos NEO (pfS2 = 0,95; pfS20 = 0,24) e ARG (pfS2 = 0,67; pfS20 = 0,20). No processo de parametrização do 3-PG, parâmetros únicos para os dois locais foram estimados como pfS2 = 2,43 e pfS20 = 0,01.



#### 4.3.5.6 Fração galhos e casca (fracBB0; fracBB1)

A variável fracBB1 foi definida como 0,15, com base nos valores a campo e para a fracBB0 foi utilizado o valor de 0,29, considerando os valores observados nos povoamentos mais jovens e a idade onde se verifica o valor médio entre as duas frações.

#### 4.3.5.7 Massa específica básica da madeira (MEb)

A massa específica básica de madeira (Meb) foi de 0,421 g cm<sup>-3</sup> para as árvores mais jovens e de 0,458 g cm<sup>-3</sup> para árvores com idade superior a 6 anos.

#### 4.3.5.8 Taxa de queda de serapilheira

As taxas mensais de serapilheira foram de 0,25 (gammaFx), estimadas para os povoamentos adultos, e de 0,001 (gammaF0) para povoamentos jovens, definido como valor padrão para representar a deposição nesses povoamentos (SANDS, 2004). Os parâmetros definidos para o processo de ajuste e calibração do 3-PG e a  $\alpha c$  (0,068 molC molRFA<sup>-1</sup>) estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de calibração do modelo 3-PG.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	F	Valor
Relação folha/Lenho para dap=2cm	pfS2	-	O	0,81
Relação folha/Lenho para dap=20cm	pfS20	-	O	0,22
Constante alométrica entre a biomassa de madeira e o dap	aS	-	O	0,0,435
Potência alométrica entre biomassa de madeira e o dap	nS	-	O	2,786
Fração máxima da PPL para as raízes – NEO	pRx	-	L	0,50
Fração máxima da PPL para as raízes – ARG	pRx	-	L	0,25
Fração mínima da PPL para as raízes – NEO	pRn	-	L	0,10
Fração mínima da PPL para as raízes – ARG	pRn	-	E	0,14
Continua.....				

Parâmetro	Símbolo	Unidade	F	Valor
Taxa de queda de serapilheira para povoamentos adultos	gammaFx	1 mês <sup>-1</sup>	O	0,25
Taxa de queda de serapilheira para povoamentos t=0	gammaF0	1 mês <sup>-1</sup>	L	0,001
Idade na qual a taxa de serapilheira tem valor médio	tgammaF	mêses	O	12
Taxa média mensal de ciclagem de raízes	gammaR	1 mês <sup>-1</sup>	L	0,025
Temperatura mínima de crescimento	Tmin	°C	L	-2
Temperatura ótima de crescimento	Topt	°C	L	25
Temperatura máxima de crescimento	Tmax	°C	L	34
Dias perdidos pela ocorrência de geadas	kF	dias	O	2
Relação do déficit de umidade para f <sub>q</sub> =0,5 – NEO	Swconst	-	L	0,7
Relação do déficit de umidade para f <sub>q</sub> =0,5 – ARG	Swconst	-	L	0,5
Potência da relação do déficit de umidade – NEO	Swpower	-	L	9
Relação do déficit de umidade para f <sub>q</sub> =0,5 – ARG	Swconst	-	L	5
Valor de 'm' quando FR=0	m0	-	L	0
Valor de 'fNutr' quando FR=0	fN0	-	L	0,5
Potência de (1-FR) em 'fNutr'	fNn	-	L	1
Máxima idade de rotação usada no modificador fAge	MaxAge	-	O	9
Potência da idade relativa na função para fAge	nAge	anos	P	4
Idade relativa para a obtenção de fAge=0,5	rAge	-	P	0,95
Taxa de mortalidade para povoamentos adultos	gammaNx	% ano <sup>-1</sup>	O	0
Taxa de mortalidade na idade t=0	gammaN0	% ano <sup>-1</sup>	O	0
Idade na qual a taxa de mortalidade tem valor médio	tgammaN	anos	O	2
Forma de resposta da mortalidade	ngammaN	-	P	1
Biomassa do fuste por árvore em densidade 1000/hectare	wSx1000	kg n <sup>-1</sup>	L	300
Potência na lei de auto desbaste	thinPower	-		1,5
Fração de biomassa foliar perdida por árvore morta	mF	kg/n	P	0
Fração de biomassa de raiz perdida por árvore morta	mR	kg/n	P	0,2
Fração de biomassa de madeira perdida por árvore morta	mS	kg/n	P	0,2
Área foliar específica na idade 0	SLA0	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	A	5,6
Área foliar específica para folhas maduras	SLA1	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup>	O	7,6
Idade em que AFE = (SLA0+SLA1)/2	tSLA	anos	A	4,5
Coefficiente de extinção da RFA pelo dossel	k	-	L	0,5
Idade de fechamento do dossel	fullCanAge	anos	L	5
Continua.....				

Parâmetro	Símbolo	Unidade	F	Valor
Máxima proporção de chuva evaporada pelo dossel	MaxIntcptn	%	P	0,15
Índice de área foliar para a máxima interceptação da chuva	LAIMaxIntc	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	L	3,33
Eficiência quântica do dossel	alfa	molC molRFA <sup>-1</sup>	A	0,068
Relação PPL/PPB	Y	-	L	0,5
Máxima condutância do dossel	MaxCond	m s <sup>-1</sup>	L	0,032
IAF para a máxima condutância do dossel	LAIgcx	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	L	2,96
Resposta estomática ao DPV	CoeffCond	1 mBar <sup>-1</sup>	L	0,0324
Condutância na camada limite do dossel	Blcond	m s <sup>-1</sup>	L	0,2
Fração da biomassa de galhos e casca em t=0	fracBB0	-	O	0,29
Fração da biomassa de galhas em idade adulta	fracBB1	-	O	0,15
Idade em que fracBB=(fracBB0+fracBB1)/2	tBB	anos	O	3,5
Densidade mínima da madeira – árvores jovens	rhoMin	Mg m <sup>-3</sup>	O	0,421
Densidade máxima da madeira – árvores adultas	rhoMax	Mg m <sup>-3</sup>	O	0,458
Idade em que rho=(rhoMin+rhoMax)/2	tRho	anos	L	4
Constante alométrica entre a altura e o dap	aH	-	A	0,356
Potência alométrica entre a altura e o dap	nH	-	A	1,442
Constante alométrica entre o volume e o dap	aV	-	-	0,106
Potência alométrica entre o volume e o dap	nV	-	A	2,752
Relação entre a radiação solar disponível e interceptada	Qa	-	P	-90
Coefficiente angular da relação entre as radiações solares	Qb	-	P	0,8
Peso molecular da matéria seca	gDM_mol	-	P	24
Fator de conversão da radiação solar em RFA	molPAR_MJ	-	P	2,3

Sendo: F = forma de obtenção do parâmetro; P = padrão do modelo; A = ajustado; O = observado; L = obtido na literatura.

#### 4.3.6 Eficiência e validação do modelo

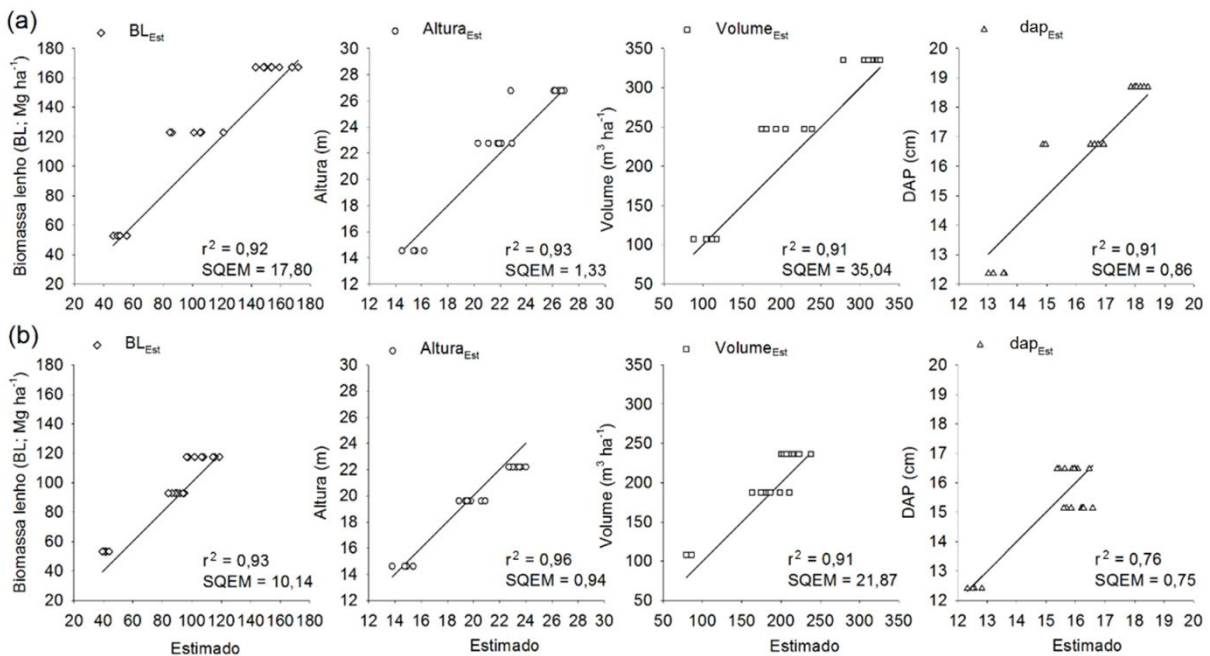
A eficiência do modelo, avaliada pela análise de regressão simples ( $O = b_0 + b_1 * E$ ) dos valores estimados de dap, h, volume de madeira do fuste e biomassa de lenho em função dos valores observados (Figura 5), apresentou elevados valores de  $r^2$  e coeficientes de variação entre 5 e 10%.

O índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (MORIASI et al., 2007) demonstrou que o modelo é mais eficiente para a predição da h e da BL e, segundo este índice,

ineficiente para a estimativa do dap. Pelo índice de concordância de Willmott (1981) foi obtido o mesmo padrão de análise, porém com melhores resultados para as estimativas do dap (Tabela 3).

Mesmo que o modelo tenha apresentado baixa eficiência para estimativa do dap, os valores sub e superestimados foram inferiores a 12%, com base na comparação entre os valores estimados e observados (PBIAS) (Tabela 3).

Figura 5 – Relação entre a biomassa de lenho (BL), a altura, o volume e o diâmetro a 1,30 m de altura (dap) estimados com o modelo 3-PG ( $BL_{Est}$ ,  $h_{Est}$ ;  $V_{Est}$ ,  $dap_{Est}$ ) em função dos valores observados (linha 1:1), das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG; a) e baixa (NEO; b).



Sendo: ( $\diamond$ ) = biomassa de lenho estimada; ( $\circ$ ) = altura estimada; ( $\square$ ) = volume de madeira estimada; ( $\triangle$ ) = dap estimado; (/) = linha 1:1 dos valores observados.

O modelo parametrizado e calibrado prediz adequadamente, com significativa precisão estatística, o padrão de crescimento e produtividade dos povoamentos em função do tempo, durante a validação do modelo. Os resultados do Nash-Sutcliffe e Willmott, da análise de correlação ( $r$ ) e o PBIAS foram satisfatórios para validar o modelo, o qual apresentou relativa sensibilidade para estimar a variável dap.

Tabela 3 – Indicadores estatísticos para a estimativa da altura (h), do diâmetro a 1,30 m de altura (dap), do volume (V) e da biomassa de lenho (BL) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 33 (ARG<sub>33</sub> e NEO<sub>33</sub>), 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.

Indicador	ARG	NEO	ARG	NEO	ARG	NEO	ARG	NEO
	h		dap		V		BL	
NSE	0,90	0,91	0,80	0,71	0,82	0,81	0,83	0,83
PBIAS (%)	-2,25	2,96	-1,50	0,86	-11,56	-9,00	-11,46	-8,77
Willmott	0,92	0,89	0,88	0,75	0,85	0,80	0,85	0,83
Correlação	0,97	0,98	0,95	0,87	0,97	0,95	0,96	0,96
Confiança	0,89	0,87	0,84	0,65	0,82	0,77	0,82	0,80

Sendo: NSE = teste de eficiência de Nesh-Sutcliffe; PBIAS = percentual PBIAS; Willmot = índice de concordância de Willmot; Correlação = coeficiente de correlação de Pearson; Confiança = índice “c”.

No processo de validação do modelo, os testes de precisão e eficiência tiveram resultados semelhantes aos obtidos com os dados observados, com maiores erros nas estimativas do dap, enquanto a maior precisão foi verificada na estimativa da h (Tabela 4).

Tabela 4 – Indicadores estatísticos para a estimativa da altura (h), do diâmetro a 1,30 m de altura (dap), do volume (V) e da biomassa de lenho (BL) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), aos 33 (ARG<sub>33</sub> e NEO<sub>33</sub>), 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos.

Indicador	h	dap	V	BL
NSE	0,94	-0,93	0,90	0,96
PBIAS (%)	2,00	7,20	5,00	4,00
Willmott	0,97	0,67	0,96	0,96
Correlação (r)	0,99	0,96	0,99	0,99

Sendo: NSE = teste de eficiência de Nesh-Sutcliffe; PBIAS = percentual PBIAS; Willmot = índice de concordância de Willmot; Correlação = coeficiente de correlação de Pearson.

Na validação do modelo, os erros de subestimativa não foram apontados pelo teste PBIAS; por outro lado, a tendência de superestimativas foi inferior a 10% para o dap e menor ou igual a 5% para a BL, V e H.

A análise de dispersão dos valores observados e estimados mostrou que, para o conjunto de variáveis considerado, o modelo teve tendência de superestimar os resultados, principalmente nas idades acima dos 80 meses. Pela análise gráfica da

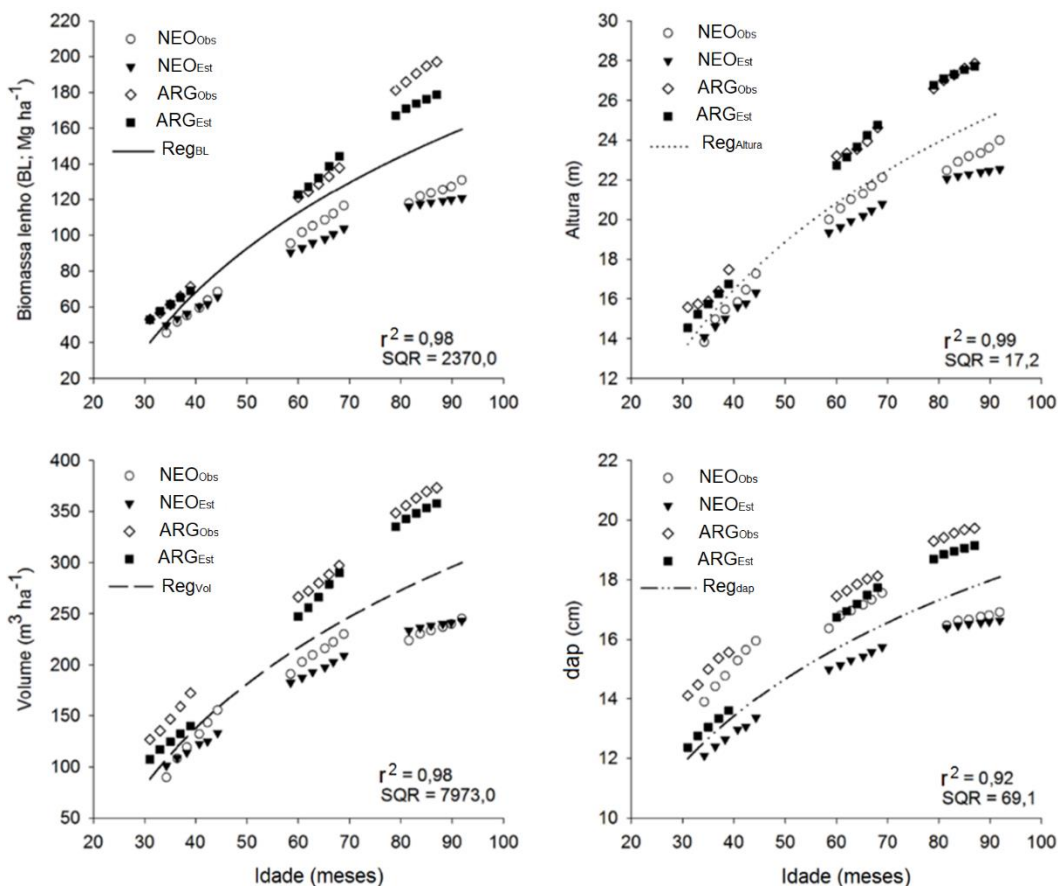
validação, o 3-PG se mostrou mais preciso nas áreas ARG, com destaque para a h (m) e a BL ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), enquanto para o dap, em ambas as áreas ARG e NEO, os valores estimados pelo modelo foram inferiores aos observados (Figura 6).

A dispersão dos valores observados e estimados mostrou que, para o conjunto de variáveis considerado, o modelo apresentou tendência de superestimar os resultados, principalmente acima dos 80 meses de idade.

A validação do modelo mostrou que as melhores estimativas foram obtidas nas áreas ARG, com destaque para a h (m) e BL ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), enquanto para a variável dap, em ambos os locais ARG e NEO, os resultados apresentaram tendência de subestimativa.

O erro percentual (RQEM) teve valores de aproximadamente 5% para o dap e a h, e de 17 e 18% para a BL e o V, respectivamente.

Figura 6 - Altura (h), diâmetro a 1,30 m de altura (dap), volume (V) e biomassa de lenho (BL) das áreas com capacidade de potencial produtivo alta (ARG) e baixa (NEO), observados (Obs) aos 33 (ARG<sub>33</sub> e NEO<sub>33</sub>), 58 (ARG<sub>58</sub> e NEO<sub>58</sub>) e 89 (ARG<sub>89</sub> e NEO<sub>89</sub>) meses de idade dos povoamentos, estimados (Est) com o modelo 3-PG.



Sendo: Reg = linha de regressão média para as ARG e NEO; SQR = soma dos quadrados dos resíduos.

#### 4.4 Discussão

O crescimento inicial médio no presente estudo (dap = 13,0 cm; h = 13,9 m), avaliado aos 33 meses, indicou um padrão de desenvolvimento superior aos resultados observados no estado de São Paulo, em povoamentos do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, avaliado aos 36 meses de idade em diferentes densidades, que apresentaram dap de 3,9 cm e h de 11,2 m (FERREIRA et al., 2014). Em florestas comerciais de *E. grandis*, cultivados sob distintos manejos de resíduos, Rocha (2014) observou que o padrão dendrométrico aos 36 meses, em segunda rotação, teve dap médio de, aproximadamente, 10,0 cm e h de 16,0 m. Os valores de dap e h observados neste estudo ficaram abaixo dos observados em sítios florestais do noroeste de Minas Gerais, cultivados com o híbrido *E. camaldulensis* x *E. grandis*, onde aos 33 meses de idades foram obtidos dap médio de 13,4 cm e altura total média de 16,6 m (FONTAN et al., 2011).

A pesar de as áreas NEO terem solos de baixa produtividade, o padrão médio de crescimento observado neste estudo ficou dentro da margem de produtividade média das florestas comerciais em distintas regiões do país. A região onde se localizam as áreas ARG e NEO têm, como característica climática, ausência de estiagem, o que, associada à adubação e ao controle de pragas, pode justificar as maiores produtividades obtidas.

A produtividade volumétrica de madeira abaixo da casca, quantificada aos 33 meses como 73,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, foi similar à obtida em florestas comerciais de *E. grandis* implantadas nos estados do Espírito Santo e São Paulo (ALMEIDA et al., 2004; ROCHA, 2014), porém muito superior aos resultados encontrados por Forrester et al. (2012), que obtiveram valores inferiores a 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, em florestas de *E. nitens* cultivadas na Austrália. A produção total das áreas com idade próxima aos 8 anos (44 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) foi superior à última estimativa nacional brasileira (IBÁ, 2015), e semelhante a resultados obtidos em outras regiões do país (STAPE et al, 2010; SILVA et al., 2013; ROCHA, 2014).

Nas áreas mais produtivas (áreas ARG<sub>89</sub>), o estoque de madeira (374 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; 177 Mg ha<sup>-1</sup>), obtido a partir de taxas de incremento médio (51 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>; 26,9 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), superou a produção de 331 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> observada em povoamentos de

*E. grandis* x *E. urophylla* aos 7 anos de idade, distribuídos em sete distintas áreas produtivas, no estado de Minas Gerais (MACHADO et al., 2015). Em povoamentos de *E. saligna* localizados nos municípios de Vera Cruz-RS e Eldorado do Sul-RS, a produção volumétrica de madeira sem casca foi de 371 e 438 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente (SCHUMACHER et al., 2011; KLIPPEL, 2015).

As áreas de maior produtividade possuem solos com boa estrutura e maiores teores de argila e, possivelmente, de matéria orgânica. Essas propriedades do solo têm apresentado alta correlação com as taxas de incremento dos sítios, principalmente devido à sua relação com capacidade de armazenamento de água dos solos e, possivelmente, à disponibilidade do micronutriente boro, originado da mineralização da matéria orgânica (GONÇALVES et al., 2008; 2012; 2013). Alterações na estrutura do solo interferem significativamente no movimento da água no solo devido à alteração nas suas propriedades (ALAOUI et al., 2011).

Associado aos fatores edáficos, as áreas ARG, caracterizadas pela maior produtividade, tiveram CAD de 42,9 mm m<sup>2</sup>, o que representa quase 3 vezes a capacidade de armazenamento das áreas NEO. Essa maior capacidade de armazenamento resulta em maior aporte de água para a cultura, o que afeta positivamente a produtividade, pois a água influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes na solução do solo, bem como o crescimento e a produção dos povoamentos de eucalipto (BALIEIRO et al., 2008; STAPE et al., 2010; LACLAU et al., 2010).

As propriedades dos solos NEO relacionadas à dinâmica e disponibilidade de água os tornam altamente drenáveis e suscetíveis a déficits hídricos devido à sua textura grossa e pouca agregação. Nesses solos, a água disponível para as plantas foi de apenas 25 mm, o que é equivalente a, aproximadamente, 20% do valor observado nos solos ARG.

A diferença na capacidade produtiva dos dois locais, ARG e NEO, também pode estar associada à dinâmica de desenvolvimento das copas que, nos povoamentos ARG, teve comportamento crescente do IAF em função da idade, o que corrobora com as maiores taxas de incremento como resposta ao aumento da capacidade fotossintética das árvores (HORN et al., 2006; CHMURA et al., 2007). A evolução do IAF em função da idade tem relação direta com as propriedades edáficas, pois sítios com maior disponibilidade nutricional e hídrica tendem a apresentar maior



alocação de biomassa na parte aérea em detrimento ao sistema radicular (REIS et al., 2006; EPRON et al., 2011).

Em florestas cultivadas sob taxas operacionais de fertilização, significativos ganhos em produtividade são obtidos com o aumento do aporte de água, com aumento ou não da fertilização, o que torna a capacidade de armazenamento de água do solo um dos principais fatores limitantes ao crescimento (STAPE et al., 2008). Nos solos de maior capacidade produtiva, esse aporte nutricional e a alta disponibilidade de água proporcionou a manutenção das altas taxas de incremento corrente (ICA) e, por consequência, o atraso no decréscimo no IMA e na idade técnica de corte, definida como o ponto onde não se verificam diferenças nas taxas de IMA e ICA (STAPE et al., 2010).

A produção total de biomassa ( $177 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) aos 89 meses de idade foi superior ao observado em povoamentos de *E. globulus* ( $153 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) avaliados aos 108 meses (ZEWDIE et al., 2009), enquanto a taxa de incremento médio anual ( $23,8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) foi superior aos valores de 13 e  $21 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  observadas em povoamentos avaliados aos 60 e 77 meses de idade, respectivamente (BOUILLET et al., 2013; SANTOS et al., 2016). A taxa observada neste estudo encontra-se dentro da faixa de produtividade dos povoamentos comerciais do Brasil, cultivados com determinados padrões nutricionais, com adubação de implantação e de cobertura, semelhante padrão de material genético e controle da matocompetição (STAPE et al., 2010).

A relação observada entre a biomassa total e a biomassa das partições madeira do fuste (84%), galhos e casca (14%) e foliar (2,3%) foi semelhante aos resultados obtidos em povoamentos de diferentes espécies de eucalipto, cultivados em regiões distintas e avaliados após os 66 meses de idade (PAIXÃO et al., 2006; MUÑOZ et al., 2008; RIBEIRO et al., 2015). Outros estudos encontraram valores divergentes nas proporções das partições de biomassa de madeira do fuste e foliar, as quais foram descritas por taxas em torno de 75% e 10%, respectivamente (ZEWDIE et al., 2009; KUYAH et al., 2013). Essa variação na distribuição da biomassa pode estar relacionada às propriedades edáficas ou climáticas, ou ainda à densidade inicial dos povoamentos (PINKARD; NIELSEN, 2003).

O padrão exponencial da biomassa aérea em função da idade, que pode ser descrito por uma função linear até os primeiros 20 meses (RODY, 2013), influenciou diretamente o IAF, que teve seu valor máximo ( $3,9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ) próximo aos 58 meses de idade. Reis (2014), na avaliação de povoamento de *E. grandis* no estado do Espírito

Santo, observou IAF de  $4,65 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , aos 19 meses de idade. Os resultados do IAF tiveram grande variação, principalmente devido à influência do sítio e da sazonalidade (LACLAU et al., 2009). Os maiores valores de IAF observados no mês de fevereiro podem estar associados ao crescimento intensivo verificado nos meses anteriores, os quais apresentaram altas disponibilidade hídrica, radiação e temperaturas (WHITEHEAD; BEADLE, 2004; REIS et al., 2006; LEMOS, 2012).

O IAF obtido aos 78 meses de idade ( $4,1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ) foi semelhante ao obtido por Epron et al. (2013), em povoamentos de eucalipto avaliados aos 72 meses de idade, no sudeste do Brasil. Em estudo realizado na mesma região, o valor médio do IAF de  $3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , quantificado em povoamentos de 3 a 72 meses de idade (LEMOS, 2012), representou padrão semelhante ao IAF médio obtido neste trabalho.

O IAF apresentou correlação positiva com a produtividade e com deposição de serapilheira. Logo, as maiores taxas de deposição podem ser explicadas pelo aumento do efeito do auto sombreamento, considerado um parâmetro ambiental diretamente relacionado à indução da senescência e queda foliar (VINCENT, 2006). As altas temperaturas e o eventual estresse hídrico, característico dos meses de janeiro e fevereiro, também podem ter influenciado a dinâmica da deposição de serapilheira, assim como observado por outros autores (ROCHA, 2014; VIERA et al., 2014; KLIPPEL, 2015).

A taxa mensal de serapilheira de  $0,65 \text{ Mg ha}^{-1}$  representou valor semelhante aos observados por outros autores, que obtiveram uma produção anual de biomassa de serapilheira entre  $4,5$  e  $8,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  (BELLOTE et al., 2008; ROCHA, 2014; INKOTTE et al., 2015). Dentro do contexto da dinâmica foliar, os valores de AFE também ficaram dentro da margem esperada para clones de eucalipto cultivados em ambientes tropicais (ALMEIDA et al., 2004; STAPE et al., 2004b).

A evolução da parte aérea das árvores em função da idade e da disponibilidade de água e nutrientes influencia diretamente o crescimento e a produtividade. Por isso, em modelos como o 3-PG, a dinâmica de fechamento das copas, do IAF, e da AFE são variáveis consideradas de alta sensibilidade no processo de ajuste (SANDS, 2004).

O conjunto de variáveis definidas como de alta sensibilidade no processo de parametrização do modelo 3-PG foram obtidos de medições, de estimativas ou de estudos realizados com espécie análoga e em condição climática o mais semelhante possível.

No ajuste das relações alométricas para o volume, a biomassa de madeira e a altura, em função do dap, a precisão estatística de  $r^2$  entre 0,84 e 0,95, foi superior aos resultados obtidos por Londero et al. (2015) e inferior aos observados por Klippel (2015), ambos em florestas de *E. saligna*. No modelo 3-PG a produtividade de biomassa em função do dap considera a relação existente entre o dap e a idade dos povoamentos, pois, para um determinado volume, o total de biomassa de madeira produzida poderá apresentar uma variação significativa em função da densidade básica da madeira (DMb), que tende a aumentar em função do aumento da idade. Esse efeito decorre principalmente da diminuição das taxas de incremento que, quando muito elevadas em povoamento mais jovens, tendem a resultar numa produção de biomassa de baixa densidade (ZHANG et al., 2012).

A DMb foi determinada para as árvores com idade inferior a 33 meses (rhMin) e superior a 70 meses (rhMax), nas duas condições locais avaliadas (ARG, NEO). Os resultados obtidos não apontaram efeito significativo do sítio sobre a DMb; porém, nas idades de 33 e 70 meses, a DMb teve um acréscimo de quase 10%, passando de 0,421 para 0,458 Mg m<sup>-3</sup>. A pouca diferença obtida entre as DMb nas duas idades avaliadas ocorreu devido ao povoamento de menor idade já estar com idade próxima a 3 anos.

Em florestas de eucalipto avaliadas no estado de Minas Gerais, aos 3 e 84 meses de idade, os valores determinados para rhMin e rhMax foram de 0,382 a 0,505 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente (BORGES et al., 2012). Outros trabalhos envolvendo espécies de eucalipto utilizaram os valores de 0,45 para rhMin e rhMax (SANDS, 2004; STAPE, 2002), e ainda rhaMin de 0,480 e rhMax de 0,520 (ALMEIDA, 2004).

Na estimativa da biomassa de queda de folheto, a taxa máxima foi de 0,81 Mg ha<sup>-1</sup> mês<sup>-1</sup>; porém, para o processo de parametrização foram utilizados valores de 0,001 para a taxa mínima ( $\gamma F_0$ ) e 0,25 para a taxa máxima ( $\gamma F_1$ ), o primeiro definido como padrão (SANDS; LANDSBERG, 2002) e o segundo ajustado a partir de valores disponíveis na literatura (STAPE, 2002; LONDERO et al., 2015). A idade na qual se observa taxa média de queda de serapilheira foi definida como 12 meses (SANDS; LANDSBERG, 2002).

Os altos valores obtidos na amostragem da serapilheira podem ter ocorrido por influência do El Niño, que no período de 2015-2016 provocou chuvas acima da média e altas temperaturas. Esse padrão climático maximiza a deposição de serapilheira,

comprovado por estudos que identificaram maiores taxas de deposição em regiões de maiores índices pluviométricos (INKOTTE et al., 2015).

A deposição de serapilheira possui uma relação estreita com a dinâmica foliar, descrita pelo IAF e pela AFE. Ao longo do ano, a variação do clima em função da sazonalidade proporcionou maiores valores de IAF, AFE e deposição de serapilheira nos períodos de primavera e verão, o que corrobora com os resultados obtidos por outros autores (EYLES et al., 2012).

A área foliar específica (AFE) teve valores estimados de  $7,6 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ , para povoamentos adultos (SLA1), semelhante ao valor obtido por Klippel (2015) e inferior ao valor de  $8,5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$  obtido por Lemos (2012), e de  $5,6$  para povoamentos jovens (SL0). Esse aumento da AFE em função da idade não corrobora com as expectativas da dinâmica foliar, pois espera-se que a AFE apresente menor valor em povoamento mais velhos devido à competição e à realocação de fotoassimilados da copa para as porções madeiráveis e às mudanças no padrão foliar, visto que as folhas se tornam mais coriáceas com a idade (ENGLAND; ATTIWILL, 2006; RAICH et al., 2014).

Os resultados adversos podem estar associados ao fato da AFE ter sido obtida em povoamentos distintos em cada idade, o que pode ter comprometido a determinação da dinâmica foliar no tempo. Entretanto, as avaliações que relacionam a AFE e o IMA tiveram alta correlação positiva quando considerado o sítio, o que talvez justifique o padrão observado na dinâmica foliar dos povoamentos (LANDSBERG et al., 2001).

O sítio também teve influência na determinação da biomassa abaixo do solo, pois em solos de baixa capacidade produtiva as plantas tendem a aumentar seu sistema radicular para maximizar a captação de água e nutrientes. Devido a esse comportamento, no modelo 3-PG, a fração máxima (pRx) e mínima (pRn) da produção primária líquida (PPL;  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) alocada no sistema radicular foi definida para cada área (ARG e NEO) com base na variação das partições de biomassa abaixo e acima do solo em função da qualidade do sítio, principalmente associada à CAD (MORONI et al., 2003; REIS et al., 2006). Para as áreas ARG, foram utilizados os valores de  $0,14$  (pRn; estimado) e  $0,25$  (pRx; ajustado), enquanto para as áreas NEO os valores de  $0,1$  (pRn) e  $0,5$  (pRx) foram obtidos da literatura (SILVA, 2006; BORGES, 2009).

Para cada um dos locais, a CAD foi determinada separadamente, dada a grande diferença observada entre os mesmos. Nos solos ARG, a CAD de  $172 \text{ mm m}^{-1}$  representa valor semelhante aos observados por outros autores em solos de textura

média e argilosa (SACRAMENTO NETO, 2001; LEMOS, 2012; GONZALEZ-BENECKE et al., 2014). Em situações onde os solos apresentam textura média a média argilosa, alguns trabalhos têm utilizado um valor padrão de  $100 \text{ mm m}^{-1}$  (SOUZA, 2006, BAESSO, 2011, BORGES, 2012).

A CAD de  $40 \text{ mm m}^{-1}$  para as áreas NEO, caracterizado pela presença de solos de textura grossa, foi superior à obtida em povoamentos de eucalipto em solos de textura arenosa, no estado de Minas Gerais, onde a CAD determinada foi de  $30 \text{ mm m}^{-1}$  (GUIMARÃES et al., 2006).

A temperatura inferior ( $T_{\min}$ ), a superior ( $T_{\max}$ ) e a ótima ( $T_{\text{opt}}$ ) para o desenvolvimento do eucalipto, utilizadas como variáveis de entrada e definidas como  $-2$  ( $T_{\min}$ ),  $25$  ( $T_{\text{opt}}$ ) e  $34$  °C ( $T_{\max}$ ), foram obtidas com base em informações espécie-específicas, valores já utilizados por outros autores (STAPE, 2002; PRIMEFACT, 2010; GONZALEZ-BENECKE et al., 2014).

A determinação da temperatura específica para a espécie avaliada pode proporcionar melhores resultados, pois os processos de fotossíntese e de transpiração e o ciclo fisiológico da planta são comprometidos em situações de temperaturas extremas, quando podem ocorrer danos aos tecidos vegetais (LANDSBERG, 2003a; LANDSBERG; SANDS, 2010).

A idade de rotação ( $MaxAge$ ), utilizada no modificador da idade ( $fAge$ ), foi definida como 9 anos, enquanto a idade de fechamento do dossel ( $fullCanAge$ ), associada à taxa de interceptação da luz e altamente sensível no processo de parametrização, foi ajustada com base na dinâmica do IAF observado, tendo sido definida a idade de 5 anos. Na parametrização do modelo 3-PG, valores entre 1 e 3 são usualmente utilizados para representar a  $fullCanAge$  (SILVA, 2006; BORGES, 2009; KLIPPEL, 2015).

A idade de fechamento do dossel influencia diretamente a distribuição da alocação de biomassa e a produtividade, pois os fotoassimilados são direcionados para o sistema radicular e parte aérea das árvores, até que ocorra o fechamento do dossel. Desse ponto em diante, a planta mantém os recursos para as raízes e redireciona outra fração para o tronco principal (RAICH et al., 2014). O desenvolvimento do tronco após o fechamento do dossel busca proporcionar maior estabilidade para as árvores (PEICHL; ARAIN, 2007), o que resulta em aceleração significativa nas taxas de incremento do fuste. Dessa forma, em sítios onde o crescimento inicial caracteriza-se por altas taxas de incremento, o fechamento do

dossel poderá ocorrer mais previamente, entre 18 e 36 meses, o que pode antecipar o aumento da alocação de biomassa para o fuste e influenciar diretamente os valores de IMA ao final do ciclo.

A dinâmica do desenvolvimento da copa em função da idade e, por consequência, em função da dimensão das árvores, apresenta semelhança no comportamento observado nas relações BF/ BL (pfS), e BGC/ BL (fracBB).

Ambas as variáveis, BL e BGC, apresentam declínio com o aumento da idade; por isso, foram estimadas para árvores em fase inicial e final de crescimento. No processo de parametrização, a pfS2 e pfS20, que representam a relação entre folhas e lenho para árvores de 2,0 e 20,0 cm de diâmetro, foram definidas como 0,81 e 0,22. Os valores foram estimados a partir das constantes e potências geradas no ajuste das relações alométricas e se assemelham aos resultados obtidos em outros estudos, que utilizaram valores entre 0,5 e 1,0 para o pfS2, e entre 0,03 e 0,15 para o pfS20 (ALMEIDA et al., 2004; SILVA, 2006; BORGES et al., 2012; RASCON, 2012).

Na determinação do peso da BGC em relação à BL, os valores observados e ajustados pela equação proposta pelo modelo 3-PG, de 0,31 (fracBB0) e de 0,11 (fracBB1), foram ajustados no processo de parametrização e tiveram seu valor final definido como 0,29 e 0,15. Esses resultados indicam que, aproximadamente, 15% da biomassa de lenho está alocada nas partições galhos e casca, o que corrobora com as estimativas apresentada em diferentes estudos com o eucalipto (SANDS; LANDSBERG, 2002; RASCON; 2012). Todavia, o valor da fracBB0, que indica que aproximadamente 30% da biomassa de lenho corresponde à fração galhos e casca, está abaixo do observado pelos mesmo autores, que descreveram a fracBB0 entre 0,6 e 0,75. O valor da fracBB0 = 0,30 foi semelhante aos trabalhos de Almeida (2004), Rascon (2012) e Lemos (2012), que obtiveram valor da fracBB0 entre 0,30 e 0,31, em florestas de *E. globulus*, do híbrido *E. grandis x E. urophylla*, e de *E. urophylla*.

O modelo parametrizado proporcionou boas estimativas das variáveis que descrevem a produção dos povoamentos, com uma menor precisão na determinação do dap. O Nash-Sutcliffe (NSE) foi superior a 0,7 para o dap, a 0,8 para o volume e a biomassa de lenho, e superior a 0,9 para a variável h, nos distintos locais. Os resultados são superiores aos obtidos nas estimativas do 3-PG em florestas comerciais no estado de São Paulo, onde o NSE foi inferior a 0,85 para a biomassa do tronco (LEMOS, 2012). Pela análise do índice de concordância de Willmott (ICW), que descreve a aproximação entre os valores estimados e observados, somente para

o dap das áreas NEO foi obtido valor inferior a 0,8. A h teve o maior nível de concordância, com ICW superior a 0,89. Em avaliação das estimativas do 3-PG pelo ICW, Rascon (2012) obteve melhores resultados para o volume de madeira (ICW = 0,97), porém menores valores do ICW para o dap e a h do que os resultados obtidos neste estudo.

O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) foi superior a 0,9 para todas as variáveis, com exceção do dap estimado no local NEO. Os valores do  $r^2$  são muito semelhantes aos resultados obtidos por Klippel (2015), em povoamento de *E. saligna* no município de Eldorado do Sul-RS, e caracterizam o modelo como de alta precisão estatística.

As maiores tendências de sub e superestimativas do modelo foram relacionadas às variáveis BL e V, que de acordo com o teste PBIAS tiveram tendência negativa inferior a 10% nos locais NEO e a 12% nas áreas ARG.

As estimativas obtidas para parcelas independentes, que objetivaram avaliar a capacidade de extrapolação do 3-PG parametrizado, tiveram estreita relação com os valores observados nos inventários, e pelos testes de NSE e ICW apresentaram valores superiores a 0,9, com exceção dos resultados obtidos para o dap.

#### 4.5 Conclusões

A produção volumétrica estimada nas áreas consideradas menos produtivas, onde ocorrem solos da classe NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico, considerados susceptíveis ao estresse hídrico, teve altas taxas de IMA até os 58 meses de idade, período a partir do qual se notou uma significativa queda nas taxas de crescimento.

Nos Argissolos, a manutenção das altas taxas de incremento até os 89 meses de idade, descrito por incremento médio anual de volume de madeira sem casca ( $IMA_{VSC}$ ) superior a  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , sugerem que, em condições edáficas ideais, talvez a rotação de corte do eucalipto possa ultrapassar os 8 anos de idade sem prejuízo na taxa de IMA.

A determinação da dinâmica foliar realizada pelas técnicas de sensoriamento remoto (SAVI), apesar de práticas e de representarem bem a condição dos povoamentos, são pouco eficientes nas análises pontuais, distribuídas nas quatro estações do ano, devido à influência do clima sobre a qualidade das imagens nas estações do outono e inverno.

O modelo 3-PG parametrizado teve alta eficiência estatística, capaz de descrever mais de 90% da variância das principais variáveis produtivas observadas nas duas áreas avaliadas, ARG e NEO, com maior sensibilidade e menor precisão quando relacionado a variável dap.

Os resultados satisfatórios no processo de validação comprovaram a capacidade de extrapolação do 3-PG para outras áreas dentro da mesma condição climática, apesar de ser recomendada uma nova validação em áreas mais distintas quanto às propriedades dos solos.

#### 4.6 Referências Bibliográficas

ALAOUI, A.; LIPIEC, J.; GERKE, H.H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation. **Soil Till. Res.** P.1-15, 2011.

ÁLVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONCALVES, J.L.M., SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, p.1–18, 2013.

BALIEIRO, F. C. et al. Fertilidade e carbono do solo e uso da água pelo eucalipto numa topossequência em Seropédica, RJ. **Revista Árvore**, Viçosa, v.32, n.1, p.153-162, 2008.

BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; SILVA, H. D. Eucalyptus com diferentes sistemas de manejo de resíduos florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, n. 1, p. 31–41, 2008.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, F. R.; et al. Relationship of soil physical quality parameters and maize yield in a Brazilian Oxisol. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 75, n. September, p. 357–366, 2015.

BORGES, J.S. Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. Dissertação, Universidade Federal de Viçosa, 2009.

BORGES, J. S. Modulador edáfico para uso em modelo ecofisiológico e produtividade potencial de povoamentos de eucalipto. Tese, Universidade Federal de Viçosa, 2012.

BORGES, J.S.; NEVES, J.C. L.; LOURENÇO, H.M.; BARROS, N.F.; DIAS, S.C.M. Parameterization of the 3-PG model for eucalypt in the region of cerrado in Minas Gerais state. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 567-578, 2012.

BOUILLET, J.P.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M. et al. Eucalyptus and Acacia tree growth over entire rotation in single- and mixed-species plantations across five sites in Brazil and Congo. **Forest Ecology and Management** 301 p. 89–101, 2013.

CHMURA, D. J.; RAHMAN, M. S.; TJOELKER, M. G. Crown structure and biomass



allocation patterns modulate aboveground productivity in young loblolly pine and slash pine. **Forest Ecology and Management**, v. 243, n. 2–3, p. 219–230, 2007.

ENGLAND, J. R.; ATTIWILL, P. M. Changes in leaf morphology and anatomy with tree age and height in the broadleaved evergreen species, *Eucalyptus regnans* F. Muell. **Trees - Structure and Function**, v. 20, n. 1, p. 79–90, 2006.

EYLES, A.; WORLEDGE, D.; SANDS, P.; et al. Ecophysiological responses of a young blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantation to weed control. **Tree Physiology**, v. 32, p. 1008–1020, 2012.

EPRON, D.; LACLAU, J.P.; ALMEIDA, J.C.R.; GONÇALVES, J.L.M.; PONTO, S. et al Do changes in carbon allocation account for the growth response to potassium and sodium applications in tropical *Eucalyptus* plantations? **Tree Physiology** 32, p.667–679, 2011.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; MARESCHAL, L.; et al. Partitioning of net primary production in *Eucalyptus* and *Acacia* stands and in mixed-species plantations: Two case-studies in contrasting tropical environments. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 102–111, Elsevier B.V., 2013.

FERREIRA, D.H.A.A.; LELES, P.S.S.; MACHADO, E.C.; ABREU, A.H.M.; ABILIO, F.M. Crescimento de clone de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* em diferentes espaçamentos. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 44, n. 3, p. 431 - 440, jul. / set. 2014.

FONTAN, I.C.I.; REIS, G.G.; REIS, M.G.F.; LEITE, H.G.; MONTE, M.A.; RAMOS, D.C.; SOUZA, F.C. Growth of pruned eucalypt clone in na agroforestry system in southeastern Brazil. *Agroforestry System*, p.1-11, 2011.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Science Publishing Co., New York, USA. 25, p.295-309, 1988.

KLIPPEL, V.H. Modelagem ecofisiológica de cultivos de eucalipto em regiões subtropicais do brasil. Tese, Universidade Federal de Vicosa, 2015.

GUIMARÃES, D. P.; GUENTHER, G.; SILVA, C.; et al. Uso do modelo de crescimento 3-PG para o zoneamento do potencial produtivo do eucalipto no estado de Minas Gerais Use of crop growth model 3-PG for zoning eucalyptus potential productivity. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Piracicaba**, v.15, n.2, p.192-197, 2006.

HORN, D.; ERNANI, P.R.; SANGOI, L.; SCHWEITZER, C. & CASSOL, P.C. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **R. Bras. Ci. Solo**, 30:77-85, 2006.

INKOTTE, J.; MAFRA, Á. L.; RIOS, P. D. Â. S cientia F orestalis Deposição de serapilheira em reflorestamentos de eucalipto e florestas nativas nas regiões Planalto e Oeste do Estado de Santa Catarina Litter fall deposition in eucalyptus plantations and native forests in the highland and west regi. , p. 261–270, 2015.

KUYAH, S.; DIETZ, J.; MUTHURI, C.; NOORDWIJK, M. VAN; NEUFELDT, H.

Allometry and partitioning of above- and below-ground biomass in farmed eucalyptus species dominant in Western Kenyan agricultural landscapes. **Biomass and Bioenergy**, v. 55, p. 276–284, 2013.

LACLAU, J. P.; ALMEIDA, J. C. R.; GONÇALVES, J. L. M.; et al. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf lifespan and allocation of above-ground growth in Eucalyptus plantations. **Tree Physiology**, v. 29, n. 1, p. 111–124, 2009.

LACLAU, J. P.; RANGER, J.; MORAES GONÇALVES, J. L. DE; et al. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1771–1785, 2010.

LANDSBERG, J.; SANDS, P. *Physiological Ecology of Forest Production: Principles, Processes and Models*, 352 p., 2010.

LEITE, F. P. Relações nutricionais e alterações de características químicas de solos da Região do Vale do Rio Doce pelo cultivo do eucalipto. 2001. 72 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001

LONDERO, E. K.; SCHUMACHER, M. V.; SZYMCZAK, D. A.; ARAÚJO, E. F. Calibração do modelo 3-PG para Eucalyptus saligna Smith NA Região de Guaíba - RS. **Ciencia Florestal**, v. 25, n. 2, p. 293–305, 2015.

MORONI, M. T.; WORLEDGE, D.; BEADLE, C. L. Root distribution of Eucalyptus nitens and E-globulus in irrigated and droughted soil. **Forest Ecology and Management**, v. 177, p. 399–407, 2003.

MUÑOZ, F.; RUBILAR, R.; ESPINOSA, M.; et al. The effect of pruning and thinning on above ground aerial biomass of Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) Maiden. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 3–4, p. 365–373, 2008.

NOLÈ, A.; LAW, B. E.; MAGNANI, F.; et al. Application of the 3-PGS model to assess carbon accumulation in forest ecosystems at a regional level. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 39, n. 9, p. 1647–1661, 2009.

PAIXÃO, F.A.; SOARES, C.P.B.; JACOVINE, L.A.G.; SILVA, M.L.; LEITE, H.G.; SILVA, G.F. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, v.30, n.3, p.411-20, 2006.

PEICHL, M.; ARAIN, A. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. **Forest Ecology and Management** 253, p. 68–80, 2007.

PINKARD, E.; NEILSEN, W. Crown and stand characteristics of Eucalyptus nitens in response to initial spacing: implications for thinning. **Forest Ecology and Management**, v. 172, n. 2–3, p. 215–227, 2003.

PRIMEFACTS *Eucalyptus saligna*, 5 p. 2010.

RAICH, J. W.; CLARK, D. A.; SCHWENDENMANN, L.; WOOD, T. E. Aboveground tree growth varies with belowground carbon allocation in a tropical rainforest environment. **PLoS one**, v. 9, n. 6, p. e100275, 2014.

RASCON, N.J.L Modelagem ecofisiológica do desenvolvimento do eucalipto na Amazônia. Dissertação, Universidade Federal de Vicosa, 2012.

REIS, G. G. DOS; REIS, M. D. G. F.; FONTAN, I. D. C. I.; et al. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp submetidos a dois regimes de irrigação no campo. **Revista Árvore**, v. 30, n. 6, p. 921–931, 2006.

REIS, M.G. Partição da radiação fotossinteticamente ativa e trocas gasosas em cultivos de eucalipto e cerrado. Dissertação, Universidade Federal de Vicosa, 2014.

RIBEIRO, S.C.; SOARES, C.P.B.; FEHRMANN, L.; JACOVINE, L.A.G.; VON GADOW, K. Aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal eucalyptus trees in southeast Brazil. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.39, n.2, p.353-363, 2015.

RODY, Y.P. Balanço de carbono e trocas gasosas nos diferentes compartimentos em plantios de eucalipto. (Meteorologia Agrícola - Tese de Doutorado), UFV, Viçosa-MG, 92 p., 2013.

SANTOS, F. M.; BALIEIRO, F. DE C.; ATA??DE, D. H. DOS S.; DINIZ, A. R.; CHAER, G. M. Dynamics of aboveground biomass accumulation in monospecific and mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on a Brazilian sandy soil. **Forest Ecology and Management**, v. 363, p. 86–97, 2016.

SACRAMENTO NETO, O. B. Balanço hídrico em plantios jovens de eucalipto na região de Belo Oriente, MG. 82 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

SILVA, G.G.C Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes. Tese, Universidade Federal de Vicosa, 2006.

SOARES, J. C. W. S. Matéria orgânica de um Argissolo Vermelho distrófico úmbrico após a introdução de fitofisionomias antrópicas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 64 p., 2011.

SOUZA, W.G. Modelagem da evapotranspiração em plantios de eucalipto em fase inicial de desenvolvimento com cobertura parcial do solo. Dissertação, Universidade Federal de Vicosa, 2006.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; ARAÚJO, E. F.; CORRE^A, R. S.; CALDEIRA, M. V. W. Deposic??ao de serapilheira e nutrientes em plantio de *Eucalyptus urophylla* x

E. globulus. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 3, p. 327–338, 2014.

VINCENT, G. Leaf life span plasticity in tropical seedlings grown under contrasting light regimes. **Annals of Botany**, v. 97, n. 2, p. 245–255, 2006.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Palm Beach, v.2, n.2, p.184-94, 1981.

WHALLEY; W.R.; TO, J.; KAY, B.D.; WHITMORE, A.P. Prediction of the penetrometer resistance of soils with models with few parameters. **Geoderma**. 137, p.370–377, 2007.

ZHANG, H.; GUAN, D.; SONG, M. Biomass and carbon storage of Eucalyptus and Acacia plantations in the Pearl River Delta, South China. **Forest Ecology and Management**, v.277, p.90-97, 2012.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em povoamentos comerciais de eucalipto implantados para a produção de biomassa, a produtividade média tende a apresentar pouca variação quando as áreas cultivadas não apresentam propriedades altamente restritivas que possam afetar significativamente o desenvolvimento das árvores.

Os tratamentos nutricionais são uma das principais alternativas para o incremento na produtividade, porém, a efetividade dos tratamentos está diretamente relacionada a disponibilidade de água (HUBBARD et al., 2004), que em solos de textura grossa, pode ser seriamente comprometida em função das propriedades físico-estrutural do solo (GELAIN, 2012). Dentre os fatores que influenciam a produtividade do eucalipto, a água é considerada um dos mais importantes (STAPE et al., 2010), o que pode justificar as distinções observadas nas duas áreas avaliadas neste estudo, onde as áreas ARG, que possuem solos bem estruturados e boa capacidade de armazenamento de água, tiveram uma produção de  $422 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , o que representou quase 50% a mais do estoque produzido nas áreas NEO.

A alta produtividade das áreas ARG está diretamente relacionada a alta Mic, aos valores de RP não restritivos ao crescimento (LACLAU et al., 2001; WHALLEY et al., 2007) e às boas taxa de fluxo ( $K_{ar}$  e  $K_{sat}$ ), que favorecem o aproveitamento dos solutos disponíveis no solo. Esta maior eficiência, associada a boa disponibilidade de água, estimula o desenvolvimento das copas (HUBBARD et al., 2004), constatado pela avaliação do IAF nas duas respectivas áreas. Os maiores valores do IAF na ARG representam maiores taxas de crescimento e maior produtividade (CARON et al., 2012), em relação aos povoamentos NEO. A menor produtividade das áreas NEO pode estar associada as altas  $K_{ar}$  e da  $K_{sat}$ , a Mac próxima a 80% da PT e ao volume médio de Mic inferior  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , o que caracteriza os solos dessas áreas como altamente sensíveis ao déficit hídrico e nutricional.

Em condições de estresse hídrico e déficit nutricional a planta pode expandir seu sistema radicular, o que aumenta consideravelmente a biomassa abaixo do solo e, por consequência, impacta negativamente na produção acima do solo (LEITE, 2001; GATTO et al., 2003). Em solos sem impedimento, considerados profundos, o sistema radicular do eucalipto pode atingir profundidade superior a 10 m (CHRISTINA et al., 2011).

Com o entendimento de que a dinâmica da água, sua disponibilidade e mobilidade, é o principal fator relacionado a variação do potencial produtivo dos solos

de eucalipto (STAPE et al., 2010; SILVA, 2011), em duas situações extremas como as observadas no ARG e NEO, a utilização de propriedades como a textura dos solos pode gerar informações relevantes na definição da qualidade físico-estrutural dos mesmos (GELAIN, 2012; MORALES, 2013).

Nos solos arenosos a manutenção da serapilheira acima do solo pode favorecer o aporte hídrico, principalmente para as raízes finas localizadas nas camadas superficiais, e proporcionar a disponibilidade de água por um maior período de tempo.

Na parametrização do modelo 3-PG, a textura e a AD são utilizadas como variáveis de entrada para representar as diferenças estruturais dos solos e adequar o modelo a situações de grande variabilidade edáfica (SANDS, 2004). Os parâmetros gerados pelo modelo utilizam dados de crescimento que caracterizam as duas áreas distintas, porém, dada a importância do fator edáfico e sua influência no padrão produtivo, para cada local o solo é caracterizado individualmente.

Os resultados que relacionaram a produtividade com as propriedades dos solos possibilitaram classificar a  $K_{ar}$ , a  $K_{sat}$  e a  $D_s$  como significativas na descrição da variância do crescimento. Tais propriedades descrevem a dinâmica de fluxo do ar e solutos no solo, por apresentarem correlação significativa com a  $M_{ac}$  e a  $PT$  (BRAGA et al., 2015; ALAOUI, et al., 2011). A mobilidade de soluções e gases no solo garante o desenvolvimento do sistema radicular e da biota do solo, e em condições ideais, associadas à disponibilidade de água, pode favorecer a produtividade das culturas (SILVA et al., 2009).

Devido à sua importância para a dinâmica da água e efetividade do solo como meio de armazenagem e condução, a  $K_{ar}$  e a  $K_{sat}$  podem ser utilizadas como indicadores da qualidade física dos solos (MOSADDEGUI, et al., 2007; SILVA et al., 2009). A significativa correlação entre  $K_{ar}$  e  $K_{sat}$  (IVERSEN, et al., 2004) permite que seja utilizada somente uma, a de menor variância e mais fácil obtenção, na caracterização da qualidade físico-estrutural do solo. Em situações onde a resistência mecânica e a AD não são fatores limitantes ao crescimento das culturas, a inclusão da  $K_{ar}$  ou da  $K_{sat}$  em modelos de crescimento como o 3-PG, pode proporcionar resultados mais precisos a partir da melhor adequação do modelo as condições edáficas locais.

Nos empreendimentos florestais avaliados a taxa média de incremento anual (IMA), na maior parte das situações se caracterizou por valores considerados dentro

da média nacional para o gênero, principalmente devido aos tratamentos de implantação, combate a pragas e matocompetição e aos tratamentos nutricionais (IPEF, 2008).

O decréscimo significativo das taxas de incremento, a partir dos 5 anos de idade, observadas nas áreas de Neossolos Quartzarênicos, indica que talvez possa se maximizar a aproveitamento da capacidade produtiva desses sítios com a diminuição da rotação de corte.