

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E  
MUCURI – UFVJM

**INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO E DA IDADE NA PRODUÇÃO DE  
BIOMASSA E NA ROTAÇÃO ECONÔMICA EM PLANTIOS DE  
EUCALIPTO**

DIAMANTINA - MG  
2012

ERIK JÚNIOR PAULINO

**INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO E DA IDADE NA PRODUÇÃO DE  
BIOMASSA E NA ROTAÇÃO ECONÔMICA EM PLANTIOS DE  
EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador: **Prof. Dr. Gilciano Saraiva Nogueira**

DIAMANTINA - MG  
2012

Ficha Catalográfica - Serviço de Bibliotecas/UFVJM  
Bibliotecária Nathália Machado Laponez Maia  
CRB6-3002

P328i	<p>Paulino, Erik Júnior.</p> <p>Influência do espaçamento e da idade na produção de biomassa e na rotação econômica em plantio de eucalipto. – Diamantina : UFVJM, 2012. 59 p.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Gilciano Saraiva Nogueira.</p> <p>Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 2012.</p> <p>1. Análise econômica. 2. <i>Eucalyptus sp.</i> 3. Bioenergia. 4. Crescimento. I. Nogueira, Gilciano Saraiva. II. Título.</p> <p style="text-align: right;"><b>CDD 631.58</b></p>
-------	---

Elaborada com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

ERIK JÚNIOR PAULINO

**INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO E DA IDADE NA PRODUÇÃO DE  
BIOMASSA E NA ROTAÇÃO ECONÔMICA EM PLANTIOS DE  
EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 30 de Maio de 2012

Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza – UNB  
Membro

Prof. Dr. Reynaldo Campos Santana – UFVJM  
Membro

Prof. Dr. Ângelo Márcio Pinto Leite – UFVJM  
Membro

Prof. Dr. Márcio Leles Romarco de Oliveira – UFVJM  
Membro

Prof. Dr. Gilciano Saraiva Nogueira – UFVJM  
Presidente

DIAMANTINA - MG  
2012

*DEDICO:*

*Aos meus pais a quem honro pelo  
esforço e dedicação;*

*Aos meus professores pelo incentivo à  
busca de novos conhecimentos e que  
muito contribuíram para a minha  
formação;*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e determinação na realização deste trabalho, e por guiar-me durante toda a minha vida;

Aos meus pais e irmãos, pelo exemplo e confiança. Apoio necessário durante esta jornada;

Ao professor Gilciano, pela dedicação na orientação deste trabalho, pela amizade e, acima de tudo, pela grande influência e referência pessoal e profissional;

Aos professores Reynaldo, Márcio, Álvaro e Ângelo, pela amizade, pelos valiosos ensinamentos e pelas grandes contribuições no desenvolvimento deste trabalho;

Ao engenheiro Marcelo Müller e ao professor Laércio Couto, por serem os responsáveis pela instalação do experimento;

Aos amigos, Jadir, Alberto, Rafael, Bruno, Marcos Paulo, Emílio e Vinícius pelo importante auxílio na elaboração deste trabalho;

Aos valorosos colegas e amigos do mestrado;

À FAPEMIG, pela concessão de bolsa de estudo;

À UFVJM e a todos os funcionários, que contribuíram de certa forma para a execução deste trabalho;

À APERAM Bioenergia Ltda pelo apoio a pesquisa.

## RESUMO

PAULINO, E.J. **Influência do espaçamento e da idade na produção de biomassa e na rotação econômica em plantios de eucalipto**. 2012. 54p. (Dissertação - Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2012.

Objetivou-se com este trabalho estudar o efeito do espaçamento de plantio e do tempo na produção de biomassa, na rotação econômica, e em variáveis de povoamento e dendrométricas de plantios clonais de eucalipto. Foi instalado um experimento em áreas da empresa APERAM BIOENERGIA, no município de Itamarandiba - MG, utilizando o delineamento experimental, blocos ao acaso. As parcelas foram constituídas por cinco espaçamentos iniciais de plantio (3,0 x 0,5 m; 3,0 x 1,0 m; 3,0 x 1,5 m; 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 3,0 m) e as épocas de medição ocorreram aos 7, 12, 18, 24, 48, 61, 77, 85 e 102 meses. A partir das informações coletadas em campo, foram estimados para cada tratamento o volume e a biomassa por hectare, a densidade básica, o poder calorífico superior, além de outras variáveis dendrométricas e de povoamento. Verificou-se que o espaçamento e a idade influenciaram significativamente nos valores de diâmetro médio, de altura total, de área basal por hectare, de volume total por hectare, de biomassa por hectare, de densidade básica da madeira e de poder calorífico superior. O crescimento em volume por hectare em biomassa por hectare e em área basal por hectare apresentou relação direta com a densidade de plantio, sendo os maiores valores obtidos nos menores espaçamentos. Por outro lado, o diâmetro médio e a altura total das árvores apresentaram correlação negativa com a densidade de plantio. A densidade básica tende a aumentar com o espaçamento e com a idade das árvores. E o poder calorífico tende a elevar-se com a idade e com o espaçamento de plantio. Os espaçamentos estudados não influenciaram a porcentagem de sobrevivência das árvores. A rotação técnica e a rotação econômica ocorreram mais cedo nos plantios com espaçamento menor. Para todos os espaçamentos a idade técnica de corte foi inferior à idade econômica de corte. O espaçamento 3,0 x 1,5 mostrou-se como a opção mais atrativa segundo os critérios VPL e BPE, considerando a venda de madeira em pé.

**Palavras-chaves:** Análise econômica, *Eucalyptus* sp, Bioenergia, Crescimento.

## ABSTRACT

PAULINO, E.J. **INFLUENCE OF SPACING AND THE AGE ON BIOMASS PRODUCTION AND ECONOMIC ROTATION IN EUCALYPT PLANTATIONS.** 2012. 54p. Dissertation (Masters in Forest Science) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2012.

The objective of this work was to study the effect of planting spacing and time in the production of biomass in the economic rotation, and dendrometric variable and stand variables of a stand of eucalyptus clonal. The experiment was performed in areas of the company APERAM BIOENERGIA in the city of Itamarandiba, MG, using a randomized block design. The plots consisted of five spacing initial (3.0 x 0.5 m, 3.0 x 1.0 m, 3.0 x 1.5 m, 3.0 and 3.0 x 2.0 x 3.0 m) and measurements were performed at 7, 12, 18, 24, 48, 61, 77, 85 and 102 months. From the information collected in the field were estimated for each treatment the volume and biomass per hectare, density, calorific value, and other dendrometric variable and stand variables. It was found that the spacing and age influence significant on the values of average diameter, height total, basal area, volume total per hectare, biomass per hectare, density and calorific value. The growth in volume per hectare in the biomass per hectare and basal area per hectare was directly related to planting density, and the higher values for the smaller spacing. On the other hand the average diameter and total height of the trees were negatively correlated with the density. The specific gravity tends to increase with age and with the spacing of the trees. And the calorific value tends to rise with age and with the planting spacing. The spacing did not influence the survival rate of trees. The technique rotation and economic rotation occurred earlier in smaller plantings spaced. For all spacing the technique age cutting was higher than the economic age cutting. The spacing of 3.0 x 1.5 proved to be a more attractive option according to the criteria net present value and equivalent periodic benefit, considering the sale of standing timber.

**Keywords:** Economic Analysis, *Eucalyptus sp*, Bioenergy, Growth.



## SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1. INTRODUÇÃO .....	4
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
2.1 Obtenção de Dados.....	8
2.2 Estimativas de densidade básica, poder calorífico superior e biomassa seca.....	9
2.3 Análise dos dados.....	10
2.4 Rotação técnica e econômica.....	11
3 RESULTADOS.....	14
3.1 Equações hipsométricas e volumétricas.....	14
3.2 Análise estatística do experimento.....	19
3.3 Efeito da idade e do espaçamento sobre variáveis de povoamento.....	38
3.4 Efeito do espaçamento sobre a rotação técnica e a rotação econômica.....	42
4 DISCUSSÃO.....	44
5 CONCLUSÕES.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

## 1. INTRODUÇÃO

Com a Revolução Industrial iniciada em meados do século XVIII na Inglaterra, a disponibilidade cada vez maior de energia torna-se uma questão crucial para o desenvolvimento econômico e tecnológico da sociedade. O carvão mineral tem a partir de então a função de impulsionar este movimento (RIZZO, 2005). Já no final do século XIX, surge o petróleo com os seus diversos derivados permitindo o desenvolvimento da indústria automobilística e do plástico, além de outros setores industriais. O gás natural, encontrado em jazidas de petróleo no subsolo, teve o seu consumo em franca expansão a partir dos anos 80, onde a partir de então vem sendo a fonte de energia fóssil a registrar maior crescimento no mundo (ANEEL, 2008).

Por outro lado, a preocupação atual com questões ambientais como o aumento do efeito estufa e a poluição atmosférica, aliada a expectativa de esgotamento de algumas fontes de energia não renováveis como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural, têm levado cada vez mais a busca por fontes alternativas de energia, dentre estas se destacam as fontes de energia renováveis.

A utilização de fontes de energia renováveis apresenta diversas vantagens, como a redução da emissão de gases poluentes, a geração de empregos e o desenvolvimento regional. Ainda assim, a maior utilização destas fontes depende da eliminação de barreiras principalmente econômicas, pois as tecnologias de implantação são relativamente novas e possuem alto custo de implantação. Contudo, para que estas barreiras possam ser superadas é preciso suporte governamental e investimentos em tecnologia, para que possam alcançar ganhos de escala e se tornar economicamente competitivas (GUARDABASSI, 2006).

As principais fontes de energia renovável são a hidráulica, a eólica, a energia solar e a energia de biomassa. A energia proveniente da biomassa, também denominada de bioenergia, tem a grande vantagem de gerar energia elétrica próxima ao local de consumo, reduzindo os gastos com transmissão e as perdas de energia durante este processo. O procedimento mais usual de geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil é a combustão direta, gerando vapor para acionar uma turbina acoplada a um gerador elétrico. Além da queima direta, existem outros modos para processamento da biomassa, visando a sua utilização como insumo energético, que incluem a fermentação, a hidrólise, a pirólise e a gaseificação (SAUER *et al.*, 2006).

No Brasil, a bioenergia representou em 2010 cerca de 27% da oferta primária de energia, superada apenas pelo petróleo e seus derivados (BRASIL, 2011). A imensa superfície do território nacional, quase toda localizada em regiões tropicais e chuvosas, oferece condições propícias para a produção e o uso da bioenergia em larga escala.

Além de ser ambientalmente mais favorável em relação a outras fontes convencionais de energia, o uso tecnicamente adequado da bioenergia tende a promover o desenvolvimento de regiões menos favorecidas economicamente, por meio da promoção de empregos e da geração de receitas.

Dentre os materiais utilizados para geração da bioenergia, a lenha é o de mais antiga utilização, tendo no Brasil ainda uma grande importância como combustível para fins energéticos, em especial nas regiões de menor desenvolvimento econômico. A biomassa de origem florestal se destaca neste cenário por possuir características que permitem a sua utilização como fonte alternativa de energia, tanto pela queima da madeira, da casca e utilização do carvão, quanto pelo aproveitamento de resíduos da exploração e aproveitamento de óleos essenciais, alcatrão e licor pirolenhoso (COUTO *et al.*, 2000).

A utilização de povoamentos para fins energéticos dá origem às florestas energéticas. As florestas energéticas são constituídas de espécies de rápido crescimento com um ciclo curto e geralmente com elevada lotação de indivíduos por hectare. A implantação de florestas energéticas implica na adoção de técnicas que visam à maximização da produção em curto espaço de tempo. Dentre essas técnicas, pode-se citar a utilização de espécies de rápido crescimento, fertilização mineral e o manejo da densidade de plantio (REZENDE *et al.*, 1983; BERGER, 2000).

A densidade de plantio é um dos principais fatores que afetam a formação de florestas, seus tratamentos culturais, a qualidade da madeira, sua extração e conseqüentemente os custos de produção (SIMÕES *et al.*, 1976). A densidade de um povoamento é a expressão quantitativa da população de indivíduos por unidade de área e pode ser descrita pela área basal, volume e frequência de forma isolada ou associada a outras variáveis para definir o espaço horizontal (SCHNEIDER, 1993).

A escolha de um determinado espaçamento deve levar em consideração fatores como o uso final da madeira, qualidade do sítio, qualidade da madeira, equipamentos que serão utilizados na colheita da floresta, dentre outros. Espaçamentos mais amplos implicam em um aumento do volume para fins específicos, como serraria e laminação (GOMES *et al.*, 1997) ou integração lavoura-pecuária-floresta.

O espaçamento entre plantas é o fator que determina e limita a quantidade de recursos que estarão disponíveis por planta, em uma sequência espacial e temporal. Sendo assim, o espaçamento tem uma série de implicações silviculturais, tecnológicas e econômicas na elaboração de projetos florestais (COUTO *et al.*, 2002). O espaçamento determina o tempo e a intensidade da competição pelos recursos entre as árvores, sendo que elas entram em competição quando os recursos disponíveis diminuem (HARRINGTON *et al.*, 2009).

Se o povoamento é muito denso, o espaço para o crescimento de cada árvore é reduzido, comprometendo o desenvolvimento radicial e da copa, e, conseqüentemente, afetando a quantidade e a qualidade da produção (SCOLFORO, 1997). O espaçamento ótimo é aquele capaz de fornecer o maior volume do produto em tamanho, forma e qualidade desejáveis, o que depende do sítio, da espécie e do potencial do material genético utilizado (PATINO-VALERA, 1986).

De maneira geral, os menores espaçamentos resultam em menor diâmetro quadrático, maior área basal por hectare, maior volume total por hectare e menor porcentagem de sobrevivência (COUTO, 1977; GORGULHO *et al.* 1991; LADEIRA, 1999).

A análise econômica é um passo importante na definição do espaçamento adequado para um determinado projeto florestal. A quantidade de mudas por hectare, sistema de exploração florestal, quantidade de acessos, aceiros e outros, são fatores que variam com o espaçamento e exercem influência direta na relação custo/benefício (COUTO *et al.*, 2002).

A idade de corte representa uma das principais variáveis de decisão em planos de manejo florestal. A idade ótima de corte pode ser definida em termos volumétricos ou econômicos (RODRIGUEZ *et al.*, 1997).

Assim, o objetivo geral deste trabalho foi estudar os efeitos do espaçamento de plantio e da idade na produção de biomassa e na rotação econômica de um povoamento clonal de eucalipto.

Os objetivos específicos foram: a) determinar o poder calorífico e a densidade básica da madeira em função do espaçamento e da idade; b) estimar a biomassa seca sem casca e o volume com casca por hectare; c) Avaliar o efeito do espaçamento e da idade sobre as variáveis dendrométricas e de povoamento; d) Determinar as idades técnicas e econômicas em cada espaçamento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisados povoamentos clonais de eucalipto (híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*) pertencentes à empresa APERAM BIOENERGIA, implantados no município de Itamarandiba, Minas Gerais.

O município está localizado na região do Vale do Jequitinhonha, Estado de Minas Gerais, com sede nas coordenadas geográficas 17,86°S de latitude e 42,86°W de longitude (PNUD, 2000). A temperatura média é de 21,2°C, sendo o clima definido como tropical de altitude, com duas estações bem definidas. O índice pluviométrico médio é de 1.130 mm anuais e a umidade relativa do ar média anual é de 60 a 70% (MME, 2005).

A tipologia florestal predominante é o cerrado com seus diferentes tipos, desde os cerradões a campos, com pequenas ocorrências de matas semicaducifolias e caducifólias, especialmente nos afloramentos com calcário (MÜLLER, 2005).

O experimento foi instalado em dezembro de 2002, sobre Latossolo Vermelho-Amarelo, em relevo plano a 1.097 m de altitude. Adotou-se o delineamento em blocos casualizados com cinco tratamentos (espaçamentos) e três blocos. Cada parcela foi constituída por seis linhas de plantio (distância entre as linhas igual a 3 m), e em cada linha foram plantadas 28 árvores (a distância entre as árvores variou de acordo com o tratamento: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; e 3,0 m), totalizando 168 árvores. Em cada parcela, as duas primeiras e as duas últimas linhas de plantio e as duas primeiras e as duas últimas árvores de cada linha foram consideradas como bordas. Com isso, 120 árvores foram consideradas como bordas e 48 árvores como pertencentes à unidade de amostra. Informações sobre cada tratamento são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização dos tratamentos

Tratamento	Espaçamento (m)	Área por planta (m <sup>2</sup> )	Nº de árvores no bloco	Nº de árvores na borda	Nº de árvores na parcela	Área da parcela (m <sup>2</sup> )
1	3,0 x 0,5	1,5	168	120	48	72
2	3,0 x 1,0	3,0	168	120	48	144
3	3,0 x 1,5	4,5	168	120	48	216
4	3,0 x 2,0	6,0	168	120	48	288
5	3,0 x 3,0	9,0	168	120	48	432

## 2.1. Obtenção dos dados

As parcelas foram medidas aos 7, 12, 18, 24, 48, 61, 77, 85 e 102 meses de idade. Até os 24 meses foram medidas a altura total e a circunferência a 1,3 m (*Cap*) de oito árvores em cada parcela. Dos 48 aos 102 meses foram medidos, em cada parcela, o *Cap* de todas as árvores, estimada a altura total (*Ht*) de aproximadamente 12 árvores normais e de quatro árvores dominantes (*Hd*) e registradas as seguintes situações dos fustes: normais (N), dominantes (D) e mortas (M). A cova que não possuía árvore foi registrada como árvore morta - ocasionada por causas naturais. Para medição da circunferência a 1,3 m do solo e da altura total empregou-se uma fita diamétrica e um Clinômetro Haglof, respectivamente.

As alturas das árvores que não foram estimadas no campo foram obtidas por meio de equações hipsométricas, ajustadas aos dados obtidos nas idades 48, 61, 77 e 102 meses. Para as idades 48, 61, 77 e 102 meses, foi gerada uma equação de altura para cada espaçamento em função do *Dap* (diâmetro a 1,3 m). O modelo utilizado foi  $LnHt = \beta_0 + \beta_1 Dap^{-1} + \varepsilon$ , em que: *Ln* = logaritmo neperiano;  $\beta_i$  = parâmetros a serem estimados;  $\varepsilon$  = erro aleatório, as demais variáveis já foram definidas anteriormente. Para as idades 12, 18, 24 e 85 meses, as alturas totais não foram estimadas no campo, nestes casos, foi gerada uma equação hipsométrica para cada espaçamento empregando-se o modelo  $LnHt = \beta_0 + \beta_1 Dap^{-1} + \beta_2 Ln(idade) + \varepsilon$ , em que: *idade* = idade em meses, as demais variáveis já foram definidas anteriormente. Aos sete meses de idade foram estimadas no campo as alturas de todas as árvores medidas em cada parcela, o que tornou desnecessário a utilização de equações hipsométricas nesta idade.

Para estimar o volume de cada árvore (*V*) foram empregadas equações volumétricas ajustadas a um conjunto de dados de cubagem rigorosa. Foram cubadas rigorosamente 245 árvores-amostra, imediatamente antes da colheita florestal da área experimental. Foram cubadas, aproximadamente, seis árvores-amostra em cada classe de diâmetro (amplitude = 5 cm) e 50 árvores por parcela. A obtenção do volume real foi obtida empregando-se o método de *Smalian*, considerando o comprimento da seção de 1 m. O modelo volumétrico empregado foi o de Schumacher e Hall (1933):  $LnV = \beta_0 + \beta_1 LnDap + \beta_2 LnHt + \varepsilon$ .

Os dados para as análises relacionadas com a tecnologia da madeira (densidade e poder calorífico) foram obtidos por meio de discos de madeira retirados de árvores-médias cubadas rigorosamente em algumas ocasiões. Foi considerada como árvore-

modelo a árvore com o diâmetro a 1,3 m ( $D_{ap}$ ) igual ou próximo ao valor do diâmetro médio quadrático ( $q$ ) da parcela. Foi colhida uma árvore-modelo em cada parcela, selecionando-se árvores das bordas internas (adjacentes ao talhão). Em cada árvore-modelo foram retirados discos de 6,0 cm de espessura a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura total do fuste. De cada disco foram obtidas duas cunhas opostas, utilizadas para a determinação da densidade básica da madeira. O restante do disco foi utilizado para a determinação do poder calorífico superior, sendo essas realizadas com amostras compostas.

## 2.2. Estimativas de densidade básica, poder calorífico superior e biomassa seca

A densidade básica ( $Db$ ) foi obtida de acordo com o método de imersão em água, descrito por Vital (1984). Os valores foram calculados a partir da média aritmética das densidades das respectivas cunhas. O poder calorífico superior ( $PCS$ ) da madeira foi determinado de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT- NBR 8633 (ABNT, 1983), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática. As amostras de madeira foram transformadas em serragem utilizando-se um moinho de laboratório tipo Wiley, de acordo com a norma TAPPI 257 om-52 (Tappi Technical Divisions and Committees - TAPPI, 1998). Foi utilizada a fração de serragem que passou pela peneira n° 16 internacional, com malha de 40 *mesh* e ficou retida na peneira n° 24 internacional, com malha de 60 *mesh*, (ASTM, 1982). As amostras foram secas em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , até massa constante, para a determinação do poder calorífico superior.

A biomassa seca da madeira sem casca ( $W_{sc}$ ) foi obtida multiplicando-se o volume de fuste sem casca ( $V_{sc}$ ) pela densidade básica da madeira ( $Db$ ), conforme equação:  $W_{sc} = V_{sc} \times D_b$ , em que:  $W_{sc}$  = biomassa seca da madeira (ton/ha);  $V_{sc}$  = volume da madeira sem casca ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) e  $Db$  = densidade básica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Informações sobre densidade foram obtidas a partir dos 24 meses, sendo que para idades anteriores foi considerado o valor da densidade obtida aos 24 meses. O poder calorífico foi estimado dos 24 aos 85 meses e, para aquelas idades onde não havia informações, foram considerados os valores de poder calorífico da idade mais próxima.

### 2.3. Análise dos dados

Para realizar a análise estatística dos dados do experimento foi efetuada análise de variância (ANOVA), em cada época de medição. Para comparar o efeito dos espaçamentos sobre cada variável testada foi utilizado o teste de *Tukey* a de 95% de probabilidade. As variáveis analisadas foram: diâmetro quadrático ( $q$ ), em cm, média aritmética das alturas totais ( $Ht$ ), em m, área basal ( $B$ ), em  $m^2/ha$ , volume de fuste com casca por hectare ( $Vcc$ ), em  $m^3/ha$ , biomassa seca de fuste sem casca por hectare ( $Wsc$ ), em ton/ha, sobrevivência (%), densidade básica da madeira ( $Db$ ), em  $g/cm^3$  e poder calorífico superior ( $PCS$ ), em Kcal/Kg.

Todos os dados foram submetidos a testes de homogeneidade de variâncias (Cochran e Bartlett) e normalidade (Lilliefors) a 95% de probabilidade. Detectou-se a necessidade de transformação dos dados para as variáveis  $Vcc$  e  $Wsc$ . Dessa forma, a análise de variância e os testes de médias foram efetuados empregando-se  $LnVcc$  e  $LnWsc$ , no entanto foram apresentados o dados sem transformação no resultado do teste de *Tukey*. Para as demais variáveis empregaram-se os dados originais.

Para verificar o efeito da idade e do espaçamento sobre as variáveis estudadas ( $q$ ,  $B$ ,  $Ht$ ,  $Vcc$  e  $Wsc$ ) empregou-se análise de regressão, considerando a variável estudada como variável dependente e a idade como variável independente. Foram testados diferentes modelos de regressão, sendo que a escolha entre estes modelos foi feita com base no coeficiente de correlação entre valores observados e estimados, pelo erro-padrão residual e pela distribuição dos resíduos.

Para verificar se as curvas de produção obtidas nos espaçamentos analisados eram estatisticamente iguais empregou-se o teste L&O, proposto por Leite e Oliveira (2002), em nível de 5% de probabilidade. Este teste consiste em uma regra decisória baseada na estatística F de Graybill, na avaliação do erro médio e na análise do coeficiente de correlação linear entre os dois vetores de dados quantitativos (valores estimados de volume por hectare em dois espaçamentos).

As análises de variância (ANOVA), as comparações individuais entre os tratamentos e os ajustes dos modelos de regressão foram realizados no *software* Statistica 10.0.



#### 2.4. Rotação técnica e rotação econômica

A rotação técnica considera a maior eficiência na produção em volume. A idade em que se verificou o encontro entre as curvas de incremento médio anual (IMA) e o incremento corrente anual (ICA) foi definida como idade técnica de corte. Assim, a rotação técnica em cada espaçamento foi definida com base na produtividade média. Conforme mencionado anteriormente, a curva de produção volumétrica de cada espaçamento foi obtida empregando-se um modelo de regressão selecionado.

A rotação econômica maximiza os retornos do investimento e considera não apenas a produção em volume, mas também os custos e as receitas da produção, submetidos a uma determinada taxa de desconto. Considerou-se um horizonte de planejamento máximo de sete anos com uma única rotação. Foram considerados os custos de implantação e de manutenção da floresta (Tabela 2) e a receita da venda de madeira em pé.

Para a estimativa dos custos, consideraram-se as operações padrões praticadas na região de desenvolvimento deste trabalho com o nível tecnológico utilizado pelos produtores rurais desta região. A adubação adotada foi considerada para uma expectativa potencial de 35 m<sup>3</sup>/ha/ano. Os custos envolvidos dividiram-se em:

- i. Custos de implantação: capina, preparo do solo, construção de estradas e aceiros, adubação, plantio e replantio, combate à formiga;
- ii. Custos de manutenção da floresta: conservação de aceiros, combate à formiga, adubação e capina.

Com relação às receitas, foi considerado o preço de R\$ 50,0/m<sup>3</sup> para a venda de madeira em pé. Em estudos no setor florestal são empregadas taxas de juros variando de 6,0 a 12% a.a (OLIVEIRA *et al.*, 1998; CASTRO *et al.*, 2011). Neste trabalho foi considerada uma taxa de desconto de 6% a.a por ser uma taxa próxima da taxa de juros da caderneta de poupança.

Para análise econômica foram utilizados os critérios econômicos Valor Presente Líquido (VPL) e Benefício Periódico Equivalente (BPE). A rotação econômica de cada espaçamento foi obtida quando o VPL ou o BPE foi máximo.

Tabela 2 - Custos de implantação e manutenção por hectare de povoamentos de eucalipto em diferentes espaçamentos

Ano	Especificação	Espaçamento (m)				
		3,0 x 0,5	3,0 x 1,0	3,0 x 1,5	3,0 x 2,0	3,0 x 3,0
		Custos (R\$/ha)				
Ano (0)	Combate à formiga/Repasse	76,49	76,49	76,49	76,49	76,49
	Roçada	94,00	94,00	94,00	94,00	94,00
	Capina Química	154,00	154,00	154,00	154,00	154,00
	Estradas e aceiros	52,00	52,00	52,00	52,00	52,00
	Subsolagem/Fosfatagem	574,00	574,00	574,00	574,00	574,00
	Plantio e replantio	3.134,73	1.726,41	1.152,64	863,55	569,37
	Adubação de cobertura (NPK)	296,98	268,99	261,99	254,99	248,00
	Ferramentas diversas	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
	EPI diversos	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
	Outros	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	SubTotal	4.562,18	3.125,87	2.545,10	2.249,02	1.947,84
Ano (1)	Capina	69,98	69,98	69,98	69,98	69,98
	Capina Química	51,99	51,99	51,99	51,99	51,99
	Adubação de cobertura	636,19	636,19	636,19	636,19	636,19
	Manutenção de Aceiros	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
	Combate à formiga	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
	Outros	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
	SubTotal	867,15	867,15	867,15	867,15	867,15
Ano (2)	Adubação de cobertura (KCl)	282,20	282,20	282,20	282,20	282,20
	Manutenção de Aceiros	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
	Combate à formiga	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
	Outros	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
	SubTotal	326,19	326,19	326,19	326,19	326,19
Ano (3 a 7)	Manutenção de Aceiros	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
	Combate à formiga	84,99	84,99	84,99	84,99	84,99
	Outros	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00
	SubTotal (3º ao 7º ano)	219,99	219,99	219,99	219,99	219,99
Total Geral	5.975,52	4.539,20	3.958,44	3.662,35	3.361,17	

Fonte: adaptado de Souza (2012).

O VPL é a diferença entre o valor presente das receitas subtraído o valor presente dos custos. Se o VPL é maior do que zero, o projeto é considerado viável. O projeto que apresenta maior VPL é considerado o mais atraente. É importante ressaltar que, para utilização deste método, faz-se necessária a definição de uma taxa de desconto (SILVA *et al.*, 2002). Se os projetos analisados possuírem diferentes durações ou tempos de maturação, há necessidade de equalização dos horizontes de planejamento. O cálculo do VPL se dá segundo a equação a seguir:

$$VPL = \left[ \sum_{j=0}^n R_j (1+i)^{-j} \right] - \left[ \sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j} \right]$$

em que:  $R_j$  = receita líquida no final do ano ou do período  $j$  considerado;  $C_j$  = custo no final do ano ou do período  $j$  considerado;  $j$  = período (anos);  $i$  = taxa de desconto anual.

O BPE é a parcela periódica, constante, necessária ao pagamento de uma quantia igual ao VPL da opção de investimento em análise ao longo de sua vida útil. O projeto será considerado economicamente viável quanto maior for o valor do BPE (REZENDE e OLIVEIRA, 2008). As diferenças de horizontes de planejamento estão implícitas no critério BPE, dessa forma, é possível comparar projetos com durações diferentes sem a necessidade de se corrigirem os horizontes de planejamento. O BPE é calculado por meio da expressão:

$$BPE = \frac{VPL[(1+i)^t - 1](1+i)^{nt}}{(1+i)^{nt} - 1}$$

em que:  $n$  = duração do projeto (anos);  $t$  = número de períodos de capitalização.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Equações hipsométricas e volumétricas

Os resultados dos ajustes das equações hipsométricas mostraram-se satisfatórios, indicando boa correlação entre a variável dependente altura e as variáveis independentes. Analisando os coeficientes de determinação ajustado ( $r^2_{ajustado}$ ), o erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) (Tabela 3) e a distribuição dos desvios percentuais (Figura 1), observa-se um bom desempenho das equações de altura que incluíram apenas o *Dap* como variável independente.

Tabela 3 - Equações hipsométricas ajustadas paras as idades de 48, 61, 77 e 102 meses

Espaçamento	Idade (meses)	$\beta_0$	$\beta_1$	$r^2_{ajustado}$	$S_{yx}$
3,0 x 0,5	48	3,41026	-4,14489	82,8	0,058
3,0 x 0,5	61	3,62137	-5,63635	85,9	0,091
3,0 x 0,5	77	3,73583	-6,46753	89,2	0,069
3,0 x 0,5	102	3,59329	-5,34249	77,7	0,064
3,0 x 1,0	48	3,42373	-4,38271	86,8	0,034
3,0 x 1,0	61	3,63902	-5,65608	90,7	0,038
3,0 x 1,0	77	3,86747	-7,79192	86,7	0,084
3,0 x 1,0	102	3,68728	-5,81960	74,2	0,061
3,0 x 1,5	48	3,45091	-4,73452	89,4	0,048
3,0 x 1,5	61	3,68590	-5,96817	88,0	0,040
3,0 x 1,5	77	3,79901	-7,18375	91,6	0,041
3,0 x 1,5	102	3,79518	-6,96412	64,8	0,060
3,0 x 2,0	48	3,52331	-5,55193	93,1	0,026
3,0 x 2,0	61	3,65102	-6,00162	77,3	0,058
3,0 x 2,0	77	3,82733	-7,66819	84,5	0,052
3,0 x 2,0	102	3,77526	-6,84578	70,8	0,042
3,0 x 3,0	48	3,51530	-5,46724	61,8	0,030
3,0 x 3,0	61	3,63497	-5,92488	70,4	0,039
3,0 x 3,0	77	3,79602	-7,64503	58,3	0,040
3,0 x 3,0	102	3,67718	-5,47199	57,7	0,033

Nota: todos os coeficientes foram significativos pelo teste  $t$  ( $p < 0,05$ )

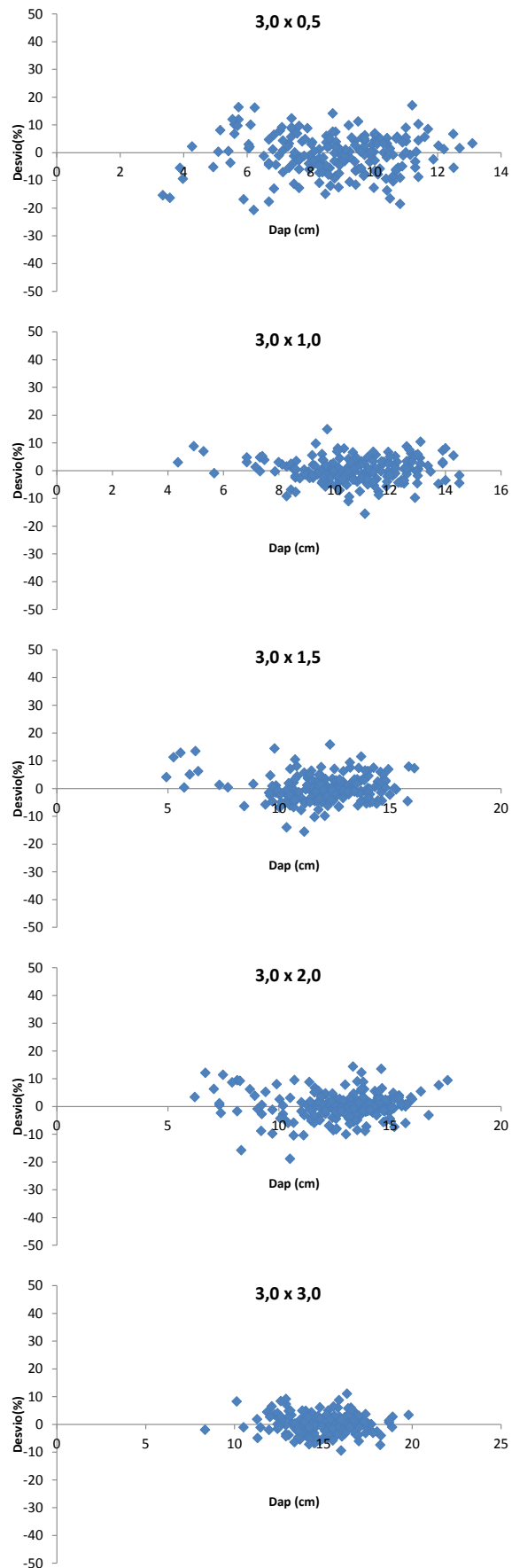


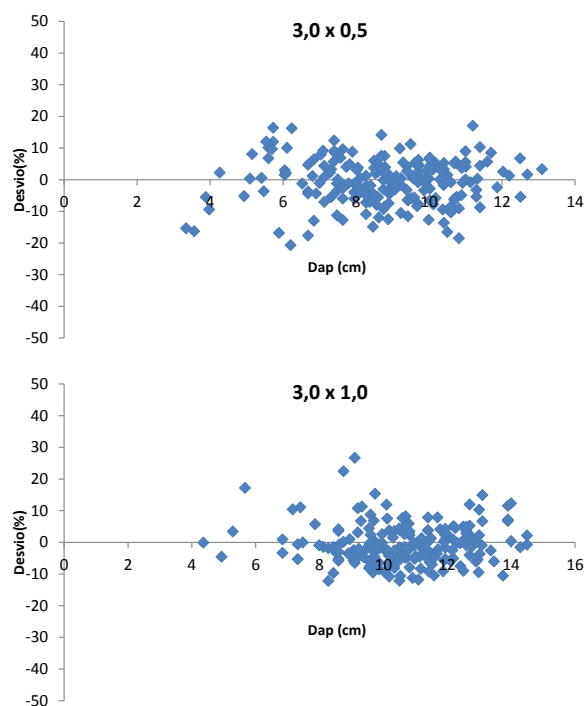
Figura 1 - Distribuição dos desvios percentuais para cada espaçamento, utilizando as equações hipsométricas geradas aos 48, 61, 77 e 102 meses.

As equações de altura que incluíram o *Dap* e a idade como variável independente também resultaram em estimativas precisas, o que pode ser comprovado pelos valores dos coeficientes de determinação ajustado ( $r^2_{ajustado}$ ), do erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) (Tabela 4) e pela distribuição dos desvios percentuais (Figura 2). A partir destas equações foram estimadas as alturas das árvores nas idades de 12, 18, 24 e 85 meses, já que não foi possível ajustar equações de altura específicas para estas idades em função de não terem sido estimadas alturas no campo nessas ocasiões.

Tabela 4 - Equações hipsométricas ajustadas para estimar a altura nas idades de 12, 18, 24 e 85 meses

Espaçamento	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$r^2_{ajustado}$	$S_{yx}$
3,0 x 0,5	2,91565	-5,08349	0,14946	94,1	0,063
3,0 x 1,0	2,63533	-5,57217	0,23205	96,2	0,065
3,0 x 1,5	2,48459	-5,68904	0,27182	96,4	0,046
3,0 x 2,0	2,66749	-6,08412	0,23460	98,5	0,038
3,0 x 3,0	2,29146	-5,74198	0,31515	97,1	0,037

Nota: todos os coeficientes foram significativos pelo teste  $t$  ( $p < 0,05$ )



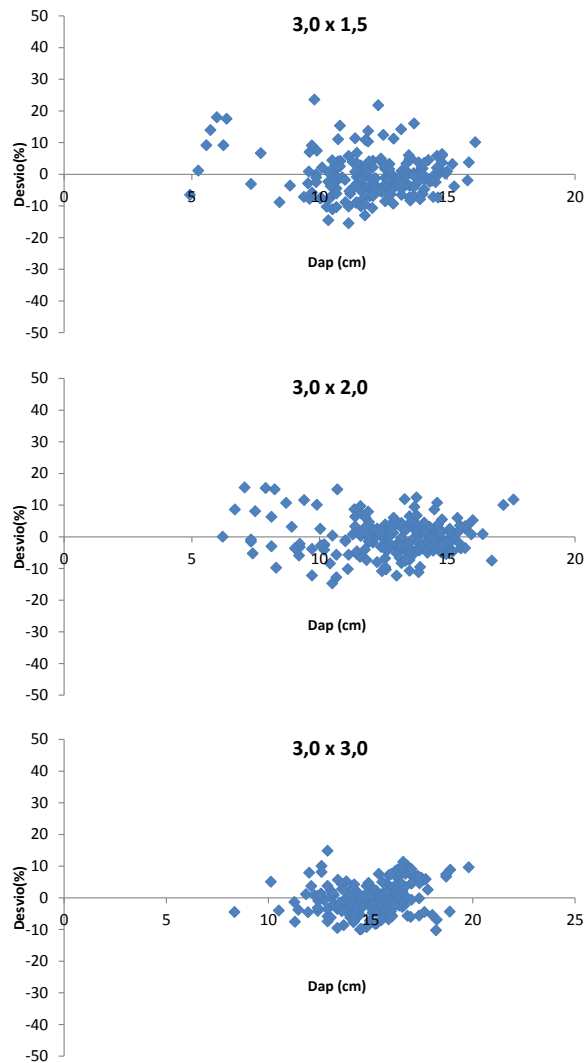


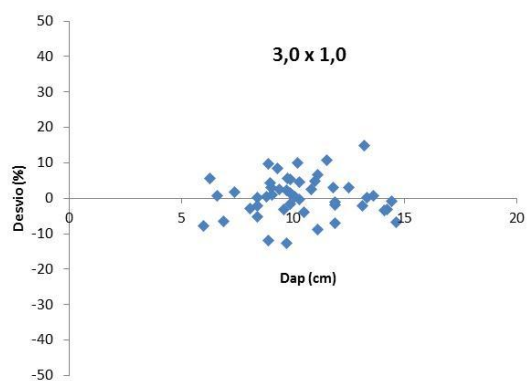
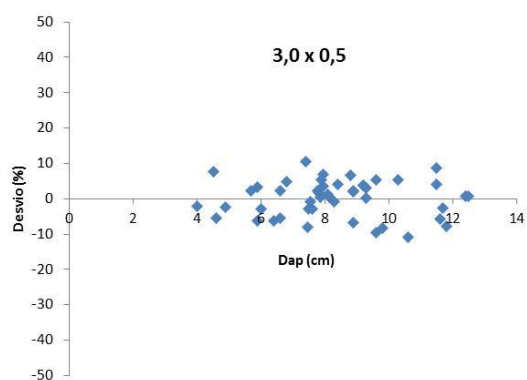
Figura 2 - Desvio percentual para as equações hipsométricas ajustadas em função do *Dap* e da idade em cada espaçamento.

Foi ajustada uma equação volumétrica para cada espaçamento empregando-se dados de cubagem de 245 árvores. De acordo com os valores mostrados na Tabela 5, observa-se que os coeficientes de determinação ajustados e os erros padrão apresentaram valores satisfatórios em todos os ajustes. Os gráficos de distribuição dos desvios percentuais (Figura 3) mostram uma distribuição coerente dos pontos em ambos os lados da linha zero, mostrando que existe uma homogeneidade da variação entre os dados reais e estimados. Estes resultados confirmam um bom ajuste em todas as equações geradas, conferindo precisão nas estimativas volumétricas.

Tabela 5 - Equações de volume total com casca para cada espaçamento

Espaçamento	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$r^2_{ajustado}$	$S_{yx}$
3,0 x 0,5	-9,91651	2,29001	0,68210	0,99	0,049
3,0 x 1,0	-10,87990	1,37897	1,67952	0,99	0,079
3,0 x 1,5	-10,31915	1,92585	1,08607	0,99	0,051
3,0 x 2,0	-10,54991	1,74786	1,30618	0,99	0,045
3,0 x 3,0	-10,68556	1,65333	1,42026	0,98	0,049

Nota: todos os coeficientes foram significativos pelo teste  $t$  ( $p < 0,05$ )





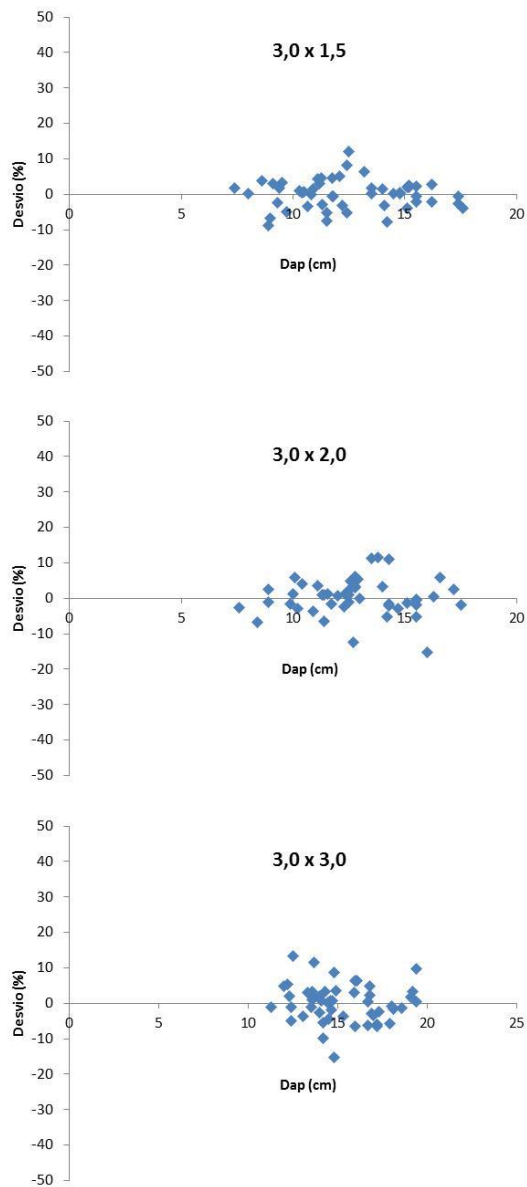


Figura 3 - Distribuição de resíduo de cada equação volumétrica ajustada.

### 3.2. Análise estatística do experimento

Os resumos dos resultados das análises de variância para cada variável e em cada idade são mostrados nas Tabelas 6 a 8. Nestas Tabelas são apresentadas as seguintes estatísticas: grau de liberdade (GL), quadrado médio e o resultado do teste F.

Tabela 6 - Resultado da análise de variância para diâmetro médio ( $q$ ), área basal por hectare ( $B$ ), altura total ( $Ht$ ), volume total por hectare ( $Vcc$ ) e biomassa por hectare ( $Wsc$ ), obtidos aos 7, 12, 18 e 24 meses

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio				
		$q$	$B$	$Ht$	$LnVcc$	$LnWsc$
7 meses						
Tratamento	4	0,1141 <sup>ns</sup>	4,5288**	0,2182 <sup>ns</sup>	2,3503**	2,7972**
Resíduo	8	0,0805	0,1133	0,1196	0,0999	0,1062
12 meses						
Tratamento	4	1,1266**	14,5146**	0,1342 <sup>ns</sup>	0,7371**	0,8230**
Resíduo	8	0,0681	0,1888	0,2018	0,0258	0,0271
18 meses						
Tratamento	4	3,7794**	43,1692**	1,3139**	0,4117**	0,4322**
Resíduo	8	0,0842	0,6950	0,1355	0,0111	0,0113
24 meses						
Tratamento	4	6,3783**	66,5233**	3,1085**	0,3040**	0,3012**
Resíduo	8	0,0879	0,5729	0,1104	0,0062	0,0063

<sup>ns</sup> F não-significativo; \* F significativo a 5% e \*\* F significativo a 1%.

Não ocorreu diferença significativa entre os diâmetros quadráticos e as alturas totais aos sete meses de idade entre os espaçamentos. Também não foi verificado efeito significativo de espaçamento aos 12 meses entre as alturas. Entretanto, para todas as demais situações mostradas na Tabela 6, o teste F identificou que pelo menos dois espaçamentos são estatisticamente diferentes.

Nas idades de 48, 61, 77, 85 e 102 meses, o efeito do espaçamento foi significativo para as variáveis: diâmetro quadrático, área basal, altura total, volume total por hectare e biomassa por hectare, (Tabela 7).

Tabela 7 - Resultado da análise de variância para diâmetro médio ( $q$ ), área basal por hectare ( $B$ ), altura total ( $Ht$ ), volume total por hectare ( $Vcc$ ) e biomassa por hectare ( $Wsc$ ), obtidos aos 48, 61, 77, 85 e 102 meses.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio				
		$q$	$B$	$Ht$	$LnVcc$	$LnWsc$
48 meses						
Tratamento	4	14,6212**	64,1769**	12,1428**	0,0670**	0,0657**
Resíduo	8	0,0559	0,4695	0,1462	0,0015	0,00149
61 meses						
Tratamento	4	17,4941**	73,3477**	23,9212**	0,0406**	0,0349**
Resíduo	8	0,1140	0,9182	0,2435	0,0024	0,0025

77 meses						
Tratamento	4	20,2587**	79,5180**	33,3336**	0,0257**	0,0203*
Resíduo	8	0,1058	1,1057	0,2886	0,0035	0,0036
85 meses						
Tratamento	4	20,7674**	83,6347**	32,1037**	0,0220**	0,0234**
Resíduo	8	0,1074	0,9920	0,1315	0,0028	0,0028
102 meses						
Tratamento	4	21,3915**	93,5097**	35,6964**	0,0290**	0,0242**
Resíduo	8	0,0983	1,0285	0,2858	0,0030	0,0030

<sup>ns</sup> F não-significativo; \* F significativo a 5%; e \*\* F significativo a 1%.

Nas idades de 48, 61, 77, 85 e 102 meses, o efeito do espaçamento foi significativo para as variáveis: diâmetro quadrático, área basal, altura total, volume total por hectare e biomassa por hectare (Tabela 7).

Tabela 8 - Resultado da análise de variância para os dados de densidade básica (*Db*), poder calorífico superior (*PCS*) e porcentagem de sobrevivência obtidos aos 24, 48, 61, 77, 85 e 102 meses

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio		
		<i>Db</i>	<i>PCS</i>	<i>Sobrevivência</i>
24 meses				
Tratamento	4	0,00062*	55.368,4**	-
Resíduo	8	0,00008	2.870,4	-
48 meses				
Tratamento	4	0,00016 <sup>ns</sup>	38.405,7**	8,3841 <sup>ns</sup>
Resíduo	8	0,00011 <sup>ns</sup>	3.488,3	10,1526
61 meses				
Tratamento	4	0,00067 <sup>ns</sup>	5.943,3 <sup>ns</sup>	8,238 <sup>ns</sup>
Resíduo	8	0,00035	9.354,2	10,13930
77 meses				
Tratamento	4	0,00021**	16.674,0**	9,7387 <sup>ns</sup>
Resíduo	8	0,00001	74,7	11,41260
85 meses				
Tratamento	4	0,00032 <sup>ns</sup>	4.082,1**	14,992 <sup>ns</sup>
Resíduo	8	0,00067	74,7	10,1959
102 meses				
Tratamento	4	0,00074*	-	17,5788 <sup>ns</sup>
Resíduo	8	0,00013	-	11,9216

<sup>ns</sup> F não-significativo; \* F significativo a 5%; e \*\* F significativo a 1%.

A sobrevivência do povoamento diz respeito ao percentual de árvores vivas em relação ao total de mudas plantadas inicialmente no campo. Neste trabalho foi analisada a sobrevivência das árvores a partir dos 48 meses de idade. Não ocorreu efeito significativo do espaçamento no índice de sobrevivência em nenhuma das idades observadas (Tabela 8).

A densidade foi analisada a partir dos 24 meses de idade dos povoamentos. O efeito do espaçamento na densidade básica nas idades de 24, 77 e 102 meses foi significativo, nas demais idades não ocorreu diferença estatística (Tabela 8).

De acordo com o teste F, somente aos 61 meses não ocorreu diferença estatística entre o poder calorífico superior dos diferentes espaçamentos, nas demais idades analisadas, observa-se que pelo menos dois espaçamentos diferem-se entre si quanto ao poder calorífico (Tabela 8).

Para identificar as diferenças estatísticas entre as médias das variáveis  $q$ ,  $B$ ,  $Ht$ ,  $LnVcc$ ,  $LnWsc$ ,  $Db$  e  $PCS$ , verificadas pela análise de variância, foi aplicado o teste Tukey a 95% de probabilidade, conforme Figuras 4 a 10.

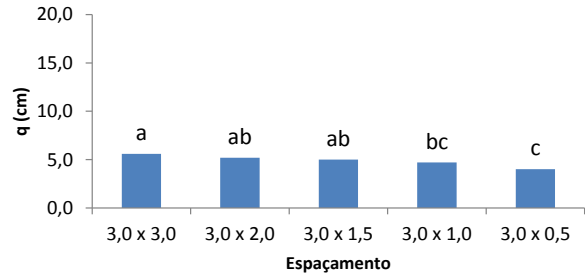
Analisando as médias dos diâmetros de cada espaçamento nas idades de 12 a 102 meses (Figura 4), observa-se a formação de grupos de médias estatisticamente iguais somente nas idades de 12, 18 e 24 meses. Nas demais idades todos os espaçamentos diferiram entre si. Como era esperado, à medida que vai ocorrendo o desenvolvimento da floresta, o efeito do espaçamento vai se tornando mais pronunciado em relação ao diâmetro devido a maior competição nos menores espaçamentos.

A área basal é função do diâmetro quadrático e do número de fustes por hectare, com isso observa-se um aumento da área basal com a redução do espaçamento entre plantas (Figura 5). Em todas as idades analisadas a área basal dos espaçamentos 3,0 x 1,5 m e 3,0 x 2,0 m não diferiram entre si. Entre os espaçamentos mais próximos, somente os espaçamentos 3,0 x 0,5 m e 3,0 x 1,0 m apresentaram área basal diferentes em todas as idades analisadas. Dos 61 aos 85 meses os grupos de médias semelhantes mantiveram-se constantes ao longo do tempo, onde os espaçamentos 3,0 x 1,0 m e 3,0 x 1,5 m não diferiram estatisticamente, também os espaçamentos 3,0 x 1,5 m e 3,0 x 2,0 m foram semelhantes.

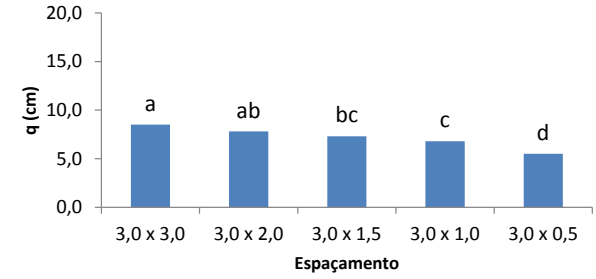
Analisando as comparações entre as médias das alturas totais de cada espaçamento, observa-se que semelhante ao que ocorreu com o diâmetro quadrático, os maiores valores de altura total ocorreram nos maiores espaçamentos (Figura 6). Também é possível observar um efeito cada vez mais acentuado do espaçamento na

altura à medida que aumenta a idade dos povoamentos. De maneira geral, os espaçamentos 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 3,0 m tiveram efeito semelhante sobre a altura nas diferentes idades.

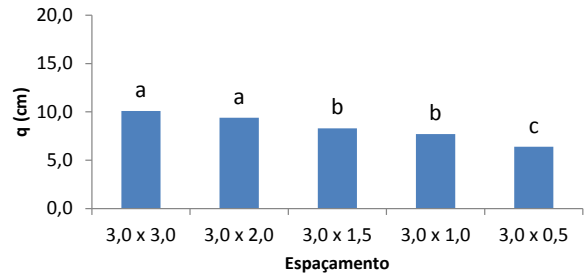
**12 meses**



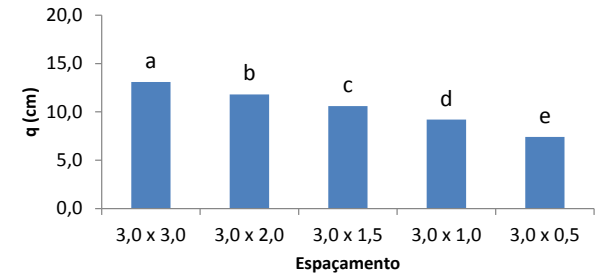
**18 meses**



**24 meses**



**48 meses**



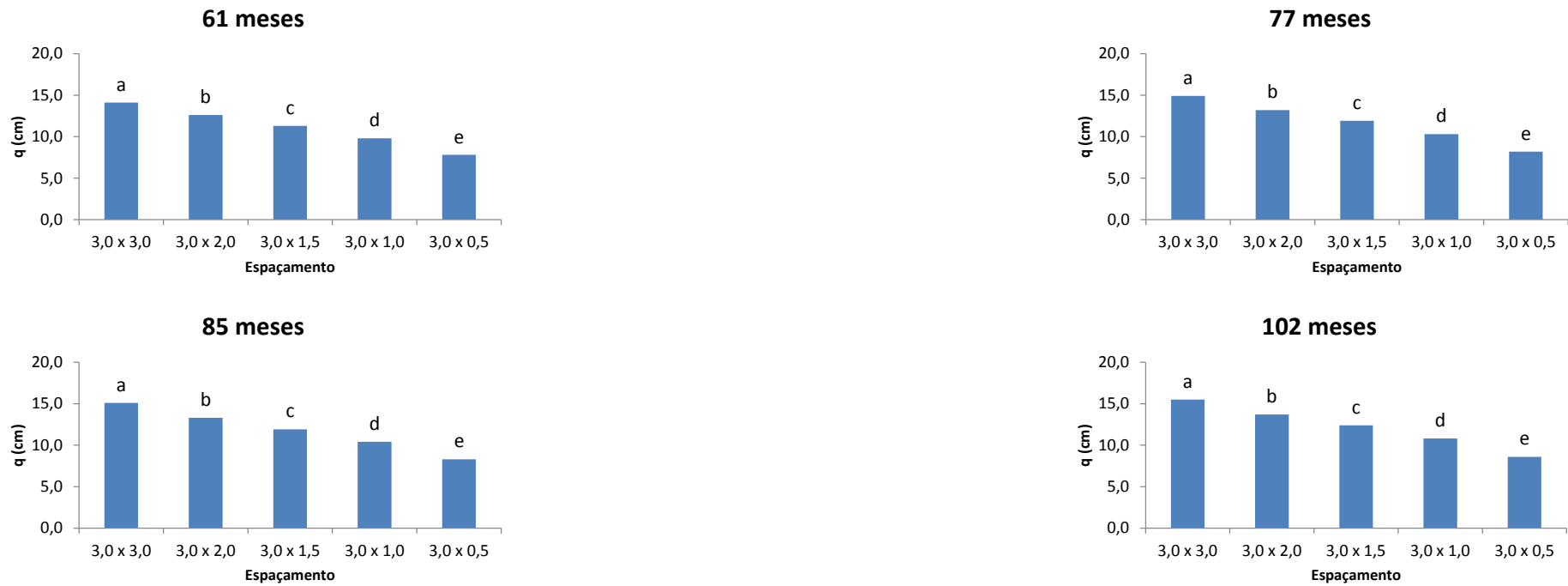
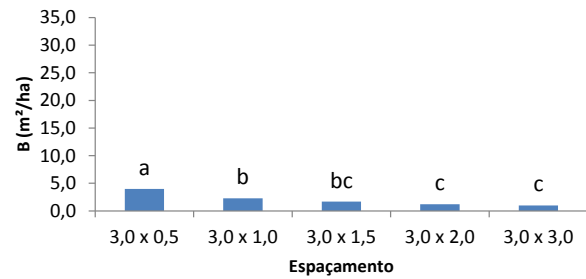
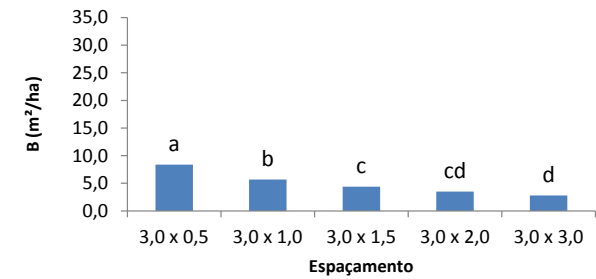


Figura 4 - Comparação entre as médias do diâmetro quadrático ( $q$ ) de cada espaçamento em cada idade observada pelo teste Tukey. Mesmas letras indicam igualdade entre espaçamentos, em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

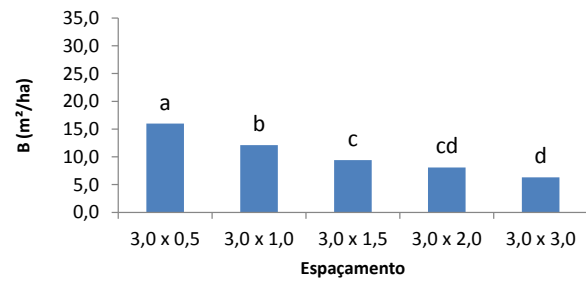
7 meses



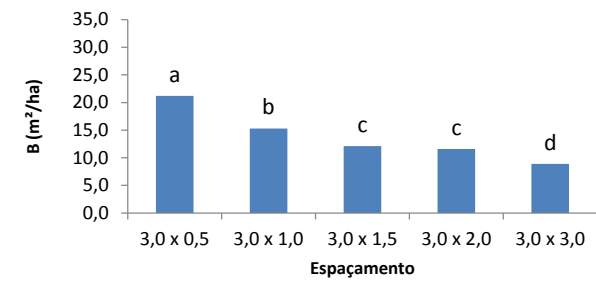
12 meses



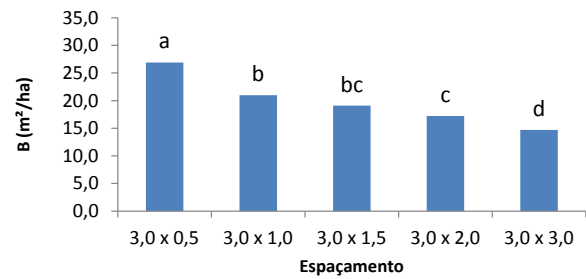
18 meses



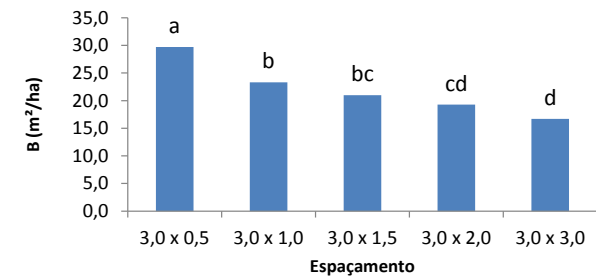
24 meses



48 meses



61 meses





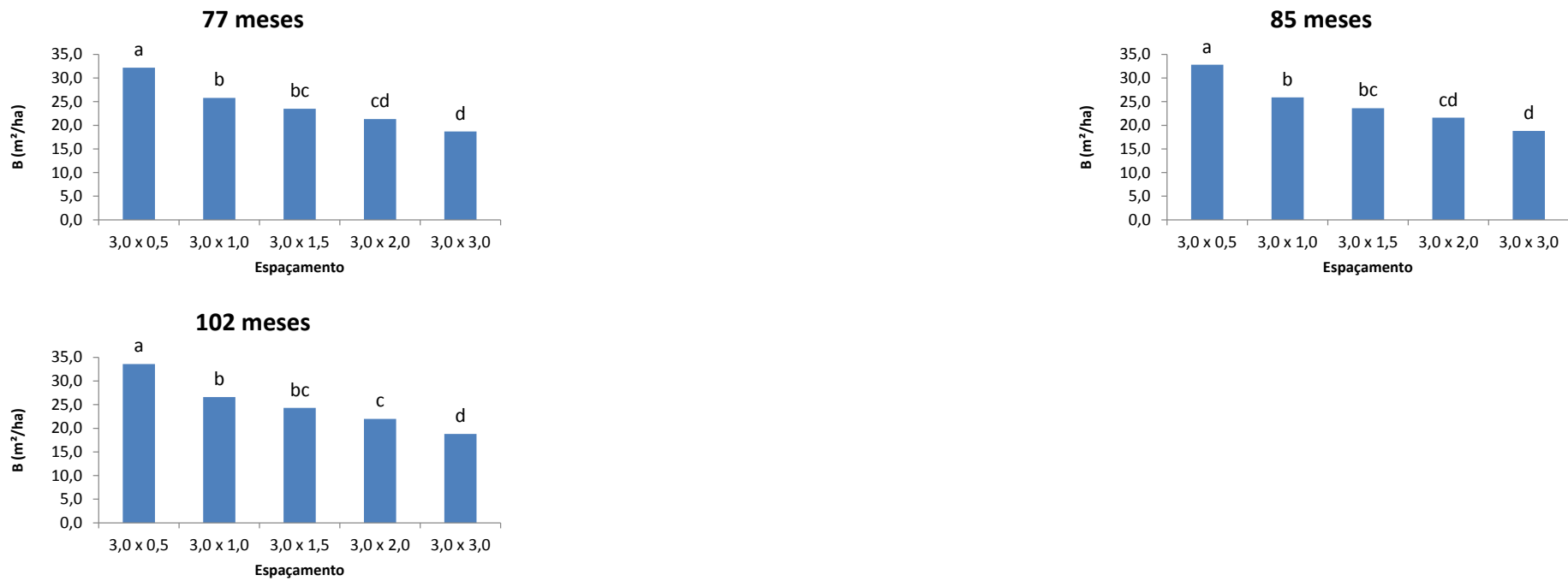
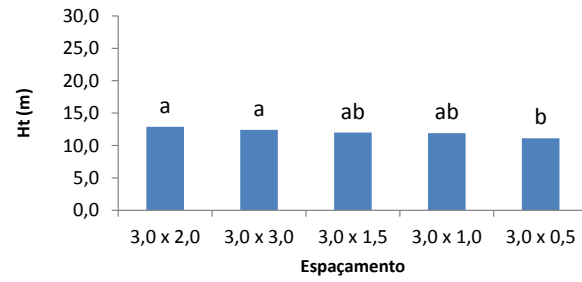
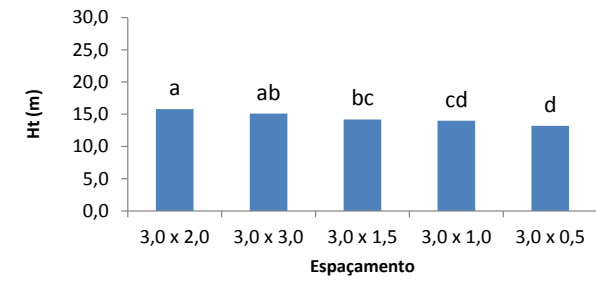


Figura 5 - Comparação entre as médias da área basal ( $B$ ) de cada espaçamento em cada idade observada pelo teste Tukey. Mesmas letras indicam igualdade entre espaçamentos, em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

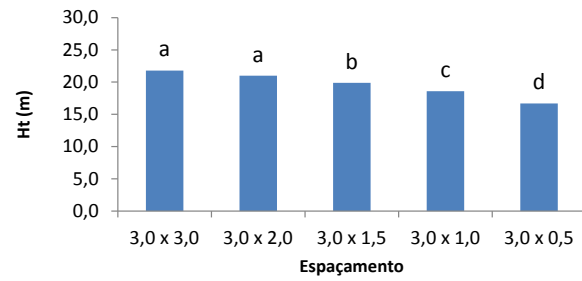
18 meses



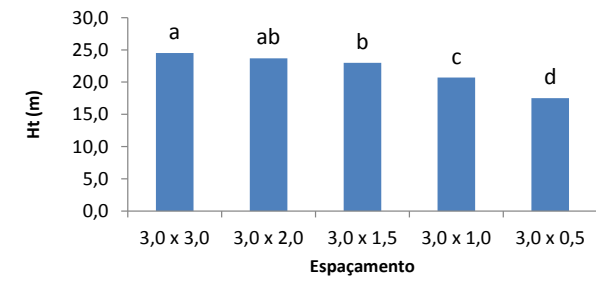
24 meses



48 meses



61 meses



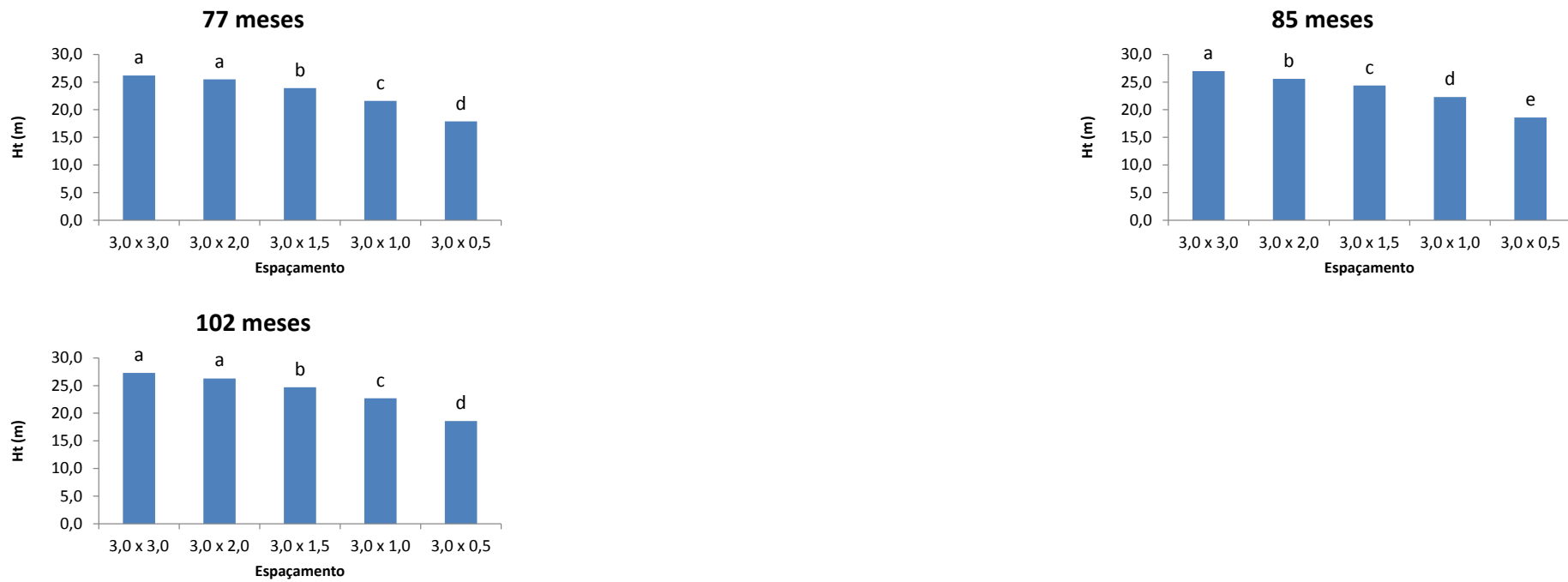
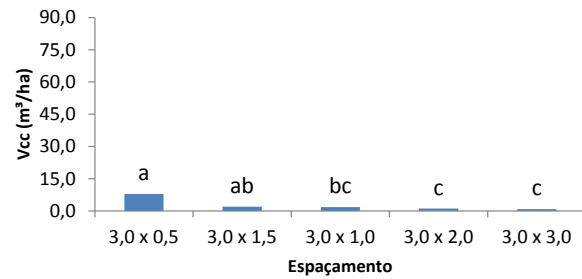


Figura 6 - Comparação entre as médias da altura total ( $Ht$ ) de cada espaçamento em cada idade observada pelo teste Tukey. Mesmas letras indicam igualdade entre espaçamentos, em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

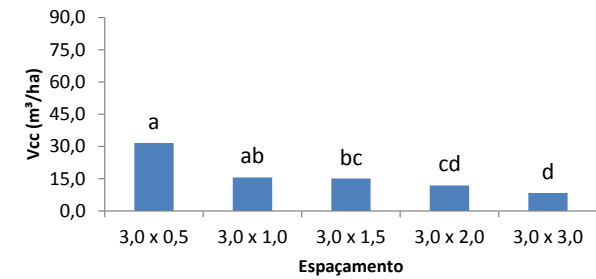
Os resultados da comparação entre as médias do volume por hectare dos diferentes espaçamentos e em cada idade são apresentados na Figura 7. Nos menores espaçamentos são observados os maiores valores de volume por hectare. O efeito dos espaçamentos 3,0 x 1,5 m e 3,0 x 2,0 m sobre o volume por hectare foi semelhante em todas as idades observadas, exceto aos sete meses. Também não se verificou diferença estatística entre os espaçamentos 3,0 x 1,0 m e 3,0 x 1,5 m, exceto aos 24 meses. De maneira geral, o efeito do espaçamento aumentou até a idade de 24 meses, entretanto, a partir dos 48 meses, ocorreu o resultado inverso, o efeito do espaçamento foi reduzindo com o acréscimo da idade dos povoamentos. Aos 102 meses somente o espaçamento 3,0 x 3,0 m foi estatisticamente diferente dos espaçamentos 3,0 x 0,5 m; 3,0 x 1,0 m e 3,0 x 1,5 m.

Verifica-se que a densidade básica média nas idades de 48, 61 e 85 meses não apresentaram diferença significativa independentemente do espaçamento (Figura 8). Analisando o efeito do espaçamento sobre a densidade básica aos 24 meses, observa-se que a densidade do espaçamento 3,0 x 3,0 m foi superior a densidade dos espaçamentos 3,0 x 0,5 m e 3,0 x 1,0 m. A densidade do espaçamento 3,0 x 2,0 m também se mostrou superior a densidade do espaçamento 3,0 x 0,5 m. Aos 77 meses a densidade do espaçamento 3,0 x 3,0 m mostrou-se superior a todas as outras densidades dos outros espaçamentos. As densidades dos espaçamentos 3,0 x 0,5 m e 3,0 x 2,0 m não apresentaram diferença significativa entre si, sendo que o mesmo ocorreu com as densidades dos espaçamentos 3,0 x 1,0 m e 3,0 x 1,5 m. Aos 102 meses a densidade dos espaçamentos 3,0 x 1,5 m e 3,0 x 2,0 m mostraram-se superiores as densidades do espaçamento 3,0 x 0,5 m.

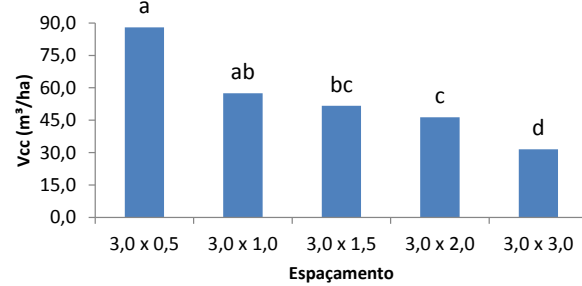
7 meses



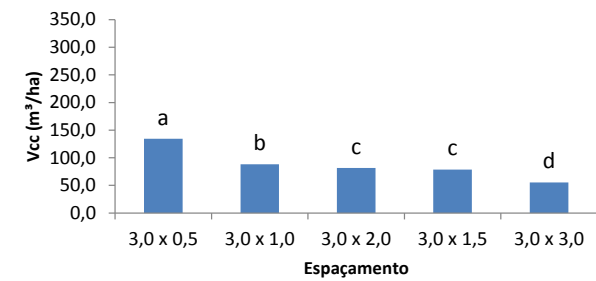
12 meses



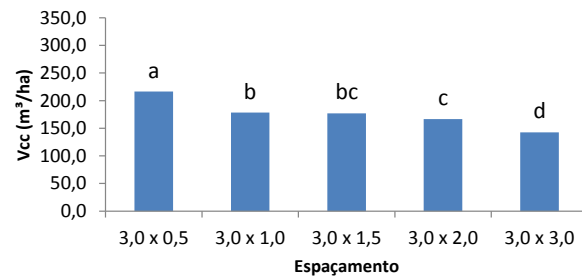
18 meses



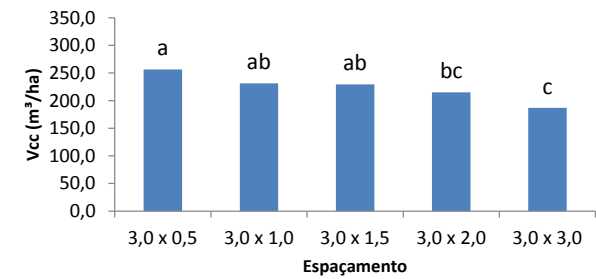
24 meses



48 meses



61 meses



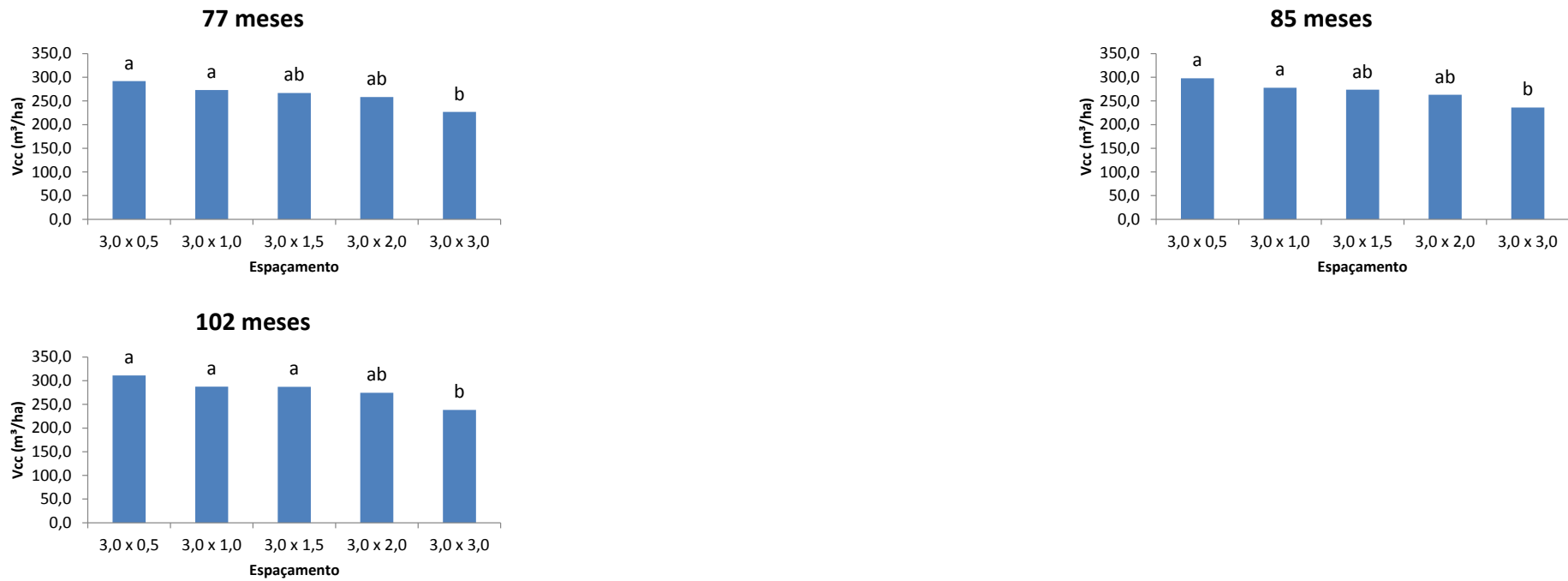


Figura 7 - Comparação entre as médias do volume por hectare ( $V_{cc}$ ) de cada espaçamento em cada idade observada pelo teste Tukey. Mesmas letras indicam igualdade entre espaçamentos, em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

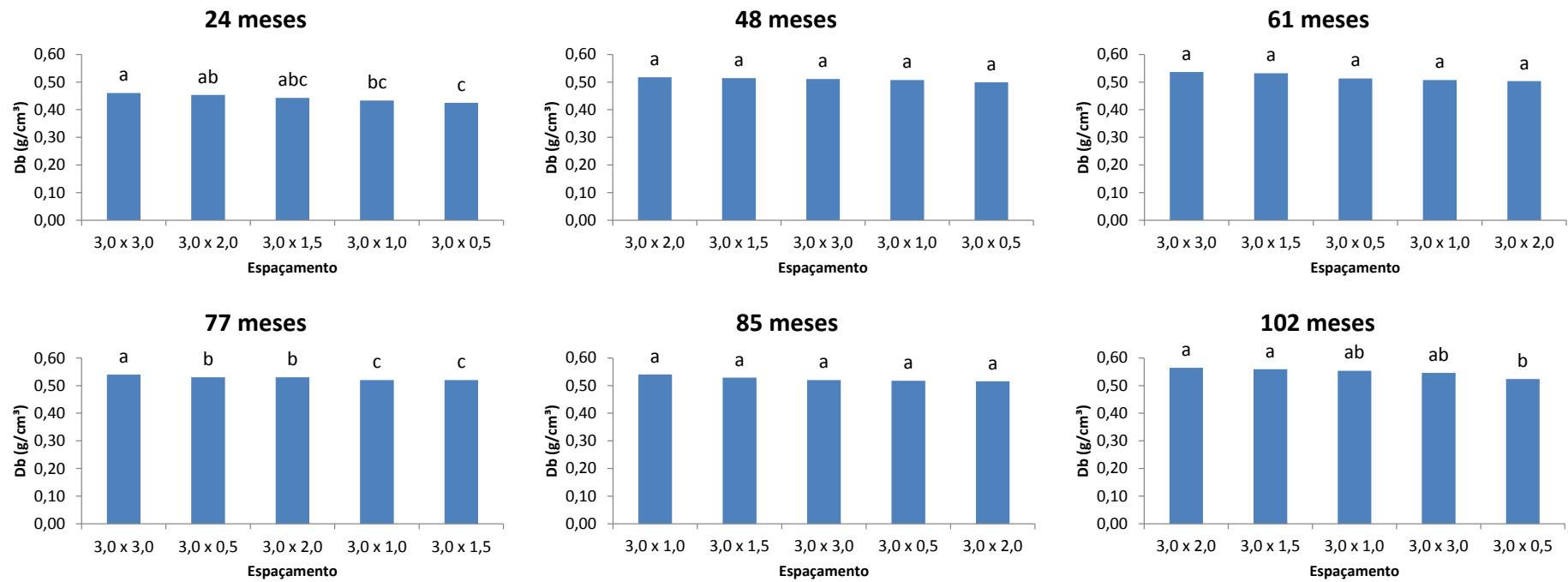


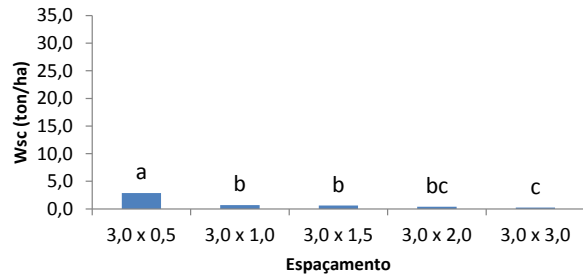
Figura 8 - Comparação entre as médias da densidade básica da madeira ( $Db$ ) de cada espaçamento em cada idade observada pelo teste Tukey. Mesmas letras indicam igualdade entre espaçamentos, em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

O efeito do espaçamento sobre a biomassa foi semelhante aos 7 e 12 meses, e também dos 18 aos 48 meses de idade dos povoamentos (Figura 9). Até aos 48 meses a biomassa do espaçamento 3,0 x 0,5 m mostrou-se superior aos valores dos demais espaçamentos. Em todas as idades analisadas os espaçamentos 3,0 x 1,0 m; 3,0 x 1,5 m e 3,0 x 2,0 m não apresentaram diferença significativa entre si. Aos 102 meses somente o espaçamento 3,0 x 3,0 m apresentou o valor da biomassa significativamente diferente dos demais.

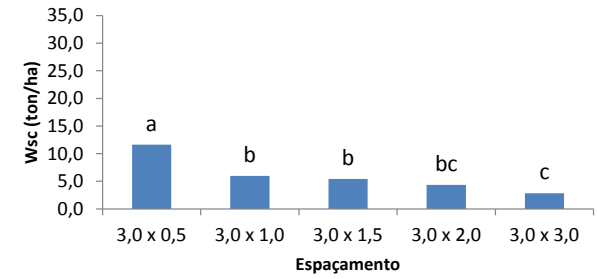
Verifica-se que o espaçamento entre as árvores não afetou o poder calorífico na idade de 61 meses (Figura 10). Aos 24 meses o poder calorífico do espaçamento 3,0 x 2,0 m foi inferior ao poder calorífico dos demais espaçamentos. Nesta idade, também não ocorreu diferença estatística entre os espaçamentos 3,0 x 0,5 m; 3,0 x 1,5 m e 3,0 x 3,0 m; o mesmo acontecendo com os espaçamentos 3,0 x 1,0 m e 3,0 x 3,0 m. Aos 48 meses o poder calorífico do espaçamento 3,0 x 0,5 m foi inferior ao poder calorífico dos espaçamentos 3,0 x 1,5 m; 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 3,0 m. Aos 77 meses o poder calorífico do espaçamento 3,0 x 1,0 m mostrou-se inferior ao poder calorífico dos demais espaçamentos, entretanto o poder calorífico dos espaçamentos 3,0 x 0,5 m e 3,0 x 1,5 m e dos espaçamentos 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 3,0 m não apresentaram diferença significativa. Na idade 85 meses o poder calorífico do espaçamento 3,0 x 1,5 m apresentou-se inferior ao poder calorífico dos demais espaçamentos, contudo, o poder calorífico dos espaçamentos 3,0 x 0,5 m e 3,0 x 3,0 m e dos espaçamentos 3,0 x 1,0 m e 3,0 x 2,0 m não apresentaram diferença estatística entre si.



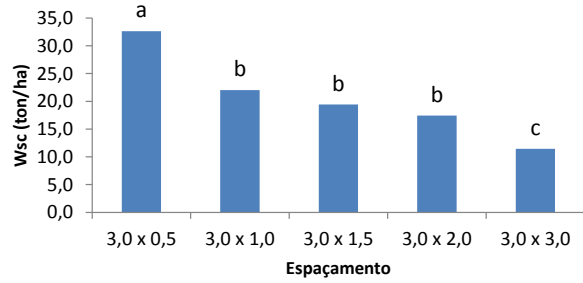
**7 meses**



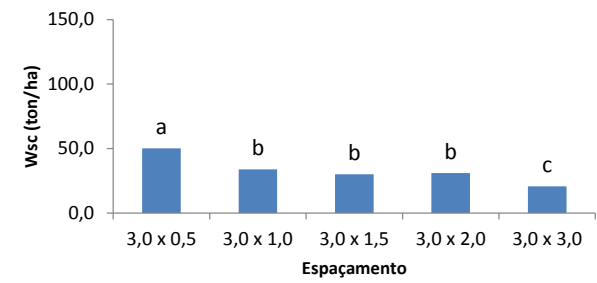
**12 meses**



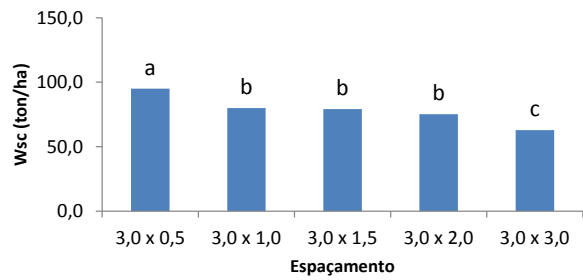
**18 meses**



**24 meses**



**48 meses**



**61 meses**

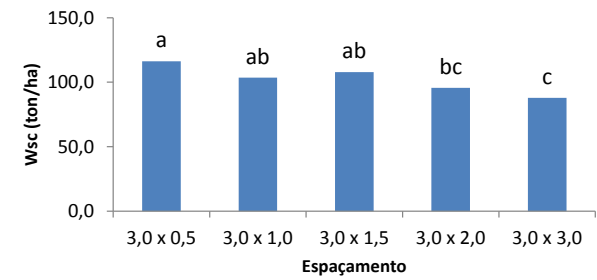




Figura 9 - Comparação entre as médias da biomassa por hectare ( $W_{sc}$ ) de cada espaçamento em cada idade observada pelo teste Tukey. Mesmas letras indicam igualdade entre espaçamentos, em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

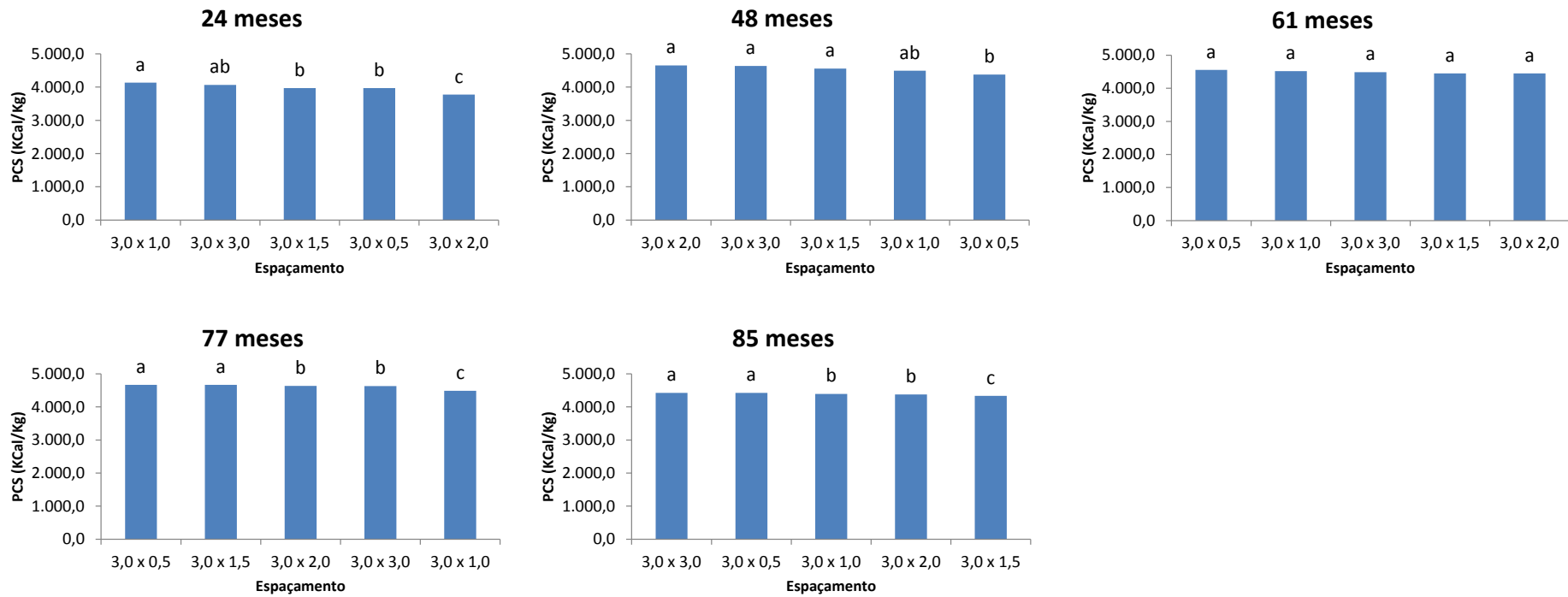


Figura 10 - Comparação entre as médias do poder calorífico superior (*PCS*) de cada espaçamento em cada idade observada pelo teste Tukey. Mesmas letras indicam igualdade entre espaçamentos, em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

### 3.3. Efeito da idade e do espaçamento sobre variáveis de povoamento

Para verificar o efeito da idade e do espaçamento sobre as variáveis estudadas, foi ajustada uma equação de regressão em função da idade para cada variável. Foram testados diferentes modelos de regressão, sendo a função sigmoideal MMF (MORGAN *et al.*, 1975) selecionada devido ao seu melhor ajuste aos dados:

$$Y = \frac{\beta_0\beta_1 + \beta_2 idade^{\beta_3}}{\beta_1 + idade^{\beta_3}} + \varepsilon$$

Conforme Campos e Leite (2009), a função MMF tem propriedades estatísticas desejáveis em estudos de crescimento e produção e parâmetros biologicamente interpretáveis. As equações e as estatísticas de cada ajuste são apresentadas na Tabela 12 (Anexo).

As Figuras 11 a 15 mostram o comportamento do diâmetro quadrático, da área basal, da altura total, do volume por hectare e da biomassa por hectare, em função da idade para cada espaçamento estudado. Também é possível observar nestas figuras a eficiência dos ajustes ao comparar os valores observados com a curva ajustada do modelo de regressão.

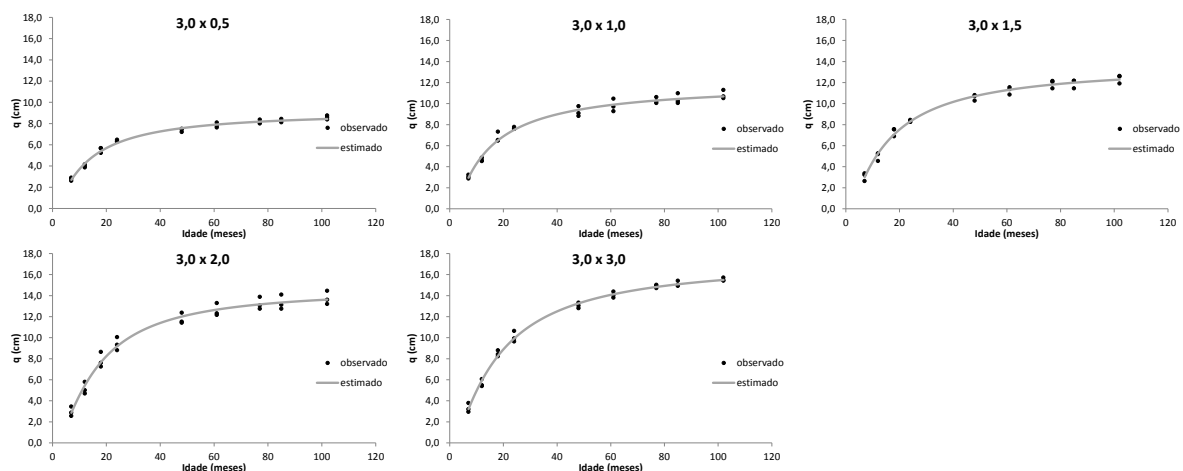


Figura 11 - Curva ajustada do diâmetro quadrático ( $q$ ) em função da idade.

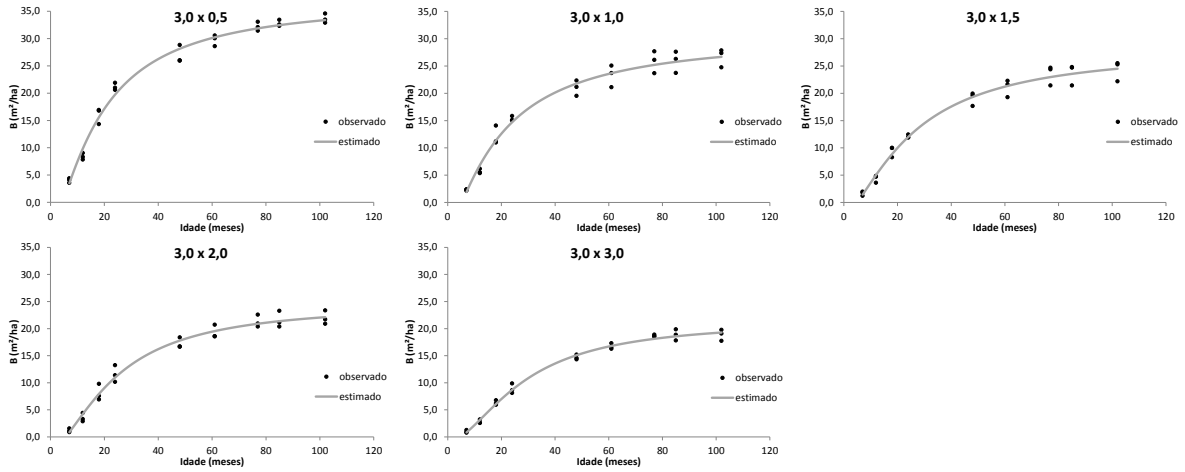


Figura 12 – Curva ajustada da área basal ( $B$ ) em função da idade.

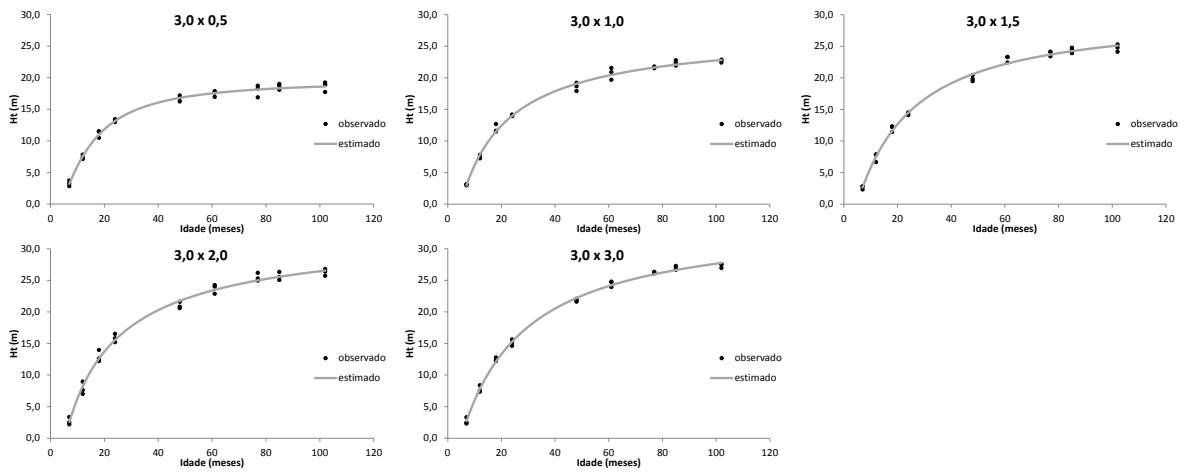


Figura 13 – Curva ajustada da altura total ( $Ht$ ) em função da idade.

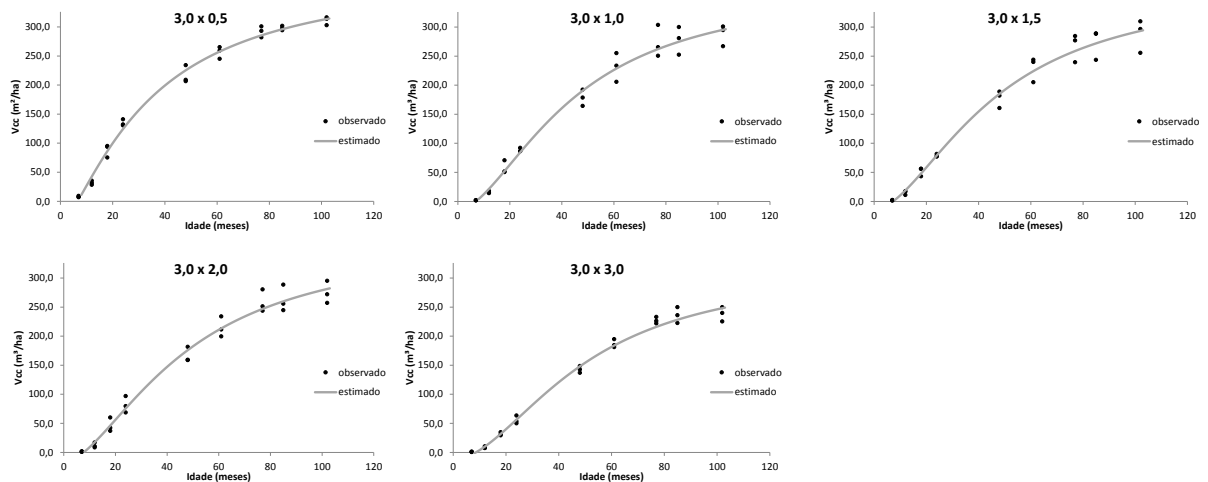


Figura 14 – Curva ajustada do volume por hectare ( $V_{cc}$ ) em função da idade.

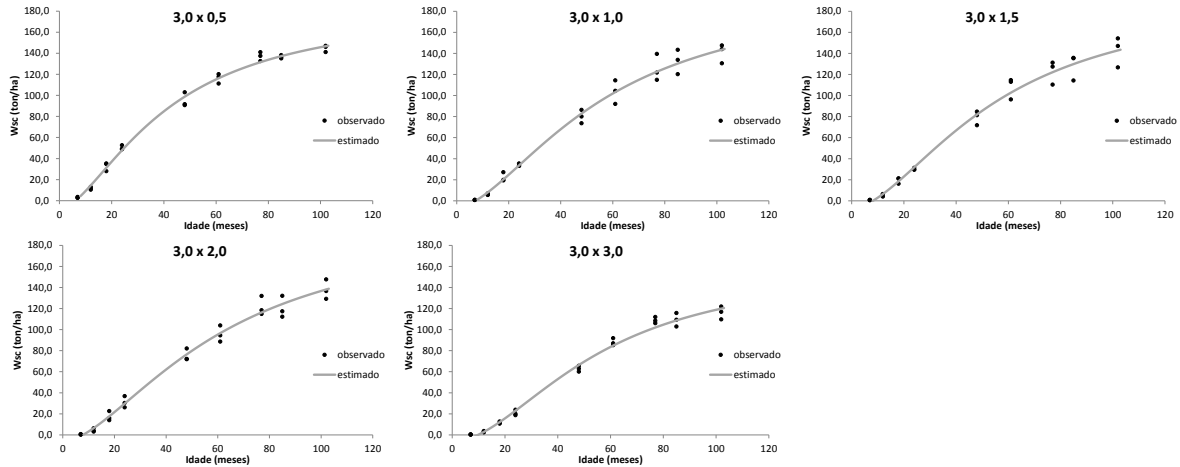


Figura 15 – Curva ajustada da biomassa por hectare ( $W_{sc}$ ) em função da idade.

Para comparar o comportamento do diâmetro médio, da área basal, da altura total e do volume e da biomassa por hectare dos diferentes espaçamentos em relação à idade, foram construídos os gráficos das Figuras 16 a 18.

Em relação ao diâmetro é possível observar uma menor inclinação da curva nos menores espaçamentos, o que demonstra que o processo de estagnação do crescimento em diâmetro ocorreu mais cedo nos menores espaçamentos (Figura 16a). A curva de crescimento em área basal mais acentuada é observada no espaçamento 3,0 x 0,5 m e a curva menos acentuada no espaçamento 3,0 x 3,0 m (Figura 16b).

Observa-se um processo de redução da taxa de crescimento em altura em todos os espaçamentos nas idades mais avançadas (Figura 17a). Este processo é mais aparente no espaçamento 3,0 x 0,5 m, onde o espaçamento teve um efeito expressivo na altura que tendeu a se estabilizar mais cedo. Segundo Woodruff *et al.* (2002), à medida que aumenta a idade do povoamento tende a reduzir a taxa de crescimento e, conseqüentemente, pode ocorrer uma redução no crescimento da altura nos menores espaçamentos.

É possível observar que os espaçamentos que tiveram o comportamento do volume mais próximo foram os espaçamentos 3,0 x 1,0 m, 3,0 x 1,5 m e 3,0 x 2,0 m. Já o comportamento da biomassa nos diferentes espaçamentos foi semelhante ao comportamento do volume (Figura 18).

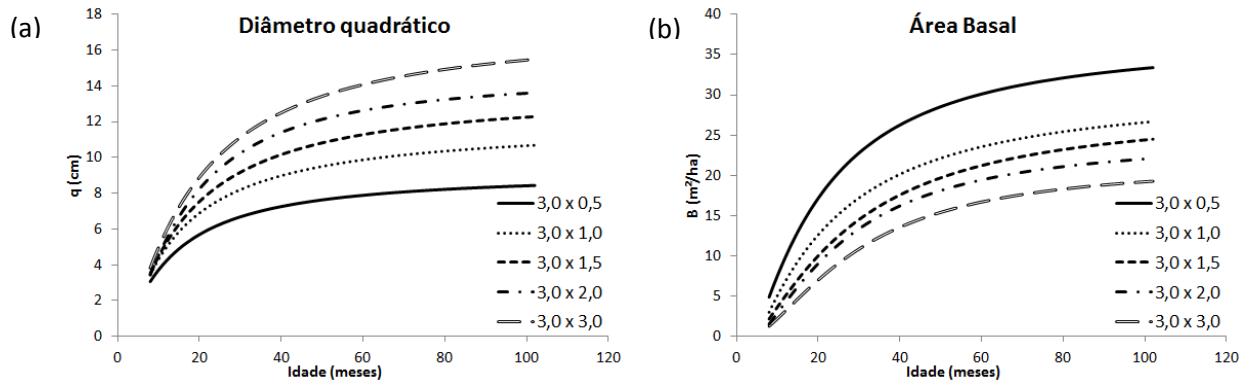


Figura 16 - Comportamento do diâmetro quadrático ( $q$ ) e da área basal ( $B$ ) em relação à idade nos diferentes espaçamentos estudados.

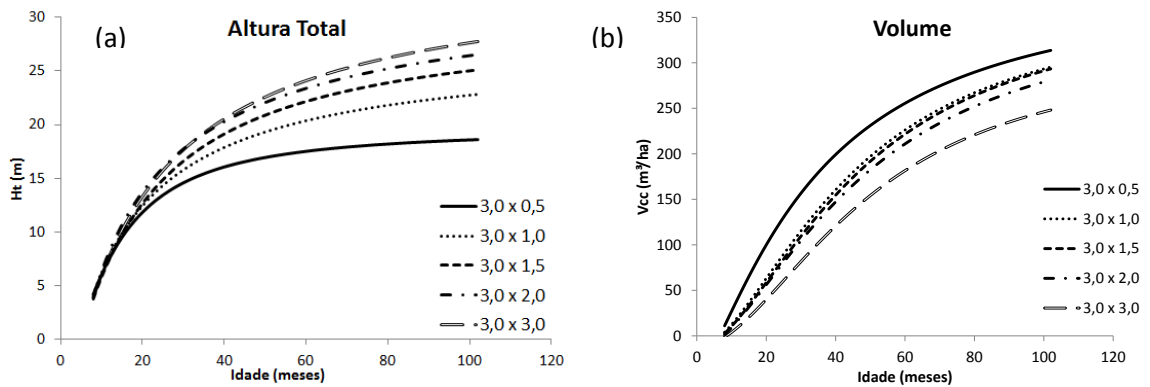


Figura 17 - Comportamento da altura total ( $Ht$ ) e do volume ( $Vcc$ ) em relação à idade nos diferentes espaçamentos estudados.

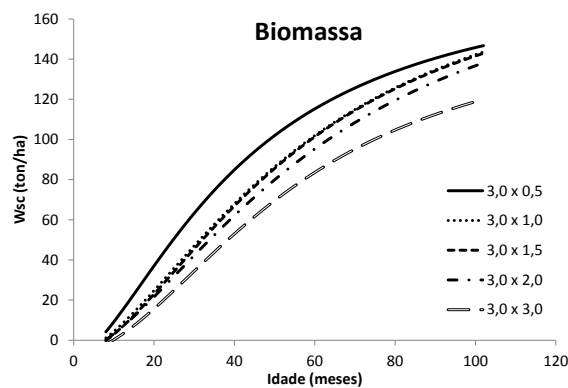


Figura 18 - Comportamento da biomassa ( $Wsc$ ) por hectare em relação à idade nos diferentes espaçamentos estudados.

Para verificar a igualdade estatística entre as curvas de crescimento, ou seja, entre as estimativas geradas pelas equações de cada espaçamento, empregou-se o teste L&O, a 5% de probabilidade. Verifica-se que o teste L&O é um procedimento estatístico rigoroso, uma vez que em todos os casos analisados os valores estimados foram estatisticamente diferentes, ou seja, as curvas do diâmetro médio, da área basal, da altura total, do volume e da biomassa foram estatisticamente diferentes entre os espaçamentos. Isso mostra que a tendência de crescimento das variáveis estudadas é dependente do espaçamento utilizado.

### 3.4. Efeito do espaçamento sobre a rotação técnica e a rotação econômica

A rotação técnica corresponde na produção de máximo volume médio por ano. O incremento médio anual (IMA) máximo ocorre em idades inferiores nos espaçamentos menores (Figura 19). As idades técnicas de corte para os espaçamentos 3,0 x 0,5 m, 3,0 x 1,0 m, 3,0 x 1,5 m, 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 3,0 m foram, respectivamente, 28, 41, 43, 43 e 49 meses.

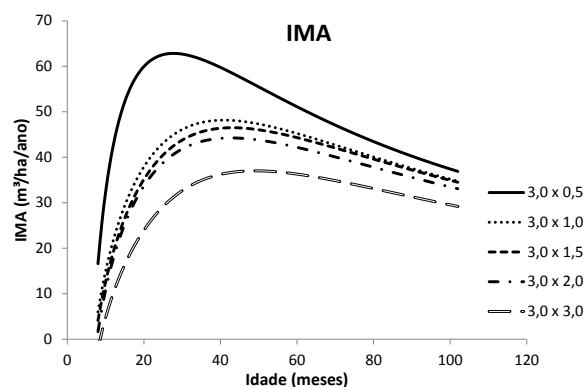


Figura 19 - Comportamento do incremento médio anual (IMA) em relação à idade nos diferentes espaçamentos estudados.

Para identificar a idade econômica de corte dos diferentes espaçamentos foram empregados os critérios valor presente líquido (VPL) e benefício periódico equivalente (BPE). Ao longo do horizonte de planejamento de sete anos foram simuladas diferentes opções de colheita, entretanto, considerando uma única rotação para todos os espaçamentos. Foi utilizada uma taxa de juros de 6% a.a e considerado o valor de R\$50,0/m³ o preço da madeira vendida em pé.

Nos menores espaçamentos ocorreram os maiores custos de implantação (ano zero), devido ao maior número de mudas necessárias para o plantio e replantio, sendo que a variação entre o custo mais elevado (3,0 x 0,5 m) e o menor custo (3,0 x 3,0 m) ficou por volta de



134% (Tabela 9). Com relação aos custos de manutenção, observa-se que os valores mantiveram-se constantes para todos os espaçamentos ao longo do período observado.

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentados, respectivamente, os valores obtidos para os critérios VPL e BPE, onde foi simulada a venda de madeira em pé do terceiro ao sétimo ano em cada espaçamento.

Tabela 9 - Custos envolvidos na implantação e condução de florestas em cada ano do horizonte de planejamento para cada espaçamento

Espaçamento	Ano							
	0	1	2	3	4	5	6	7
	R\$/ha							
3,0 x 0,5	4.562,18	867,15	326,19	44,00	44,00	44,00	44,00	44,00
3,0 x 1,0	3.125,87	867,15	326,19	44,00	44,00	44,00	44,00	44,00
3,0 x 1,5	2.545,10	867,15	326,19	44,00	44,00	44,00	44,00	44,00
3,0 x 2,0	2.249,02	867,15	326,19	44,00	44,00	44,00	44,00	44,00
3,0 x 3,0	1.947,84	867,15	326,19	44,00	44,00	44,00	44,00	44,00

Tabela 10 - Valores obtidos para Valor Presente Líquido (VPL)

Espaçamento	Ano				
	3	4	5	6	7
3,0 x 0,5	2.003,3	3.186,1	3.773,3	<u>3.988,9</u>	3.970,4
3,0 x 1,0	1.750,3	3.238,9	4.113,4	4.549,6	<u>4.690,4</u>
3,0 x 1,5	2.080,8	3.603,0	4.522,7	5.000,4	<u>5.174,9</u>
3,0 x 2,0	2.106,3	3.542,0	4.419,7	4.887,3	<u>5.070,8</u>
3,0 x 3,0	1.346,1	2.736,4	3.622,4	4.113,1	<u>4.322,8</u>

Valores sublinhados indicam máximo VPL encontrado para cada espaçamento.

Tabela 11 - Valores obtidos para Benefício Periódico Equivalente (BPE)

Espaçamento	Ano				
	3	4	5	6	7
3,0 x 0,5	749,5	<u>919,5</u>	895,8	811,2	711,2
3,0 x 1,0	654,8	934,7	<u>976,5</u>	925,2	840,2
3,0 x 1,5	778,5	1.039,8	<u>1.073,7</u>	1.016,9	927,0
3,0 x 2,0	788,0	1.022,2	<u>1.049,2</u>	993,9	908,4
3,0 x 3,0	503,6	789,7	<u>859,9</u>	836,4	774,4

Valores sublinhados indicam máximo BPE encontrado para cada espaçamento.

De acordo com o critério econômico VPL, todas as opções consideradas para a venda de madeira são alternativas viáveis de investimento em qualquer espaçamento (Tabela 10).

Entretanto, para o espaçamento 3,0 x 0,5 m, a melhor opção é vender a madeira no sexto ano. Para os demais espaçamentos a época onde ocorreu o maior retorno financeiro é no sétimo ano. Verifica-se, porém, que segundo este critério econômico o espaçamento 3,0 x 1,5 m foi o mais atrativo, seguido do espaçamento 3,0 x 2,0 m. O espaçamento 3,0 x 0,5 m apresentou-se o menos atraente em relação às demais opções de espaçamento de plantio.

Ao considerar o critério BPE (Tabela 11), observa-se que a melhor alternativa para os espaçamentos 3,0 x 1,0 m; 3,0 x 1,5 m; 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 3,0 m é a venda de madeira no quinto ano. Para o espaçamento 3,0 x 0,5 m o BPE indica que a opção mais atrativa é venda no quarto ano. Ainda, segundo este critério, o espaçamento 3,0 x 1,5 m apresentou o maior retorno financeiro, seguido dos espaçamentos 3,0 x 2,0 m, e do 3,0 x 1,0 m. O espaçamento 3,0 x 3,0 m mostrou-se como a opção menos atraente.

#### 4. DISCUSSÃO

O diâmetro médio é uma variável importante no processo de tomada de decisão sobre colheita da floresta e na definição do uso final da madeira, já que está diretamente relacionado com o volume por árvore. Os maiores valores de diâmetro ocorreram nos espaçamentos com as menores densidades de plantio, em todas as idades analisadas (Figura 4). Com isso, observa-se um maior incremento médio em diâmetro nos maiores espaçamentos. À medida que a idade avança a diferença entre os diâmetros dos diferentes espaçamentos aumenta, isto ocorre em função do aumento mais acentuado da competição entre árvores nos menores espaçamentos. Esse acréscimo do diâmetro médio com a redução da densidade de plantio em diferentes idades também foi observado em diversos estudos como, por exemplo, Couto *et al.* (1977) que analisaram árvores de *Eucalyptus urophylla* e Leite *et al.* (1997) que estudaram *Eucalyptus grandis*, em sete densidades de plantio. Para Oliveira Neto (1996) o crescimento em diâmetro tende a apresentar uma taxa constante de crescimento com o aumento da área útil por planta.

Segundo Smith (1962), algumas funções fisiológicas são mais críticas à sobrevivência da árvore que outras, parecendo haver uma escala prioritária quanto ao consumo de produtos da fotossíntese. O crescimento em diâmetro não parece ter um valor imediato para a sobrevivência da árvore, no sentido de que possa comandar alta prioridade no

consumo de produtos da fotossíntese. Por esta razão, ele é prontamente controlável pelo espaçamento.

A área basal por hectare apresentou comportamento inverso ao diâmetro médio em relação ao crescimento nos diferentes espaçamentos e idades (Figura 5). Os maiores valores de área basal foram observados nos menores espaçamentos. Campos *et al.* (1990) também verificaram um aumento da área basal com a redução da densidade de plantio ao trabalharem com *Eucalyptus grandis*, em dois diferentes espaçamentos. Resultado semelhante foi encontrado por Schneider *et al.* (2000) ao estudarem o crescimento da espécie *Acacia mearnsii* em diferentes espaçamentos. Apesar dos espaçamentos com maiores densidades de plantio apresentarem menores diâmetros, estes possuem um maior número de fustes por unidade de área, o que pode ter maior influência no valor da área basal. Valores altos de área basal podem ser alcançados por dois caminhos: alta densidade, com indivíduos apresentando diâmetros reduzidos; ou baixa densidade de plantio, com indivíduos apresentando diâmetros maiores (GLUFKE *et al.*, 1997).

Semelhante ao diâmetro médio quadrático verifica-se uma tendência de aumento dos valores de altura total nos maiores espaçamentos nas diferentes idades analisadas (Figura 6). Coelho *et al.* (1970) explicam este fato considerando que, se existe correlação entre diâmetro e altura, o espaçamento mais amplo favorece também uma maior altura das árvores, resultando em altura média mais elevada. O maior crescimento em altura com o aumento do espaçamento foi verificado para *Eucalyptus pyrocarpa* nos espaçamentos 2,0 x 1,5 m, 3,0 x 1,5 m e 3,0 x 2,0 m (GORGULHO, *et al.*, 1991). No entanto Leles *et al.* (2001) não identificaram diferenças significativas ao avaliar o efeito do espaçamento no crescimento em altura de indivíduos seminais de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellit*, aos 52 meses de idade.

O volume totalizado por hectare foi superior nos espaçamentos menores em todas as idades analisadas (Figura 7). Apesar dos menores espaçamentos produzirem fustes mais finos, o maior número de indivíduos por unidade de área gera um volume por hectare mais elevado. Este resultado está de acordo com os trabalhos desenvolvidos por Leite *et al.* (1997) e Couto *et al.* (1977), onde estes autores verificaram uma produção volumétrica por hectare superior nos espaçamentos com maior densidade de plantio. Um resultado importante deste trabalho e que tem grande valor do ponto de vista econômico é que os volumes por hectare dos diferentes espaçamentos tenderam a se igualar nas idades mais avançadas (Figura 7). Isso demonstra que com o tempo o volume de madeira em determinado sítio tende a se igualar em diferentes espaçamentos (MELLO *et al.*, 1971; RESENDE *et al.*, 1983; KLEIN & FREITAS,

1988; MORA, 1986; GORGULHO *et al.*, 1991; LISITA *et al.*, 1997; e FERREIRA *et al.*, 1997).

De maneira geral a produção de biomassa por hectare foi menor nos maiores espaçamentos. Isso ocorreu devido a uma menor produção volumétrica nos espaçamentos menores. No período de 77 para 85 meses observa-se uma ligeira redução na biomassa por hectare nos espaçamentos 3,0 x 0,5 m e 3,0 x 2,0 m (Figura 9), o que não é biologicamente esperado. Também, verifica-se uma redução na variação dos valores de biomassa por hectare entre os espaçamentos com o aumento da idade. Este fato pode ser explicado pelo processo de estagnação do crescimento iniciar mais cedo nos espaçamentos com maiores densidades de plantio, já nos espaçamentos maiores a disputa acirrada por fatores de produção ocorre mais tarde, permanecendo o povoamento subestocado por um período de tempo maior. Também nos maiores espaçamentos tendem a ocorrer os maiores valores de densidade básica, o que acaba em conjunto compensando as menores produções volumétricas nestes espaçamentos.

Observar-se que independentemente do espaçamento houve uma tendência de aumento da densidade básica com a idade da floresta (Figura 8). De acordo com Vital *et al.* (1984), normalmente a densidade da madeira tende a aumentar com a idade como consequência do aumento da espessura da parede celular e diminuição da largura das células. Essas mudanças irão dar origem a variações na madeira produzida, em cada idade. Como consequência, a madeira dos primeiros anos de vida é significativamente diferente da madeira nas idades mais avançadas. Moura & Brito (2001) afirmaram que, com o aumento da idade e a consequente redução do ritmo de crescimento, ocorre um maior acúmulo de macromoléculas de celulose nas paredes secundárias das fibras, contribuindo para o aumento da espessura da parede celular, que irá refletir nos valores da densidade da madeira.

De modo geral os maiores valores de densidade básica foram encontrados nos maiores espaçamentos de plantio, o que também foi observado por Lima *et al.* (2009) e Haselein *et al.* (2002), onde verificaram uma tendência no aumento da densidade básica com o aumento do espaçamento. Estes valores mais elevados da densidade nos maiores espaçamentos podem estar relacionados à maior disponibilidade de nutrientes para a árvore, ocasionando em maior volume de copa. Isto resulta em maior produção de fotoassimilados e, consequentemente, contribuiu de forma direta para o aumento na densidade básica da madeira (ROCHA, 2011).

A variável poder calorífico expressa a capacidade de geração de energia de um combustível durante a sua combustão. Deste modo, para o cálculo da quantidade de energia estocada na madeira, é necessária a determinação do poder calorífico superior. De maneira

geral se observa uma tendência de acréscimo do poder calorífico com o aumento do espaçamento (Figura 10). Essas diferenças de poder calorífico entre espaçamentos estão relacionadas a alturas das árvores (ROCHA, 2011). Verifica-se que à medida que se aumenta o espaçamento ocorre um acréscimo na altura das árvores. De acordo com Zobel (1984), árvores mais altas têm uma percentagem maior de lenho juvenil, que, de modo geral, possui maior conteúdo de lignina em relação à madeira mais adulta. Também se observou um aumento do poder calorífico da madeira com a idade das árvores. Tal relação também foi observada por Cintra (2009) ao verificar que árvores mais velhas apresentavam maior energia por unidade de massa. Esse aumento do poder calorífico pode estar relacionado a variações na constituição química da madeira com a idade como, por exemplo, teores de extrativos e lignina que afetam diretamente o poder calorífico da madeira.

Ocorreu pouca variação entre a porcentagem de sobrevivência entre os espaçamentos analisados em cada idade observada. Também não se verificou qualquer tendência da sobrevivência em função do espaçamento. Este mesmo resultado foi observado por Schönau (1974) ao trabalhar com diferentes densidades de plantio. Com o avanço da idade percebe-se uma redução da sobrevivência em todos os espaçamentos, principalmente na idade de 102 meses, onde a maior competição por fatores de produção acarretou um maior número de árvores mortas. Entretanto, o processo de decrepitude ou competição intraespecífica mais grave não iniciou até a idade de 102 meses.

A rotação técnica e a rotação econômica ocorreram mais cedo nos plantios com menor espaçamento quando comparados aos plantios com os maiores espaçamentos (Figura 19 e Tabelas 10 e 11). Isto comprova que a densidade de plantio influencia, substancialmente, na estagnação do crescimento, ou seja, os menores espaçamentos resultam em maior competição entre as plantas por água, luz e nutrientes. A rotação econômica ocorre mais cedo nos espaçamentos menores devido ao fato da manutenção de uma floresta com o crescimento estagnado não ser economicamente lucrativa. Em todos os espaçamentos a idade técnica de corte foi inferior à idade econômica de corte. Isto ocorre devido ao fato da rotação econômica depender, além do crescimento volumétrico de outras variáveis como custo de implantação, preço por unidade de volume e taxa de juros. O aumento da taxa de juros eleva o custo do capital, onerando o empreendimento com o passar do tempo, desta forma reduzindo a rotação econômica. Considerando o cenário analisado, a melhor opção de investimento foi o emprego do espaçamento 3,0 x 1,5 seguido do 3,0 x 2,0 para a venda de madeira em pé. Este resultado é função, principalmente, dos custos de implantação e das produtividades alcançadas para estes espaçamentos.

É imprescindível que a escolha do espaçamento ideal para um determinado material genético considere diversos fatores como, por exemplo, o sistema de mecanização das atividades florestais, a dinâmica de crescimento da floresta e a sustentabilidade da produção de um determinado local. Também, é necessário analisar o efeito do espaçamento sobre a produtividade do local, em longo prazo. Os espaçamentos reduzidos, apesar de apresentarem maior produção de volume total e idade de corte menor, podem comprometer a produtividade do local em longo prazo, pela exportação de nutrientes imobilizados na madeira. Por outro lado, a liberação de nutrientes imobilizados no *litter* é lenta, sendo necessário um tempo maior de permanência deste material no campo para que ocorra a sua decomposição e liberação de nutrientes para o solo (BALLONI, 1983).

## 5. CONCLUSÕES

- O espaçamento e a idade influenciaram significativamente nos valores de diâmetro médio, de altura total, de área basal por hectare, de volume total de fuste por hectare com casca, de biomassa de fuste por hectare, densidade básica da madeira e poder calorífico superior.
- O crescimento em volume por hectare, em biomassa por hectare e em área basal por hectare apresentou relação direta com a densidade de plantio, sendo os maiores valores obtidos nos menores espaçamentos. Por outro lado, os maiores valores de diâmetro médio e de altura total foram obtidos nos maiores espaçamentos.
- A densidade básica tende a aumentar com o espaçamento e com a idade das árvores. O poder calorífico tende a elevar-se com a idade e com o espaçamento de plantio.
- Os espaçamentos estudados não tiveram influência na porcentagem de sobrevivência das árvores, indicando que o processo de decrepitude ou competição intraespecífica mais grave não iniciou até a idade de 102 meses.
- A rotação técnica e a rotação econômica ocorreram mais cedo nos plantios com espaçamento menores. Para todos os espaçamentos a idade técnica de corte foi inferior à idade econômica de corte.
- O espaçamento 3,0 x 1,5 mostrou-se como a opção mais atrativa segundo os critérios VPL e BPE, considerando a venda de madeira em pé.

## 6. REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2008. 236p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard method for chemical analysis of charcoal**. Philadelphia: 1982. 1042 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, **NBR 8633**. Brasília, 1983. n. p.
- BALLONI, E. A. A influência do espaçamento de plantio na produtividade florestal. **Silvicultura**, v.8, n.31, p.588-592, 1983.
- BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização**. Santa Maria, RS: UFSM, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, 2000. 126p.
- BRASIL – Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional**. Brasília: MME, 2011, 266 p.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: Perguntas e respostas**. 3.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009. 548p.
- CAMPOS, J.C.; LEITE, H.G.; SOUZA, R.N. *et al.* Relações entre espaçamento, volume e peso de madeira em plantações de eucalipto. **Revista Árvore**, v.14, n.2, p.119-133, 1990.
- CASTRO, R.V.O.; LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; SOARES, C.P.B.; JÚNIOR, C.A.A.; CASTRO, A.F.N.; CRUZ, J.P.; SANTOS, F.L.; SOUZA, C.C. Avaliação econômica de um povoamento de eucalipto desbastado e destinado a multiprodutos da madeira, **Revista Scientia Forestalis**, v.39, n.91, p.351-357, 2011.
- COELHO, A.S.R.; MELLO, H.A.; SIMÕES, J.M. Comportamento de espécies de eucaliptos face o espaçamento. Piracicaba: **IPEF**, n.1, p.29-55, 1970.
- COUTO, L.; MÜLLER, M.D.; DIAS, A. N. FILHO, A.A. T.; FONSECA, E.M.B.; CORRÊA, M. R. **Espaçamentos de plantio de espécies de rápido crescimento para dendroenergia**. Belo Horizonte, MG: Companhia Energética de Minas Gerais, 2002. 66 p.
- COUTO, L. **Influência do espaçamento no crescimento do *Eucalyptus urophylla* de origem híbrida, cultivado na região de Coronel Fabriciano, Minas Gerais**. Viçosa, MG: UFV, 1977. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1977. 45p.
- COUTO, L.; FONSECA, E.M.B.; MÜLLER, M.D. **O estado da arte das plantações de florestas de rápido crescimento para produção de biomassa para energia em Minas Gerais: aspectos técnicos, econômicos sociais e ambientais**. Belo Horizonte: CEMIG, 2000. 44p.
- CINTRA, T. C. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. 2009. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) –Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz, Piracicaba. 2009.85 p.

- FERREIRA, G.W.; GONZAGA, J.V.; FOELKEL, C.E.B.; ASSIS, T.F.; RATNIEKS, E.; SILVA, M.C.M. Qualidade da celulose Kraft-antraquinona de *Eucalyptus dunnii* plantado em cinco espaçamentos em relação ao *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **Ciência Florestal**, v.7, n.1, p.41-63, 1997.
- GLUFKE, C., FINGER, C.A.G., SCHENEIDER, P.R. Crescimento de *Pinus elliottii* sob diferentes intensidades de desbaste. **Ciência Florestal**, v.7, n.1, p.11-26, 1997.
- GOMES, F. G.; MAESTRI, R.; SANQUETTA, C. R. Avaliação da produção em volume total e sortimento em povoamentos de *Pinus Taeda* L. Submetidos a diferentes condições de espaçamento inicial e sítio. **Ciência Florestal**, v.7, n.1, p.101-126, 1997.
- GORGULHO, E.P.; RAMALHO, M.P.; SOARES, A.R. Avaliação de progênies de *Eucalyptus pyrocarpa* L. Johnson & Blaxel, em diferentes espaçamentos de plantio. **Revista Árvore**, v.15, n.3, p. 207-216, 1991.
- GUARDABASSI, P.M. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento**. 2006. Dissertação ((Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. 126 p.
- HARRINGTON, T.B.; HARRINGTON, C. A.; DEBELL, D.S. Effects of planting spacing and site quality on 25-year growth and mortality relationships of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*). **Forest Ecology and Management**, v.258, p.18–25, 2009.
- HASELEIN, C.R.; BERGER, R.; GOULART, M. Propriedades de flexão estática da madeira e umidade e a 12% de umidade de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob efeito do espaçamento e da adubação. **Ciência Florestal**, v.12, n.2, p.147-152, 2002.
- KLEIN, J.E.M., FREITAS, A.J.P. Influência do espaçamento na produção de *Eucalyptus saligna* Smith. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL, 6., 1988, Nova Prata. **Anais...** Nova Prata, 1988, p.479-492.
- LADERIA, B.C. **Crescimento, produção e eficiência nutricional de *Eucalyptus* spp., sob três espaçamentos, em uma sequência de idades**. Viçosa, MG: UFV, 1999. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1999. 132p.
- LEITE, H.G.; OLIVEIRA, F.H.T. Statistical procedure to test the identity of analytical methods. **Communications in Soil Science Plant Analysis**, v.33, n.7/8, p.1105-1118, 2002.
- LEITE, F.P.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; SANS, L.M.; FABRES, A.S. Crescimento de *Eucalyptus grandis* em diferentes densidades populacionais. **Revista Árvore**, v.21, n.3, p.313-321, 1997.
- LELES, P.P.S.; REIS, G.G.; REIS, M.G.F.; MORAIS, E.J. Crescimento, produção e alocação de matéria seca *E.camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região do cerrado, MG. **Scientia Forestalis**, n.59, p.77-87, 2001.
- LISITA, A.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; REGAZZI, A.J.; LELLIS, V.G.S. Efeitos de reespaçamento na produção, no diâmetro médio e na estrutura de povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis*. **Revista Árvore**, v.21, n.4, p.473-482, 1997.



- LIMA, I.L.; MONTEIRO, B.F.S.; LONGUI, E.L. Influência do espaçamento em algumas propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* Linn, **Revista Cerne**, v.15, n.2, p.244-250, 2009.
- MELLO, H.A. Influencia da espécie, do espaçamento e da idade no custo de produção da madeira industrial. **IPEF**, v.2, n.3, p.13-14, 1971.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea Vale do Jequitinhonha**. Diagnóstico do Município de Itamarandiba - MG, 2005.
- MORA, A.L. **Interação com espaçamento e locais em clones de *Eucalyptus* spp. no norte do Estado da Bahia**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1986. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1986. 116 p.
- MOURA, L.F. de; BRITO, J.O. Influência da desrama artificial sobre a densidade básica, a composição química e as características dos traqueídeos da madeira de *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barr. Et Golf. Viçosa – MG: **Revista Árvore**, v.25, n.3, p.369-374, 2001.
- MORGAN, P.H.; MERCER, L.P.; FLODIN, N.W. General model for nutritional responses of higher organisms. **Proc. Nat. Sci.**, v.72, p.4327-4331, 1975.
- MÜLLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG**. 2005. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2005. 94p.
- OLIVEIRA, A.D.; LEITE, A.P.; BOTELHO, S.A.; SCOLFORO, J.R.S. Avaliação econômica da vegetação de cerrado submetida a diferentes regimes de manejo e de povoamento de eucalipto plantado em monocultura, **Revista Cerne**, v.4, n.1, p 034-056, 1998.
- OLIVEIRA NETO, S.N. Biomassa, nutrientes e relações hídricas em *Eucalyptus camaldulensis* em resposta à adubação e ao espaçamento. 1996. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1996. 131p.
- PATIÑO-VALERA, F. **Variação genética em progênies de *Eucalyptus saligna* e sua interação com o espaçamento**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1986. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). 192p.
- PNUD – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Atlas de Desenvolvimento Humano para o Brasil**. 2000 Disponível em: <[www.pnud.org.br/atlas](http://www.pnud.org.br/atlas)> acesso em: 21 fev.2011.
- REZENDE, J.L.P.; PEREIRA, A.R.; OLIVEIRA, A.D. Espaçamento ótimo para produção de madeira. **Revista Árvore**, v.7, n.1, p.30-43, 1983.
- REZENDE, J.L.P.; OLIVEIRA, A.D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2008. 386p.
- ROCHA, M.F.V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 2011. 86p.
- RODRIGUEZ, L.C.E.; BUENO, A.R.S.; RODRIGUES, F. Rotações de eucalipto mais longas: análise volumétrica e econômica. **Scientia Forestalis**, n.51, p.15-28, 1997.

- RIZZO, L.G.P.; PIRES, M.C.; A questão energética: da exaustão do modelo fóssil ao desafio da sustentabilidade. **Revista de Economia e Relações Internacionais**, v.3, n.6, p.88-103, 2005.
- SAUER, I.L.; QUEIROZ, M.S.; MIRAGAYA, J.C.G.; MASCARENHAS, R.C.; JÚNIOR, A. R. Q. Energias renováveis: ações e perspectivas na Petrobras. **Bahia Análise & Dados**, n.1, p.9-22, 2006.
- SCHÖNAU, A.P.G. The effect of planting spacing and pruning on growth, yield and timber density of *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal**, n.88, p.16-23, 1974.
- SCHNEIDER, P.R.; **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: UFSM, 1993. 348 p.
- SCHNEIDER, P.R.; FLEIG, F.D.; FINGER, C.A.G.; KLEIN, J.E.M. Crescimento da Acácia-negra, *Acacia mearnsii* De Wild, em diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, v.10, n.2, p.101-112, 2000.
- SCOLFORO, J.R.S. **Manejo Florestal**. Universidade Federal de Lavras. FAPE. Lavras, 1997, 433p.
- SIMÕES, J.W.; BRANDI, R.M.; MALINOVSKY, J.R. **Formação de florestas com espécies de rápido crescimento**. (Série divulgação PNUD/FAO/IBDF/BRA - 45, 6). Brasília: IBDF/PNUD/FAO, 1976. 74p.
- SILVA, M.L.; JACOVINE, L.A.G.; VALVERDE, S.R. **Economia Florestal**. Viçosa: UFV, 2002, 178p.
- SMITH, D.M., 1962 - **The practice of silviculture**. New York – London: John Wiley & Sons, 578p.
- SOUZA, A.P. Produção de madeira de eucalipto em propriedades rurais no Alto Jequitinhonha – MG. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 2012. 76p.
- TAPPI TECHNICAL DIVISIONS AND COMMITTEES. **TAPPI test methods**. Atlanta, 1998. 46p.
- VITAL, B.R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21p.
- ZOBEL, B.J. The changing quality of the world wood supply. **Wood Science Technology**, n.18, p.1-17, 1984.
- WOODRUFF, D.R.; BOND, B.J.; RITCHIE, G.A.; SCOTT, W. Effects of stand density on the growth of young Douglas-fir trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v.32, n.3, p.420-427, 2002.

## APÊNDICE

Tabela 12 – Equações obtidas em cada tratamento, das variáveis diâmetro quadrático ( $q$ ), área basal ( $B$ ), altura total ( $Ht$ ), volume por hectare ( $Vcc$ ) e biomassa por hectare ( $Wsc$ )

Diâmetro quadrático ( $q$ )						
Espaçamento	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$R_{\hat{y}y}$	$S_{yx}$
3,0 x 0,5	-0,797412	18,380724	9,155976	1,180918	0,9946	0,2197
3,0 x 1,0	-2,643777	12,519866	11,955706	1,054573	0,9902	0,3967
3,0 x 1,5	-1,752010	21,696372	13,674114	1,165175	0,9948	0,3516
3,0 x 2,0	-1,080136	45,516444	14,655000	1,399298	0,9901	0,5680
3,0 x 3,0	-1,617712	31,963346	17,349476	1,228868	0,9974	0,3299
Área basal ( $B$ )						
Espaçamento	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$R_{\hat{y}y}$	$S_{yx}$
3,0 x 0,5	-5,643819	52,412183	37,078781	1,366042	0,9938	1,2643
3,0 x 1,0	-5,798704	44,208154	30,711365	1,270082	0,9876	1,4872
3,0 x 1,5	-2,543155	114,986764	28,112038	1,461136	0,9904	1,2467
3,0 x 2,0	-2,418906	160,079242	24,612488	1,591396	0,9904	1,1584
3,0 x 3,0	-1,023985	326,175436	21,445392	1,734939	0,9958	0,6787
Altura total ( $Ht$ )						
Espaçamento	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$R_{\hat{y}y}$	$S_{yx}$
3,0 x 0,5	-3,759764	41,761021	19,621284	1,477018	0,9957	0,5281
3,0 x 1,0	-11,424753	10,744042	27,425717	0,947602	0,9957	0,5242
3,0 x 1,5	-7,816027	21,052256	29,964986	1,072972	0,9974	0,5967
3,0 x 2,0	-15,419735	9,614836	33,045709	0,892353	0,9975	0,7468
3,0 x 3,0	-8,743656	19,773194	34,556681	1,008394	0,9964	0,4622
Volume por hectare ( $Vcc$ )						
Espaçamento	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$R_{\hat{y}y}$	$S_{yx}$
3,0 x 0,5	394,633132	0,008302	-42,364113	-1,356300	0,9964	10,3403
3,0 x 1,0	369,754000	0,001521	-15,547600	-1,712070	0,9881	16,7961
3,0 x 1,5	370,636740	0,001291	-14,862193	-1,737581	0,9905	16,5661
3,0 x 2,0	363,996414	0,001647	-17,890961	-1,663610	0,9914	15,1495
3,0 x 3,0	316,099082	0,000759	-12,579938	-1,844045	0,9958	9,4594
Biomassa por hectare ( $Wsc$ )						
Espaçamento	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$R_{\hat{y}y}$	$S_{yx}$
3,0 x 0,5	183,011227	0,002561	-8,698430	-1,604690	0,9972	4,3446
3,0 x 1,0	199,671774	0,001247	-6,633982	-1,658720	0,9920	7,3550

---

3,0 x 1,5	195,239131	0,001045	-7,386683	-1,712047	0,9910	7,8397
3,0 x 2,0	200,401518	0,001144	-6,790028	-1,647086	0,9930	6,5924
3,0 x 3,0	160,329784	0,000602	-6,535880	-1,850229	0,9955	4,7897

---