



# GERAÇÃO ENERGÉTICA DE EUCALIPTO DE CURTA ROTAÇÃO<sup>1</sup>

**Stella Vannucci Lemos<sup>2</sup>, Maria Márcia Pereira Sartori<sup>3</sup>, Humberto de Jesus Eufrade Junior<sup>4</sup>, Luiz César Ribas<sup>5</sup> & Saulo Philipe Sebastião Guerra<sup>6</sup>**

**RESUMO:** A participação de fontes renováveis de energia é requisitada com mais frequência devido a crescente preocupação com questões ambientais e o apelo mundial para o desenvolvimento de variados tipos de energias alternativas, resultando na realização de estudos e pesquisas tecnológicas voltados para essa área. Logo, o objetivo deste trabalho foi analisar, a partir de um estudo de caso, variados espaçamentos e diferentes tipos de doses de adubação, visando a implantação de povoamentos florestais de eucalipto de curta rotação e verificando, com isso, a influência dos fatores adubação e espaçamento na geração de madeira para uso energético. Os procedimentos metodológicos utilizados foram a dendrometria das árvores, análise de poder calorífico e a densidade básica média de cada tratamento. Os resultados obtidos provaram que houve influência do espaçamento e da adubação na geração de madeira para energia, destacando-se com maiores volumes totais e poder energético, os tratamentos mais adensados e com maior dose de adubo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bioenergia, poder calorífico, volumetria de florestas energéticas.

## ENERGY GENERATION OF SHORT ROTATION *EUCALYPTUS*

**ABSTRACT:** Renewable sources of energy is required more frequently because of growing concern about environmental issues and the global appeal for the development of various types of alternative energy, resulting in the realization of technological studies and research focused on this area. This study aimed to analyze varying spacing and different types of fertilizer levels, verifying the influence of fertilization and spacing factors in wood for energy generation. The methodological procedures were performing in trees dendrometry, wood calorific value, and average basic density of each treatment. The results proved that there is an influence of spacing and fertilization on wood properties. Denser treatments and higher fertilizer doses showed higher total volumes and energy potential.

**KEYWORDS:** Bioenergy; calorific value; volumetry of energetic forests.

## 1 INTRODUÇÃO

Fontes alternativas renováveis referem-se aos recursos naturais que podem ser aproveitados para geração de energia elétrica, tais como os ventos, a força das marés, a biomassa e a luz solar. Dadas suas características naturais (no sentido da ausência de processos de industrialização, por exemplo), o processo de geração de energia é menos poluente que o das fontes tradicionais (SÃO PAULO, 2012).

A madeira reveste-se de grande importância ao desempenhar o papel de fonte energética. Seu uso tornou-se fonte de energia mais sustentável

(bioenergias), o que a potencializa como alternativa aos combustíveis fósseis (LOPES, 2012).

Segundo Moreira (2011) a biomassa florestal apresenta um forte potencial para geração de energia, com vantagens para a redução da emissão de gases do efeito estufa (fonte de energia limpa). Todavia, para aumentar o potencial de geração de energia de biomassa florestal no país seria necessária a difusão de tecnologias silviculturais, e, conseqüentemente, excluir-se do aspecto convencional usado atualmente.

Do total de 6,6 milhões de hectares de florestas plantadas no Brasil, 76% são de plantios de eucalipto que estão localizados, em sua maioria, na região sudeste do país (ABRAF, 2013).

A maioria das florestas plantadas de eucalipto concentra-se no setor de Papel e Celulose, com 72,5% do total, enquanto que o segmento florestal vinculado aos fins energéticos e/ou industriais de carvão vegetal, detém a segunda maior área plantada desta espécie florestal, com 19,5% (ABRAF, 2013).

<sup>1</sup> Departamento de Economia, Sociologia e Tecnologia - FCA / UNESP. E-mail: svlemos@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal - FCA / UNESP. E-mail: mmmsartori@fca.unesp.br

<sup>3</sup> Departamento de Ciências Florestais - FCA / UNESP. E-mail: hdjejunior@fca.unesp.br

<sup>4</sup> Departamento de Economia, Sociologia e Tecnologia - FCA / UNESP. E-mail: lcribas@fca.unesp.br

<sup>5</sup> Departamento de Economia, Sociologia e Tecnologia - FCA / UNESP. E-mail: ssguerra@fca.unesp.br

Constata-se, com respeito ao eucalipto, e considerando que as espécies florestais tradicionais no país sempre foram manejadas para produção de celulose, que a produção de bioenergia requer sistemas de manejo diferenciados. Assim, espécies florestais tradicionais que são utilizadas para finalidade bioenergética devem ser escolhidas em função de sua capacidade de rebrota, qualidade de biomassa (com baixa demanda por água) e produtividade (BARREIRO; TOMÉ, 2012).

Dada a expressiva participação da biomassa florestal para fins de destinação energética industrial, notadamente no que diz respeito aos povoamentos de Eucalipto visando geração de energia dentro de processos industriais, foi criado o termo “florestas energéticas” (ABRAF, 2013).

O sistema florestal de curta rotação pode ser compreendido como sendo um modelo de produção florestal relacionado a uma cultura intensiva de plantios florestais baseados em talhadia (ou seja, várias colheitas), com vantagem de produzir rendimentos mais rapidamente e em intervalos regulares, de curta duração (MCKENNEY et al., 2014).

*Eucalyptus* spp. é um gênero amplamente usado em florestas de curta rotação devido ao seu rápido crescimento e capacidade de formação de copa, bem como elevada densidade de madeira. As características mais comuns são as elevadas taxas de produção imediatamente após o plantio e a alta eficiência de acumulação de madeira em relação à biomassa total produzida (KNAPIC et al., 2014).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi analisar, a partir de um estudo de caso, a produção de madeira com fins energéticos, a partir dos volumes obtidos de tratamentos florestais de curta rotação sob influência de variados espaçamentos e diferentes tipos de adubação.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área experimental e operações realizadas

O estudo de caso foi realizado numa área experimental de aproximadamente 5 hectares, no município de

Botucatu, estado de São Paulo, localizada em altitude aproximada de 856 m, com coordenadas geográficas de longitude 48°25'63" W e latitude 22°58'45" S.

O solo predominante na área é do tipo Latossolo Vermelho Amarelo, textura média. O clima no município, segundo os critérios adotados por Köppen, é Cfa – clima mesotérmico, com temperaturas médias superiores a 10°C, sendo que a temperatura do mês mais quente é igual ou superior a 22°C e o índice pluviométrico anual situa-se em torno de 1.516 mm.

No local do experimento houve operações realizadas logo no início da instalação do mesmo, tais como preparo de solo, implantação de mudas, aplicação de formicida e adubação de plantio; no 6º e 9º mês realizaram-se aplicações de formicida e herbicida, respectivamente; enquanto no período compreendido entre 12º e 18º mês realizaram-se adubações de cobertura. No 24º mês procedeu-se a colheita com auxílio de motosserra.

### 1.1 Delineamento

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial (5x3), sendo o primeiro fator cinco espaçamentos e o segundo três adubações, com 45 repetições (árvores), retiradas no centro de cada parcela.

No plantio foram utilizados clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (C219) plantados em cinco espaçamentos entre plantas e o mesmo espaçamento entre linhas, com os seguintes códigos para identificação no campo: A (2,8m x 0,5m); B (2,8m x 1,0m); C (2,8m x 1,5m); D (2,8m x 2,0m); E (2,8m x 2,5m).

As adubações de plantio e de cobertura foram realizadas em três doses diferentes e a escolha para serem aplicadas nos espaçamentos foi aleatória. Assim, para efeitos da identificação das distintas formas de adubação, foram empregados os seguintes códigos apresentados na Tabela 1:

**Tabela 1 - Tipos de adubação e suas respectivas doses de fertilizantes.**

Tipos	Plantio com Formulado 6-30-10 (g)	Cobertura com Formulado 19-00-19 (g)*
1	35,0	27,5
2	70,0	55,0
3	140,0	110,0

\*0,7% de Boro e 3% de Zinco.

## 2.2 Dendrometria

Com embasamento na metodologia utilizada por Garcia (2013), quarenta e cinco árvores na região central de cada parcela foram avaliadas, medindo-se o DAP (diâmetro à altura do peito), com uso de uma suta, bem como a altura total (H), utilizando-se um clinômetro digital.

## 2.3 Energia da madeira

O poder calorífico superior da madeira foi estimado de acordo com o estudo de Garcia (2013), no qual determinou o poder calorífico da madeira com casca em um experimento com mudas de clones do híbrido de

*Eucalyptus urophylla* vs. *Eucalyptus grandis* (C219), com espaçamento de 0,5 m; 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m; 2,5 m e com variações de adubação.

Ainda, a partir do método da bomba calorimétrica descrito por Vale et al. (2000), que consiste em queimar a madeira com sua mensuração de variação da temperatura, obteve-se o valor médio do poder calorífico de 20 MJ.kg<sup>-1</sup>.

Por fim, analisou-se a densidade básica média da madeira com casca (Tabela 2), possibilitando assim, saber o peso de madeira com casca gerado por cada tratamento.

**Tabela 2** - Resultados da densidade básica média, encontrados por Garcia (2013).

Espaçamento (m)	Densidade básica média (m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> )
2,8x0,5	409,80
2,8x1,0	432,07
2,8x1,5	447,45
2,8x2,0	453,72
2,8x2,5	469,60

## 2.4 Análise estatística

A análise estatística foi realizada no programa computacional Minitab 16. As informações da maneira foram utilizadas com o intuito de se investigar as influências das variáveis silviculturais (espaçamento e adubação), bem como suas interações. Neste processo investigativo promoveu-se a análise de variância dos resultados, além de testes de comparação de médias (Tukey), ao nível de 5% de probabilidade. Quando houve diferença significativa entre os espaçamentos realizou-se a regressão para determinar o espaçamento ideal para cada dose de adubação utilizada.

número restrito de pesquisas indicando especificamente como as relações alométricas de biomassa são afetadas por tratamentos silviculturais, material genético e/ou limitações específicas do sítio de pesquisa, segundo Rubilar et al. (2010).

De acordo com Soares et al. (2012), o inventário florestal é uma técnica para estimar a produção de determinada floresta e que pode ser realizado sob diferentes níveis de detalhamento e em diferentes pontos no tempo trata-se de um conjunto de procedimentos para obter informações sobre quantidades e qualidades dos recursos florestais e de características das áreas em que as árvores estão se desenvolvendo.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Volumetria

Relações alométricas individuais, como DAP e altura (H), têm sido as principais ferramentas para obter, via inventário florestal, as estimativas de biomassa florestal (RUBILAR et al., 2010). No entanto, há ainda um

As variações de volumes médios individuais são devido às medidas de diâmetro e altura das árvores. Ainda, os tratamentos D e E apresentaram maiores volumes quando relacionados aos outros espaçamentos (Tabela 3).

**Tabela 3** - Valores médios de volumes individuais (m<sup>3</sup>) das árvores com interações de espaçamento e adubação.

Espaçamento	Adubação			Média
	1	2	3	
2,8x0,5	0,015 Ab	0,016 Ac	0,018 Ac	0,016 c
2,8x1,0	0,023 Bb	0,024 Ab	0,025 Ab	0,026 b
2,8x1,5	0,029 Bb	0,030 BCb	0,032 Aab	0,026 b
2,8x2,0	0,031 Ba	0,035 ABa	0,039 Aa	0,034 a
2,8x2,5	0,033 Aa	0,033 Aab	0,035 Aa	0,032 a
Média	0,023 C	0,028 B	0,031 A	

\*Médias seguidas de mesma letra maiúscula, nas linhas, e minúsculas, nas colunas, não diferem pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

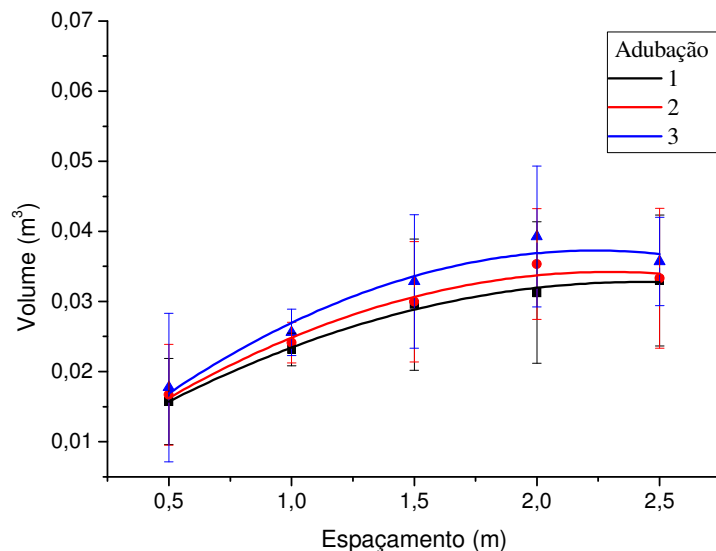


O espaçamento 2,8 x 0,5m apresentou menor volume individual, em corroboração à Martins et al. (2009) que afirmam que há maior competição das plantas por água, luz e nutrientes, visto que, o aumento da densidade da floresta implica diretamente na redução do volume individual das árvores. Em plantios de espaçamento 3 x 3 metros, Oliveira et al. (2008) observaram que o diâmetro era mais elevado, e assim, maiores volumes individuais.

Na Tabela 3 pode-se verificar que a adubação que mais contribuiu para o aumento de volume individual foi a do tipo 3 (dose de 140 gramas no plantio de formulado 6-30-10 e dose de 110 gramas na cobertura de formulado 19-00-19). Por outro lado, os espaçamentos que obtiveram os maiores volumes individuais foram 2,8 x 2 metros e 2,8 x 2,5 metros.

A fertilização mineral é a ferramenta comumente utilizada para modificar a qualidade do sítio e, assim, aumentar a taxa de crescimento das árvores (SETTE JÚNIOR et al., 2014). Técnicas de adubação podem ser utilizadas durante o crescimento da árvore para melhorar o seu desenvolvimento, pois a formação da madeira é altamente sensível às mudanças ambientais (BARBOSA et al., 2014).

Para determinar o espaçamento ideal em função das doses de adubações, realizou-se a regressão (Figura 1).



**Figura 1** - Curva de regressão entre volume ( $m^3$ ) e espaçamento (m) das árvores para cada tipo de adubação.

Obtiveram-se as seguintes funções: (i) para a dose de adubação 1,  $Y_1 = 0,00572 + 0,02232x - 0,0046x^2$ ; com  $R^2=98,9\%$ ; (ii) para a dose de adubação 2,  $Y_2 = 0,00488 + 0,0255x - 0,0055x^2$ ; com  $R^2=96,2\%$ , e; (iii) para a dose de adubação 3, a função  $Y_3 = 0,00351 + 0,03021x - 0,0067x^2$ ; com  $R^2 = 93,4\%$ .

Em estudo sob o efeito do espaçamento em *Pinus radiata* (D. Don) foram avaliados altura e diâmetro à altura do peito, resultando que o espaçamento teve pouco ou limitado impacto sobre o crescimento altura da árvore, mas um efeito altamente significativo sobre o crescimento de diâmetro (LIN et al., 2013).

Observa-se, a propósito dos espaçamentos utilizados, que variações de espaçamento em plantios florestais são bem documentadas na literatura científica. Um interesse

crecente em processos baseados na produtividade madeireira resultou na concepção, implantação e descrição de várias investigações, demonstrando que a relação de crescimento entre uma espécie de árvore pode variar de acordo com o espaçamento (CLASEN; KNOKE, 2013).

Na silvicultura, é de grande importância o estudo do espaçamento de plantio mais adequado para cada sítio. Isto porque, o espaçamento influencia na taxa de crescimento das plantas, no aproveitamento dos recursos disponíveis no ambiente, no recobrimento do solo, no manejo do povoamento e no valor e na qualidade da matéria-prima a ser produzida, como na produção de carvão vegetal (LELES et al., 2014).

Ainda de acordo com as funções de regressão, pode-se verificar que, para as doses de adubação do tipo 1 e 3, o espaçamento ideal é 2,4 metros, enquanto na dose de adubação do tipo 2, o espaçamento ideal é 2,3 metros. Contudo, considerando apenas espaçamentos usuais, o espaçamento que mais se aproxima dos resultados encontrados nesse estudo é o de 2,5 metros.

## 2.5 Análise de geração de energia

Ainda, com os volumes de madeira com casca em metro cúbico, verificou-se, a partir dos dados de densidade básica média dos espaçamentos, a biomassa de madeira gerada em toneladas de cada tratamento, e assim, a sucessiva quantificação energética em gigajoule por hectare dos mesmos, descritos na Tabela 4.

**Tabela 4 - Poder calorífico gerado em cada tratamento.**

<i>Tratamento</i>	<i>m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup></i>	<i>Biomassa de madeira por hectare (ton.ha<sup>-1</sup>)</i>	<i>Poder energético (GJ.ha<sup>-1</sup>)</i>
A1	104,93	43,00	858,83
A2	111,42	45,66	911,94
A3	122,16	50,06	999,78
B1	77,22	33,36	666,32
B2	80,49	34,78	694,61
B3	85,31	36,86	736,12
C1	65,70	29,40	587,15
C2	66,59	29,80	595,09
C3	73,02	32,67	652,52
D1	52,10	23,64	472,13
D2	58,92	26,73	533,92
D3	65,43	29,69	592,89
E1	43,99	20,66	412,56
E2	44,41	20,85	416,48
E3	47,63	22,37	446,73

Segundo Silveira et al. (2013), se a densidade de mudas no talhão for muito alta, os recursos ambientais, como disponibilidade de água e nutrientes, não serão suficientes para atender as necessidades do povoamento, ocasionando o desenvolvimento de plantas com menor diâmetro individual.

De toda sorte, verifica-se, pela Tabela 4, que os maiores volumes totais, de matéria seca, foram obtidos no espaçamento A, mais adensado. Ademais, os menores valores de volumes totais foram observados no espaçamento E. A este propósito, Reiner et al. (2012) afirmam que, com a diminuição do espaçamento de plantio, ocorre o aumento da produção de material lenhoso.

Segundo Silveira et al. (2013), o maior volume de madeira observado nos menores espaçamentos se deve ao fato de que neste espaçamento existem mais plantas que no cômputo final, mesmo apresentando baixo volume individual de madeira em relação aos espaçamentos maiores, resultam em maior volume na área total.

Por fim, na Tabela 4, a biomassa dos tratamentos do espaçamento mais adensado (2,8 x 0,5m) apresentou maior poder energético. Pode-se observar, também, que,

com o aumento das doses de adubação, há o aumento do poder energético, sendo assim, o tratamento A3 o de maior destaque.

Nota-se que, com o crescente espaçamento, o poder calorífico diminui, sendo semelhante à verificação de Müller (2005), que constatou que a energia gerada por hectare é proporcional ao aumento de biomassa do mesmo.

## 4 CONCLUSÕES

A dose de adubo que mais contribuiu no volume individual de madeira foi o tipo 3 (dose de 140 gramas no plantio de formulado 6-30-10 e dose de 110 gramas na cobertura de formulado 19-00-19). Ainda, os espaçamentos que propiciaram maiores volumes individuais foram os tipos 2,8 x 2 metros e 2,8 x 2,5 metros (D e E, respectivamente).

Em relação à geração de energia corroborou-se, a partir do estudo de caso consequentemente, que os tratamentos que mais se destacaram visando tanto o maior volume total por área quanto a geração de biomassa florestal foram aqueles de espaçamento mais adensados e com maiores doses de adubação.



## 5 REFERÊNCIAS

- ABRAF. **Anuário estatístico da Abraf 2013**: ano Base 2012. Brasília, DF: Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, 2013. 148 p.
- BARBOSA, B. M.; COLODETTE, J. L.; CABRAL, C. P. T.; GOMES, F. J. B.; SILVA, V. L. Efeito da fertilização na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 29-39, 2014.
- BARREIRO, S.; TOMÉ, M. Analysis of the Impact of the Use of Eucalyptus Biomass for Energy on Wood Availability for Eucalyptus Forest in Portugal: a Simulation Study. **Ecology and Society**, Canada, v. 17, n. 2, 2012.
- CLASEN, C.; KNOKE, T. Site conditions have an impact on compensation payments for the loss of tree species in mixed forests. **Forestry**, Oxford, v. 86, p. 533-542, 2013.
- GARCIA, E. A. **Qualidade da madeira de eucalipto em função do espaçamento, da adubação e da idade conduzida no sistema de curta rotação**. 2013. 84 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)–Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2013.
- KNAPIC, S.; PIRRALHO, M.; LOUZADA, J. L.; PEREIRA, H. Early assessment of density features for 19 *Eucalyptus* species using X-ray microdensitometry in a perspective of potential biomass production. **Wood Science and Technology**, Heidelberg, v. 48, n. 1, p. 37-49, 2014.
- LELES, P. S. S.; MACHADO, T. F. F.; ALONSO, J. M.; ANDRADE, A. M.; SILVA, L. L. Crescimento e Biomassa de *Melia azedarach* L. em diferentes espaçamentos e características tecnológicas da madeira visando à produção de carvão. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 214-223, 2014.
- LIN, Y.; YANG, H.; IVKOVIC, M.; GAPARE, W. J.; MATHESON, A. C. Effect of genotype by spacing interaction on radiata pine genetic parameters for height and diameter growth. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 304, p. 204-211, 2013.
- LOPES, G. de A. **Uso energético de resíduos madeireiros em um pólo de produção de cerâmicas vermelhas do Estado de São Paulo**. 2012. 100 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais/Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2012.
- MARTINS, R. J.; SEIXAS, F.; STAPE, J. L. Avaliação técnica e econômica de um harvester trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 83, p. 253-263, 2009.
- MCKENNEY, D. W.; WEERSINK, A.; ALLEN, D.; YEMSHANOV, D.; BOYLAND, M. Enhancing the adoption of short rotation woody crops for bioenergy production. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 64, p. 363-366, 2014.
- MOREIRA, J. M. Potencial e participação das florestas na matriz energética. **Brazilian Journal of Forestry Research**, Colombo, v. 31, n. 68, 2011.
- MÜLLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG**. 2005. 109 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- OLIVEIRA, A. D.; FERREIRA, T. C.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; REZENDE, J. L. P. Avaliação econômica de plantios de *Eucalyptus grandis* para a produção de celulose. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 82-91, 2008.
- REINER, D. A. **Desenvolvimento de eucalipto em diferentes espaçamentos de plantio em Pato Branco (PR)**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012. 48 f.
- RUBILAR, R. A.; ALLEN, H. L.; ALVAREZ, J. S.; ALBAUGH, T. J.; FOX, T. R.; STAPE, J. L. Silvicultural manipulation and site effect on above and belowground biomass equations for young *Pinus radiata*. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 34, p. 1825-1837, 2010.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Energia. **Plano Paulista de Energia 2020**. São Paulo: Conselho Estadual de Política Energética, 2012. 210 p.
- SETTE JÚNIOR, C. R.; DEUS JUNIOR, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; PÁDUA, F. A.; CALIL, F. N.; LACLAU, J. P. Alterações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação mineral. **Revista Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 251-258, 2014.
- SILVEIRA, E. R.; REINER, D. A.; SMANIOTTO, J. R. Efeito do espaçamento de plantio na produção de madeira e serapilheira de *Eucalyptus dunni* na região sudoeste do Paraná. **Revista Técnico Científica**, Curitiba, v. 1, n. 2, p. 1-9, 2013.
- SOARES, C. P. B.; DE PAULA NETO, F.; SOUZA, A.L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa, MG: UFV, 2012. 272 p. 2 ed.
- VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.