



**POTENCIAL ENERGÉTICO DE CLONES DE *EUCALYPTUS* SPP.
PROVENIENTES DE TESTES CLONAIIS EM DOIS DIFERENTES
TIPOS DE SOLO**

MACKSUEL FERNANDES DA SILVA

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA-UnB**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE CLONES DE *EUCALYPTUS* SPP.
PROVENIENTES DE TESTES CLONAIIS EM DOIS DIFERENTES
TIPOS DE SOLO**

MACKSUEL FERNANDES DA SILVA

**ORIENTADOR: Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE
TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

BRASÍLIA – DF FEVEREIRO DE 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**“POTENCIAL ENERGÉTICO DE CLONES DE *EUCALYPTUS* SPP.
PROVENIENTES DE TESTES CLONAIIS EM DOIS DIFERENTES
TIPOS DE SOLO”**

MACKSUEL FERNANDES DA SILVA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS FLORESTAIS.

APROVADA POR:

Prof. Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB)
(Orientador)

Prof. Dr. JOAQUIM CARLOS GONÇALEZ (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB)
(Examinador Interno)

Dra. LUCÉLIA ALVES DE MACEDO (MAPA / Laboratório de Produtos Florestais)
(Examinadora Externa ao PPG-EFL)

Prof. Dr. CARLOS ROBERTO SETTE JR. (Escola de Agronomia / Universidade Federal de Goiás)
(Examinador Externo à UnB e ao PPG-CFL)

BRASÍLIA/DF, 03 DE FEVEREIRO DE 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília.

Fp Fernandes da Silva, Macksuel
 POTENCIAL ENERGÉTICO DE CLONES DE EUCALYPTUS SPP.
 PROVENIENTES DE TESTES CLONAIIS EM DOIS DIFERENTES TIPOS DE
 SOLO / Macksuel Fernandes da Silva; orientador AILTON
 TEIXEIRA DO VALE. -- Brasília, 2022.
 67 p.

 Tese (Doutorado - Doutorado em Ciências Florestais) --
 Universidade de Brasília, 2022.

 1. FLORESTAS ENERGÉTICAS. 2. BIOENERGIA. 3. EUCALIPTO. 4.
 MADEIRA. 5. BIOCOMBUSTÍVEIS. I. TEIXEIRA DO VALE, AILTON ,
 orient. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, M. F. (2022). Potencial energético de clones de *Eucalyptus* spp. provenientes de testes clonais em dois diferentes tipos de solo. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.TD-107/2020. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 73 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Macksuel Fernandes da Silva

TÍTULO: Potencial energético de clones de *Eucalyptus* spp. provenientes de testes clonais em dois diferentes tipos de solo.

GRAU: Doutorado ANO: 2022

É concedido à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Macksuel Fernandes da Silva
macksuelfernandes@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me iluminar e sempre estar comigo em momentos importantes;

À minha família, em especial meus pais Valdeir e Djanete, pelo carinho, valores transmitidos e incentivos;

Ao meu orientador, Prof. Ailton Teixeira do Vale, por compartilhar tanto conhecimento e sabedoria. Muito obrigado pelo apoio e paciência durante esses quatro anos de trabalhos juntos;

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PGEFL) e Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, por todo suporte;

Ao meu amigo, Prof. Carlos Roberto Sette Jr., sempre me incentivando a ser um profissional melhor, serei sempre grato pela sua compreensão e ajuda, essencial para a construção deste trabalho;

A todos meus amigos, que me proporcionam tantas alegrias, muito obrigado pelo carinho e incentivo;

A toda equipe do Laboratório de Qualidade da Madeira e Bioenergia da Universidade Federal de Goiás, obrigado pelo suporte e por tornar meu trabalho tão gratificante;

A toda equipe do Laboratório de Produtos Florestais (LPF/IBAMA), em especial para a equipe do laboratório de Energia da Biomassa, sempre disponível para as aulas práticas e condução dos experimentos;

A todos os colegas do Setor de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Goiás;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (Proc. FAPEG 2012-00550000188), e Suzano S.A. pelo apoio financeiro. Às empresas CLONAR, CMOC e JP Florestal e ao Sr. Paulo de Moraes pelo fornecimento dos clones, área de plantio e gerenciamento dos experimentos;

Ao Prof. Evandro Novaes, pela iniciativa na realização do teste clonal, que viabilizou a elaboração e execução do projeto que deu origem à esta Tese;

E a todas as pessoas que de alguma forma participaram deste trabalho e contribuíram para minha formação, muito obrigado!

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE CLONES DE *EUCALYPTUS* SPP.
PROVENIENTES DE TESTES CLONAIIS EM DOIS DIFERENTES TIPOS DE
SOLO**

RESUMO GERAL

As áreas de florestas plantadas, principalmente do gênero *Eucalyptus* sp., estão em expansão no Centro-Oeste brasileiro, associado a isso, a alta demanda por biomassa energética impulsiona pesquisas que visam a seleção de clones baseadas em características desejáveis da madeira e produtividade. Apesar da grande adaptabilidade edafoclimática, as variações nas condições do ambiente tendem a influenciar o crescimento e a qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp., bem como dos produtos obtidos a partir dela. Diante deste pressuposto, neste trabalho, estudou-se a influência do genótipo e do tipo de solo no crescimento das árvores, produtividade e qualidade de biocombustíveis sólidos derivados da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. em dois diferentes tipos de solo (Latosolo amarelo e Plintossolo háplico). Foram implantados, em cada tipo de solo, cinco clones denominados: I - *E. urophylla*; II - *E. cloeziana*; III - *E. resinifera* x *E. grandis*; IV - *E. saligna* x *E. tereticornis*; V - *E. urophylla* x *E. grandis*. Aos seis anos foi estimado o incremento médio anual (IMA) em volume de madeira e a seleção dos clones foi baseada em dois critérios: incremento médio anual diferente (baixo, médio e alto) e variação genotípica, priorizando clones de diferentes espécies ou híbridos. Cinco árvores foram selecionadas de cada clone por tipo de solo (5 árvores x 5 clones x 2 tipos de solo), cortadas e obtidas amostras de madeira para a sua caracterização físico-química e energética, estimativa da produtividade energética e massa seca, bem como para a produção e caracterização energética dos *pellets* e carvão vegetal. A produtividade energética dos clones no Plintossolo foi maior que no Latossolo e geraram uma quantidade de energia 21,5% maior por hectare/ano, fator que atesta a melhor adaptação desses clones nesse tipo de solo. O clone *E. urophylla*, apresentou maior produtividade energética e é o material genético recomendado para plantação florestal com fins energéticos, independentemente do tipo de solo, visto que na média geral esse clone também apresentou os melhores resultados. Também se constatou que a qualidade energética da madeira de *Eucalyptus* spp. foi influenciada pelo genótipo (clone), tipo de solo (sítio) e interação (genótipo x tipo de solo). Assim, para as variáveis energéticas da madeira, os clones se comportam de forma diferente dependendo do tipo de solo do cultivo. Quanto aos biocombustíveis, os clones *E. urophylla* e *E. urophylla* x *E. grandis*, no Plintossolo, apresentaram os melhores resultados para as características do carvão vegetal. Constatou-se que existe influência do tipo de solo nas características avaliadas para ambos os biocombustíveis, exceto para a análise imediata do carvão vegetal e o clone *E. resinifera* x *E. grandis*, proveniente do Latossolo, apresentou os melhores resultados para produção de *pellets*.

Palavras-chave: genótipo; pellets; biomassa; produtividade energética, carvão vegetal.

ENERGY POTENTIAL OF *EUCALYPTUS* CLONES SPP. OF CLONAL TESTS IN TWO DIFFERENT TYPES OF SOIL

GENERAL ABSTRACT

The areas of planted forests, mainly of the genus *Eucalyptus* sp., are expanding in the Brazilian Cerrado, associated with this, the high demand for energetic biomass drives research aimed at the selection of clones based on the desirable characteristics of the wood and biomass volume produced. Despite the great edaphoclimatic adaptability, variations in environmental conditions tend to influence the growth and quality of *Eucalyptus* spp. wood, as well as the products obtained from it. Given this assumption, this work studied the influence of genotype and soil type on tree growth, productivity and quality of solid biofuels derived from wood from clones of *Eucalyptus* spp. in two types of soil (Yellow Latosol and Haplic Plinthosol). Five clones named: I - *E. urophylla*; II - *E. cloeziana*; III - *E. resinifera* x *E. grandis*; IV - *E. saligna* x *E. tereticornis*; V - *E. urophylla* x *E. grandis* were implanted in each soil type. At six years, the mean annual increment (MAI) in wood volume was estimated and five trees of each clone were selected per soil type (5 trees x 5 clones x 2 soil types), cut and wood samples were obtained, for its chemical and energy characterization, estimation of energy productivity and dry mass, as well as for the production and energy characterization of pellets and charcoal. The energy productivity of clones in Plintosol was higher than in Latosol and generated an amount of energy 21.5% higher per hectare/year, a factor that attests to the better adaptation of these clones in this type of soil. The clone *E. urophylla* showed the highest energy productivity and is the genetic material recommended for forest plantations for energy purposes, regardless of the type of soil, as in general this clone also presented the best results. It was also verified that the energetic quality of *Eucalyptus* spp. was influenced by genotype (clone), soil type (site) and interaction (genotype x soil type). Thus, for wood energy variables, clones behave differently depending on the soil type of the crop. As for biofuels, the clones *E. urophylla* and *E. urophylla* x *E. grandis*, in Plintosol, showed the best results for the characteristics of charcoal. It was found that there is an influence of soil type on the characteristics evaluated for both biofuels, with the exception of the immediate analysis of coal and the clone *E. resinifera* x *E. grandis*, from Latosol, showed the best results for pellet production.

Keywords: genotype; pellets; biomass; energy productivity; charcoal.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	08
1.1 Referências	10
2 MATERIAL E MÉTODOS	14
2.1 Caracterização do local e descrição do experimento.....	14
2.1 Referências	16
3 CAPÍTULO I: PRODUTIVIDADE ENERGÉTICA DE CLONES DE EUCALYPTUS SPP. CULTIVADOS EM DIFERENTES TIPOS DE SOLO	17
3.1 Introdução.....	17
3.2 Materiais e Métodos	19
3.2.1 <i>Características da madeira</i>	19
3.2.2 <i>Análise estatística</i>	20
3.3 Resultados e discussão.....	21
3.4 Conclusões	25
3.5 Referências.....	26
4 CAPÍTULO II: QUALIDADE DA MADEIRA DE EUCALYPTUS SPP. PARA FINS ENERGÉTICOS, CULTIVADA EM DIFERENTES TIPOS DE SOLO NO CERRADO.....	30
4.1 Introdução	31
4.2 Material e Métodos	Erro! Indicador não definido.
4.3 Resultados	34
4.4 Discussão	37
4.5 Conclusão.....	40
4.4 Referências.....	41
5 CAPÍTULO III: O TIPO DE SOLO INFLUENCIA AS CARACTERÍSTICAS DA BIOMASSA DA MADEIRA DE CLONES DE EUCALYPTUS E SEUS BIOCOMBUSTÍVEIS?.....	46
5.1 Introdução	46
5.2 Material e Métodos	48
5.2.1 <i>Produção do carvão vegetal</i>	48
5.2.2 <i>Produção dos pellets</i>	50
5.2.3 <i>Características da madeira, carvão e pellets</i>	51
5.2.4 <i>Rendimento e produtividade do carvão vegetal</i>	50
5.2.5 <i>Análise estatística</i>	52
5.3 Resultados e Discussão	52
5.4 Conclusões	61
6. CONCLUSÕES GERAIS.....	62
6.1 Referências.....	62

1. INTRODUÇÃO GERAL

O aperfeiçoamento tecnológico e científico no setor florestal brasileiro promoveu importantes avanços no manejo e melhoramento genético do gênero *Eucalyptus* sp., resultando no aumento da produtividade florestal e ganhos em qualidade e homogeneidade da madeira, transformando o Brasil no maior polo de produção florestal do planeta, com uma produtividade média de 36,8 m³/ha/ano de madeira de eucalipto oriundos de florestas plantadas (Colodette et al., 2014; IBÁ, 2021).

O Brasil possui 9,55 milhões de hectares de florestas plantadas, dos quais, 78,2% contêm espécies de *Eucalyptus*. Em 2020, as florestas plantadas representaram cerca de 1,0% do produto interno bruto (PIB) do país, movimentando cerca de US\$ 11,15 bilhões, gerando 536 mil empregos diretos e 2,3 milhões de empregos indiretos (IBÁ, 2021).

Em comparação com as regiões Sudeste e Sul, a silvicultura permaneceu pouco desenvolvida durante muitos anos na região Centro-Oeste. Fatores como a distância das principais unidades industriais do segmento de florestas plantadas localizadas nas regiões Sudeste e Sul, bem como dos mercados fornecedores de insumos e da maioria dos mercados consumidores contribuíram para justificar a pouca representatividade dessa região no mercado de florestas plantadas, no decorrer dos anos (Reis et al., 2015).

No entanto, atualmente a região Centro-Oeste é considerada uma das novas fronteiras da silvicultura brasileira. Entre as causas desse expressivo incremento da área de florestas plantadas nessa região estão o aumento populacional e o elevado desenvolvimento econômico, que geram demandas para atender vários usos, seja no âmbito de consumo interno ou para exportação. O estado de Goiás tem ocupado lugar de destaque na produção de madeira para lenha quando comparado com os demais estados do Centro-Oeste e Distrito Federal, com 59,4% da produção, sendo totalmente a partir de madeira de eucalipto (Reis et al., 2015; IBÁ, 2020; IBGE, 2019).

Conforme citado, ao longo dos anos, as plantações se expandiram para outras regiões, principalmente áreas rurais já antropizadas no bioma Cerrado (Fernandes et al., 2016). Nos últimos dez anos, a área de plantio de eucalipto nessas novas fronteiras florestais aumentou 85%, ou 810.000 ha (Reis et al., 2017; IBÁ, 2020). Consequentemente, é fundamental readaptar as práticas silviculturais considerando as novas condições edáficas e climáticas, com particular atenção para a seleção e

desenvolvimento de novos clones de eucalipto que são tolerantes à seca e outros fatores de estresse na região do Cerrado (Oliveira et al., 2020).

É evidente que diferentes materiais genéticos, mesmo quando plantados nos mesmos ambientes, apresentam disparidades em suas respostas em relação as variáveis qualitativas da madeira (Costa et al., 2020), e essas respostas são importantes para a melhor definição dos usos da madeira. Vários estudos têm enfatizado a importância de avaliar as propriedades do solo para determinar a produtividade e qualidade da madeira em diferentes sítios, abordando os fatores edáficos em geral ou características específicas do solo (Almeida et al., 2020; Cavalli et al., 2020; Cunha et al., 2021; Furlan et al., 2020; Oliveira et al., 2020; Rubilar et al., 2020; Silva et al., 2020).

A relação entre variáveis edafoclimáticas como o tipo do solo, com o crescimento e formação da madeira, permite compreender as influências sobre as características do material, e a seleção das variáveis que melhor interagem entre si (Melesse e Zewotir, 2012). Os programas de melhoramento genético buscam cada vez mais adaptar seus clones às condições ambientais, visando atingir altos níveis de qualidade e homogeneidade dos plantios de eucalipto (Oliveira et al., 2020).

Os eucaliptos têm sido usados para diversas aplicações, como celulose, carvão vegetal, madeira serrada, painel de madeira e produção de biomassa (Flores et al., 2016; IBÁ, 2021). Entretanto, para cada utilização, a matéria-prima deve apresentar propriedades específicas e adequadas de acordo com o produto final. Desta forma, o uso da madeira como fonte energética depende da identificação das propriedades de maior interesse, das interações entre elas e da quantificação da sua importância (Vital et al., 2013).

Nota-se que a produção de energia é responsável por grande parte da área plantada de eucalipto, justificado principalmente pelo crescimento acelerado com alta densidade e homogeneidade (Stanturf et al., 2013). A lenha e o carvão vegetal correspondem a 8,4% da energia total gerada no Brasil (BEN, 2019). No país, a biomassa de madeira é produzida a partir de florestas plantadas, principalmente do gênero *Eucalyptus* (Cândido e Santos, 2016). Essas plantações fornecem lenha, cavacos e madeira para a produção de materiais densificados e carvão vegetal, importante insumo utilizado nos altos-fornos das siderúrgicas brasileiras (Assis et al., 2016; Costa et al., 2018).

Apesar dos benefícios atribuídos ao uso da biomassa florestal para produção de bioenergia, é necessário melhorar as tecnologias de conversão de energia (Rodrigues e Braghini Junior, 2019). O uso de madeira com qualidade adequada reduz a pressão sobre

a floresta nativa e melhora o fornecimento de bioredutores com propriedades adequadas para a indústria siderúrgica (Deboni et al., 2019; Dufourny et al., 2019).

A percepção da necessidade de mudança do mercado energético para fontes de energia ambientalmente sustentáveis, visto o alto custo de combustíveis fósseis aliado à escassez energética e produção predatória, tem motivado, nas últimas décadas, investimento em fontes de energias renováveis. Interesses econômicos e científicos impulsionaram diversas pesquisas com a finalidade de reduzir a dependência por combustíveis convencionais, potencializar o fornecimento de matéria-prima energética e melhorar o desempenho energético dos biocombustíveis (Deboni et al., 2019; Moraes et al., 2019; Almeida et al., 2020; Djurusic et al., 2020).

A substituição parcial do carvão mineral por carvão vegetal reduz as emissões de CO₂ em processos siderúrgicos (Pohlmann et al., 2016; Silva et al., 2019). Além disso, o uso de derivados de madeira provenientes de florestas plantadas para bioenergia, em contraste com os combustíveis fósseis, permite a diminuição das emissões de enxofre e óxido de nitrogênio, reduzindo a ocorrência de chuvas ácidas, consequentemente obtendo um balanço de carbono (Baker et al., 2019).

Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar o potencial energético de clones de espécies de *Eucalyptus* em diferentes regiões do estado de Goiás que apresentam dois diferentes tipos de solo (Latosolo amarelo e Plintossolo háplico). A estrutura da tese foi elaborada em capítulos na forma de artigos científicos, a saber:

- Capítulo I – determinou-se a produtividade energética e a qualidade da madeira dos clones de *Eucalyptus* ssp. para produção de bioenergia;
- Capítulo II – o efeito dos diferentes tipos de solo nas características químicas e físico-mecânicas da madeira dos diferentes clones de *Eucalyptus* ssp;
- Capítulo III – neste último capítulo foi abordado as características do carvão vegetal, *pellets* e madeira proveniente dos clones de *Eucalyptus* spp. cultivados nos diferentes tipos de solo.

1.1 REFERÊNCIAS

Almeida, M.N.F., Vidaurre, G.B., Pezzopane, J.E.M., Lousada, J.L.P.G., Silva, M.E.G.M., Câmara, A.P., Rocha, S.M.G., Oliveira, J.C.L., Campoe, O.C., Carneiro, R.L., Alvares, C.A., Tomazzelo-Filho, M., Figueiredo, F.M., Oliveira, R.F. 2020. Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. *Forest Ecology and Management* 458, 117743. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117743>

Assis, M.R., Brancheriau, L., Napoli, A., Trugilho, P.F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review, *Wood Sci. Technol.* 50 (2016) 519e536, <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0812-6>.

Baker, J.S., Wade, C.M., Sohngen, B.L., Ohrel, S., Fawcett, A.A. Potential complementarity between forest carbon sequestration incentives and biomass energy expansion, *Energy Pol.* 126 (2019) 391e401, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.009>.

BEN, Brazilian Energy Balance 2019: Year 2018, EPE, Rio de Janeiro, 2019.

Candido, W.L., Santos, R.C. Quantification of forestry and carbonization waste, *Renew. Energy* 103 (2017) 432e438, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.050>.

Cavalli, J.M., Reichert, M.F., Rodrigues, E.F. Composition and functional soil properties of arenosols and acrisols: Effects on *eucalyptus* growth and productivity, *Soil Tillage Res.* 196 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104439>

Colodette, J.L., Gomes, C.M., Gomes, F.J., Cabral, C.P. The Brazilian wood biomass supply and utilization focusing on *Eucalyptus*. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 2014; 1(1): 1-8.

Costa, L.R., Trugilho, P.F., Hein, P.R.G. Evaluation and classification of eucalypt charcoal quality by near infrared spectroscopy, *Biomass Bioenergy* 112 (2018) 85e92, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.017>.

Costa, S.E.L., Santos, R.C., Vidaurre, G.B., Castro, R.V.O., Rocha, S.M.G., Carneiro, R.L., Campoe, O.C., Santos, C.P.S., Comes, I.R.F., Carvalho, N.F.O., Trugilho, P.F. 2020. The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. *Forest Ecology and Management* 458, 117807, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117807>

Cunha, T. Q. G.; Santos, A. C.; Novaes, E.; Hansted, A. L. S.; Yamaji, F. M.; Sete Jr, C.R. *Eucalyptus* expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. *Biomass and Bioenergy*, v. 144, p. 105900, 2021.

Deboni, T.L., Simioni, F.J., Brand, M.A., Lopes, G.P. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant, *Renew. Energy* 135 (2019) 1291e1302, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.039>.

Djurisic, V.; Smolovic, J. C.; Misnic, N.; Rogic, S. Analysis of public attitudes and perceptions towards renewable energy sources in Montenegro. *Energy Reports*, v. 6, p. 395-403, 2020.

Dufourny, A., Van De Steene, L., Humbert, G., Guibal, D., Martin, L., Blin, J. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 137 (2019) 1e13, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.10.013>.

Fernandes, G.W., Coelho, M.S., Machado, R.B., Ferreira, M.E., Aguiar, L.M.S., Dirzo, R., Scariot, A., Lopes, C.R. (2016) Afforestation of savannas: an impending ecological disaster. *Natureza & Conservação* 14: 146-151.

Flores, T.B., Alvares, C.A., Souza, V.C., Stape, J.L. (2016) *Eucalyptus* no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, 448p.

Furlan, R. A.; Moraes, C. B.; Tambarussi, E. V. Genetic parameters of *Eucalyptus* spp. clones in Northeastern Brazil. *Floresta*, v. 50, n. 2, p. 1267-1278 in Brazil. *South. For. J. For. Sci.* 81 (3), 247–253. <https://doi.org/10.2989/20702620.2019.1570453>.

IBGE. Produção da extração vegetal e da silvicultura 2019. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2019>. Acesso em: 11 nov. 2021.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório IBÁ 2020. Brasília: IBA, 2020. 122 p.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório IBÁ 2021. Brasília: IBA, 2021. 93 p.

Melesse, S. F.; Zewotir, T. The effect of correlated climatic factors on the radial growth of eucalypt trees grown in coastal Zululand of South Africa. *African Journal of Agricultural Research, África*, v. 8, n. 14, p. 1233- 1244, 2012.

Moraes, M. D. A.; Silva, M. F.; Barbosa P.V.G.; Marques, R.; Silva, R. T.; Sette Jr. C. R. Characterization of *Khaya ivorensis* (A. Chev) biomass, charcoal and briquettes. *Scientia Forestalis*, n. 121, p. 34-44, 2019.

Oliveira, R.S., Ribeiro, C.V.G., Neres, D.F., Porto, A.C.M., Ribeiro, D., Siqueira, L., Zauza, E.A.V., Coelho, A.S.G., Reis, C.A.F., Alfenas, A.C., Novaes, E. 2020. Evaluation of genetic parameters and clonal selection of *Eucalyptus* in the Cerrado region. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. 20 (3), e29982031, 2020. <http://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3a35>

Pohlmann, J.G., Borrego, A.G., Osorio, E. Diez, M.A., Vilela, A.C.F. Combustion of *eucalyptus* charcoals and coals of similar volatile yields aiming at blast furnace injection in a CO₂ mitigation environment, *J. Clean. Prod.* 129 (2016) 1e11, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.138>

Reis, C. A. F.; Moraes, A. da C. Produção de madeira de florestas plantadas na região Centro-Oeste do Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2015. 31 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 287).

Reis, C. A. F.; Talone Neto, A.; Brunckhorst, A.; Moreira, J. M. M. A. P.; Pereira, A. V.; Moraes, A. da C. Cenário do setor de florestas plantadas no Estado de Goiás. Colombo: Embrapa Florestas; [S.l.]: SEBRAE, [2017]. 79 p.

Rodrigues, T., Braghini Junior, A. Charcoal: a discussion on carbonization kilns, J. Anal. Appl. Pyrolysis 143 (2019), 104670, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104670>.

Rubilar R, Hubbard R, Emhart V, Mardones O, Quiroga JJ, Medina A, Valenzela H, Espinoza J, Burgos Y and Bozo D (2020) Climate and water availability impacts on early growth and growth efficiency of *Eucalyptus* genotypes: The importance of GxE interactions. Forest Ecology and Management 458: 117763.

Silva, F.T.M., Ataíde, C.H. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: product yields and characterization, Energy 172 (2019) 509e516, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.159>

Silva, V. E.; Nogueira, T. A. R.; Abreu-Junior, C. H.; He, Z.; Buzettic, S. Laclaub, J.P.; Teixeira Filho, M. C. M.; Grilli, E.; Murgiai, I.; Caprai, G. F. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian *Eucalyptus* plantations. Forest Ecology and Management 455 (2020) 117673 11p.

Stanturf, J. A.; Vance, E. D.; Fox, T. R.; Kirst, M. *Eucalyptus* beyond its native range: Environmental issues in exotic bioenergy plantations. International Journal of Forestry Research, v. 463030, p. 1–5, 2013.

Vital, B. R.; Carneiro, A. C. O.; Pereira, B. L. C. Qualidade da madeira para fins energéticos. In: Santos, F.; Colodete, J.; Queiroz, J. H. Bioenergia e biorrefinaria – Cana-de-açúcar e espécies florestais. Viçosa-MG: Super Gráfica e Editora Ltda. 2013. 322-354p.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização do local e descrição do experimento

Os experimentos dos clones de *Eucalyptus* spp. foram instalados nos municípios de Luziânia (16°15'09"S, 47°57'01"O) e Corumbá de Goiás (15°55'26"S, 48°48' 32"O), estado de Goiás, Brasil, em dezembro de 2012, ressaltando-se que a escolha dos municípios foi em função das diferentes características de solo, Plintossolo háplico em Luziânia e Latossolo amarelo em Corumbá de Goiás, visto que as condições climáticas dos municípios possuem pouca diferença (Figura 1).

O macroclima é caracterizado por tropical úmido do tipo Aw, típico do Bioma Cerrado (Alvares et al., 2013), com condições climáticas similares em todos os sítios avaliados, caracterizados por verão chuvoso e inverno seco. Nos dois locais, o período do ano com menor precipitação está compreendido entre os meses de maio e setembro e o de maior precipitação entre os meses de outubro a abril (Figura 1).

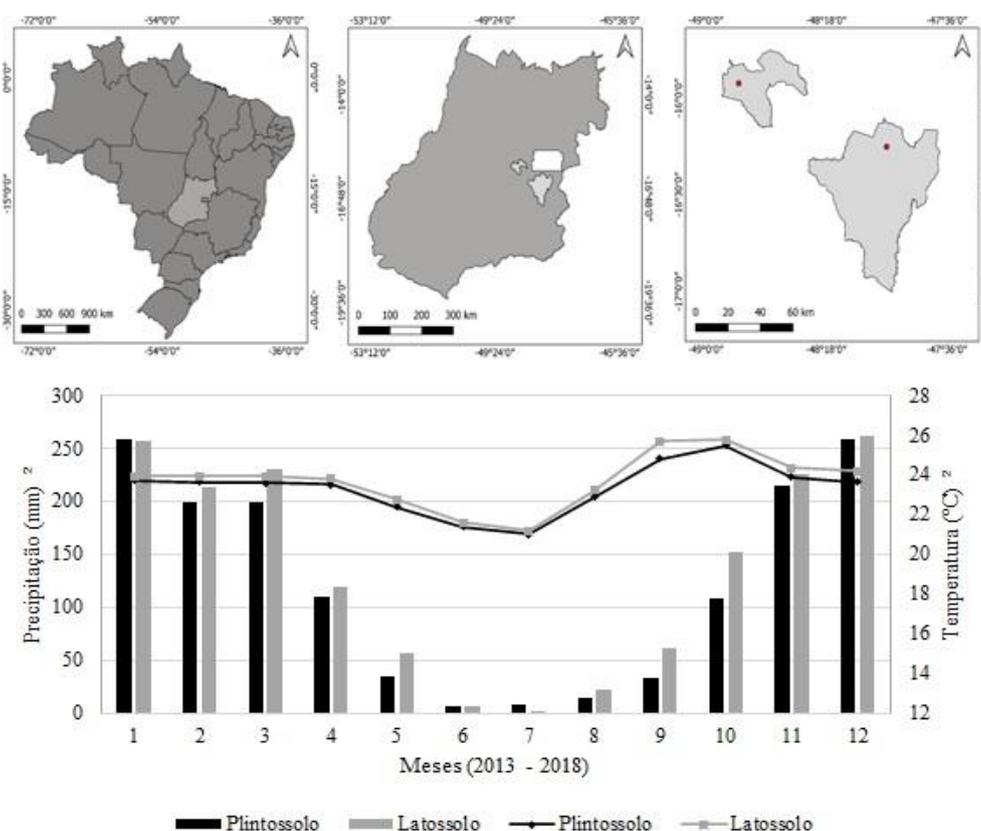


Figura 1: Localização geográfica e médias das características edafoclimáticas dos locais de ensaio com clones de *Eucalyptus* sp. no período de 2013 a 2018. Fonte: INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, em que Precipitação (mm) aparece representada pelas barras Temperatura (°C) pelas linhas.

Predominantemente, estes sítios possuem condições típicas do bioma Cerrado, caracterizado por solos com pH ácido, baixa saturação de bases e alta saturação por alumínio. Contudo, ocorrem diferenças quanto às características morfológicas dos solos da área de cultivo, na região de Luziânia há o predomínio de Plintossolo háplico de textura média, com presença de plintita a partir dos 40 cm da superfície. Já em Corumbá de Goiás encontra-se o Latossolo amarelo, de textura média, com cascalho abaixo de 50 cm de profundidade, possuindo estreita faixa de solo agricultável, quando considerado culturas de sistema radicular profundo.

Tabela 1. Análise físico-química de composição do solo das áreas experimentais.

Camada 0-20 cm		
	Plintossolo háplico (Luziânia)	Latossolo amarelo (Corumbá de Goiás)
Teor de argila (%)	34	44
Teor de areia (%)	39,1	45
Teor de silte (%)	26,9	11
pH (CaCl ₂)	4,4	4,6
CTC	4,7	5,57
H + Al (%)	88	64
Camada 20-40 cm		
Teor de argila (%)	20	34
pH (CaCl ₂)	4,7	4,6
CTC *	2,5	4,68
H + Al (%)		76

*CTC: Capacidade de troca de cátions.

O experimento com clones de *Eucalyptus* spp. foi implantado em dezembro de 2012. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com 93 clones distintos e 29 repetições em parcelas simples, totalizando 2.697 plantas. O espaçamento utilizado entre as árvores foi de 3 x 3 m, totalizando 2,43 ha⁻¹ de área.

O preparo do solo dos experimentos foi realizado com base em análises químicas, com aplicação de calcário dolomítico (2,5 ton ha⁻¹), gesso (1,5 ton ha⁻¹) e adubação com nitrogênio, fósforo, potássio e boro (300 kg ha⁻¹ de NPK 10-30-10 e 0,5 kg ha⁻¹ de B). A cobertura foi realizada aos 3, 12 e 24 meses após o plantio com 180 kg ha⁻¹ da fórmula NPK 12-5-12 juntamente com 0,5 kg ha⁻¹ de boro.

Cinco clones foram selecionados (do total de 93 clones) para as avaliações. A seleção dos clones foi baseada em dois critérios: (i) incremento médio anual diferente (baixo, médio e alto) obtido a partir do censo florestal realizado em clones aos seis anos

de idade por Oliveira et al. (2021) e (ii) variação genotípica, priorizando clones de diferentes espécies ou híbridos. Os mesmos clones foram selecionados para dois sítios avaliados, a fim de avaliar a interação dos genótipos pelos ambientes. A Tabela 2 mostra os clones selecionados, a designação do código usado neste estudo e o IMA.

Tabela 2. Identificação e incremento médio anual (IMA) dos clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Espécie ou híbrido	IMA Latossolo	IMA Plintossolo
I	<i>Eucalyptus urophylla</i>	50.10	79.27
II	<i>E. cloeziana</i>	22.78	23.88
III	<i>E. resinifera</i> x <i>E. grandis</i>	59.79	60.61
IV	<i>E. saligna</i> x <i>E. tereticornis</i>	35.58	23.77
V	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	48.81	66.35

IMA= incremento médio anual ($m^3 ha^{-1} year^{-1}$).

Em janeiro de 2019, seis anos após a implantação do experimento, foram selecionadas cinco árvores de cada clone pertencentes à classe diâmetro médio à altura do peito (DAP) e a cinco blocos diferentes (uma árvore por bloco). Os blocos foram selecionados aleatoriamente. 25 árvores foram amostradas por local (5 árvores x 5 clones). Assim, houve um total de 50 árvores (25 árvores por sítio x 2 sítios).

Amostras representativas de todo o tronco foram posteriormente extraídas na forma de discos de madeira (5 cm de espessura) para cada árvore, nas seguintes posições longitudinais: DAP (diâmetro à altura do peito, 1,3 m do solo), 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial considerada até o diâmetro mínimo de sete centímetros.

2.2 REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET, 2019. Weather database, 2019. <https://bdmep.inmet.gov.br/> (acesso em: 19 jul. 2019).

OLIVEIRA, R.S., SANTOS, L.T.V., MELO, S.C., CHAGAS, M.P., RIBEIRO, D., REIS, C.A.F., NOVAES, E., SETTE JR., C.R. Wood energy yield for *Eucalyptus* clones growing under seasonal drought-stress in Brazil. *Biomass and Bioenergy* 154. 106264, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106264>

3. CAPÍTULO I

PRODUTIVIDADE ENERGÉTICA DE CLONES DE *Eucalyptus spp.* CULTIVADOS EM DIFERENTES TIPOS DE SOLO

RESUMO

A produtividade em plantações florestais de *Eucalyptus spp.* é fator importante uma vez que quanto maior a quantidade de madeira produzida por unidade de área e tempo, maior será a produção de biomassa, que constitui matéria-prima para fins energéticos, com reflexos na produtividade energética. Com o intuito de promover a expansão de plantações de *Eucalyptus spp.* para regiões do país que não possuem tradição no plantio de florestas energéticas, é necessário, entre outros, a avaliação das características de materiais genéticos e sua adaptação às diferentes condições edafoclimáticas. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar as características da madeira e a produtividade energética de cinco clones de *Eucalyptus spp.* provenientes de plantios em dois diferentes tipos de solo, Latossolo amarelo e Plintossolo háplico, visando verificar a influência do tipo de solo, além de indicar o clone com melhor aptidão para floresta energética. Os resultados indicam que a produtividade energética dos cinco clones de *Eucalyptus spp.* avaliados está correlacionada em maior magnitude com a taxa de crescimento em volume do tronco das árvores (IMA), e o clone I (*E. urophylla*), apresentou maior produtividade energética e é o material genético recomendado para plantação florestal com fins energéticos, independentemente do tipo de solo. Foi verificada diferença significativa com relação ao tipo de solo, sendo que os clones implantados no Plintossolo cresceram em média 17% mais que os clones no Latossolo e geraram uma quantidade de energia 21,5% maior por hectare/ano.

Palavras-chave: Incremento médio anual; plintossolo; latossolo; clones

3.1 INTRODUÇÃO

Os compromissos internacionais firmados por diversos países desenvolvidos reforçaram a promoção de fontes de energia limpas e renováveis, visando assim, mitigar os efeitos das mudanças climáticas (André et al. 2012). Nesse contexto, a biomassa se destaca como uma das principais fontes de energia renovável. Além disso, o incentivo à implantação de florestas plantadas para a produção de biomassa lignocelulósica favorece o desenvolvimento das economias locais e conseqüentemente promove a redução das emissões de CO₂ (García-Morote et al. 2014).

O uso de biomassa lignocelulósica, embora historicamente consolidado, está em constante expansão. Para garantir o atendimento da demanda crescente, a avaliação das características da madeira e de produtividade da plantação de *Eucalyptus* spp. é fundamental para a seleção de materiais genéticos para fins energéticos (Silva et al. 2021). De acordo com Santos et al. (2012) a grande diversidade dentro do gênero *Eucalyptus* facilita a busca por combinações desejáveis nos programas de melhoramento para atender as diferentes finalidades industriais.

A utilização de materiais híbridos é interessante, pois agrega atributos atraentes de espécies distintas em uma única planta (Paludzyszyn Filho e Santos, 2011). No entanto, para se comprovar a superioridade de um clone é fundamental que o mesmo seja avaliado em testes clonais distribuídos por regiões representativas das condições alvo do plantio.

A relação entre variáveis edafoclimáticas como temperatura, precipitação e tipo do solo, com o crescimento e formação da madeira, permite compreender as influências sobre as características do material, e a seleção das variáveis que melhor interagem entre si (Melesse e Zewotir, 2012). Os programas de melhoramento genético buscam cada vez mais adaptar os clones às condições ambientais, visando atingir altos níveis de qualidade e homogeneidade dos plantios de eucalipto (Oliveira et al. 2020).

O conhecimento sobre a produtividade das florestas, além de indicar a condição atual do povoamento, fornece informações importantes para tomada de decisão, principalmente, sobre intervenções necessárias para a manutenção do rendimento dos indivíduos. Sendo assim, os tratamentos silviculturais, manejo e a destinação da madeira desses materiais são praticados com base em uma previsão sobre o desenvolvimento dos recursos florestais. Desse modo, essa variável desempenha papel fundamental nas avaliações de custos para utilização na bioenergia (Hess et al. 2018; Jiang et al. 2017).

Na prática, as culturas energéticas lignocelulósicas ocupam solos degradados com baixa fertilidade. No entanto, eles são obrigados a fornecer uma grande quantidade de biomassa de forma rentável. No caso dos eucaliptos, as principais limitações de crescimento e sobrevivência das plantações tendem a ser estresse hídrico, falta de fertilidade do solo e as geadas de inverno (Fernández et al. 2012).

O lento desenvolvimento da eucaliptocultura no estado de Goiás, pode ser creditado a um conjunto de fatores, como a falta de incentivos políticos que visem à implantação de atividades florestais, e a carência de informações científicas para viabilizar tais atividades. Entretanto, é preciso ressaltar que Goiás apresenta excelente

aptidão florestal, por apresentar condições edafoclimáticas favoráveis e considerável percentual de áreas degradadas aptas para recuperação com espécies florestais (Reis et al. 2017).

Assim, são necessárias pesquisas que busquem selecionar materiais genéticos mais adaptados e com maior potencial produtivo para o estado de Goiás, visando aumentar o conhecimento sobre os clones de eucalipto adaptados às regiões do bioma Cerrado. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as características da madeira e a produtividade energética de clones de espécies de *Eucalyptus* spp. provenientes de plantios em dois tipos de solo: Latossolo amarelo e Plintossolo háplico.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Características da madeira

Densidade básica (DB, kg m⁻³): foi utilizado o método hidrostático, em que se considerou o peso saturado e o peso imerso da amostra de madeira (cunha), conforme preconizado na ABNT NBR 11941 (ANBT, 2003).

Poder calorífico superior (PCS, MJ kg⁻¹): determinado por meio de uma bomba calorimétrica marca IKA WORKS, modelo C-200, conforme a Norma ASTM D5865 (2013).

Poder calorífico inferior (PCI, MJ kg⁻¹): foi determinado o poder calorífico inferior da madeira, considerando o teor de hidrogênio apresentado no Capítulo 2, tabela 3. (Equação 1).

$$PCI = PCS - 600 * \frac{9 * H}{100} \quad (1)$$

Densidade energética (MJ m⁻³): obtida pelo produto entre o poder calorífico inferior (PCI, MJ kg⁻¹) e da densidade básica da madeira (DB, kg m⁻³) (Equação 2).

$$DE = PCI * DB \quad (2)$$

Incremento médio anual (IMA, m³ h⁻¹ ano⁻¹): calculado a partir da relação entre o volume de cada árvore (Vi, m³), número de árvores por hectare (n) e a idade das árvores (T, anos) (Equação 3). O volume de cada árvore (Vi) foi calculado com base nos dados do senso florestal realizado na área experimental todos os anos, utilizando-se o DAP (diâmetro a altura do peito, a 1,3 m do solo, cm), a altura total (Ht, m) e o fator de conicidade (f, 0,46243) (Miranda et al. 2015) (Equação 4).

$$Vi = \frac{Dap^2 * Ht}{40000} * \pi * f \quad (4)$$

$$IMA = \frac{Vi * n}{T} \quad (3)$$

Massa seca (MS, t ha⁻¹ ano⁻¹): utilizando-se a densidade básica da madeira (DB, kg m⁻³) e o incremento médio anual (IMA, m³ h⁻¹ ano⁻¹) (Torres et al. 2016; Eloy et al. 2016; Brun et al. 2018) (Equação 5).

$$MS = \frac{DB * IMA}{1000} \quad (5)$$

Produtividade energética (PE, MJ ha⁻¹ ano⁻¹): estimada por meio da massa seca (MS, kg ha⁻¹ ano⁻¹) e do poder calorífico inferior (PCI, MJ kg⁻¹) (Torres et al. 2016; Eloy et al. 2016; Brun et al. 2018) (Equação 6). O produto obtido estima a quantidade de energia produzida pela floresta por hectare ano⁻¹.

$$PE = MS * PCI \quad (6)$$

3.2.2 *Análise estatística*

Para avaliar os diferentes clones e o efeito do tipo de solo nas características da madeira e da produtividade energética, foi utilizado o delineamento de blocos casualizados, com cinco clones e dois diferentes tipos de solo, totalizando 10 tratamentos

e 50 repetições (cinco árvores por tratamento). As análises estatísticas foram realizadas no programa JMP, em que foram avaliados os *outliers*, a normalidade dos dados e a pressuposição de homogeneidade da variância. Atendidas as pressuposições, aplicou-se a análise de variância (ANOVA), verificando o efeito do clone, do tipo de solo e interação genótipo x tipo de solo a 5% de probabilidade.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diversos trabalhos que avaliaram diferenças nas condições edafoclimáticas, dentre elas o tipo de solo, no local de implantação das árvores dos clones de *Eucalyptus* spp. constataram que as variações no sítio influenciam o desenvolvimento das árvores e características da madeira (Cunha et al., 2021; Oliveira et al., 2020; Pupin et al., 2017; Resquin et al., 2019).

As características do solo das áreas experimentais desse estudo, Latossolo e Plintossolo, são distintas, sobretudo em relação as propriedades físicas, como textura, que influencia a porosidade, principais fatores associados ao armazenamento e disponibilidade de água no solo, bem como mineralização de nutrientes e resistência ao crescimento radicular (Maluf et al. 2015; Barbosa et al. 2018).

Para elucidar as variáveis utilizadas nos cálculos de produtividade e as diferenças nas características da madeira, na Tabela 1, são apresentados os dados de poder calorífico superior, densidade básica e energética, apresentados e discutidos no capítulo II dessa tese (Figura 2, pag. 30).

Tabela 1. Comparação entre as médias das densidades e poder calorífico superior da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. cultivados em dois tipos de solo.

Características	Solo	Clones				
		I	II	III	IV	V
Poder Calorífico Superior (MJ kg ⁻¹)	Latossolo	19,86 abA	19,81 bA	19,71 bA	20,05 aA	19,85 abA
	Plintossolo	19,85 aA	19,68 bB	19,85 aA	19,95 aA	19,79 abA
Densidade básica (kg m ³)	Latossolo	434,4 cA	490,5 aA	465,7 bA	462,3 bA	455,2 bA
	Plintossolo	443,0 cA	487,2 aA	474,0 abA	467,2 bA	461,7 bA
Densidade energética (MJ m ³)	Latossolo	8035,0 cA	9052,1 aA	8547,5 aA	8639,8 abA	8414,6 bA
	Plintossolo	8192,2 cA	8926,1 aA	8766,0 bcA	8682,9 bA	8510,9 bA

Clones: I - *E. urophylla*; II - *E. cloeziana*; III - *E. resinifera* x *E. grandis*; IV - *E. saligna* x *E. tereticornis*; V - *E. urophylla* x *E. grandis*. Médias seguidas das mesmas letras minúsculas na linha para clones e maiúsculas na coluna para tipo de solo não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

É válido ressaltar que apesar de existirem respostas condicionadas a fatores ambientais para variáveis como densidade básica da madeira e IMA, não deve-se considerar esse comportamento como via de regra, isso porque a performance de cada clone sob diferentes condições de crescimento é inerente a cada material genético (Silva et al. 2021). Nesse sentido, sabe-se que diferentes materiais genéticos, mesmo quando cultivados nos mesmos ambientes, apresentam respostas diferentes para características qualitativas ou quantitativas da madeira (Costa et al. 2020).

Na Figura 2 são apresentados os resultados de produtividade (incremento médio anual, massa seca e produtividade energética) dos clones de *Eucalytus* ssp. em dois diferentes tipos de solo.

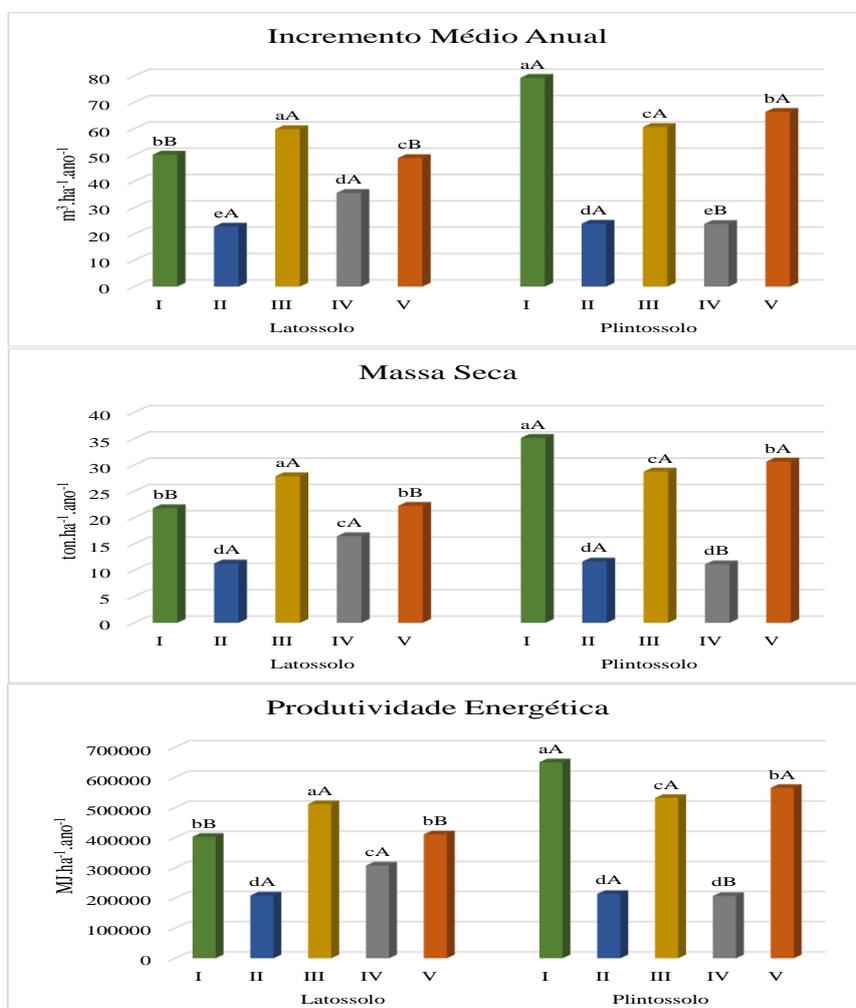


Figura 2. Estimativa de incremento médio anual, massa seca e produtividade energética dos clones de *Eucalytus* ssp. em dois diferentes tipos de solo. Clones: I - *E. urophylla*; II - *E. cloeziana*; III - *E. resinifera*

x *E. grandis*; IV - *E. saligna* x *E. tereticornis*; V - *E. urophylla* x *E. grandis*. Médias seguidas da mesma letra minúscula para clone e maiúscula para tipo de solo não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

O incremento médio anual (IMA) apresentou diferenças estatísticas entre todos os clones, variando de 22,8 a 79,3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, conforme esperado, visto que esse foi um dos critérios utilizados para a seleção dos clones. O clone I (*E. urophylla*) no Plintossolo obteve o maior valor de IMA (79,3 m³.ha⁻¹.ano⁻¹) dentre os clones, valor acima da média de produtividade de madeira de eucalipto no Brasil, 36,8 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ (IBÁ, 2021). Além do clone I, os clones III (*E. saligna* x *E. tereticornis*) e V (*E. cloeziana*) também tiveram crescimento maior que a média nacional, 60,2 e 57,6 m³.ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente.

Resende et al. (2018), avaliaram diferentes genótipos de eucalipto com 6 anos de idade, que apresentaram variação no incremento médio de 29,3 a 58,8 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Os mesmos autores também observaram que os clones respondem distintivamente à heterogeneidade ambiental, destacando que o IMA recebe influência de diferentes variáveis, dentre elas as condições edafoclimáticas, e se correlaciona com os diferentes genótipos (Almeida et al. 2020).

Com exceção do clone IV (*E. urophylla* x *E. grandis*), todos os demais clones apresentaram maior IMA no Plintossolo, quando comparado com o Latossolo. Na média geral, os clones do Plintossolo cresceram 17% mais que os clones no Latossolo, demonstrando que as condições edafoclimáticas desempenham um papel importante no desenvolvimento da planta e que os diferentes tipos de solo, juntamente com outros fatores ambientais, influenciaram no crescimento e comportamento da plantação de eucaliptos.

Silva et al. (2020), avaliando o incremento médio anual das árvores de *Eucalyptus* em dois diferentes tipos de solo, verificaram diferenças de até 46% no crescimento em volume das árvores, constatando que as diferentes propriedades do solo afetaram o desenvolvimento das árvores. Os autores indicam que o tipo de solo foi altamente correlacionado com o armazenamento de água na planta e o aumento no incremento médio anual. De acordo com os autores, tais resultados são justificados pela maior quantidade de frações finas (silte) no solo, que facilita a absorção de água pela planta, e consequentemente favorece o crescimento da mesma, enquanto que, o maior conteúdo de areia no solo prejudica a retenção de água e nutrientes, interferindo de forma negativa no crescimento da árvore.

Considerando que a análise físico-química de composição do solo (Figura1) apontou menor quantidade de areia e maior quantidade de silte no Plintossolo, quando comparado com o Latossolo, esses fatores específicos podem ter facilitado a absorção de água e nutrientes dos clones implantados no Plintossolo, potencializando o incremento médio anual das árvores nesse tipo de solo.

Diversos outros estudos verificaram diferenças no incremento médio anual de florestas plantadas em diferentes condições edafoclimáticas. Como por exemplo, Rubilar et al. 2019 avaliando genótipos de *Eucalyptus* com 2,6 anos implantados em solo com diferenças nos teores de argila, silte e areia, mesmo caso desse estudo (Figura 1), também constataram que os genótipos se comportaram de forma diferente, dependendo do tipo de solo.

Ao avaliar a estimativa de massa seca foi observado que os clones apresentaram diferenças significativas entre si. A produção de massa seca é influenciada pelo ambiente de crescimento da árvore, aumentada em condições de irrigação e fertilização (Toledo et al. 2015; Fernandez et al. 2018). No entanto, alguns genótipos apresentam maior capacidade de manter uma taxa de incremento em biomassa satisfatória em ambientes menos favoráveis.

A maior massa seca estimada, dentre os clones avaliados, foi constatada para o clone I (*E. urophylla*) no Plintossolo (35,07 ton ha⁻¹ ano⁻¹). Valores semelhantes na produção de massa seca da espécie *E. urophylla* também foram relatados por Binkley et al. (2017), Brun et al. (2018) e Silva et al. (2021), com uma média de 34 ton ha⁻¹ ano⁻¹. No Latossolo, o resultado de massa seca no clone I apresentou um valor 66,7% menor que no Plintossolo, ressaltando a influência do tipo de solo para essa variável.

Os clones I (*E. urophylla*), IV (*urophyla* x *E. grandis*) e V (*E. cloeziana*) apresentaram diferenças significativas na produção de massa seca, com relação ao tipo de solo. De forma geral, os clones no Plintossolo tiveram uma média (23,41 ton ha⁻¹ ano⁻¹) de massa seca 21,6% maior, quando comparada com a média do Latossolo (19,24 ton ha⁻¹ ano⁻¹). Alguns estudos relatam a influência dos fatores ambientais na produção total de biomassa seca, com variações que podem atingir 169%, dependendo da disponibilidade de água e nutrientes (Gonçalves et al. 2013; Fernandez et al. 2018).

Silva et al. 2021, avaliando o crescimento de *E. urophylla* observaram correlações positivas e significativas para o IMA, massa seca e a produtividade energética. Desta forma, a maior produtividade energética ou estoque de energia por ha e por ano está fortemente relacionada ao incremento médio anual, demonstrando que a quantidade de

energia produzida pela floresta por ano depende de variáveis inerentes à madeira, diretamente influenciadas pelo genótipo, os quais podem responder de forma diferente às condições do ambiente (Brun et al. 2017; Silva et al. 2021; Varghese et al. 2107).

Neste sentido, o clone I (*E. urophylla*) no Plintossolo, obteve o maior valor para a produtividade energética (648.510,8 MJ.ha⁻¹.ano⁻¹), ou seja, produziu mais energia por hectare ano⁻¹. Esse resultado foi 226,6% maior que o verificado para o clone II (*E. resinifera* x *E. grandis*) no Latossolo, que obteve o menor valor (198.577,4 MJ.ha⁻¹.ano⁻¹). Na média geral, considerando os dois tipos de solo, o clone I permaneceu sendo o que teve a maior produtividade energética, 518.761,4 MJ.ha⁻¹.ano⁻¹, dentre os cinco clones avaliados.

No Latossolo, o clone I (*E. urophylla*) obteve a produtividade energética 66,7% ou 259.498,8 MJ.ha⁻¹.ano⁻¹ inferior ao mesmo clone do Plintossolo. Santos et al. (2012) ao avaliar três diferentes clones de *E. urophylla* aos 6 anos, mesmas características do clone I desse estudo, encontraram produtividades energéticas entre 371.408,4 e 287.830,8 MJ.ha⁻¹.ano⁻¹, mostrando que diferentes clones da mesma espécie, podem apresentar diferentes taxas de crescimento em um mesmo local, influenciando de forma direta no estoque energético da plantação.

Ao avaliar a produtividade energética considerando o tipo de solo, observa-se que a quantidade de energia gerada, por hectare e por ano, pelas árvores no Plintossolo foi cerca de 21,5% maior, quando comparada com a média geral das árvores do Latossolo. Os clones I (*E. urophylla*), IV (*urophyla* x *E. grandis*) e V (*E. cloeziana*) novamente apresentaram diferenças significativas sobre a forma que se comportaram nos diferentes tipos de solo.

A maior produtividade energética do clone I no Plintossolo pode ser explicada pelo maior acúmulo de massa seca, em consequência do maior IMA. Nesse sentido, a produtividade energética ou estoque de energia de uma plantação florestal está diretamente relacionada a quantidade de massa seca, ou seja, valores mais altos resultam em maior energia estocada por unidade de área e tempo (Schwerz et al. 2020).

3.4 CONCLUSÕES

- A produtividade energética dos cinco clones de *Eucalyptus* spp. avaliados está correlacionada em maior magnitude com a taxa de crescimento em volume do tronco das árvores (IMA);

- O clone I (*E. urophylla*), apresentou maior produtividade energética e é o material genético recomendado para plantação florestal com fins energéticos, independentemente do tipo de solo, visto que na média geral esse clone também apresentou os melhores resultados;

- Os clones implantados no Plintossolo cresceram em média 17% mais que os clones no Latossolo e geraram uma quantidade de energia 21,5% maior por hectare e por ano.

3.5 REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira, determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ALMEIDA, M. N. F., VIDAURRE, G. B., PEZZOPANE, J. E. M., LOUSADA, J. L. P. C., SILVA, M. E. C. M., CÂMARA, A. P., ALVARES, C. A. Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology and Management**, Holanda, v. 458, p. 117743, 2020.

ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M., SPAROVEK, G. 2013. Köppen´s climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22 (6), 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ANDRÉ, F.J., CASTRO, L.M., CERDÁ, E. Las energías renovables en el ámbito internacional. **Renewable energies at an international level**. Cuad. Econ. ICE 83, 11–36, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM International. **ASTM D5865-13**: standard test method for gross calorific value of coal and coke. West Conshohocken; 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira, determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

BARBOSA, L. C.; SOUZA, Z. M.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; ROSSI NETO, J.; GARSIDE, A. L.; CARVALHO, J. L. N. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 13, p. 15-25, 2018.

BINKLEY, D., CAMPOE, O. C., ALVARES, C., CARNEIRO, R. L., CEGATTA, Í., & STAPE, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271-283, 2017.

BRUN, E.J.; BERSCH, A.P.; PEREIRA, F.A.; SILVA, D.A.; BARBA, Y.R.; DORINI JUNIOR, J.R. Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. **Revista Floresta**, v.48, n.1, p 87-92, 2018.

COSTA, L. S. E., DO SANTOS, R. C., VIDAURRE, G. B., CASTRO, R. V. O., ROCHA, S. M. G., CARNEIRO, R. L., TRUGILHO, P. F. The effects of contrasting environments

on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 117807, 2020.

CUNHA, T. Q. G.; SANTOS, A. C.; NOVAES, E.; HANSTED, A. L. S.; YAMAJI, F. M.; SETE JR, C.R. *Eucalyptus* expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, p. 105900, 2021.

ELOY, E.; SILVA, D. A.; SCHMIDT, D.; TREVISAN, R.; CARON, B. O.; ELLI, E. F. Effect of planting age and spacing on energy properties of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 4, 2016.

FERNÁNDEZ, M.; ALAEJOS, J.; ANDIVIA, E.; VÁZQUEZ-PIQUÉA, J.; RUIZ, F.; LÓPEZA, F.; TAPIAS, R. *Eucalyptus x urograndis* biomass production for energy purposes exposed to a Mediterranean climate under different irrigation and fertilisation regimes. **Biomass and Bioenergy**, v. 111, p. 22–30, 2018.

FERNÁNDEZ, M., TAPIAS, R., ALESSO, P., RUIZ, F., LÓPEZ, G. Variación estacional del incremento diametral diario de cuatro clones de *Eucalyptus globulus* Labill. en Huelva medido con dendrómetros de precisión, **Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales**. 35, 143–149, 2012.

GARCÍA-MOROTE, F.A., LÓPEZ-SERRANO, F.R., MARTÍNEZ-GARCÍA, E., ANDRÉS-ABELLÁN, M., DADI, T., CANDEL, D., RUBIO, E., LUCAS-BORJA, M.E. Stem biomass production of *Paulownia elongata* × *P. fortunei* under low irrigation in a semi-arid environment. **Biomass and Bioenergy**. 111 (2018) 22–30 *Forests* 5, 2505–2520, 2014.

GONCALVES, J. L. M, ALVARES, C. A., HIGA, A. R., SILVA, L. D., ALFENAS, A. C., STAHL, J., BOUILLET, J. P. D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest ecology and management**, v. 301, p. 6-27, 2013.

HESS, A. F., RICKEN, P., & CIARNOSCHI, L. D. Dendrocronologia, incremento e manejo florestal em floresta de araucária-SC. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1568-1582, 2018.

JIANG, R., WANG, T. T., JIN, S. H. A. O., SHENG, G. U. O., WEI, Z. H. U., YU, Y. J., HATANO, R. Modeling the biomass of energy crops: Descriptions, strengths and prospective. **Journal of integrative agriculture**, v. 16, n. 6, p. 1197-1210, 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2021**. Brasília: IBA, 2021. 93 p.

MALUF, H. J. G. M.; SOARES, E. M. B.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L; SILVA, M. F. O. Disponibilidade e recuperação de nutrientes de resíduos culturais em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p 1690-1702, 2015.

MELESSE, S. F.; ZEWOTIR, T. The effect of correlated climatic factors on the radial growth of eucalypt trees grown in coastal Zululand of South Africa. **African Journal of Agricultural Research**, África, v. 8, n. 14, p. 1233- 1244, 2012.

MIRANDA, D. L.C.; JUNIOR, V. B.; GOUVEIA, D. M. Fator de forma e equações de volume para estimativa volumétrica de árvores em plantio de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Plena**. Aracajú, v. 11, n. 3, p. 3-11, 2015.

OLIVEIRA, R.S., SANTOS, L.T.V., MELO, S.C., CHAGAS, M.P., RIBEIRO, D., REIS, C.A.F., NOVAES, E., SETTE JR., C.R. Wood energy yield for *Eucalyptus* clones growing under seasonal drought-stress in Brazil. **Biomass and Bioenergy** 154. 106264, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106264>

OLIVEIRA, R.S., RIBEIRO, C.V.G., NERES, D.F., PORTO, A.C.M., RIBEIRO, D., SIQUEIRA, L., ZAUZA, E.A.V., COELHO, A.S.G., REIS, C.A.F., ALFENAS, A.C., NOVAES, E. Evaluation of genetic parameters and clonal selection of *Eucalyptus* in the Cerrado region. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**. 20 (3), e29982031, 2020. <http://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3a35>

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T. Programa de melhoramento genético de eucalipto da Embrapa Florestas: resultados e perspectivas. Colombo: Embrapa, 2011.

PUPIN, S.; ZARUMA, D. U. G.; SOUZA, C. S.; CAMBUIM, J.; COLETO, A. L.; ALVES, P. F.; PAVAN, B. E.; MORAES, M. L. T. Parâmetros genéticos para caracteres de crescimento, espessura de casca e densidade básica da madeira em progênies de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 115, p. 455-465, 2017.

REIS, C. F.; NETO, A. T.; BRUNCKHORST, A.; MOREIRA, J. M. M. A. P.; PEREIRA A. V.; MORAES A. C. Cenário do Setor de Florestas Plantadas no estado de Goiás. EMBRAPA FLORESTA 2017.

RESQUIN, F.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; CARRASCO-LETELIER, L.; CASNATIA, C. R. Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and wood density of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, and *Eucalyptus grandis* for bioenergy in Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 438, p. 63–74, 2019.

RESENDE, R. T., SOARES, A. A., FORRESTER, D. I., MARCATTI, G. E., DOS SANTOS, A. R., TAKAHASHI, E. K., LEITE, H. G. Environmental uniformity, site quality and tree competition interact to determine stand productivity of clonal *Eucalyptus*. **Forest ecology and management**, v. 410, p. 76-83, 2018.

RUBILAR, R., HUBBARD, R., EMHART, V., MARDONES, O., QUIROGA, J.J., MEDINA, A., VALENZELA, H., ESPINOZA, J., BURGOS, Y., BOZO, D. Climate and water availability impacts on early growth and growth efficiency of *Eucalyptus* genotypes: The importance of GxE interactions. **Forest Ecology and Management** 458, 117763, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117763>

SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 971-980, 2012.

SCHWERZ, F., NETO, DD, CARON, BO, NARDINI, C., SGARBOSSA, J., ELOY, E., REICHARDT, K. Biomass and potential energy yield of perennial woody energy crops under reduced planting spacing. **Renewable Energy**, v. 153, p. 1238-1250, 2020.

SILVA, V.E., NOGUEIRA, T.A.R., ABREU-JUNIOR, C.H., HE, Z., BUZETTI, S., LACLAU, J.P., TEIXEIRA FILHO, M.C.M., GRILLI, E., MURGIA, I., CAPRA, G.F. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, V. 455, 117673, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117673>.

SILVA, B.I.P., SANTOS, A.C., SILVA, M.F., MORAES, M.D.A, SETTE JR., C.R. Bioenergy yield of *Eucalyptus urophylla* clones and its relationship with the mean annual increment of wood volume. **Canadian Journal of Forest Research**. 51(9): 1381-1385. 2021. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0407>

TOLEDO, G. R.; SOUZA, G. M.; BERTOLLI, S. C. Influence of root interaction in eucalyptus clones under two environmental conditions. **Procedia Environmental Sciences**, v. 29, p. 223-224, 2015.

TORRES, C. M. M.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; JACOVINE, L. A. G.; NETO, S. N. O.; CARNEIRO, A. C. O.; TORRES, C. M. M. E. Estimativas da produção e propriedades da madeira de eucalipto em Sistemas Agroflorestais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 137-148, mar. 2016.

VARGHESE, M., HARWOOD, C. E., BUSH, D. J., BALTUNIS, B., KAMALAKANNAN, R., SURAJ, P. G., HEGDE, D.; MEDER, R. Growth and wood properties of natural provenances, local seed sources and clones of *Eucalyptus camaldulensis* in southern India: implications for breeding and deployment. **New forests**, v. 48, n. 1, p. 67-82, 2017.

4. CAPÍTULO II

QUALIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp. PARA FINS ENERGÉTICOS, CULTIVADA EM DIFERENTES TIPOS DE SOLO NO CERRADO

RESUMO

A avaliação da qualidade energética da madeira de clones de eucalipto plantados em diferentes condições edafoclimáticas é fundamental para promover a expansão sustentável de florestas energéticas para regiões sem tradição no plantio de florestas. Este trabalho teve como objetivo avaliar as características energéticas da madeira (análise imediata, análise elementar, poder calorífico superior, densidades básica e energética) de cinco clones de *Eucalyptus* spp., plantados em solos distintos (Latosolo e Plintossolo háplico) no Cerrado brasileiro. As densidades básica e energética da madeira são influenciadas pelo genótipo (clone), mas não pelo tipo de solo (sítio). O poder calorífico e a análise imediata mostraram um efeito significativo de interação entre clone e tipo de solo. Assim, para essas variáveis energéticas da madeira, os clones se comportam de forma diferente dependendo do local de cultivo (tipo de solo). Os resultados indicam que o clone com genes de *E. cloeziana* tem o maior potencial energético devido à melhor qualidade da madeira: baixo teor de cinzas (0,11 – 0,09%) e teor de nitrogênio (0,24 – 0,31%), maior densidade básica (490,60 – 487,22 kg. m⁻¹) e densidade energética (9720,5 – 9589,1 MJ m⁻¹), para os tipos de solo Latossolo e Plintossolo, respectivamente.

Palavras-chave: Biomassa; plintossolo; latossolo; genótipos

ABSTRACT

The evaluation of wood energy quality of *Eucalyptus* clones planted in different edaphoclimatic conditions is fundamental to promote the sustainable expansion of energy forests to traditionally non-forest regions. This study aimed to evaluate the wood energy characteristics (proximate analysis, elemental analysis, higher heating value, basic and energy densities) from 5 *Eucalyptus* spp. clones planted in latosol and haplic plinthosol soils in the Brazilian Cerrado (Savannah), considered a traditionally non-forest region. The wood basic and energetic densities are influenced by genotype (clone) but not influenced by the soil type (site). The higher heating value and the proximate analysis showed a significant effect of interaction between clone and soil type. Thus, for these wood energy variables, the clones behave differently depending on the growing location (soil type). Our results indicate that the clone with *E. cloeziana* genes has the greatest energy potential because of the best wood quality: low ash (0.11 – 0.09 %), nitrogen contents (0.24 - 0.31%), higher basic density (490.60 – 487.22 kg.m⁻¹) and energy density (9720.5 – 9589.1 MJ m⁻¹), for soil types Latosol and Plinthosol.

4.1 INTRODUÇÃO

As plantações florestais com o gênero *Eucalyptus* estão presentes em mais de 120 países, ocupando a maioria das regiões tropicais do mundo (Beech et al. 2017). Essa situação é atribuída a características como baixa rotação, alta qualidade da madeira para diversos usos e alta adaptabilidade e produtividade (Eufrade Júnior et al. 2017; Oliveira et al. 2021). Portanto, a madeira de eucalipto é uma das principais matérias-primas utilizadas nos segmentos industriais do mundo (Brancalion e Chazdon, 2017).

No Brasil, o gênero *Eucalyptus* apresenta a maior produtividade do mundo, com valor médio de $36 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e tem sido utilizado para diversas aplicações como celulose, madeira serrada, painel de madeira e bioenergia (Brazilian Tree Industry, 2020). O setor de florestas plantadas no Brasil possui cerca de 7,8 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo 72% da área total ocupada por espécies do gênero *Eucalyptus*.

As plantações de eucalipto se concentraram, principalmente, nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, principalmente dentro do bioma Mata Atlântica. No entanto, atualmente estão sendo preferidas novas áreas de plantio com menor valor da terra, maiores incentivos fiscais e maior flexibilidade em termos de infraestrutura e logística (Oliveira et al. 2020), como a região Centro-Oeste do Brasil (Cerrado brasileiro). Essas novas áreas de plantio são predominantemente caracterizadas por solos distróficos e chuvas sazonais muito distintas em relação às regiões tradicionais (Alvares et al. 2013).

Em algumas áreas do Cerrado brasileiro, as plantações de *eucalipto* têm produtividade superior a $45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; no entanto, em outras áreas eles têm menor produtividade, variando de 15 a $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Binkley et al. 2017), o que é em parte uma consequência da escassez de genótipos (clones) adaptados às suas condições edafoclimáticas.

Materiais genéticos altamente adaptados ou produtivos em condições edafoclimáticas específicas podem limitar a expansão de florestas plantadas ou até mesmo reduzir sua produtividade. Uma forma de identificar materiais genéticos de eucalipto com características superiores de adaptabilidade, produtividade e qualidade de madeira em uma determinada região pode ser a implementação de testes clonais (Cunha et al. 2021). Da mesma forma, é notória a importância de estudos que avaliem a possibilidade de expansão de florestas plantadas para regiões tradicionalmente não florestais, com potencial de exploração.

Os programas de melhoramento genético buscam cada vez mais adaptar seus clones às condições ambientais específicas, visando alcançar altos níveis de qualidade e homogeneidade nos plantios de eucalipto (Oliveira et al. 2020). O melhoramento genético do eucalipto, por muito tempo, teve como foco principal o crescimento das árvores. O desenvolvimento de genótipos com qualidade de madeira para fins energéticos também tem sido buscado recentemente (Cunha et al. 2021; Oliveira et al. 2021; Silva et al. 2021). Assim, é fundamental conhecer a capacidade produtiva dos genótipos, a qualidade da madeira e compreender o efeito ambiental da sua seleção (Pupin et al. 2017; Oliveira et al. 2020).

Diversos estudos enfatizaram a importância de avaliar as propriedades do solo para determinar a produtividade e a qualidade da madeira em diferentes locais, abordando fatores edáficos em características gerais ou específicas do solo (Alfaro-Sánchez et al. 2019; Almeida et al. 2020; Caldeira et al. 2020; Maidana et al. 2021; Oliveira et al. 2021; Rubilar et al. 2020; Vieira et al. 2021). No geral, esses estudos encontraram efeitos significativos das características do solo no crescimento e na qualidade da madeira. No entanto, poucos estudos consideraram a avaliação da qualidade da madeira para produção de energia.

Este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade energética da madeira a partir de clones de *Eucalyptus* spp. plantados em dois tipos distintos de solo: Latossolo amarelo e Plintossolo háplico, indicando o genótipo com as melhores características da madeira e aumentando assim, o conhecimento sobre clones de *Eucalyptus* adaptados às regiões do bioma Cerrado.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

As seguintes características energéticas foram determinadas a partir de amostras de madeira obtidas de clones em diferentes tipos de solo:

Densidade básica da madeira (DB, Kg m⁻³): DB determinada nas 30 amostras de madeira por clone (5 árvores x 6 posições longitudinais) pelo método hidrostático a partir dos valores de peso seco (103°C por 48h) e o peso saturado das amostras de madeira (cunhas). A média aritmética foi calculada por árvore (com todas as posições

longitudinais, da base ao topo das árvores). Cinco repetições (árvores) foram usadas para determinar o DB média por clone.

Poder calorífico superior (PCS, MJ kg⁻¹): O PCS foi determinado nas 3 amostras compostas de madeira (com todas as posições longitudinais, base ao topo) por clone, de acordo com a norma ASTM D5865 (2013) usando um calorímetro IKA WORKS C -200. Três repetições foram usadas para determinar o PCS médio por clone.

Poder calorífico inferior (PCI, MJ kg⁻¹): foi determinado o poder calorífico inferior da madeira, considerando o teor de hidrogênio apresentado no Capítulo 2, tabela 3. (Equação 1).

$$PCI = PCS - 600 * \frac{9 * H}{100} \quad (1)$$

Densidade energética (DE, MJ m⁻³): obtida pelo produto entre o poder calorífico inferior (PCI, MJ kg⁻¹) e da densidade básica da madeira (DB, Kg m⁻³) (Eq. 1). Cinco repetições (árvores) foram usadas para determinar a DE média por clone.

$$(1) DE = PCI \times DB$$

Análise imediata: determinação dos teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo nas 3 amostras compostas de madeira (com todas as posições longitudinais) por clone com base nas normas ASTM E872-82 (2013) e ASTM D1102-84.34 (2013). Três repetições foram usadas para determinar a média de cinzas, materiais voláteis e teores de carbono fixo por clone.

Análise elementar (%): determinada por um analisador universal EA 2400 Series II nas amostras compostas de madeira (com todas as posições longitudinais) por clone com base na norma ASTM D3176-74 (1983). Os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio foram determinados em uma repetição por clone.

Análise estatística

Foi utilizado esquema fatorial em delineamento de blocos completos casualizados (cinco blocos) com cinco clones e duas áreas de plantio (tipos de solo), 10 tratamentos no total e o número de repetições descrito no item 2.3 para avaliar o efeito de diferentes clones (genótipo), locais (tipo de solo) e a interação genótipo x tipo de solo nas características da madeira. Para os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, o efeito dos fatores não foi avaliado, pois foi realizada apenas uma análise (repetição) por clone.

Foram avaliados outliers, normalidade dos dados e suposição de homogeneidade de variância. A análise de variância (ANOVA) foi aplicada para verificar o efeito dos tratamentos utilizando o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.3 RESULTADOS

A análise de variância indicou efeito significativo do clone (genótipo), tipo de solo (local) e da interação entre clone e tipo de solo sobre as características da madeira.

Os clones avaliados apresentaram densidade básica de madeira com valor médio de 464,09 kg m⁻³ aos seis anos de idade, com variação significativa entre os clones dentro dos sítios (Figura 2A). Diferentemente das demais características da madeira, não foi observado efeito significativo da interação genótipo e sítio. Assim, os clones se comportaram de forma semelhante, independentemente de onde as árvores cresceram. Por exemplo, clone I (*E. urophylla*) e clone II (*E. cloeziana*) apresentaram menor (433,5 - 443,0 kg m⁻³) e maior (490,6 - 487,2 kg m⁻³) valores para densidade básica da madeira, respectivamente, em ambos os tipos de solo (Figura 2A).

Assim como observado para a densidade básica da madeira, não foi observado efeito significativo da interação na densidade energética da madeira e os menores (8608,8 a 8794,9 MJ m⁻³) e maiores (9720,5 a 9589,1 MJ m⁻³) valores foram observados no clone I (*E. urophylla*) e clone II (*E. cloeziana*), respectivamente (Figura 2C).

O maior poder calorífico (Figura 2B) e a análise imediata (Figura 3) mostraram um efeito significativo de interação entre clone e tipo de solo. Assim, para essas variáveis de madeira, os clones se comportam de forma diferente dependendo do local de cultivo.

A composição elementar da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. plantados em dois tipos de solo são apresentados na Tabela 2.

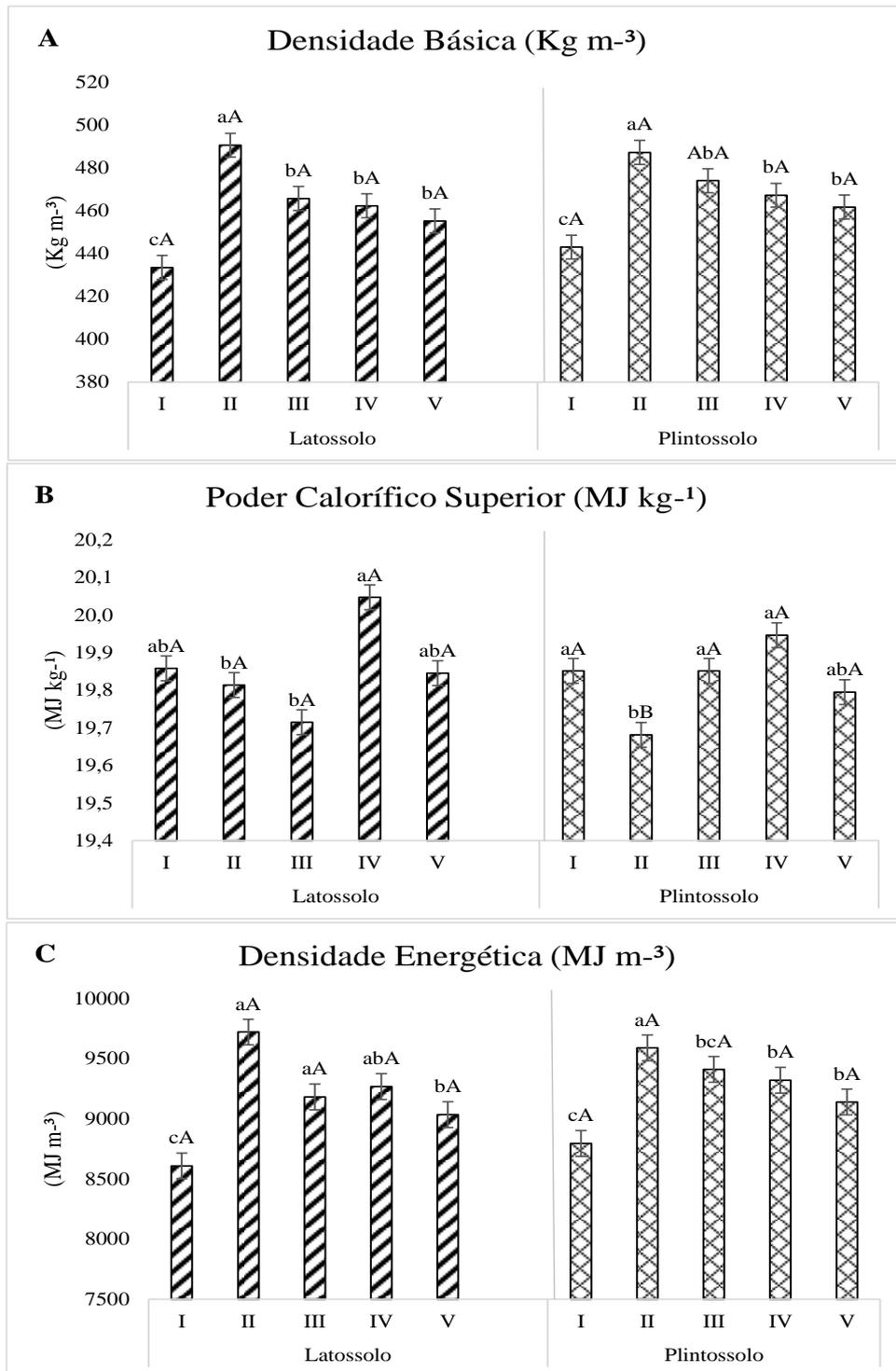


Figura 2: Interação entre clone (I a V) e sítio (Latossolo e Plintossolo) para densidade básica (A), poder calorífico superior (B) e densidade energética (C) na madeira de *Eucalyptus* spp. O efeito dos clones dentro do sítio é indicado por letras minúsculas e o efeito dos sítios sobre os clones é indicado por letras maiúsculas. As médias seguidas da mesma letra não diferem, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. As barras indicam o desvio padrão. Clones: I - *E. urophylla*; II - *E. cloeziana*; III - *E. resinifera* x *E. grandis*; IV - *E. saligna* x *E. tereticornis*; V - *E. urophylla* x *E. grandis*.

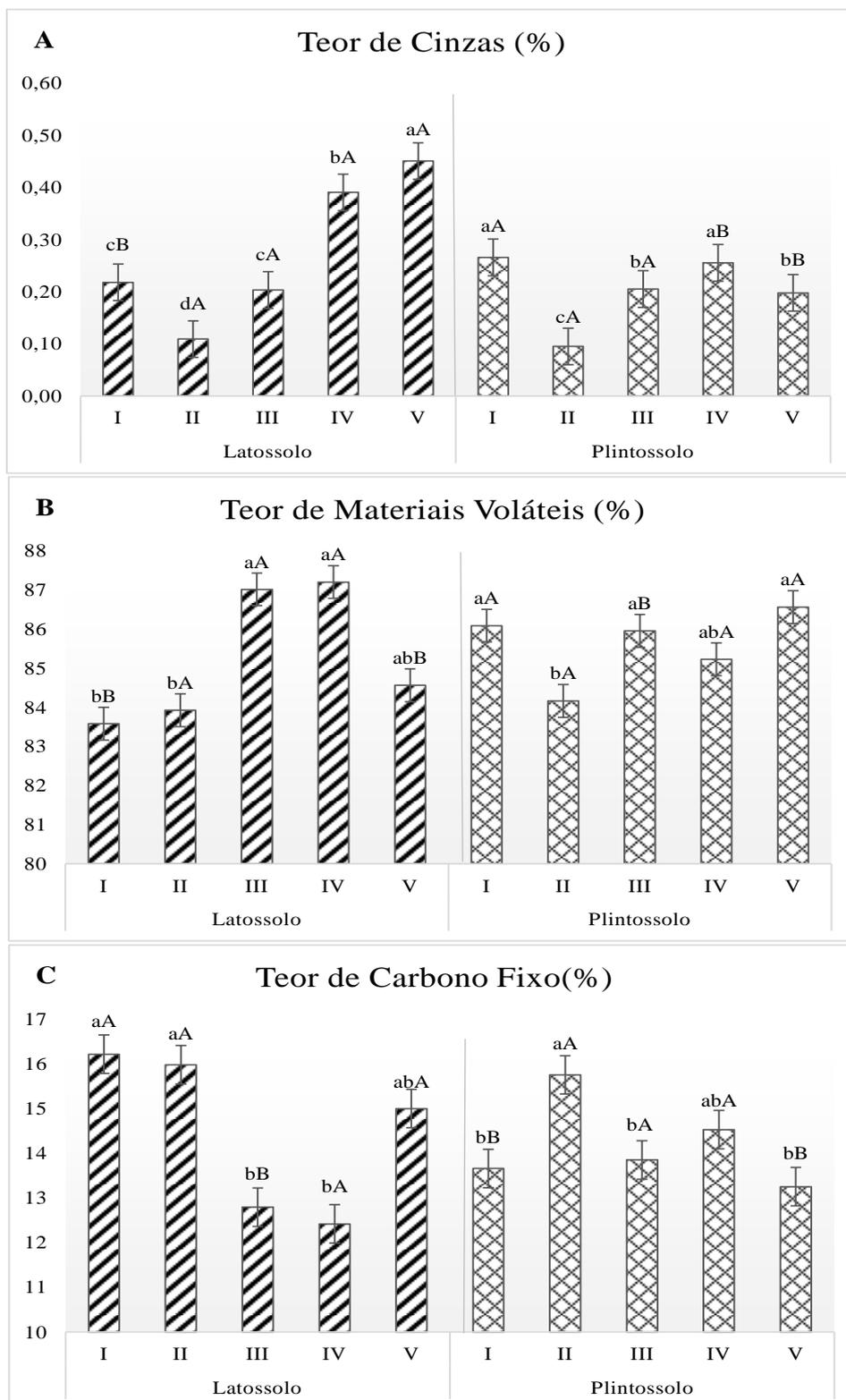


Figura 3: Interação entre clone (I a V) e sítio (Latossolo e Plintossolo) para os teores de cinzas (A), materiais voláteis (B) e carbono fixo (C) na madeira de *Eucalyptus* spp. O efeito dos clones dentro do local é indicado por letras minúsculas e o efeito dos locais no clone é indicado por letras maiúsculas. As médias seguidas da mesma letra não diferem, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. As barras indicam o desvio padrão. Clones: I - *E. urophylla*; II - *E. cloeziana*; III - *E. resinifera* x *E. grandis*; IV - *E. saligna* x *E. tereticornis*; V - *E. urophylla* x *E. grandis*.

Tabela 3. Composição elementar da madeira de *Eucalyptus* spp. clones plantados em dois tipos de solo.

Solo	Clones	Características			
		Nitrogênio (%)	Hidrogênio (%)	Carbono (%)	Oxigênio (%)
Latossolo	I	0.30	5.45	43.70	50.55
	II	0.24	6.08	43.63	50.05
	III	0.23	8.18	43.90	47.69
	IV	0.26	6.51	45.27	47.96
	V	0.35	6.38	45.43	47.84
Plintossolo	I	0.32	7.07	44.81	47.80
	II	0.31	6.08	43.88	49.73
	III	0.31	6.16	44.26	49.27
	IV	0.33	6.48	45.70	47.49
	V	0.35	6.75	47.78	45.12
Coeficiente de variação		0.04	0.73	5.11	1.59

Clones: I - *E. urophylla*; II - *E. cloeziana*; III - *E. resinifera* x *E. grandis*; IV - *E. saligna* x *E. tereticornis*; V - *E. urophylla* x *E. grandis*.

4.4 DISCUSSÃO

As características do solo dos dois locais são diferentes, principalmente no que diz respeito aos teores de argila, areia e silte. Essa diferença nas características do solo não foi suficiente para influenciar a densidade básica e energética da madeira dos clones de *Eucalyptus* spp. Os resultados indicam que a densidade básica e energética da madeira são influenciadas pelo genótipo (clone), mas não pelo tipo de solo (sítio).

Assim, entende-se que a variação da densidade básica da madeira não pode ser explicada pelas características edáficas selecionadas, e que fatores genéticos estão exercendo maior influência sobre essa variável. As diferentes espécies dos clones avaliados resultaram em variações na densidade básica da madeira, pois a característica genética da espécie influenciou fortemente essa variável (Resquin et al. 2019).

É possível confirmar que o clone II (*E. cloeziana*) teve um incremento médio anual baixo, nos dois tipos de solo, em relação aos demais clones. Consequentemente, o maior valor em densidade básica e energética da madeira foi atribuído a este clone. O efeito oposto foi observado para os clones I (*E. urophylla*) e V (*E. urophylla* x *E. grandis*), que apresentaram altos valores de incremento médio anual, principalmente no plintossolo, e obtiveram menor valor para ambas as densidades.

Segundo Oliveira et al. (2021), a baixa produtividade de *E. cloeziana* indica uma baixa adaptação deste clone às condições edafoclimáticas do Cerrado. A madeira de

Eucalyptus sp. de locais com alta taxa de crescimento mostrou uma tendência a ter menor densidade básica (Rigatto et al. 2004). Essas interações podem ser observadas nos resultados de uma variedade de estudos (Protásio et al. 2017; Protásio et al. 2019), que demonstram que espécies com baixa densidade de madeira geralmente apresentam maiores taxas de crescimento (Kunstler et al. 2016). No entanto, o conjunto de variáveis edafoclimáticas deve ser considerado ao avaliar seu efeito na densidade básica e no incremento médio anual de madeira (Costa et al. 2020).

Vários estudos verificaram diferenças na densidade básica de vários genótipos de eucalipto (Costa et al. 2020; Cunha et al. 2021; Lima et al. 2020; Lins et al. 2021; Ramos et al. 2019; Silva et al. 2019; Silva et al. 2021). Observa-se que o clone II (*E. cloeziana*) apresentou a maior densidade básica e energética em ambos os tipos de solo, destacando-se como potencial produtor de energia, e o clone I (*E. urophylla*) apresentou os menores valores para ambas as densidades. No entanto, a baixa variação de densidade entre os clones III (*E. resinifera* x *E. grandis*), IV (*E. saligna* x *E. tereticornis*) e V (*E. urophylla* x *E. grandis*) não compromete substancialmente o uso da madeira avaliada como uma fonte de bioenergia.

Os resultados de Barbosa et al. (2019) e Rigatto et al. (2004) também não verificaram diferenças significativas para a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. em diferentes tipos de solo. Outros estudos com diferentes espécies florestais também constataram que a densidade básica da madeira não foi totalmente influenciada pelos atributos do solo (Vasquez-Cuecuecha, et al. 2015).

O poder calorífico superior (PCS) é um dos padrões centrais utilizados para selecionar espécies, híbridos e clones, pois está relacionado à quantidade de energia liberada pela madeira durante sua queima (Carneiro et al. 2014). A quantidade de calor emitida por unidade de massa, assim como por unidade de volume (densidade energética), é fundamental para a compreensão da capacidade energética da madeira. Os valores de PCS encontrados para *Eucalyptus* spp. são consistentes com os relatados na literatura (Fernández et al. 2018; Lins et al. 2021).

Houve diferença entre os clones, sendo que o clone IV (*E. saligna* x *E. tereticornis*) apresentou o maior PCS. Assim como observado para a densidade básica da madeira, variações no PCS podem estar relacionadas ao efeito das espécies que constituem os clones avaliados. Para o PCS, o efeito do tipo de solo sobre os clones foi verificado apenas no clone II (*E. cloeziana*).

Apesar do efeito significativo do tipo de solo no PCS do clone II, observa-se que os valores encontrados foram aproximados ($0,13 \text{ MJ kg}^{-1}$ de diferença) e diferenças maiores que $1,26 \text{ MJ kg}^{-1}$ são consideradas para geração de energia (Brand, 2010). Assim, pode-se inferir que os menores valores de PCS dos clones de *Eucalyptus* avaliados no plintossolo não comprometem o uso energético desta biomassa.

O PCS da madeira está intrinsecamente ligado à sua composição química estrutural (Pereira et al. 2013). Variações no PCS podem estar relacionadas à composição elementar da madeira dos clones de *Eucalyptus*. A energia liberada durante o processo de combustão está positivamente correlacionada com os teores de carbono e hidrogênio em função do valor energético desses elementos. Em contraste, altos valores de oxigênio e nitrogênio diminuem o poder calorífico, diminuindo o potencial energético do material combustível (Huang et al. 2009; Protásio et al. 2011). Esses componentes elementares têm correlações diretas com o poder calorífico da biomassa vegetal (Huang et al. 2009).

Observa-se que os clones cultivados no Latossolo apresentaram os menores teores de nitrogênio, comparados aos mesmos clones avaliados no Plintossolo, que apresentaram o maior teor de nitrogênio. Em relação ao teor de carbono, observou-se maior valor de carbono para a madeira dos clones cultivados em Plintossolo. Vários estudos verificaram a influência do solo na composição elementar da madeira, Neves et al. (2011) encontraram diferenças significativas para a composição de oxigênio, nitrogênio e carbono em madeiras de eucalipto em diferentes locais, e Reis et al. (2012) encontraram influência do tipo de solo para os teores de hidrogênio e carbono na madeira.

Em relação à densidade energética, Lima et al. (2020) verificaram uma correlação linear entre densidade básica da madeira e densidade energética, mostrando uma forte influência da primeira variável sobre a segunda. A densidade energética é uma diretriz essencial para combustíveis sólidos, pois representa a quantidade de energia armazenada em um determinado volume (Silva et al. 2018; Simetti et al. 2018). A maior densidade energética foi observada no clone II (*E. cloeziana*) no Latossolo, que produziu mais energia por metro cúbico de madeira. Este resultado está diretamente relacionado aos maiores valores de densidade básica da madeira observados neste clone.

A análise imediata mostrou efeito significativo da interação entre clone e tipo de solo. Assim, os clones se comportam de forma diferente dependendo do local de cultivo. Esses resultados indicam que a avaliação da interação do genótipo com o ambiente, no caso, tipo de solo, é importante e necessária, principalmente para selecionar os melhores

clones por local e obter mais indicações de quais materiais devem ser adotados em cada região (Cunha et. al. 2021).

O clone II (*E. cloeziana*) apresentou o menor teor de cinzas, o que pode ser explicado pelo menor teor de minerais na madeira em ambos os tipos de solo. Segundo Carneiro et al. (2017), o teor de cinzas pode ser reflexo da fertilidade natural dos solos e da adubação mineral, o que possibilita adaptá-los por meio do uso da adubação mineral, para que os teores de cinzas atinjam valores específicos adequados a determinados setores, como o da indústria siderúrgica. Lins et al., (2021) atribuíram as variações no teor de cinzas de *Eucalyptus* spp. à composição mineral de cada árvore devido à localização.

Foram verificadas diferenças significativas no teor de cinzas para o tipo de solo nos clones I (*E. urophylla*), IV (*E. saligna* x *E. tereticornis*) e V (*E. urophylla* x *E. grandis*). Ao avaliar o clone de *Eucalyptus urophylla* em três locais diferentes, Reis et al. (2012) verificaram variações de 54 a 84% no teor de cinzas nos diferentes locais, mostrando a influência do local de plantio nesta característica da madeira. Neves et al., (2011) também concluíram que o teor de cinzas apresentou diferenças significativas entre clones de eucalipto em dois locais distintos.

O teor de voláteis na madeira em sua forma *in natura* favorece a ignição, no entanto, a indústria siderúrgica prefere baixos teores de voláteis e maior teor de carbono fixo (Cheng et al. 2016). Bruzual (2015) relata que o carbono fixo é o componente mais importante em um agente redutor, pois é responsável pela redução de óxidos de ferro no minério de ferro durante a produção do metal no alto-forno.

Os teores de materiais voláteis e carbono fixo variaram pouco em relação ao clone e mostraram diferenças entre os clones e entre os tipos de solo nos clones I (*E. urophylla*), III (*E. resinifera* x *E. grandis*) e V (*E. urophylla* x *E. grandis*); esse fator já era esperado, pois a relação entre materiais voláteis e carbono fixo é inversamente proporcional. Os valores mínimo e máximo para materiais voláteis (83 a 87%) e carbono fixo (12 a 17%) foram semelhantes aos encontrados por Ignacio et al. (2019), que avaliaram essas variáveis em diversos clones de eucalipto (*E. grandis*, *E. saligna*, *E. dunnii*, entre outros). Silva et al., (2018) também encontraram valores semelhantes para ambas as variáveis em clones de *E. grandis* x *E. urophylla* com 7 anos de idade.

4.5 CONCLUSÃO

A qualidade energética da madeira de *Eucalyptus* spp. foi influenciada pelo genótipo (clone), tipo de solo (sítio) e interação (genótipo x tipo de solo) em diferentes níveis de intensidade. As densidades básica e energética da madeira são influenciadas pelo clone, mas não pelo tipo de solo. O maior poder calorífico e a análise elementar mostraram um efeito significativo de interação entre clone e tipo de solo. Assim, para essas variáveis energéticas da madeira, os clones se comportam de forma diferente dependendo do local de cultivo (tipo de solo).

Os resultados indicam que o clone com genes de *E. cloeziana* possui o maior potencial energético devido às melhores características da madeira, pois possui as maiores densidades básicas e energéticas e menor teor de cinzas.

Para a indicação do clone mais adequado para implantação florestal em larga escala nas condições edafoclimáticas do Cerrado brasileiro, recomenda-se avaliar a quantidade de energia disponível por unidade de área e tempo (produtividade energética), pois em sua determinação são considerados variáveis de crescimento e qualidade da madeira.

4.6 REFERENCIAS

Alfaro-Sanches, R., Jump, A.S., Pino, J., Díez-Nogales, O., Espelta, J.M. 2019. Land use legacies drive higher growth, lower wood density and enhanced climatic sensitivity in recently established forests. *Agricultural and Forest Meteorology*. 276-277, 107630. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107630>

Almeida, M.N.F., Vidaurre, G.B., Pezzopane, J.E.M., Lousada, J.L.P.G., Silva, M.E.G.M., Câmara, A.P., Rocha, S.M.G., Oliveira, J.C.L., Campoe, O.C., Carneiro, R.L., Alvares, C.A., Tomazzelo-Filho, M., Figueiredo, F.M., Oliveira, R.F. 2020. Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. *Forest Ecology and Management* 458, 117743. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117743>

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22 (6), 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS – ASTM, 2013. ASTM D1102-84: Standard Test Method for Ash in Wood, ASTM Standards, West Conshohocken.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS – ASTM, 1983. ASTM D3176-74: Standards Methods for the Ultimate Analysis of Coal and Coke, ASTM Standards, West Conshohocken.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS – ASTM, 2013. ASTM D5865-13: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM Standards, West Conshohocken.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS – ASTM, 2013. ASTM E872-82: Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels. ASTM Standards, Philadelphia,

Barbosa, L.C., De Souza, Z.M., Franco, H.C.J., Otto, R., Rossi Neto, J., Garside, A.L., Carvalho, J.L.N. 2018. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. *Geoderma Reg.* (13) 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.03.002>

Barbosa, T.L., Oliveira, J.T.S., Rocha, S.M.G., Câmara, A.P., Vidaurre, G.B., Rosado, A.M., Leite, F.P. 2019. Influence of site in the wood quality of *Eucalyptus* in plantations in Brazil. *Southern Forests: a Journal of Forest Science.* 81 (3). 247-253. <https://doi.org/10.2989/20702620.2019.1570453>

Beech, E., Rivers, M., Oldfield, S., Smith, P.P. 2017. Global Tree Search: the first complete global database of tree species and country distributions. *Journal of Sustainable Forestry* 36, 454-489. <http://dx.doi.org/10.1080/10549811.2017.1310049>

Binkley, D., Campoe, O.C., Alvares, C., Carneiro, R.L., Cegatta, I., Stape, J.L. 2017. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. *Forest Ecology and Management* 405, 271-283. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>.

Brazilian Tree Industry. 2020. Annual Report. 80p.

Brancalion, P.H.S., Chazdon, R.L. 2017. Beyond hectares: four principles to guide reforestation in the context of tropical forest and landscape restoration. *Restoration Ecology* 25 (4), 491-496. <http://dx.doi.org/10.1111/rec.12519>

Brand, M.A. 2010. Energia de biomassa florestal. Interciência, Rio de Janeiro.

Bruzual, C.F. 2015. Assessment of CO₂ mitigation potential, biomass use and plantation areas to sustain charcoal-ironmaking. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração* 12 (4), 325-334. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.0881>

Caldeira, D.R.M., Alvares, C.A., Campoe, O.C., Hakamada, R.E., Guerrini, I.A., Cegatta, I.R., Stape, J.L. 2020. Multisite evaluation of the 3-PG model for the highest phenotypic plasticity *Eucalyptus* clone in Brazil. *Forest Ecology and Management* 462, 117989. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117989>

Carneiro, A.C.O., Castro, A.F.N.M., Castro, R.V.O., Santos, R.C., Ferreira, L.P., Damásio, R.A.P., Vital, B.R. 2014. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. *Revista Árvore* 38 (2), 375-381. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>

Carneiro, A.C.O., Vital, B.R., Frederico, P.G.U., Figueiró, C.G., Fialho, L.F., Silva, C.M.S. 2017. Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados

em diferentes localidades. *Brazilian Journal of Wood Science* 8 (3), 127-135. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n3p127-135>

Cheng, Z., Yang, J., Zhou, L., Liu, Y., Wang Q. 2016. Characteristics of charcoal combustion and its effects on iron-ore sintering performance. *Applied Energy* 161, 364-374. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.095>

Costa, S.E.L., Santos, R.C., Vidaurre, G.B., Castro, R.V.O., Rocha, S.M.G., Carneiro, R.L., Campoe, O.C., Santos, C.P.S., Comes, I.R.F., Carvalho, N.F.O., Trugilho, P.F. 2020. The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. *Forest Ecology and Management* 458, 117807, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117807>

Cunha, T.Q.G., Santos, A.C., Novaes, E., Hansted, A.L.S., Yamaji, F.M., Sette Jr., C.R. 2021. *Eucalyptus* expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. *Biomass and Bioenergy* 144, 105900. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105900>

Eufrade Júnior, H.J., Nakashima, G.T., Yamaji, F.M., Guerra, S.P.S., Ballarin, A.W. 2017. *Eucalyptus* short-rotation coppice for solid fuel production. *Ind. Crops Prod.* 108, 636-640. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.025>.

Fernández, M., Alaejosa, J., Andivia, E., Vázquez-Piquéa, J., Ruizc, F., López, F., Tapiasa, R. 2018. *Eucalyptus x urograndis* biomass production for energy purposes exposed to a Mediterranean climate under different irrigation and fertilisation regimes. *Biomass and Bioenergy* 111, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.01.020>

Huang, C., Han, L., Yang, Z., Liu, X. 2009. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. *Waste Management* 29 (6), 1793–1797. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.027>

Ignacio, L.H.S., Santos, P.E.A., Duarte, C.A.R. 2019. An experimental assessment of *Eucalyptus urosemense* energy potential for biomass production in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 103, 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.053>

Kunstler, G., Falster, D., Coomes, D. 2016. Plant functional traits have globally consistent effects on competition. *Nature* 529, 204–207. <https://doi.org/10.1038/nature16476>

Lima, M.D.R., Barros Jr., U.O., Assis, M.R., Melo, I.C.N.A., Figueiredo, I.C.R., Protásio, T.P., Trugilho, P.F. 2020. Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis* 48 (128), 1-17. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04>

Lins, T.R.S., Braz, R.L., Silva, T.C., Reis, C.A., Silva, D.A., Silva, J.A. 2021. Energetic potential of *Eucalyptus* sp. wood cultivated in the Plaster's Pole of Araripe, PE, Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 16 (1), 1-8. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v16i1a8961>

Maidana, D.P.F.d., da Silva, J.R., de Aquino Ribas, A.C., Dias, E.S. 2021. Do six-year-old *Eucalyptus* clones maintain uniformity in growth and wood quality in different soils?. *Plant Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05216-0>

Neves, T.A., Protásio, T.P., Couto, A.M., Trugilho, P.F., Silva, V.O., Vieira, C.M.M. 2011. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. Pesquisa Florestal Brasileira. 31 (68), 319-330. <http://dx.doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.319>.

Oliveira, R.S., Ribeiro, C.V.G., Neres, D.F., Porto, A.C.M., Ribeiro, D., Siqueira, L., Zauza, E.A.V., Coelho, A.S.G., Reis, C.A.F., Alfenas, A.C., Novaes, E. 2020. Evaluation of genetic parameters and clonal selection of *Eucalyptus* in the Cerrado region. Crop Breeding and Applied Biotechnology. 20 (3), e29982031, 2020. <http://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3a35>

Oliveira, R.S., Santos, L.T.V., Melo, S.C., Chagas, M.P., Ribeiro, D., Reis, C.A.F., Novaes, E., Sette Jr., C.R. 2021. Wood energy yield for Eucalyptus clones growing under seasonal drought-stress in Brazil. Biomass and Bioenergy 154. 106264. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106264>

Pereira, B.L.C., Carneiro, A.C.O., Carvalho, A.M.M.L., Colodette, J.L., Oliveira, A.C.O., Fontes, M.P.F. 2013. Influence of Chemical Composition of *Eucalyptus* Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. BioResources 8 (3), 4574-4592. <https://doi.org/10.15376/biores.8.3.4574-4592>

Protásio, T. P., Bufalino, L., Tonoli, G. H. D., Couto, A. M., Trugilho, P. F., Guimarães Júnior, M. 2011. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. Pesquisa Florestal Brasileira, 31 (66), p. 122 -133. <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.113>

Protásio, T.P., Trugilho, P.F., Araujo, A.C.C., Bastos, T.A., Rosado, S.C.S, Pinto, J.F.N. 2017. Classificação de clones de *Eucalyptus* por meio da relação siringil/guaiacil e das características de crescimento para uso energético. Scientia Forestalis 45 (113), 327-341. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n114.09>

Protásio, T.P., Scatolino, M.V., Araújo, A.C.C., Oliveira, A.F.C., Figueiredo, I.C.R., Assis, M.R., Trugilho, P.F. 2019. Assessing proximate composition, Extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior *Eucalyptus* firewood. BioEnergy Research 12, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10004-x>

Pupin, S., Zaruma, D.U.G., Souza, C.S., Cambuim, J., Coletto, A.L., Alves, P.F., Pavan, B.E., Moraes, M.L.T. 2017. Parâmetros genéticos para caracteres de crescimento, espessura de casca e densidade básica da madeira em progênies de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. Scientia Forestalis 45 (115), 455-465. <https://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n115.04>

Ramos, D.C., Carneiro, A.C.O., Tangstad, M., Saadieh, R., Pereira, B.L.C. 2019. Quality of wood and charcoal from eucalyptus clones for metallurgical use. Floresta e Ambiente 26 (2), 1-8. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.043518>

Reis, A.A., Melo, I.C.N.A., Protásio, T.P., Trugilho, P.F., Carneiro, A.C.O. 2012. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus*

urophylla S.T. Blake. *Floresta e Ambiente* 19 (4), 497-505. <https://doi.org/10.4322/floram.2012.055>

Resquin, F., Navarro-Cerrillo, R.M., Carrasco-Letelier, L., Casnati, C.R. 2019. Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and wood density of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, and *Eucalyptus grandis* for bioenergy in Uruguay. *For. Ecol. Manage.* 438, 63–74, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.007>.

Rigatto, P.A., Dedecek, R.A., Matos, J.L.M. 2004. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft. *Revista Árvore* 28 (2), 267-273. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000200013>

Rubilar, R., Hubbard, R., Emhart, V., Mardones, O., Quiroga, J.J., Medina, A., Valenzuela, H., Espinoza, J., Burgos, Y., Bozo, D. 2020. Climate and water availability impacts on early growth and growth efficiency of *Eucalyptus* genotypes: The importance of GxE interactions. *Forest Ecology and Management* 458, 117763. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117763>

Silva, M.F., Fortes, M.M., Sette Jr, C.R. 2018. Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones. *Floresta e Ambiente* 25 (3), 1-10. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035016>

Silva, V.E., Nogueira, T.A.R., Abreu-Junior, C.H., He, Z., Buzetic, S., Laclub, J.P., Teixeira Filho, M.C.M., Grilli, E., Murgiai, I., Caprai, G.F. 2020. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management* 455, 117673. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117673>

Silva, B.I.P., Santos, A.C., Silva, M.F., Moraes, M.D.A., Sette Jr., C.R. 2021. Bioenergy yield of *Eucalyptus urophylla* clones and its relationship with the mean annual increment of wood volume. *Canadian J. For. Res.* 51: 1381–1385. [dx.doi.org/10.1139/cjfr-2020-0407](https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0407)

Simetti, R., Bonduelle, G.M., Silva, D.A. 2018. Wood quality of five *Eucalyptus* species planted in Rio Grande do Sul, Brazil for charcoal production. *Journal of Tropical Forest Science* 30 (2), 175-181. <https://doi.org/10.26525/jtfs2018.30.2.175181>

Vazquez-Cuecuecha, O.G., Zamora-Campos, E.M., Garcia-Gallegos, E., Ramirez-Flores, J.A. 2015. Densidad básica de la madera y su relación con propiedades edáficas. *Madera y Bosques* 21 (1), 129-38. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.211437>

Vieira, W.L., Amorim, E.P., Correa, C.C., Yamaji, F.M., Freitas, M.L.M., Ballarin, A.W., Tomazello-Filho, M., Guerrini, I.A., Rossi, M., Longui, E.L. 2021. Effect of soil type on mean annual increment, wood anatomy and properties of 33-year-old *Corymbia citriodora* (Hook.), K. D. Hill, & L. A. S. Johnson. *Research, Society and Development* 10 (10). <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.19004>.

5. CAPITULO III

O TIPO DE SOLO INFLUENCIA AS CARACTERÍSTICAS DA BIOMASSA DA MADEIRA DE CLONES DE *EUCALYPTUS* E SEUS BIOCOMBUSTÍVEIS?

RESUMO

As florestas energéticas de *Eucalyptus* spp. estão localizadas, em sua grande maioria, nas regiões Sul e Sudeste do Brasil e para promover a expansão das florestas energéticas e difundir o uso de materiais densificados como o *pellet* para outras regiões do país é necessário, entre outros, a avaliação das características de diversos materiais genéticos e sua adaptação à diferentes condições edafoclimáticas. Desta forma, o objetivo desse estudo foi avaliar as características energéticas e físico-mecânicas do carvão vegetal e *pellets* de clones de espécies de *Eucalyptus* provenientes de plantios em dois diferentes tipos de solo, Latossolo e Plintossolo, visando verificar o efeito do tipo de solo nas características energéticas e indicar o genótipo mais apto para a utilização como biocombustível. Os resultados indicam que os clones I (*E. urophylla*) e V (*E. urophylla* x *E. grandis*), no Plintossolo, apresentaram os melhores resultados para a produção de carvão vegetal e que existe diferença significativa do tipo de solo nas características avaliadas, exceto para a análise imediata do carvão vegetal. Os *pellets* apresentaram valores considerados excelentes de acordo com os padrões de exigência da norma de qualidade ISO 17225-2. Nas características energéticas e físico-mecânicas, o clone III (*E. resinifera* x *E. grandis*), proveniente do Latossolo, é o mais indicado, dentre os avaliados, para produção de *pellets* em condições edafoclimáticas similares.

Palavras-chave: pellets; carvão; plintossolo; latossolo; genótipos.

5.1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui o maior índice de produtividade do eucalipto do mundo, com uma média de produtividade média de 36,8 m³/ha/ano. O clima favorável é um dos principais fatores responsáveis pelo alto rendimento florestal (Indústria Brasileira de Árvores, 2021; Sistema Nacional de Informações Florestais, 2016). Além disso, característica de rápido crescimento, alta fecundidade e tolerância à várias condições edafoclimáticas também contribuem para a adaptação do eucalipto a diversos ambientes.

Algumas das vantagens da utilização do eucalipto, conforme mencionado, é a possibilidade de produzir florestas homogêneas, de ciclo rápido, a partir de clones selecionados, os quais apresentam características desejáveis para determinado fim. No entanto, além do material genético, outro fator que influencia no crescimento das

plantações é o ambiente, assim, fatores associados aos sítios ou à qualidade das estacas podem resultar em clones heterogêneos no final do ciclo (Resende et al., 2016).

Santos et al., 2008 afirmam que o tipo de solo exerce influência significativa sobre o crescimento de plantas de eucaliptos e embora a espécie tenha ótima adaptação em diversos tipos de solo, sofre os efeitos de solos salinos, alagados ou com baixa umidade. Além disso, o crescimento radicular de árvores de eucalipto pode ser comprometido quando implantados em solos rasos ou compactados.

A produção de energia é responsável por grande parte da área plantada de clones de eucalipto, justificado principalmente pelo crescimento acelerado com alta densidade do povoamento e homogeneidade (Stanturf et al., 2013). Os principais produtos fornecidos pelas florestas energéticas são a lenha (biomassa “*in natura*”), a partir da qual seu beneficiamento gera outros produtos, tais como o carvão vegetal, muito usado domesticamente e na siderurgia, e os produtos densificados como *pellets* e briquetes, além da possibilidade de produtos líquidos e gasosos (Araújo et al., 2016; Eufrade Jr. et al., 2017).

O processo de compactação da biomassa, através da pelletização, apresenta como vantagens a redução no volume aparente do material devido a compactação, alto valor e capacidade calorífica por volume, redução de custo com transporte, manuseio, estocagem, aumento da densidade aparente e homogeneização do material combustível (Fernández et al., 2013; García et al., 2015). A Europa é o maior consumidor de *pellets* do mundo, com 27 milhões de toneladas de *pellets* sendo consumidas anualmente. Em 2018, ocorreu um crescimento significativo no uso industrial de *pellets*, de cerca de 2 milhões de toneladas, 14% maior em comparação com 2017. Com um volume de produção de 20,1 milhões de toneladas em 2018, a Europa produz 74% da sua demanda de uso de *pellets*, importando o restante (26%) principalmente dos países asiáticos (The European Pellet Council, 2020).

Líder mundial em carvão vegetal, o Brasil é responsável por 11% de todo o carvão vegetal produzido globalmente. Um dos importantes insumos da indústria siderúrgica, o carvão vegetal registrou consumo de 4,6 milhões de toneladas no Brasil. Do total de carvão consumido em 2018, 91% foi produzido a partir de madeira oriunda de árvores plantadas, confirmando a tendência de queda no uso de madeira de floresta nativa já apresentada nos últimos anos (IBÁ, 2019).

Diante deste exposto, esse trabalho propõe como objetivo, avaliar os *pellets* e carvão vegetal produzidos a partir de clones de espécies de *Eucalyptus* provenientes de plantios

que apresentam diferentes tipos de solo e avaliar as características energéticas e físico-mecânicas, indicar o genótipo com as melhores características e determinar o efeito das condições edafoclimáticas nas características energéticas dos biocombustíveis.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Produção do carvão vegetal

Os discos de madeira foram segmentados em quatro partes, em forma de cunhas. As cunhas foram secas em estufa a 103°C e carbonizadas em forno mufla elétrico, modelo Linn Elektro Therm, com dimensões de 60 x 60 x 70 cm, equipado com um sistema de controle de temperatura e tempo. A carbonização ocorreu numa taxa de aquecimento de 1,67 °C min⁻¹ e temperatura final de 450 °C, permanecendo estabilizado na temperatura final por um período de 30 minutos (Sette Jr et al., 2020; Moraes et al., 2019; Silva et al., 2018).

Do carvão vegetal produzido, duas cunhas opostas foram utilizadas para a determinação do rendimento e densidade relativa aparente (DRA) e as restantes foram trituradas e moídas a 60 *mesh* para realização da análise imediata (teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo) e poder calorífico superior.

5.2.2 Produção dos pellets

As cunhas de todas as posições longitudinais foram transformadas em serragem no moinho de facas tipo Wiley, formando assim, uma amostra composta representativa de toda à árvore. Posteriormente, os *pellets* foram produzidos em uma peletizadora modelo ENG-MAC 0400V, com capacidade de alimentação contínua de 75 kg/h.

Para o processo de produção de *pellets*, foi determinada a granulometria da madeira moída, predominantemente classificada entre 20-60 *mesh*. O teor de umidade das amostras foi ajustado à 20% antes da compactação, conforme recomendação do fabricante da peletizadora, visando assim, obter uniformidade e melhor compactação.

5.2.3 Características da madeira, carvão e pellets

Análise imediata do carvão: procedimentos baseados nas normas ASTM E872-82 (2013) e ASTM D1102-84.34 (2013);

Densidade relativa aparente do carvão (DRA, kg m⁻³): procedimentos baseados na norma ABNT NBR 9165 (ABNT, 1985);

Densidade relativa aparente dos pellets (DRA, kg m⁻³): a determinação da densidade relativa aparente dos pellets foi obtida pela obtenção do volume (Equação 02) e massa. Foram avaliados três lotes de 20 pellets, totalizando 60 pellets amostrados por tratamento;

$$DRA = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Onde: m – massa do pellet (g) e V – volume do pellet (cm).

$$V = \pi r^2 L \quad (2)$$

Onde: r – raio do cilindro (cm) e L – comprimento do cilindro (cm).

Teor de umidade dos pellets em base úmida (TU, %): procedimentos baseados na norma ABNT NBR 14929 (ABNT, 2003);

Poder calorífico superior do carvão e madeira (PCS, MJ kg⁻¹): determinado por meio de uma bomba calorimétrica marca IKA WORKS, modelo C-200, conforme a Norma ASTM D5865 (2013).

Poder calorífico inferior e útil dos pellets (PCI e PCU, MJ kg⁻¹): uma vez que os pellets não são comercializados e utilizados com 0% de umidade, foi determinado o poder calorífico inferior e útil, considerando o teor de umidade dos pellets.

$$PCI = PCS - 600 * \frac{9 * H}{100} \quad (3)$$

$$PCU = PCI (1 - U) - 600 * U \quad (4)$$

Onde: U – teor de umidade do pellet (%) e H – teor de hidrogênio

Densidade energética do carvão (DE, MJ ⁻³): obtida por meio do poder calorífico superior (PCS, MJ kg⁻¹) e da densidade relativa aparente do carvão (DRA, kg m⁻³) (Equação 5).

$$DE = PCS * DRA \quad (5)$$

Densidade energética do pellet (DE, MJ ⁻³): obtida por meio do poder calorífico útil (PCU, MJ kg⁻¹) e da densidade relativa aparente do pellet (DRA, kg m⁻³) (Equação 6).

$$DE = PCU * DRA \quad (6)$$

5.2.4 Rendimento e produtividade do carvão vegetal

As equações utilizadas para determinar os índices de rendimento e produtividade do carvão vegetal são descritas a seguir:

Incremento médio anual (IMA, m³ h⁻¹ ano⁻¹): calculado pela relação entre o volume de cada árvore sem casca (Vi, m³) (Equação 7), o número de árvores por hectare (n), e a idade das árvores (T, anos) (Equação 8). O volume de cada árvore sem casca (Vi) foi calculado com base nos dados do inventário da floresta usando o DAP (1,3 m do solo), altura total (Ht, m) e o fator de forma (f, 0,46) obtido por cubagem rigorosa das árvores.

$$Vi = \frac{DAP \times Ht}{40000} \times \pi \times f \quad (7)$$

$$IMA = \frac{Vi \times n}{T} \quad (8)$$

Massa seca (MS, ton ha⁻¹ ano⁻¹): obtida utilizando-se a densidade básica da madeira (DB, kg m⁻³) e o IMA (m³ ha⁻¹ ano⁻¹) (Equação 9).

$$MS = \frac{DB \times IMA}{1000} \quad (9)$$

Rendimento gravimétrico (Y_c , %): determinado pela relação entre o peso da amostra de carvão vegetal (P_{sc} , g) e o peso da amostra de madeira completamente seca em estufa (P_{sm} , g) (Equação 10).

$$Y_c = \left(\frac{P_{sc}}{P_{sm}} \right) * 100 \quad (10)$$

Rendimento em carbono fixo (Y_{fix} , %): quantificado por meio do rendimento gravimétrico (Y_c , %) e teor de carbono fixo do carvão vegetal (CF, %) (Equação 11) (Lima et al., 2020).

$$Y_{fix} = \frac{Y_c * CF_c}{100} \quad (11)$$

Rendimento energético (Y_e , %): calculado com base no rendimento gravimétrico (Y_c) e poder calorífico superior da madeira (PCS_m , MJ kg⁻¹) e do carvão vegetal (PCS, MJ kg⁻¹) (Equação 12) (Lima et al., 2020).

$$Y_e = Y_c * \left(\frac{PCS}{PCS_m} \right) \quad (12)$$

Massa seca do carvão vegetal (MS_c , t ha⁻¹ ano⁻¹): foi utilizado a massa seca da madeira (MS_m , ton ha⁻¹ ano⁻¹) e o rendimento gravimétrico (Y_c , %) (Equação 13) (Rocha et al., 2017).

$$MS_c = MS_m * \left(\frac{Y_c}{100} \right) \quad (13)$$

Consumo específico de madeira (CSM, m³ ton⁻¹): calculado com base na densidade básica da madeira (DBm, g cm⁻³) e rendimento gravimétrico (Y_c , %) (Equação 14) (Lima et al., 2020).

$$CSM = \left[\frac{1}{DBm * \frac{Y_c}{100}} \right] \quad (14)$$

Produtividade energética do carvão vegetal (PE, MJ ha⁻¹ ano⁻¹): estimada por meio da massa seca do carvão (MS_c , ton ha⁻¹ ano⁻¹) e do poder calorífico superior do carvão vegetal (PCS, MJ kg⁻¹) (Equação 15) (Lima et al., 2011).

$$PE = MS_c * PCS \quad (15)$$

5.2.5 Análise estatística

Para análise dos dados foi utilizado o delineamento em blocos casualizados, em um fatorial 5x2 (cinco materiais genéticos e dois tipos de solo), com cinco repetições (árvores), totalizando 50 unidades amostrais. Foram avaliados os *outliers*, a normalidade dos dados e a pressuposição de homogeneidade da variância. Atendidas as pressuposições, aplicou-se a análise de variância (ANOVA), verificado o efeito significativo realizou-se o teste de *Tukey* para comparação das médias ao nível de 5% de probabilidade.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2, são apresentados os resultados da análise imediata (teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo) do carvão vegetal produzidos com a madeira de clones de *Eucalyptus* spp. cultivados em dois tipos de solo

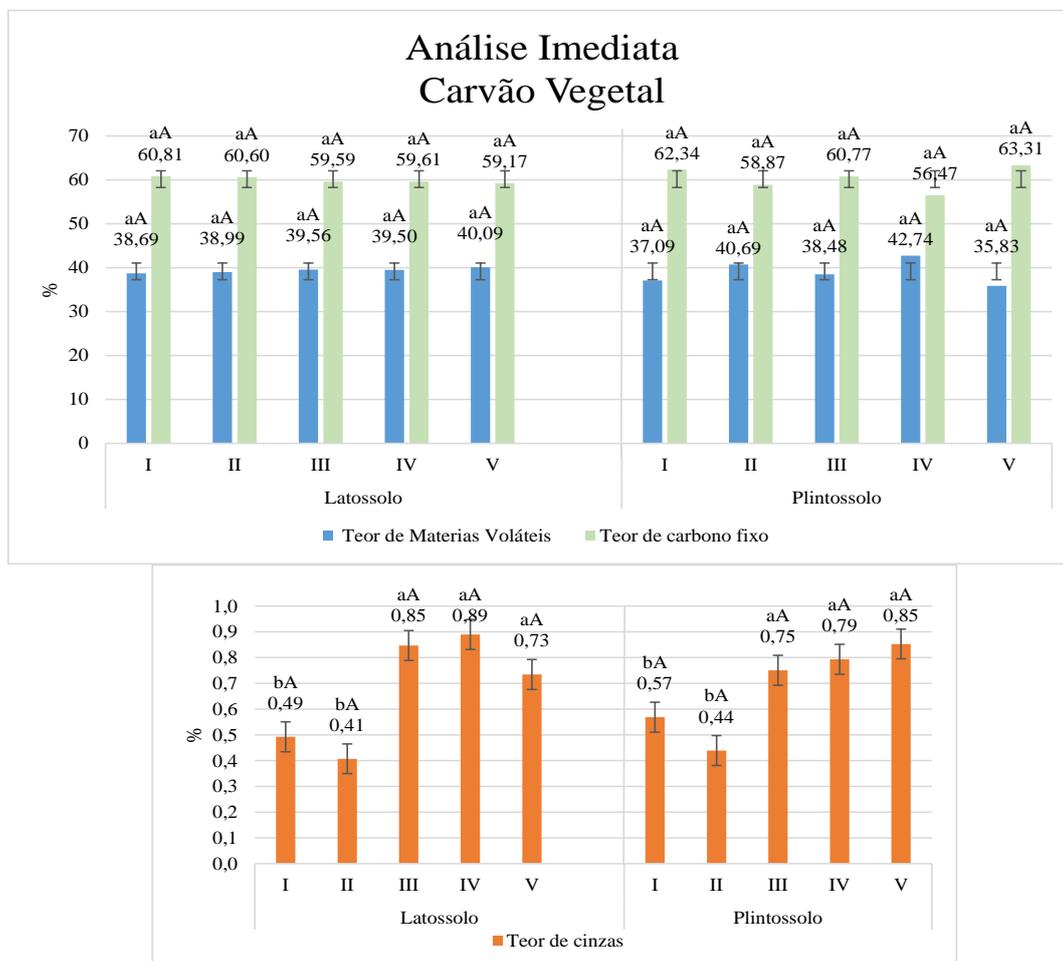


Figura 2: Efeito do tipo de solo nos teores de cinzas, carbono fixo e materiais voláteis dos clones de *Eucalyptus* spp. Clones: I - *E. urophylla*; II - *E. cloeziana*; III - *E. resinifera* x *E. grandis*; IV - *E. saligna* x *E. tereticornis*; V - *E. urophylla* x *E. grandis*. Médias seguidas da mesma letra minúscula para clone e maiúscula para tipo de solo não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

A semelhança entre os valores médios de carbono fixo e materiais voláteis observados comprovam que o tipo de solo não afetou essas características do carvão vegetal. Esses resultados indicam que os clones não foram influenciados e se comportaram de forma semelhante, independente das variações no tipo de solo. Atribui-se a similaridade nos dados ao processo de carbonização, uma vez que a madeira plantada em diferentes tipos de solo foi carbonizada na mesma taxa de aquecimento e temperatura final.

Os valores de teor de carbono fixo do carvão vegetal variaram de 56,47 a 63,3%, e o teor de materiais voláteis variou de 37,09 a 42,74%, nos cinco clones estudados. Essas médias de valores estão distintas das encontradas na literatura avaliando o carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. Santos (2008) relatou que o carvão vegetal para uso em siderurgia deve ter o teor de carbono fixo entre 75 e 80%, e apresentar teores de material volátil de 20 a 25%.

Pode-se deduzir que a provável explicação para teores menores de carbono fixo está relacionada ao tempo de fixação de carbono final (30 minutos) no patamar de 450°C, fator que pode ter comprometido a retirada do material volátil e conseqüentemente diminuído os valores médios de carbono fixo. Sendo assim, os altos teores de materiais voláteis e baixos teores de carbono fixo verificados podem estar associados aos parâmetros utilizados na produção do carvão vegetal.

A avaliação dos mesmos clones, carbonizados com diferenças na taxa de aquecimento e tempo final de fixação de carbono no processo de carbonização devem ser consideradas, visando elevar os valores de carbono fixo e conseqüentemente reduzir os teores de materiais voláteis, visto que, os teores de material volátil são inversamente proporcionais ao teor de carbono fixo.

O conteúdo de cinzas em *Eucalyptus* spp. é normalmente baixo, assim como mostram os resultados, variando conforme a espécie (Sette Jr. et al., 2020; Silva et al., 2018). No âmbito energético, esta porção não é relevante para eleger o clone mais adequado. De modo geral, a biomassa madeireira não atinge quantidade de cinzas que possam causar problemas no seu uso como biocombustível (Brand, 2017), embora seja demonstrado relação negativa com poder calorífico e complicações operacionais (McKendry, 2002; Caraschi et al., 2019).

Diante disso, observa-se que os clones I (*E. urophylla*) e II (*E. cloeziana*), independentemente do tipo de solo, apresentaram estatisticamente os menores valores de cinzas, média de 0,48%, e que variações não foram verificadas nos teores de cinzas, teores de carbono fixo e material volátil, quando se comparou o mesmo clone em solos distintos.

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios de características dos *pellets* e carvão vegetal produzidos a partir de cada um dos cinco clones cultivados em dois tipos de solo comparados entre si pelo teste de média.

Tabela 1. Comparação entre as médias das características dos *pellets* e carvão vegetal produzidos com a madeira de clones de *Eucalyptus* spp. cultivados em dois tipos de solo.

Características	Solo	Clones				
		I	II	III	IV	V
Teor de Umidade do <i>pellet</i> em base úmida (%)	Latossolo	6,62bA	7,17aA	6,45cA	7,26aA	6,67bA
	Plintossolo	7,36aB	7,48aB	7,38bB	7,38aA	6,91bB
Poder Calorífico Útil do <i>pellet</i> (Mj kg)	Latossolo	17,10bA	16,95dA	17,01cA	17,15aA	17,08bA
	Plintossolo	16,95cB	16,76dB	17,02abA	17,03abB	16,99bcB
Poder Calorífico Superior do carvão (Mj kg)	Latossolo	24,95aA	24,87aA	24,75abB	24,64abA	24,42bB
	Plintossolo	25,09bA	23,97cB	25,02bA	24,38cB	26,14aA

I: *E. urophylla*; II: *E. cloeziana*; III: *E. resinifera* x *E. grandis*; IV: *E. saligna* x *E. tereticornis*; V: *E. urophylla* x *E. grandis*. Médias seguidas das mesmas letras minúsculas na linha para clones e maiúsculas na coluna para tipo de solo não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

A biomassa utilizada para a produção dos *pellets* teve o seu teor de umidade ajustado para 20% (base úmida), isso devido à presença de água no material favorecer a transferência de calor, e conseqüentemente, a ligação entre as partículas durante a compactação (Quirino et al., 2012). Devido o atrito entre componentes da peletizadora, ocorre aumento da temperatura com redução da umidade durante o processo de produção dos *pellets*. A diminuição da umidade dos *pellets* dificulta a ocorrência e degradação por microrganismos decompositores da madeira quando armazenados por longos períodos de tempo (Liu et al., 2014).

A análise do teor de umidade dos *pellets* entre clones, dentro de cada tipo de solo, mostra que foram detectadas diferenças significativas entre clones, e o efeito de tipo de solo não apresentou diferenças significativas apenas no clone IV (*E. saligna* x *E. tereticornis*). Para todos os clones as diferenças verificadas no teor de umidade dos *pellets* variaram na média de $\pm 1\%$, fator que pode ser ajustado durante o processo de produção. Sob o ponto de vista de utilização e exportação os valores de teor de umidade entre 6 e 8% são considerados excelentes, visto que a norma de qualidade ISO 17225-2 classifica materiais densificados com teor de umidade inferior a 10% como qualidade A1.

Considerando que os *pellets* não serão comercializados com teor de umidade de 0%, o poder calorífico útil (PCU) deve ser obtido e considerado como parâmetro de qualidade dos materiais densificados. Os valores de PCU confirmam a influência do teor de umidade da biomassa nesta variável, com redução do poder calorífico dos *pellets* nos tratamentos que apresentaram os maiores valores de teor de umidade.

A água presente na biomassa é um dos fatores de maior influência sobre a liberação de energia, com alta correlação negativa entre o poder calorífico e o teor de umidade. Para o PCU, foram detectadas diferenças significativas entre todos os clones, os valores obtidos aproximam-se dos encontrados por Pereira et. al (2016) e Pegoretti et.al (2019), 16,86 e 16,51 MJ kg⁻¹, consecutivamente, que avaliaram *pellets* produzidos com clones de eucalipto. Considerando o PCU dos *pellets*, novamente todos os materiais densificados avaliados, independente do genótipo ou tipo de solo, são classificados como qualidade A1 de acordo com a norma DIN 5173 PLUS, que exige valor mínimo de 15,5 MJ kg⁻¹ para o poder calorífico útil.

O efeito de tipo de solo apresentou diferenças significativas e foi superior no poder calorífico útil no latossolo, quando comparado com o plintossolo, exceto para o clone III (*E. resinifera* x *E. grandis*), que apresentou uma diferença pequena (0,01 Mj Kg). Entre os clones foi verificada similaridade nos clones III (*E. resinifera* x *E. grandis*) e IV (*E. saligna* x *E. tereticornis*) no Plintossolo e no Latossolo apenas os clones I (*E. urophylla*) e V (*E. urophylla* x *E. grandis*) não apresentaram diferenças estatísticas para o PCU. Porém, apesar da diferença significativa entre os valores de PCU, a diferença absoluta não é acentuada, sendo notório que o teor de umidade foi maior nos *pellets* de plintossolo, fator que conseqüentemente reduz os valores disponíveis de poder calorífico útil.

Com relação ao poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal, não foi observado padrão de comportamento dos clones para essa variável. A análise estatística mostra que foram detectadas diferenças entre clones, sendo o clone V (*E. urophylla* x *E.*

grandis) do Plintossolo o que apresentou maior valor, 26,14 Mj kg. O efeito de tipo de solo apresentou diferenças significativas, exceto para o clone I (*E. urophylla*), e apesar da pequena diferença média (0,20 Mj kg) foi superior no Plintossolo, quando comparado com o Latossolo.

Oliveira (2003) mencionou que a composição química da madeira pode ser afetada pela disponibilidade de minerais no solo e Vale et al. (2011), relacionaram, em parte, que à presença significativa de macro e micronutrientes influenciam no teor de cinzas e podem reduzir o poder calorífico da biomassa (Garcia et al., 2013).

Visto que os diferentes tipos de solo avaliados neste estudo apresentaram diferenças nos teores de argila, areia, silte, hidrogênio, alumínio e CTC (Figura 1), destaca-se que diferenças na composição química do solo podem causar o acúmulo de minerais na constituição dos tecidos vegetais, resultando em variações nos valores de PCS.

Os valores de incremento médio anual e densidade básica da madeira dos clones em diferentes tipos de solo, já apresentados no capítulo I e II deste trabalho, são apresentados abaixo, para facilitar a compreensão de alguns resultados obtidos.

Tabela 2. Identificação e características dos clones de *Eucalyptus* spp. selecionados

Clone	Espécie ou híbrido	Incremento médio anual (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)		Densidade básica (kg m ⁻³)	
		Latossolo	Plintossolo	Latossolo	Plintossolo
I	<i>Eucalyptus urophylla</i>	50.10	79.27	433,53	443,04
II	<i>E. cloeziana</i>	22.78	23.88	490,60	487,22
III	<i>E. resinifera</i> x <i>E. grandis</i>	59.79	60.61	465,76	474,04
IV	<i>E. saligna</i> x <i>E. tereticornis</i>	35.58	23.77	462,32	467,24
V	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	48.81	66.35	455,23	461,71

Na Figura 3, são apresentados os resultados de densidade aparente e energética dos *pellets* e carvão vegetal.

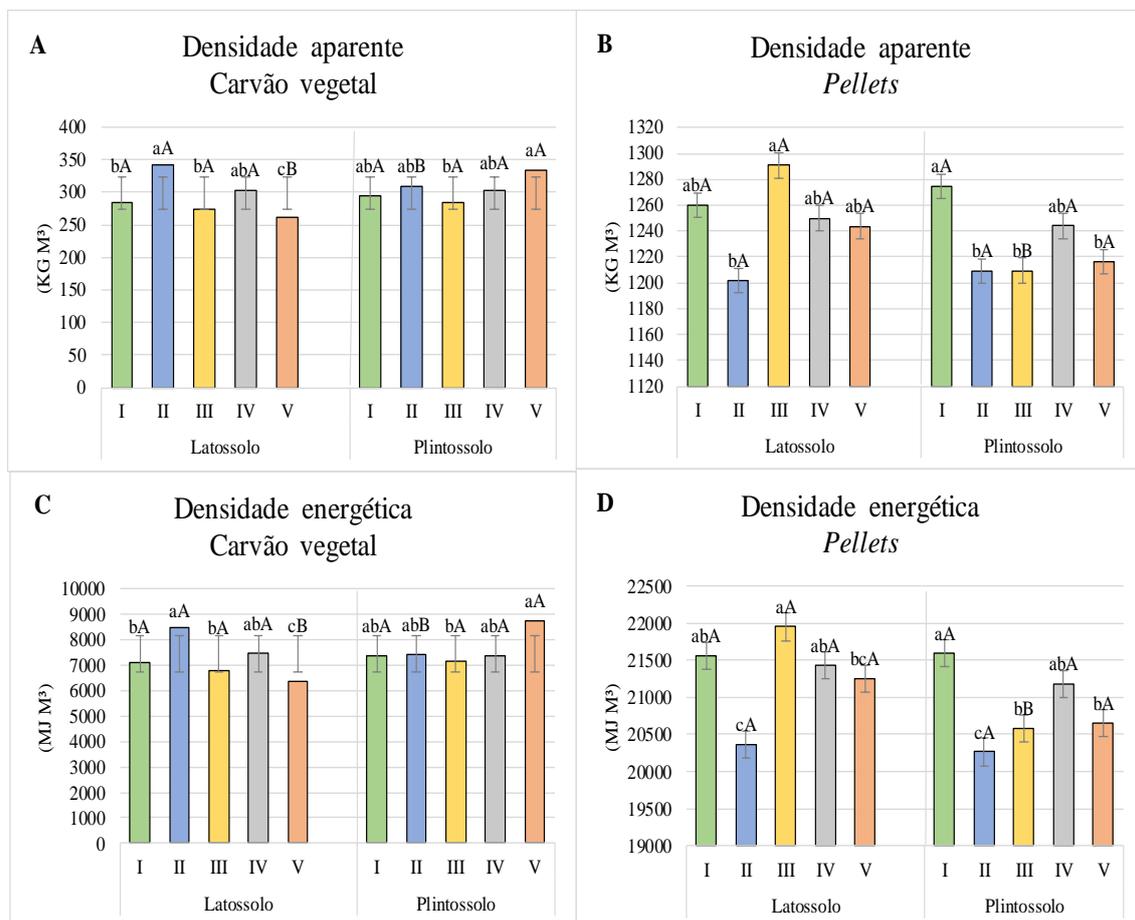


Figura 3: Características dos *pellets* e carvão vegetal produzidos com clones de *Eucalyptus* spp. I: *E. urophylla*; II: *E. cloeziana*; III: *E. resinifera* x *E. grandis*; IV: *E. saligna* x *E. tereticornis*; V: *E. urophylla* x *E. grandis*. Mesmas letras minúsculas para clone e maiúsculas para tipo de solo não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05\%$).

Segundo Souza e Vale (2017), valores maiores de densidade são desejáveis, visto que há uma relação diretamente proporcional entre o aumento da densidade aparente e a densidade energética. O carvão vegetal ou *pellets* com maior densidade energética são desejáveis porque liberam, durante a queima, maior quantidade de energia por unidade volumétrica, ou seja, a quantidade de energia transportada ou armazenada em um mesmo volume é aumentada, além do uso mais eficiente das fornalhas.

Para os *pellets*, foi verificada diferença significativa entre os clones nas variáveis de densidade aparente e densidade energética, sendo o clone III (*E. resinifera* x *E. grandis*) no Latossolo e I (*E. urophylla*) no Plintossolo os que apresentaram o melhor resultado para a densidade energética e densidade aparente (Figura 3). O clone II (*E. cloeziana*) obteve o menor valor médio para ambas as densidades, independentemente do tipo de solo. A densidade energética média no clone II foi 6% inferior quando comparada com o clone I e 4,7% menor que o clone III.

Observando os resultados para a densidade aparente e densidade energética do *pellet* foi verificada diferença significativa para a interação clone x tipo de solo apenas no clone III (*E. resinifera* x *E. grandis*), em ambas as variáveis. Os resultados dessas variáveis são dependentes, visto que a maior densidade aparente dos materiais densificados influenciam diretamente nos valores de densidade energética. Sendo assim, os resultados indicam que a qualidade e características dos *pellets* avaliados, dos dois tipos de solo e cinco clones estudados está fortemente relacionada principalmente ao processo de produção, características dos equipamentos e biomassa, fatores que interferem em variáveis como teor de umidade, densidade aparente do *pellet* e consequentemente na densidade energética e poder calorífico útil.

A densidade é um parâmetro referencial também para o uso da madeira para a produção do carvão vegetal. Quando a madeira é degradada termicamente, cerca de 60 % da sua massa é perdida, e, consequentemente, quanto maior a densidade, maior a massa de carvão vegetal produzido para um determinado volume, o que aumenta a produtividade dos fornos. De tal modo, a densidade relativa aparente do carvão vegetal tem uma relação direta com a densidade da madeira de origem (Castro, 2016; Carneiro *et al.*, 2014; Arantes *et al.*, 2013).

Entre os clones, nas variáveis de densidade aparente e densidade energética do carvão vegetal, não houve diferenças significativas nos clones I (*Eucalyptus urophylla*) e III (*E. resinifera* x *E. grandis*) no Latossolo e I, II (*E. cloeziana*) e IV (*E. saligna* x *E. tereticornis*) no Plintossolo. Sendo o clone V (*E. urophylla* x *E. grandis*) do Plintossolo o que apresentou maior valor para a densidade energética (8724,28 MJ m³) dentre os clones avaliados.

Os resultados para as densidades do carvão vegetal demonstraram diferenças significativas para a interação clone x tipo de solo nos clones II (*E. cloeziana*) e V (*E. urophylla* x *E. grandis*). A densidade energética do carvão do clone V no Plintossolo foi 37% superior quando comparada com o Latossolo, refletindo a influência da densidade básica da madeira, que também foi superior nesse clone do Plintossolo (Tabela 2). Além disso, o clone V (*E. urophylla* x *E. grandis*) obteve o incremento médio anual 36% superior no Plintossolo, quando comparado com o Latossolo (Tabela 2), confirmando o destaque desse clone para produção de carvão vegetal no Plintossolo.

Tabela 3. Comparação entre as médias das características do carvão vegetal produzido com a madeira de clones de *Eucalyptus* spp. cultivados em dois tipos de solo.

Características	Solo	Clones				
		I	II	III	IV	V
Rendimento gravimétrico (%)	Latossolo	30,69bA	32,49aA	30,60bA	29,78bA	25,12cB
	Plintossolo	34,22aB	23,92cB	30,06bA	24,84cB	34,61aA
Rendimento energético (%)	Latossolo	40,17aA	38,59abA	35,60abA	37,25abA	29,99bA
	Plintossolo	43,47aA	27,63cB	36,83bA	29,92cB	46,00aB
Rendimento em carbono fixo (%)	Latossolo	19,44aA	18,62abA	16,89abA	18,06abA	14,43bB
	Plintossolo	21,44aA	13,36cB	17,75bA	13,83cB	22,05aA
Massa seca carvão vegetal (ton ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Latossolo	6,71abB	3,31cA	7,54aA	4,92bcA	5,27bB
	Plintossolo	12,06aA	2,63dA	8,33cA	2,67dB	10,79bA
Produtividade energética (MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Latossolo	16.753 abB	8.237d A	18.657 aA	12.124 cdA	12.863 bcB
	Plintossolo	30.257 aA	6.300d A	20.858 cA	6.505 dB	28.216 bA
Consumo específico de lenha (m ³ ton ⁻¹)	Latossolo	6,81bcA	6,41cB	7,55bA	6,65bcB	9,07aA
	Plintossolo	6,67bA	9,29aA	7,52abA	8,62aA	6,39bB

I: *E. urophylla*; II: *E. cloeziana*; III: *E. resinifera* x *E. grandis*; IV: *E. saligna* x *E. tereticornis*; V: *E. urophylla* x *E. grandis*. Médias seguidas das mesmas letras minúsculas na linha para clones e maiúsculas na coluna para tipo de solo não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

O rendimento gravimétrico é um bom indicativo de qualidade da matéria-prima utilizada para a produção de carvão vegetal (Silva e Ataíde, 2019). A estimativa do quanto de madeira é necessário para produzir uma tonelada de carvão vegetal é de grande importância no processo de produção, pois reflete diretamente na capacidade de rendimento da matéria-prima (Cunha et al. 2021).

De acordo com os resultados obtidos e observados na Tabela 3, diferenças foram verificadas entre o tipo de solo com relação ao rendimento gravimétrico. Exceto o clone III (*E. resinifera* x *E. grandis*), todos os demais responderam de forma diferente quando considerada a variação do tipo de solo. O valor médio do rendimento gravimétrico foi de 29,7% no Latossolo e 29,53% no Plintossolo, não apresentando diferenças na média final por tipo de solo. Diferenças entre os clones foram verificadas e o clone que apresentou maior rendimento em carvão (32,45%) foi o clone I (*E. urophylla*).

O rendimento energético e rendimento em carbono fixo são indicadores da eficiência de conversão do processo de carbonização e representam a quantidade de energia e carbono retido na forma sólida do carvão vegetal, portanto, está associado à

qualidade do biocombustível (Silva e Ataíde, 2019; Silva et al., 2020). Assim, clones que detenham maior PCS, carbono fixo e rendimento em carvão vegetal, resultam em carvões de maior rendimento energético e em carbono fixo, sendo estabelecida uma correlação positiva.

Em virtude de ambas as variáveis serem vinculadas ao rendimento gravimétrico, foi observado efeito significativo entre clones e na interação com o solo nos clones II (*E. cloeziana*), IV (*E. saligna* x *E. tereticornis*) e V (*E. urophylla* x *E. grandis*). Porém, nenhuma tendência consistente foi observada como esperado, sendo o clone V (*E. urophylla* x *E. grandis*) do Plintossolo o que apresentou maiores valores para ambos os rendimentos, $\pm 65\%$ superior que o clone II (*E. cloeziana*) no Plintossolo, que demonstrou o menor rendimento dentre os clones avaliados.

Protásio et al., (2021), avaliando quatorze diferentes clones de *Eucalyptus* sp. com sete anos de idade, obtiveram uma média de 41,5% no rendimento energético do carvão vegetal, valor médio superior do obtido neste estudo (36,5%), justificado pela maior idade das árvores utilizadas para a produção do carvão vegetal, quando comparada com as avaliadas neste estudo (6 anos).

Para o consumo específico de lenha, o clone I (*E. urophylla*), teve o menor valor médio dentre os avaliados ($6,74 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$), ou seja, é necessário $6,74 \text{ m}^3$ de madeira para produzir 1 tonelada de carvão desse clone. Os clones II (*E. cloeziana*) no Plintossolo e V (*E. urophylla* x *E. grandis*) no Latossolo, tiveram os maiores valores no consumo específico de madeira ($9,29$ e $9,07 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$), consecutivamente, justificado pelo baixo rendimento gravimétrico, que resultou em menor desempenho de conversão em biomassa carbonizada (carvão vegetal). Não foram detectadas diferenças significativas na interação entre genótipo x tipo de solo para o clone I (*E. urophylla*) e clone III (*E. resinifera* x *E. grandis*), porém, diferenças na interação solo x clone foram verificadas nos demais clones.

A massa seca é a principal responsável pela variação na produtividade energética do carvão vegetal. Este resultado é reflexo da taxa de crescimento das árvores e rendimento gravimétrico (Cunha et al. 2021). A produtividade energética do carvão vegetal também apresentou diferenças para o tipo de solo, e seguiu o comportamento observado para a massa seca de carvão vegetal, como o esperado. Os clones do Plintossolo tiveram 34,2% maior produtividade energética, ou $47.003 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ maior que no Latossolo.

O clone I (*E. urophylla*) no Plintossolo foi o destaque para a produção energética (30.257 MJ ha⁻¹ ano⁻¹), valor 380% superior que o menor valor que foi verificado para o clone II (*E. cloeziana*) no Plintossolo (6.300 MJ ha⁻¹ ano⁻¹). Considerando o desempenho dos clones, independente das variações observadas pelo do tipo de solo, o clone I (*E. urophylla*), foi o genótipo que obteve o melhor desempenho para a produtividade energética do carvão vegetal (23,505 MJ ha⁻¹ ano⁻¹).

5.4 CONCLUSÕES

- Os resultados indicam que os clones I (*E. urophylla*) e V (*E. urophylla* x *E. grandis*), no Plintossolo, apresentaram os melhores resultados para rendimentos, massa seca e produtividade energética, além de apresentar os maiores valores de incremento médio anual. Além disso, o clone V no Plintossolo apresentou os maiores valores de PCS e densidade energética no carvão vegetal, dentre os avaliados, variáveis de extrema importância quando se avalia a qualidade dos biocombustíveis;

- Constatou-se que existe diferença significativa e influência do tipo de solo nas características avaliadas, exceto para a análise imediata (teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo) do carvão vegetal;

- O clone III (*E. resinifera* x *E. grandis*), proveniente do Latossolo, é o mais indicado, dentre os avaliados, para produção de *pellets* em condições edafoclimáticas similares, pois, apresentou o maior valor para densidade energética;

- Todos os *pellets* avaliados dos diferentes genótipos e tipos de solo apresentaram valores considerados satisfatórios nas características energéticas e físico-mecânicas, se tratando das exigências para comercialização dos *pellets*. Porém, outras análises complementares (teor de cloro, enxofre, durabilidade, etc) são necessárias para determinar as demais propriedades exigidas pelas normas de qualidade.

6. CONCLUSÕES GERAIS

Para a indicação do clone mais adequado para implantação florestal em larga escala nas condições edafoclimáticas do Cerrado brasileiro, foi avaliada a quantidade de energia disponível por unidade de área e tempo (rendimento energético), pois em sua determinação são considerados variáveis de crescimento e qualidade da madeira que são os principais parâmetros examinados quando se propõe à produção de energia em grande escala.

Sendo assim, a produtividade energética dos clones no Plintossolo foi maior que no Latossolo e geraram uma quantidade de energia 21,5% maior por hectare/ano, fator que atesta a melhor adaptação desses clones nesse tipo de solo. O clone *E. urophylla*, apresentou maior produtividade energética e é o material genético recomendado para plantação florestal com fins energéticos, independentemente do tipo de solo, visto que na média geral esse clone também apresentou os melhores resultados.

A qualidade energética da madeira de *Eucalyptus spp.* foi influenciada pelo genótipo (clone), tipo de solo (sítio) e interação (genótipo x tipo de solo) em diferentes níveis de intensidade. Assim, para as variáveis energéticas da madeira, os clones se comportam de forma diferente dependendo do tipo de solo do cultivo.

Quanto aos biocombustíveis, os clones *E. urophylla* e *E. urophylla* x *E. grandis*, no Plintossolo, apresentaram os melhores resultados para as características do carvão vegetal. Constatou-se que existe influência do tipo de solo nas características avaliadas para ambos os biocombustíveis, exceto para a análise imediata do carvão vegetal e o clone *E. resinifera* x *E. grandis*, proveniente do Latossolo, apresentou os melhores resultados para produção de *pellets* nas características avaliadas.

6.1 REFERÊNCIAS

ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; ANDRADE, C. R. Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, Lavras, v.19, n.3, p.423-431, 2013.

ARAÚJO, S.; VILAS BOAS, M. A.; NEIVA, D. M.; CARNEIRO, A. C.; VITAL, B.; BREGUEZ, M.; PEREIRA, H. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures. **Biomass and Bioenergy**, v. 90, p. 181–186, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9165** (1985) Carvão vegetal - Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929**. Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira, determinação da densidade básica, Normas da ABNT, Rio de Janeiro. 2003.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS – ASTM, 2013. ASTM D1102-84: Standard Test Method for Ash in Wood, ASTM Standards, West Conshohocken.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS – ASTM, 2013. ASTM D5865-13: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM Standards, West Conshohocken.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS – ASTM, 2013. ASTM E872-82: Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels. ASTM Standards, Philadelphia,

BRAND, M. A. Potencial de uso da biomassa florestal da caatinga, sob manejo sustentável, para geração de energia. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 117-127, 2017.

CARASCHI, J. C.; GOUVEIA, D.; DEZAJACOMO, G.; PRATES, G. A. Evaluation of Biomass Properties for the Production of Solid Biofuels. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. SPE2, p. e20180433, 2019.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A.P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, Viçosa, v.38, n.2, p.375-381, 2014.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, R. C.; CARVALHO, A. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. **Revista Árvore**, Viçosa, v.40, n.3, p.551-560, 2016.

CUNHA, T. Q. G.; SANTOS, A. C.; NOVAES, E.; HANSTED, A. L. S.; YAMAJI, F. M.; SETE JR. *Eucalyptus* expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, p. 105900, 2021.

EPC - The European Pellet Council. **World Pellet Map, 2019**. Disponível em: <<https://epc.bioenergyeurope.org/about-pellets/pellets-statistics/world-pellet-map/>>. Acesso em: 01 de abril de 2020.

EUFRADE JUNIOR, H. J.; NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. M.; GUERRA, S. P. S.; BALLARIN, A. W. *Eucalyptus* short-rotation coppice for solid fuel production. **Industrial Crops and Products**, v. 108, n. January, p. 636–640, 2017.

FERNÁNDEZ, R.G. et al. Influence of physical properties of solid biomass fuels on the design and cost of, storage installations. **Waste Management**, v. 33, pp. 1151-1157, 2013

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A.; BUENO, J. Biomass proximate analysis using thermogravimetry. **Bioresource Technology**, Essex, v.139, p. 1–4, 2013.

GARCÍA, M. A.; A.; RODRIGUEZ, M. L.; SERRANO, B. F.; DIAZ, L.F.; ZAMORANO, M. Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees. **Fuel Process. Technol.** v. 129, p.1–7, 2015.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2021**. Brasília: IBA, 2021.

LIMA, M. D. R.; SIMETI, R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, p. 105804, 2020.

LIU, Z. G.; QUEK, A.; BALASUBRAMANIAN, R. Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars. **Applied Energy**, v. 113, p. 1315-1322, 2014.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002.

MORAES, M. D. A; SILVA, M. F; SILVA, R. T; BARBOSA, P. V. G; MARQUES, R. D; SETTE JR, CARLOS R. Characterization of *Khaya ivorensisi*> (A. Chev) biomass, charcoal and briquettes. **Scientia Forestalis**, v. 47, p. 34-44, 2019.

OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semi-árido nordestino**. 2003. 122f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

PEGORETTI, H. J.; CHAVES, M. D.; VIDAURRE, G. B.; BROCCO, V. F.; SOUZA, D. P.; PROTÁSIO, T. P. Colorimetría de pellets de eucalipto y residuos de la cafeicultura y sus relaciones con los parámetros de calidad. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 47, n. 121, p. 114-124, mar. 2019.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O; CARVALHO, A. M. M. L; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A.C.; DAVEL, W. Influência da adição de lignina kraft nas propriedades de pellets de eucalipto. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 46, n. 2, p. 235 - 242, abr. / jun. 2016.

PROTÁSIO, T.P., LIMA, M. D. R. L., SCATOLINO, M.V., SILVA, A. B., FIGUEIREDO, I.C.R., HEIN, P.R.G., TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, Volume 164, 2021, Pages 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>

QUIRINO, W. F.; PINHA, I. V. O.; MOREIRA, A. C. O.; SOUZA, F.; TOMAZELLO FILHO, M. Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Sci. For**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 525-536, dez. 2012.

RESENDE, R. T.; MARCATTI, G. E.; PINTO, D. S.; TAKAHASHI, E. K.; CRUZ, C. D.; RESENDE, M. D. V. Intra-genotypic competition of Eucalyptus clones generated by environmental heterogeneity can optimize productivity in forest stands. **Forest Ecology and Management**, v. 380, p. 50–58, 2016.

ROCHA, M. F. V.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; ZANUNCIO, A. J. V.; HEIN, P. R. G. Propriedades energéticas do carvão vegetal em função do espaçamento de plantio. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 8, n. 2, 2017.

SANTOS, F. W.; FLORSHEIM, S. M. B.; LIMA, I. L.; TUNG, E. S. C.; SILVA, J. M.; FREITAS, M. L. M.; MORAES, M. L. T.; SEBBENN, A. M. Variação genética para a densidade básica da madeira e caracteres silviculturais em uma população base de *Eucalyptus camaldulensis* DEHNH. **Rev. Inst. Flor.**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 185-194, 2008.

SANTOS, M. A. S. Quality parameters of charcoal for use in blast furnaces. **Proceedings of the National Forum on Charcoal**, vol. 1, UFMG, Belo Horizonte, Brazil, 2008.

SETTE JUNIOR, C. R., CUNHA, T.Q.G., CONEGLIAN, A., HANSTED, A.L.S.H, SILVA, D.A., LIMA, P.A.F., SILVA, M.F., YAMAJI, F.M. Does the presence of bark in the wood of fast-growing forest species significantly change the energy potential? **BioEnergy Research**, v. 13, p. 222-228, 2020.

SNIF. Sistema Nacional de Informações Florestais. Brasília: Ed. Dois, v. 1, jan. 2017, 22 p.

SILVA, M.F.; FORTES, M. M.; SETTE JUNIOR, C. R. Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones. **Floresta e Ambiente**. 2018; 25(3): e20160350 <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035016>

SILVA, F.T.M., ATAÍDE, C.H. Valorization of *eucalyptus urograndis* wood via carbonization: Product yields and characterization, **Energy**, v. 172, 2019, 509-516. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.159>

SILVA, V. E.; NOGUEIRA, T. A. R.; ABREU-JUNIOR, C. H.; HE, Z.; BUZETTIC, S. LACLAUB, J.P.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GRILLI, E.; MURGIAI, I.; CAPRAI, G. F. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management** 455 (2020) 117673 11p.

SOUZA, F.; VALE, A. T. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [s.l.], v. 36, n. 88, p.405-413, 11 jan. 2017.

STANTURF, J. A.; VANCE, E. D.; FOX, T. R.; KIRST, M. Eucalyptus beyond its native range: Environmental issues in exotic bioenergy plantations. **International Journal of Forestry Research**, v. 463030, p. 1–5, 2013.

VALE, A. T.; MENDES, R. M.; AMORIM, M. R. S.; DANTAS, V. F. S. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p.