

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Ciências Agrárias

Mestrado em Ciências Florestais

Adriane dos Santos Santos

**Potencial para geração de energia de genótipos de *Eucalyptus* cultivados
na integração lavoura-pecuária-floresta e em cultivos puros**

Montes Claros

2024

Adriane dos Santos Santos

**Potencial para geração de energia de genótipos de *Eucalyptus* cultivados
na Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e em cultivos puros**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Leonardo David Tuffi Santos

Coorientador: Fernando Colen

Montes Claros

Agosto de 2024

Santos, Adriane dos Santos.

S237p
2024

Potencial para geração de energia de genótipos de eucalyptus cultivados na integração lavoura-pecuária-floresta e em cultivos puros [manuscrito]/ Adriane dos Santos Santos. Montes Claros, 2024.

41 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Ciências Florestais. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Leonardo David Tuffi Santos

Banca examinadora: Thiago Campos Monteiro, Edy Eime Pereira Barauna.

Inclui referências: f. 35-41

1. Eucalipto -- Agrosilvicultura -- Teses. 2. Fibras vegetais -- Teses. 3. Madeira -- Densidade -- Teses. 4. Carvão vegetal -- Análise gravimétrica -- Teses. 4. Carvão - Combustão -- Teses. I. Santos, Leonardo David Tuffi. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 630:620.09

Adriane dos Santos Santos

04/09/2024, 10:23

SEI/UFMG - 3508496 - Ata de defesa de Dissertação/Tese



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ICA - DIRETORIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO/TESE

Aos 30 dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e quatro, às 14:00 horas, sob a Presidência do Professor Leonardo David Tuffi Santos, D. Sc. (Orientador – UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Edy Eime Pereira Baraúna, D. Sc. (UFMG/ICA) e Thiago Campos Monteiro, D. Sc. (UFPR), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de Defesa de Dissertação de Adriane Santos Santos, aluna do Curso de Mestrado em Ciências Florestais. Após a avaliação da referida aluna, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa da Dissertação intitulada: "**Potencial para geração de energia de genótipos de *Eucalyptus* cultivados na Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e em cultivos puros**", sendo a aluna considerada aprovada. E, para constar, eu, Professor Leonardo David Tuffi Santos, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 74 do regulamento do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, conforme apresentado a seguir:

Art. 74 – Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do colegiado do Curso, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 30 de agosto de 2024.

Thiago Campos Monteiro
Membro

Edy Eime Pereira Baraúna
Membro

Leonardo David Tuffi Santos
Orientador



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo David Tuffi Santos, Professor do Magistério Superior**, em 30/08/2024, às 16:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edy Eime Pereira Barauna, Membro**, em 30/08/2024, às 20:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Campos Monteiro, Usuário Externo**, em 04/09/2024, às 08:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3508498** e o código CRC **E8717FE5**.

Dedico este trabalho aos amores da
minha vida Anderson e Andressa, por
serem minha fonte de energia diária.

AGRADECIMENTOS

Ao senhor Deus, por todas as bênçãos, forças e livramentos, pelo dom da vida e a oportunidade de recomeçar todos os dias.

A minha pequena família Anderson e Andressa, meus pilares de sustentação, minha motivação para não desistir, meus fiéis e leais apoiadores e incentivadores, vocês são a minha vida e fortaleza.

Ao meu orientador, professor Leonardo David Tuffi Santos, por ter acreditado em mim, pela paciência, atenção e incentivo. Sua orientação sábia e apoio constante foram fundamentais para essa jornada.

Ao meu coorientador, professor Fernando Colen, por sua orientação, apoio e ajuda sempre que necessário, pela paciência, atenção e motivação. As suas orientações foram essenciais na construção dessa pesquisa.

A Universidade Federal de Minas Gerais – Instituto de Ciências Agrárias pela oportunidade de participar do programa de mestrado em Ciências Florestais, contribuindo de forma imensurável na minha formação acadêmica e profissional.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, COD 001) pelo apoio financeiro na bolsa de pesquisa.

A equipe do Laboratório de Biologia e Manejo Integrado de Plantas Daninhas, Victor, Gabriel, Elora e Graciélme, tenho um carinho especial por todos, em especial ao José, Luan, Richardson e Murilo que foram meus braços literalmente e a Nicolle que cuidou sempre com muito carinho da minha filha.

Ao meu quarteto que ingressaram nessa loucura de mestrado comigo Maria Fernanda, Pedro e Matheus, foi muito bom estar com vocês nas disciplinas e nas longas conversas.

Aos integrantes da banca de defesa, pelas sugestões e correções de grande ajuda para esta pesquisa.

E a todos que passaram em minha vida nesse período e participaram de forma direta e indireta da minha formação profissional e crescimento pessoal.

“Seja forte e corajoso! Não fique desanimado, nem tenha medo, porque eu, o Senhor, seu Deus, estarei com você em qualquer lugar para onde você for!”

Josué 1:9

Potencial para geração de energia de genótipos de *Eucalyptus* cultivados na Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e em cultivos puros

RESUMO

O Brasil é líder na produção de carvão vegetal para a indústria siderúrgica, utilizando principalmente madeira de *Eucalyptus*. E essa produção sustentável do carvão pode ser aumentada com madeira proveniente de áreas com sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). O objetivo da pesquisa foi avaliar as características físicas e anatômicas da madeira de genótipos de *Eucalyptus*, assim como a qualidade do carvão vegetal produzindo para fins energéticos de madeiras provenientes de sistemas ILPF e cultivo puro. Amostras de madeira foram coletadas em dois sistemas de cultivo, com cerca de 11 anos de implantação, no norte do estado de Minas Gerais, sendo: 1- um sistema ILPF com espaçamento de fileiras duplas com 2 x 3 m dentro do renque e com 14 m de espaçamento entre renques, com a espécie de *Eucalyptus cloeziana* e o híbrido do *E. urophylla* x *E. grandis* (3335); 2- um monocultivo com espaçamento 3 x 4 m, com dois clones híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis* (3487 e 3336), cada genótipo em seu respectivo sistema de cultivo foi considerado como um tratamento. Para a coleta de discos das árvores foi utilizado método de Smalian, sendo selecionadas seis árvores por tratamento. Para caracterização da qualidade da madeira foram determinados a densidade básica, densidade energética e as características morfométricas das fibras. Análises feitas para o carvão vegetal após a carbonização foram densidade aparente, densidade energética, poder calorífico superior; e composição química imediata (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), foram calculados os rendimentos gravimétricos, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis. *Eucalyptus cloeziana* do ILPF destacou-se com maior largura de fibra, densidade básica e energética, indicando madeira de boa qualidade para usos energéticos. O carvão vegetal dessa madeira também apresentou maior densidade aparente e energética, com o clone C3335 possuindo o maior poder calorífico. A biomassa de genótipos de *Eucalyptus* cultivados em ILPF mostrou-se promissora para processamentos energéticos, evidenciando o sistema ILPF como uma opção eficiente para produção de madeira e carvão vegetal de boa qualidade.

Palavras-chave: Dimensões das fibras, densidade energética, rendimento gravimétrico, poder calorífico.

Energy generation potential of *Eucalyptus* genotypes grown in Crop-Livestock-Forest Integration and in pure crops

ABSTRACT

Brazil is a global leader in charcoal production for the steel industry, primarily using *Eucalyptus* wood. The sustainable production of charcoal can be expanded using wood from areas with Integrated Crop-Livestock-Forest (ICLF) systems. This study aimed to evaluate the physical and anatomical characteristics of *Eucalyptus* wood genotypes, as well as the quality of charcoal produced for energy purposes, using wood from ICLF systems and pure plantations. Wood samples were collected from two cultivation systems, approximately eleven years after their establishment, in the northern region of Minas Gerais state: (1) an ICLF system with double-row spacing of 2 x 3 m within the rows and 14 m between rows, using *Eucalyptus cloeziana* and the hybrid *E. urophylla* x *E. grandis* (3335); and (2) a monoculture system with 3 x 4 m spacing, with two hybrids of *E. urophylla* x *E. grandis* (3487 and 3336). Each genotype within its respective cultivation system was considered a treatment. Tree disks were collected using the Smalian method, with six trees selected per treatment. Basic density, energy density, and fiber morphometric characteristics were measured to assess wood quality. Regarding charcoal, analyses conducted after carbonization included apparent density, energy density, higher heating value, and proximate chemical composition (volatile matter, ash, and fixed carbon). Gravimetric yields, liquid pyrolysis products, and non-condensable gases were also calculated. *Eucalyptus cloeziana* from the ICLF system stood out with greater fiber width, basic density, and energy density, indicating high-quality wood for energy purposes. Charcoal from this wood also exhibited higher apparent density and energy density, with the clone C3335 presenting the highest heating value. The biomass of *Eucalyptus* genotypes cultivated in ICLF systems proved to be promising for energy applications, highlighting the ICLF system as an efficient option for producing high-quality wood and charcoal.

Keywords: Fiber dimensions, energy density, gravimetric yield, calorific value.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.** Mapa de localização das áreas de coleta das madeiras de *Eucalyptus*, Estado de Minas Gerais, Brasil. 26
- Figura 2.** Correlação entre a qualidade da madeira (M), qualidade de carvão (C), rendimento gravimétrico (RG), licor pirolenhoso (LP) e gases não condensáveis (GNC) de genótipos de *Eucalyptus* cultivados em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e em monocultivo.. 33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Genótipos de <i>Eucalyptus</i> com o respectivo espaçamento (E), sistema de cultivo (SC), altura total (Ht), volume de madeira sem casca (Vsc) e porcentagem de casca (PC).....	25
Tabela 2. Valores médios da análise das fibras da madeira de genótipos de <i>Eucalyptus</i> cultivados em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e em monocultivo.	30
Tabela 3. Propriedades energéticas da madeira de genótipos de <i>Eucalyptus</i> cultivados em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e em monocultivo.	30
Tabela 4. Propriedades energéticas do carvão vegetal de genótipos de <i>Eucalyptus</i> cultivados em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e em monocultivo.	31
Tabela 5. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis de genótipos de <i>Eucalyptus</i> cultivados em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e em monocultivo.	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo geral	16
2.2. Objetivos específicos.....	16
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1. Florestas de <i>Eucalyptus</i> e seu uso na produção de biomassa.....	17
3.2. Sistemas integrados de produção de <i>Eucalyptus</i>	18
3.3. Qualidade da madeira	20
3.4. Qualidade do carvão vegetal	23
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
4.1. Área de amostragem das árvores de <i>Eucalyptus</i>	25
4.2. Amostragem e caracterização do material	26
4.3. Processo de carbonização	27
4.4. Análises realizadas na madeira e no carvão vegetal.....	27
4.5. Análise estatística.....	29
5. RESULTADOS	29
5.1. Qualidade da madeira	29
5.2. Qualidade do carvão vegetal	31
5.3. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis	31
5.4. Análise de correlação	32
6. DISCUSSÃO.....	34
7. CONCLUSÕES.....	36
REFERÊNCIA	36

1. INTRODUÇÃO

A compreensão mundial das questões ambientais levou ao uso crescente de fontes de energia renováveis e sustentáveis como alternativa aos combustíveis fósseis. A combustão de biomassa é uma das alternativas mais utilizadas para substituir os combustíveis fósseis na produção de calor e energia, por ser considerada um combustível neutro em carbono, dada sua capacidade de renovação e redução da emissão de gases de efeito estufa (Capela *et al.*, 2022).

Dentre os materiais utilizados na produção de biomassa no Brasil a madeira de *Eucalyptus* merece destaque, sendo o país líder mundial na produção de *Eucalyptus* para fins energéticos (Lavoranti *et al.*, 2021). O país é também o maior produtor e o único a utilizar carvão vegetal em larga escala para a biorredução do minério de ferro na indústria do ferro-gusa (FAO, 2017; Barros Junior, 2020).

A produção de carvão vegetal no Brasil em 2022 possuía cerca de 7,6 milhões de hectares de florestas plantadas de *Eucalyptus*, dos quais aproximadamente 16% são destinados exclusivamente à siderurgia para produção de carvão vegetal (IBÁ, 2023), o que torna essa uma atividade de destaque para o país.

Apesar da liderança brasileira no uso de madeira de florestas plantadas para fins energéticos há uma necessidade urgente de desenvolver e aumentar a disponibilidade de energia renovável na matriz energética para enfrentar os desafios ambientais e climáticos do futuro (Tian *et al.*, 2022). Assim, é importante propor soluções que envolvam a expansão da disponibilidade de solo para a produção de energia, a integração do desenvolvimento da energia de biomassa com práticas agrícolas e florestais sustentáveis, a melhoria da produtividade dos plantios com consideração ao solo, à água e ao uso de nutrientes, e o desenvolvimento de tecnologias de produção avançada (Goldemberg, 2009).

Os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) apresentam estratégias que visam à produção sustentável, integrando atividades agrícolas, pecuárias e florestais em uma mesma área, buscando efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema, contemplando a adequação ambiental e

a viabilidade econômica (EMBRAPA, 2019). Conhecer e empregar o uso do componente arbóreo desses sistemas é essencial, pois permite a viabilidade de novas fontes de matéria-prima que podem ser utilizadas pela indústria madeireira.

Visando à utilização da madeira com qualidade, a variabilidade de plantios como fontes de extração de madeira favorece alternativas que permitem reduzir a pressão sobre as florestas nativas e melhorar a oferta de biorredutores com propriedades adequadas para a indústria siderúrgica (Protásio *et al.*, 2021). As propriedades do carvão vegetal destinado à siderurgia para a redução do minério de ferro nos altos-fornos dependem diretamente do processo de carbonização e da qualidade da madeira. Portanto, a qualidade da madeira é um fator fundamental na produção do carvão vegetal, interferindo diretamente nas propriedades e na qualidade do produto final (Assis *et al.*, 2016).

Entre as características das árvores que devem ser consideradas para a produção de carvão vegetal, destacam-se as características físicas, químicas e anatômicas da madeira. Essas características podem ser alteradas pelos genótipos e idade da árvore (Trugilho *et al.*, 2015) e pelo sistema de produção das árvores no campo (Reis; Santos; Pacheco, 2021).

As pesquisas sobre os genótipos de *Eucalyptus* cultivados em sistemas de ILPF têm atraído a atenção de pesquisadores nos últimos anos (Oliveira; Pinto Júnior, 2021; Silva *et al.*, 2023; Kruchelski *et al.*, 2023; Ferreira *et al.*, 2020; Tonini *et al.*, 2020). Porém, são escassos estudos sobre a qualidade da madeira oriundas de sistemas integrados para a produção de carvão vegetal.

Nesse contexto, este estudo investiga a hipótese de que a madeira de *Eucalyptus* cultivados na ILPF possui potencial para geração de energia através do carvão vegetal. Além disso, determinando-se a qualidade da madeira e qualidade do carvão vegetal de sistemas integrados para a produção de biorredutores, o carvão vegetal se torna um importante biocombustível sólido, podendo ser utilizado em diversas aplicações (Protásio *et al.*, 2021).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar as características físicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus*, assim como a qualidade do carvão vegetal produzido para fins energéticos de madeiras provenientes de sistemas ILPF e cultivo homogêneo.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar a qualidade da madeira de genótipos de *Eucalyptus* provenientes de sistemas ILPF e cultivo homogêneo;
- Avaliar a qualidade e capacidade energética do carvão vegetal produzido de madeira de genótipos de *Eucalyptus* proveniente de sistemas ILPF e cultivo homogêneo;
- Atribuir uso à biomassa de *Eucalyptus* de sistema ILPF para processamentos energéticos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Florestas plantadas de *Eucalyptus* e seu uso na produção de biomassa

No Brasil, a biomassa lenhosa é produzida a partir de plantações florestais homogêneas de *Eucalyptus* e outras espécies. Essas plantações fornecem madeira para a produção de carvão vegetal, importante insumo utilizado nos altos-fornos das siderúrgicas brasileiras (Protásio *et al.*, 2021).

O gênero *Eucalyptus* tem ampla diversidade de espécies conhecidas, sendo algumas com características de rápido crescimento, alta produtividade, grande capacidade de adaptação e aplicação para diferentes finalidades. Tem sido extensivamente utilizado em plantios florestais, ajudando a reduzir a pressão sobre os ecossistemas nativos, e sua área plantada continua em processo de expansão (Lima *et al.*, 2020; Lavoranti *et al.*, 2021).

Diante da alta adaptabilidade do *Eucalyptus*, várias espécies estão presentes em diversas regiões do Brasil. *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* têm sido espécies importantes no processo de hibridação, produzindo híbridos excelentes, presentes em muitas regiões do país e possuindo alta produtividade. Da mesma forma, destacam-se *E. urophylla*, *E. camaldulensis* e *E. cloeziana*, e seus híbridos, com importantes propriedades para fins energéticos (Barreiros *et al.*, 2021; Ferreira *et al.*, 2012).

O potencial produtivo dos plantios de *Eucalyptus* no Brasil é superior ao de outras regiões do mundo. A produtividade média no plantio de *Eucalyptus* evoluiu significativamente ao longo dos anos. Em 1970, ela era de 10 m³/ha/ano, passando a ser de 32,7 m³/ha/ano em 2022. Entre os principais estados produtores de florestas plantadas no país, Minas Gerais se destaca, com 29% dos plantios de *Eucalyptus* (IBÁ, 2023).

O destino da biomassa florestal gerada de florestas plantadas é separado em produtos madeireiros, como carvão vegetal e lenha, madeira em tora para produção de celulose e papel, e madeira em tora para outras finalidades (IBGE, 2019). Pesquisas relacionadas à biomassa florestal apresentam diversos propósitos, entre os quais, para fins energéticos, pois 8,9% da energia produzida nacionalmente originam-se da lenha e do carvão vegetal (MME, 2021).

A produção de carvão vegetal nacional tornou o Brasil um grande produtor mundial, sendo esse produto uma matéria-prima importante para outras cadeias industriais. A madeira oriunda das florestas plantadas substitui insumos de fontes fósseis, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa da indústria siderúrgica. Dessa forma, a indústria fortalece seu compromisso ambiental e beneficia outras indústrias (IBÁ, 2022).

O estado de Minas Gerais é o principal produtor e consumidor de carvão vegetal no país, visto que, além do mercado de papel e celulose, a matéria-prima florestal dos plantios de *Eucalyptus* destina-se à geração de energia pelas agroindústrias, tornando-se fonte de energia renovável com grande impacto sobre a economia do setor florestal. Entre os principais setores de utilização do carvão vegetal para produção energética, encontram-se as indústrias de produção de ferro-gusa e aço, ligas metálicas e silício metálico, entre outras destinações (Rezende; Santos, 2010).

Segundo o Instituto Brasileiro de Árvores (IBÁ), em 2021, a produção de carvão vegetal nos principais estados, como Minas Gerais e Espírito Santo, chegou a 3,6 milhões de toneladas, aumentando em 9,4% em relação a 2020. O destino principal da produção de carvão vegetal é para o setor da Siderurgia Ferro-gusa e Aço, no qual seu consumo chegou a 4,25 milhões de toneladas (IBÁ, 2022).

O setor florestal tem a possibilidade de contribuir ainda mais para a composição da matriz energética nacional, a partir do momento em que se propõe a atuar no aumento de alternativas fornecedoras de matéria-prima, desenvolvimento de produtos e processos tecnológicos tendentes a aumentar o uso de fontes renováveis de energia. A necessidade de se realizar pesquisas sobre a qualidade específica da madeira de florestas plantadas, e ainda as produzidas em sistemas integrados de produção manejadas para fins de aplicações energéticas, buscando maior agregação e aumentando recursos para a geração de energia (Lavoranti *et al.*, 2021).

3.2. Sistemas integrados de produção de *Eucalyptus*

Os sistemas integrados de produção são caracterizados pela combinação de diferentes estruturas de cultivo agrícola, florestal e animal com diferentes finalidades em uma mesma unidade de área, objetivando maximizar o uso da

terra e dos meios de produção. Este sistema tem ganhado destaque nos solos brasileiros, alcançando mais de 11,5 milhões de hectares nos últimos anos (EMBRAPA, 2019).

Entre os sistemas integrados que vêm sendo difundidos no Brasil, destaca-se o sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), que consiste em um sistema de produção sustentável que integra atividades silviagrícolas e pecuárias em uma mesma área, com cultivo em sucessão e/ou em rotação. Sua diversificação visa a produção de alimentos, fibra e energia por meio da otimização dos ciclos biológicos e geração de matéria orgânica das plantas e animais presentes no sistema (Balbino *et al.*, 2011).

No ILPF, o componente agrícola mais utilizado são as culturas anuais como soja, milho e sorgo. Como forrageiras, destaca-se a utilização de espécies do gênero *Urochloa*, para pastejo dos animais e formação de palhada. Já o componente florestal pode ser composto por diferentes espécies arbóreas determinadas pelo objetivo do produtor (Marchioro, 2019), porém, com predomínio de utilização do *Eucalyptus*.

A introdução de espécies arbóreas junto aos sistemas de produção agropecuário, além de apresentar-se como mais um componente rentável ao produtor, contribui com a proteção do solo, aumento do aporte de carbono e conforto animal, melhorando assim a dinâmica de produção do sistema (Balbino *et al.*, 2011; Costa *et al.*, 2015). Além disso, o componente florestal tem grande importância para a economia, fornecendo matérias-primas e sendo base florestal para grandes empreendimentos de indústrias siderúrgicas, para produção de carvão, papel, celulose, madeira, postes, bioenergia, construção civil, entre outros. Isso também contribui para a conservação ambiental e de espécies nativas, reduzindo a pressão sobre o desmatamento de ambientes naturais (SNIF, 2020).

Entre as espécies florestais com potencial de uso em sistema ILPF, destacam-se as espécies do gênero *Eucalyptus*. O destaque dos indivíduos desse gênero na implantação de ILPF se deve ao grande número de espécies e variedade de híbridos interespecíficos, possibilitando a seleção de materiais genéticos para diferentes finalidades e adaptados às condições edafoclimáticas de cada região (EMBRAPA, 2019).

Plantios de *Eucalyptus* destinados à obtenção de matéria-prima para a indústria de papel e celulose e carvão vegetal normalmente utilizam os arranjos de 3 x 0,5 m; 3 x 1 m; 3 x 1,5 m; 3 x 2 m e 3 x 3 m (Rocha *et al.*, 2017). Gomes (2020), analisando povoamentos de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* aos 60 meses, sobre a produtividade e a análise econômica, associadas às características tecnológicas mais adequadas para a produção de carvão vegetal, observou que o espaçamento 3 x 2 m se mostrou o mais viável. Dentro dos sistemas integrados em consórcio com outros cultivos, adota-se um espaçamento mais amplo, pois segundo Cipriani *et al.* (2018) em seu trabalho sobre crescimento do *Eucalyptus* em dois renques diferentes, menciona a importância do planejamento e ainda recomenda o uso de espaçamento de 3,5 m x 3,0 m entre plantas para proporcionar árvores grossas e evitar perda de produtividade por área.

Em uma pesquisa desenvolvida por Magalhães *et al.* (2019) em Sinop – MT, em uma área de ILPF com um híbrido de *Eucalyptus urograndis* plantado em linhas triplas e renques de 30 metros de distância, foi observado que, nos primeiros cinco anos, o *Eucalyptus* cresceu 18% mais do que o sistema de monocultivo da espécie. Porém, após o manejo da área com desbaste das linhas laterais, o volume da produtividade de madeira chegou a ser 54% maior que a área de monocultura.

Dessa forma, observa-se que estudos sobre os detalhes, desenvolvimento e benefícios do sistema são essenciais para levantamento das informações dos melhores arranjos adaptados à realidade de cada área, pois diversificar a produção na propriedade desperta um conceito de integração de atividades muito promissor (Lopes *et al.*, 2021). Ademais, estudos voltados para produtividade e propriedades da madeira também são importantes, pois se diferenciam em função da espécie que, conseqüentemente, acarretam variação na qualidade da madeira (Loureiro *et al.*, 2021).

3.3. Qualidade da madeira

A qualidade da madeira é um fator de grande importância quando se visa à produção de carvão vegetal com alto rendimento, baixo custo e elevada produtividade (Donato *et al.*, 2020). Para a finalidade energética, sua qualidade está diretamente ligada às suas propriedades, que incluem elevados valores de

densidade básica, porcentagem e morfologia das fibras, poder calorífico e um baixo teor de cinzas (Barros Junior, 2020; Siqueira *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2017).

A densidade da madeira representa a quantidade de massa contida em uma unidade de volume, sendo uma das propriedades mais relevantes para a caracterização da biomassa. Essa densidade pode variar entre espécies, árvores da mesma espécie e até dentro de uma mesma árvore, e está fortemente relacionada com a produção energética. Quanto maior a densidade básica, maior será a quantidade de energia estocada por metro cúbico de madeira (Vital *et al.*, 1986; Rezende *et al.*, 1995; Lima *et al.*, 2020).

A densidade básica da madeira influencia a quantidade de massa disponível para combustão para um dado volume, além de afetar a qualidade do carvão vegetal produzido (Pereira *et al.*, 2017; Barotto *et al.*, 2018), pois apresenta forte correlação com outras propriedades da madeira, como as físicas, químicas, anatômicas e mecânicas (Barros Junior, 2020).

Estudos realizados por Sereghetti *et al.* (2015), Hsing, Paula, Paula (2016) e Oliveira *et al.* (2021), observaram que a densidade média da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* se enquadra no processo de carbonização para produção de carvão vegetal destinado ao uso siderúrgico (Ramos *et al.*, 2023). Quanto mais alta for a densidade da madeira, maior será o rendimento gravimétrico do carvão vegetal (Loureiro *et al.*, 2021). O rendimento gravimétrico é definido como sendo razão entre a massa de carvão produzido e a massa seca de madeira enfiada (Oliveira *et al.*, 2013). A densidade básica também está fortemente relacionada com a produção energética, quanto maior a densidade básica, maior será a quantidade de energia estocada por metro cúbico (Carneiro *et al.*, 2014).

Um fator que influencia diretamente a densidade da madeira são as dimensões das células que a compõem, com destaque para as fibras, que na maioria das espécies, representam a maior porcentagem do lenho. As fibras são as células mais afetadas durante a carbonização, e a redução da espessura da parede celular das fibras é expressiva após esse processo, deixando-as com um aspecto vítreo e quebradiço, o que pode tornar o carvão quebradiço. Madeiras ricas em fibras com alta fração de parede devem ser recomendadas para a

geração de energia, seja pela queima direta ou pela produção de carvão vegetal (Pereira *et al.*, 2017).

O poder calorífico da madeira é definido como a quantidade de calor liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou volume do combustível, expresso em kcal kg⁻¹ e/ou MJ kg⁻¹. Para uso energético, quanto mais alto for o poder calorífico, maior será a energia contida (Nogueira *et al.*, 2000; Nones *et al.*, 2015). O poder calorífico é uma propriedade que possui alta variação entre as espécies, o que pode influenciar a geração de energia devido à composição química da madeira, especialmente aos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas (Quirino *et al.*, 2005).

Os materiais voláteis são a fração evaporada como vapor ou gás durante a decomposição térmica do combustível, enquanto a outra quantidade de carbono não evaporada permanece relativamente intacta em estado sólido, chamada de carbono fixo (Nasser *et al.*, 2016). O teor de carbono fixo e os materiais voláteis apresentam relação inversa, uma vez que são determinados por diferença, visto que elevado teor de materiais voláteis facilita a ignição do combustível (Protásio *et al.*, 2011). Em relação a altos teores de cinzas, estes reduzem o poder calorífico da madeira, enquanto altos teores de carbono fixo afetam, positivamente, o valor calórico (Imam; Capareda, 2012).

As cinzas são resíduos compostos de óxidos minerais obtidos após a combustão completa da madeira. Para a produção de energia, alto teores de cinzas não são interessantes, pois isso indica elevados níveis de minerais. Para biomassas em geral, o teor cinzas ideal deve ser inferior a 5%, principalmente, pela relação inversa existente entre o poder calorífico (Brand *et al.*, 2015). Sob altas temperaturas, as cinzas, por apresentarem baixa temperatura de fusão, promovem prejuízos aos equipamentos de queima, como incrustações, corrosões e entupimentos, caracterizando-se como material abrasivo, além de reduzirem a qualidade do carvão vegetal como biorredutor do ferro na indústria siderúrgica (Souza *et al.*, 2016; Melissari, 2014).

O conhecimento acerca da origem da madeira, juntamente com seu sistema de produção, está associado à grande influência na dificuldade no uso do carvão vegetal decorrente da alta variabilidade de sua qualidade (Loureiro *et al.*, 2021). A utilização da madeira de qualidade adequada melhora a oferta de biorredutores com propriedades adequadas para a indústria siderúrgica. As

propriedades do carvão vegetal destinado à redução do minério de ferro nos altos-fornos dependem diretamente do processo de carbonização e da qualidade da madeira (Protásio *et al.*, 2021).

O potencial energético da madeira sofre influência de diversos fatores, tais como espécie/clone, idade, local de plantio, interações entre o genótipo e ambiente, e o espaçamento, podem afetar de forma significativa as composições química, física, mecânica e anatômica, conseqüentemente, influenciando a qualidade e produção do carvão vegetal (Neves *et al.*, 2011; Assis *et al.*, 2012).

3.4. Qualidade do carvão vegetal

As propriedades do carvão vegetal são influenciadas, principalmente, pelas propriedades da madeira na qual está sendo utilizada para a carbonização e posteriormente pelas condições de operação da carbonização, como sistema de produção, mão-de-obra, temperatura e tempo de carbonização (Dufourny *et al.*, 2019).

A qualidade do carvão vegetal pode ser avaliada por análise química imediata, rendimentos gravimétricos e densidade relativa aparente, entre outros. A análise imediata determina a composição do carvão vegetal depois de carbonizado, como umidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas. Carbono fixo é a porção de carvão que permanece como resíduo após a remoção dos materiais voláteis, umidade e minerais. As cinzas representam a fração inorgânica que permanece após a combustão completa (Loureiro *et al.*, 2021).

O rendimento gravimétrico refere-se à quantidade de carvão produzido e a quantidade de madeira que será carbonizada (base seca ou base úmida). O rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal produzido, além de depender das características da madeira, estão associados ainda ao modo de condução da carbonização, mediante o controle da temperatura, da taxa de aquecimento e do tempo de exposição da madeira ao calor (Damásio *et al.*, 2015).

O aumento na densidade da madeira, associado a elevados teores de lignina, propicia a produção de carvão de melhor qualidade, com alto rendimento gravimétrico, aumento no teor de carbono fixo e na densidade aparente do carvão (Soares *et al.*, 2014). Madeiras de densidades mais elevadas produzem carvão com maior densidade aparente. Quanto maior a densidade aparente do

carvão vegetal, melhor será o aproveitamento do volume útil do alto-forno siderúrgico, permitindo aumento da sua produtividade em um determinado espaço de tempo (Froehlich; Moura, 2014).

A densidade aparente do carvão vegetal consiste em medir o volume e peso de várias peças de carvão considerando os poros internos como ocupados pelo material carvão. Sendo assim, a densidade básica da madeira também está fortemente ligada à densidade aparente do carvão, ou seja, quanto maior for a densidade da madeira, mais denso será o carvão vegetal e maior será a quantidade de energia liberada por unidade de volume (Vale; Dias; Santana, 2010).

A qualidade do carvão vegetal para o uso na siderurgia está relacionada à qualidade da madeira. Um dos desafios para a produção de carvão vegetal é maximizar o rendimento gravimétrico do processo, associado ao uso de energia proveniente da carbonização dos subprodutos (Protásio *et al.*, 2021).

As principais variações dos parâmetros do processo de carbonização das indústrias produtoras de carvão vegetal do Brasil estão relacionadas à estrutura utilizada para a carbonização, à condução do processo, às dimensões do forno, ao diâmetro da madeira e ao seu teor de umidade. As indústrias têm utilizado os fornos retangulares para o processo de carbonização, esses fornos são construídos em alvenaria e possuem grande capacidade volumétrica, entre 150 a 550 metros cúbicos (m³) de madeira, o que possibilita a mecanização das atividades de carregamento e descarregamento (Ramos *et al.*, 2023). No entanto, nesses fornos, é vista variação na taxa de aquecimento, distribuição dos gases e temperatura de carbonização, devido, principalmente, às suas grandes dimensões, que podem influenciar, além do rendimento, a qualidade do carvão vegetal produzido (Rodrigues; Braghini Júnior, 2019).

Para uso na siderurgia, o carvão deve ter, no máximo, 1,5% de teor de cinzas, pois estas podem afetar a queima e dificultar a gaseificação, em razão das interações entre a fração inorgânica e a matéria combustível. É preferível um teor de carbono fixo superior a 75%. Além disso, os rendimentos gravimétricos considerados satisfatórios estão entre 30 e 35% (Bruzual, 2015; Rousset *et al.*, 2011; Rodrigues; Braghini Júnior, 2019).

O processo de carbonização da madeira tem como objetivo a concentração de carbono no volume disponível, eliminando os elementos

voláteis. Isso visa não somente à sua transformação em carvão vegetal, mas também a garantir alto desempenho e eficiência energética. De modo geral, a carbonização da madeira resulta em perdas de frações na forma de vapor de água, alcatrões, metano, monóxido de carbono, entre outros compostos. A ação do calor é projetada para eliminar a maior parte dos componentes voláteis da madeira, que podem provocar sérios problemas ambientais (Carneiro *et al.*, 2013; Canal *et al.*, 2016).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de amostragem das árvores de *Eucalyptus*

As árvores de *Eucalyptus* usadas para obtenção das amostras de estudo foram coletadas em um sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e em um povoamento puro cujas características produtivas e de cultivo são apresentadas na Tabela 1. As árvores foram implantadas no ano de 2012 e apresentavam 11 anos de idade, sendo seus cultivos localizados na região norte do estado de Minas Gerais. Nos sistemas de ILPF, o espaçamento adotado foi de fileiras duplas com 2 x 3 m dentro do renque e com 14 m de espaçamento entre renques. No monocultivo o *Eucalyptus* foi cultivado no espaçamento 3 x 4 m.

Tabela 1. Genótipos de *Eucalyptus* com o respectivo sistema de cultivo (SC), altura total (Ht), volume de madeira sem casca (Vsc) e porcentagem de casca (PC%).

Genótipo	ID	SC	Ht (m)	Vsc (m ³ /árvore)	PC (%)
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	01	ILPF	15,03	0,94 ^(0,18)	20,32 ^(0,01)
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3335		23,00	0,98 ^(0,34)	22,98 ^(0,02)
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3336	Monocultivo	21,41	0,89 ^(0,13)	26,09 ^(0,02)
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3487		19,52	0,82 ^(0,15)	25,43 ^(0,01)

Id = identificação; C = clone. ILPF = Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. Os números entre parênteses referem-se ao erro padrão da média.

Os sistemas de ILPF, com área total de 3,2 ha e altitude média de 590 m, localizam-se na Fazenda da Barra, com coordenadas geográficas 16°38'44,02" S e 43°42'43,77" O, no município de Francisco Sá, Minas Gerais (Figura 1). Na

ILPF, as árvores foram cultivadas em renques duplos com plantio feito na orientação Leste-Oeste.

O sistema de cultivo puro de clones de *Eucalyptus* apresenta área de 1,14 ha, a 655 m de altitude, localizado no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais - ICA/UFMG, com coordenadas 16°40'21"S e 43°50'28' O, na cidade de Montes de Claros, Minas Gerais (Figura 1).

Os genótipos de *Eucalyptus* utilizados na pesquisa foram considerados como tratamentos, sendo que seis árvores de cada material foram utilizadas para as análises de qualidade da madeira e do carvão vegetal. Cada árvore representativa do povoamento foi considerada como uma parcela e como uma repetição no estudo.

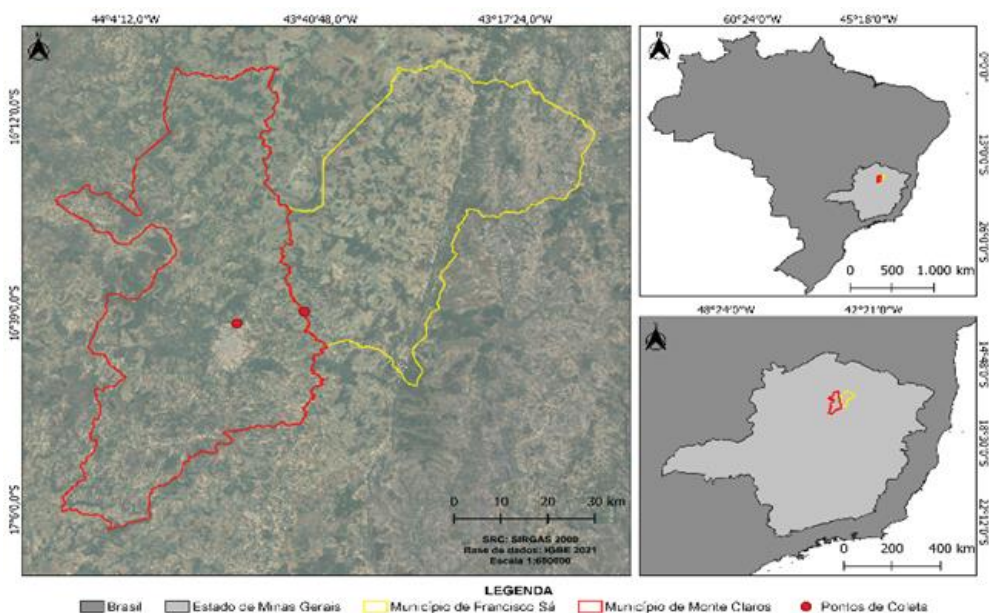


Figura 1. Mapa de localização das áreas de coleta das madeiras de *Eucalyptus*, Estado de Minas Gerais, Brasil.

4.2. Amostragem e caracterização do material

A coleta do material foi a mesma para as duas áreas pelo método Smalian. A escolha das árvores para retirada dos discos de madeira no ILPF e no monocultivo foi realizada de forma aleatória, buscando a representatividade dos povoamentos. Na amostragem, foram obtidos discos com casca e espessura de 2,5 cm, em posições longitudinais: 2%, 10%, 30%, 50% e 70% da altura comercial, além de um disco na altura do DAP, considerada até um diâmetro

mínimo de 4,0 cm, conforme metodologia descrita por Protásio *et al.* (2021). Os discos foram divididos em quatro partes em forma de cunhas, passando pela medula. Duas amostras opostas foram retiradas para as análises da qualidade da madeira e as demais cunhas opostas foram utilizadas para o processo de carbonização.

4.3. Processo de carbonização

O processo de carbonização da madeira ocorreu em forno mufla elétrico (Forno Mufla SSFMr, GP Científica Ltda, Belo Horizonte, Brasil) com uma cápsula metálica conectada a um condensador resfriado a água interligado a um frasco para coleta do líquido pirolenhoso e a saída dos gases não condensáveis e combustão desses gases. As amostras utilizadas tiveram massa aproximada de 1.600 g de madeira seca previamente a 103 ± 2 °C. Para carbonização da madeira, o forno mufla foi programado com as seguintes rampas de aquecimentos e períodos de permanência nas faixas de temperatura: 1ª rampa: temperatura inicial até 120° C; 2ª rampa: 120° a 240° C e 3ª rampa: 240° a 360° C. Cabe ressaltar que a mufla permaneceu por vinte minutos estabilizada antes da mudança das rampas e que o processo total de carbonização durou em torno de 4h/ amostra.

4.4. Análises realizadas na madeira e no carvão vegetal

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método de imersão em água de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003). Os valores foram calculados a partir da média aritmética das densidades considerando os pontos de amostragem longitudinal das toras.

Para as análises das fibras, foram preparadas lâminas semipermanentes, a partir do macerado de fragmentos da madeira. Os fragmentos de madeira foram imersos em solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial na proporção de 1:1 (Dadswell, 1972) e, em seguida, levados à estufa a 60 °C por 48 horas. Posteriormente o material foi lavado com água destilada e corado com Safranina para posterior montagem das lâminas semipermanentes. As imagens das fibras foram obtidas com auxílio de microscópio óptico acoplado a câmera (Primo Star, Carl Zeiss Optic Ltda, São Paulo, Brasil). O material digitalizado foi analisado quanto à largura das fibras (Lf), ao diâmetro do lume (DL), à espessura

da parede celular (Eq. 1) e à fração parede (Eq. 2), sendo estimados conforme Foelkel e Barrichelo (1975).

$$EP = (Lf-DL)/2 \quad (1)$$

$$FP = ((2.EP)/Lf)100 \quad (2)$$

Onde EP é a espessura da parede celular (μm); FP é a fração parede celular (%); Lf é a largura da fibra (μm); DL é o diâmetro do lume (μm).

Para a análise do poder calorífico superior da madeira, as amostras foram previamente secas em estufa a $103\pm 2^\circ\text{C}$ até o peso constante, sendo, então, trituradas e em seguida passadas em uma peneira de malha de 40 mesh (ASTM, 1982). Parte do material obtido foi usado para determinar o poder calorífico superior utilizado uma bomba calorimétrica (IKA® C-5000, LabControl, São Paulo, Brasil), conforme a norma (ASTM, 1987). O mesmo processo foi feito com pedaços do carvão vegetal. Uma fração das amostras de madeira e carvão trituradas e peneiradas foram empregadas para determinar os teores materiais voláteis (MV; Eq. 3), cinzas (Cz; Eq. 4) e carbono fixo (CF; Eq. 5), em base seca (ASTM, 1984).

$$MV\% = ((mb-mc)/mb)100 \quad (3)$$

Onde $MV\%$ é materiais voláteis da amostra em gramas de madeira; mb : gramas de amostra após secagem a 105°C ; mc : gramas de amostra após secagem a 950°C .

$$Cz\% = (md/mb)100 \quad (4)$$

Onde $Cz\%$ é o teor de cinzas da amostra em gramas de madeira; mb : gramas de amostra após secagem a 105°C ; md : gramas de resíduo.

$$CF\% = 100-(MV\%+Cz\%) \quad (5)$$

A densidade aparente do carvão vegetal (Da) foi determinada pelo método hidrostático, sendo determinado o volume a partir de dez pedaços de carvão por árvore amostrada e utilizando uma balança com precisão de 0,01. Após a imersão do carvão em água, as amostras foram secas em estufa a $103\pm 2^\circ\text{C}$ para obtenção da massa seca (Vital, 1984). A densidade aparente do carvão foi determinada conforme Protásio *et al.* (2021) e Loureiro *et al.* (2019), pela relação

entre a massa seca e o volume do carvão. A densidade energética (De) foi calculada através da multiplicação da densidade e do poder calorífico superior da madeira e do carvão conforme Loureiro *et al.* (2021). Também foram calculados os rendimentos gravimétricos (RG ; Eq. 6) em base seca do carvão vegetal, líquido pirolenhoso (LP ; Eq. 7) e gases não condensáveis (GNC ; Eq. 8)

$$RG\% = (Msc/Msm)100 \quad (6)$$

Onde $RG\%$ é o rendimento gravimétrico do carvão vegetal; Msc é a massa seca de carvão (g); e Msm é a massa seca da madeira (g).

$$PL\% = (MPL/Msm)100 \quad (7)$$

Onde $PL\%$ é o rendimento do líquido pirolenhoso; MPL é a massa de líquido pirolenhoso (g); e Msm é a massa seca da madeira (g).

$$GNC\% = 100-(RG\%+PL\%) \quad (8)$$

Onde $GNC\%$ é o rendimento de gases não condensáveis; $RG\%$ é o rendimento gravimétrico do carvão vegetal; e $PL\%$ é o rendimento líquido pirolenhoso.

4.5. Análise estatística

Os dados foram analisados segundo um delineamento inteiramente casualizado, submetidos ao teste de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk e ao teste de O'Neill e Mathews para verificação da homogeneidade de variâncias. Os dados foram considerados normais e homogêneos, sendo submetidos a análise de variância e ao teste de médias comparadas entre si pelo teste de Tukey, ambos a 5% de significância. Também foi feita uma análise de correlação linear simples de Pearson para os dados a 5% de significância. As análises foram realizadas com o software estatístico R Studio versão 3.3.1 (R Core Team, 2023).

5. RESULTADOS

5.1. Qualidade da madeira

Eucalyptus cloeziana cultivado no sistema ILPF apresentou a maior largura de fibra, não sendo observada variação entre os demais genótipos estudados (Tabela 2). O diâmetro do lume, a espessura da parede e a fração da

parede apresentaram médias de 8,15 μm , 3,44 μm e 45,76%, respectivamente, não sendo observada variação entre os genótipos analisados (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios da análise das fibras da madeira de genótipos de *Eucalyptus* cultivados em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e em monocultivo.

Genótipo	ID	SC	Lf (μm)	DL (μm)	EP (μm)	FP (%)
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	S01	ILPF	16,07 a	8,47	3,80	47,30
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3335		14,83 b	7,90	3,47	46,74
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3336	Monocultivo	14,62 b	8,08	3,27	44,70
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3487		14,60 b	8,13	3,23	44,29
Erro padrão			0,35	0,12	0,13	0,74
CV			6,07	11,62	16,82	14,61

Id = identificação; C = clone. S = propagação seminífera. SC = sistema de cultivo; Lf: largura da fibra; DL: diâmetro do lume; EP: espessura da parede; FP: fração parede; CV: coeficiente de variação. As médias de cada parâmetro seguidas pela mesma letra minúscula se diferem estatisticamente pelo teste F ao nível de 5% de significância.

Os maiores valores de densidade básica e densidade energética da madeira foram observados no *E. cloeziana* cultivado no ILPF, enquanto valores inferiores para essas variáveis foram observados nos clones C3336 e C3487 (Tabela 3). O poder calorífico superior da madeira e de matérias voláteis não apresentaram diferença entre os genótipos, com média 4227 kcal kg⁻¹ e 79,89%, respectivamente (Tabela 3). Os resultados dos teores de cinzas e carbono fixo se comportaram de forma oposta, em que a espécie *E. cloeziana* e o C3487 apresentaram maiores teores de cinzas e menores teores de carbono fixo. Os clones C3335 e C3336 apresentaram menor teor de cinzas e maior teor de carbono fixo (Tabela 3).

Tabela 3. Propriedades energéticas da madeira de genótipos de *Eucalyptus* cultivados em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e em monocultivo.

Genótipo	ID	SC	Db (kg m ⁻³)	De (kcal m ⁻³)	PCS (kcal kg ⁻¹)	MV (%)	Cz (%)	CF (%)
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	S01	ILPF	769 a	3264,44 a	4245	80,56	3,17 a	16,28 b
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3335		628 b	2670,99 b	4254	79,76	0,87 b	19,37 a
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3336	Monocultivo	546 c	2312,27 c	4239	79,05	0,47 b	20,48 a
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3487		517 c	2159,01 c	4171	80,20	2,72 a	17,08 b
Erro padrão			56,46	245,59	19,00	0,32	0,67	0,98
CV			7,87	7,75	1,75	1,49	34,36	6,74

Id = identificação; C = clone. S = propagação seminífera. SC = sistema de cultivo; Db: densidade básica; De: densidade energética; PCS: poder calorífico superior; MV: materiais voláteis; Cz: teor de cinzas; CF: carbono fixo; CV: coeficiente de variação. As médias de cada parâmetro seguidas

pela mesma letra minúscula se diferem estatisticamente pelo teste F ao nível de 5% de significância.

5.2. Qualidade do carvão vegetal

Assim como na madeira, a densidade aparente e densidade energética do carvão vegetal foi maior em *E. cloeziana* cultivado no ILPF. O clone 3335 apresentou maior quantidade de poder calorífico superior (Tabela 4). Os teores de cinzas do carvão foram superiores para o genótipo C3336 em relação aos demais materiais. Os resultados dos teores de matérias voláteis e carbono fixo apresentaram médias de 26,89 e 71,27%, respectivamente, não apresentando diferença entre os genótipos de *Eucalyptus* estudados (Tabela 4).

Tabela 4. Propriedades energéticas do carvão vegetal de genótipos de *Eucalyptus* cultivados em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e em monocultivo.

Genótipo	Id	SC	Da (kg m ⁻³)	De (kcal m ⁻³)	PCS (kcal Kg ⁻¹)	MV (%)	Cz (%)	CF (%)
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	S01	ILPF	473 a	3262,05 a	6842 b	27,63	1,41 b	70,96
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3335		424 b	3030,86 ab	7150 a	26,57	1,01 b	72,42
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3336	Monocultivo	440 ab	2972,20 ab	6746 b	23,43	2,71 a	73,86
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3487		429 b	2860,08 b	6664 b	30,28	1,89 ab	67,84
Erro padrão			11,02	84,68	106,25	1,42	0,37	1,29
CV			7,87	6,80	2,15	19,60	39,15	7,35

Id = identificação; C = clone. S = propagação seminífera. SC = sistema de cultivo; Da: densidade aparente; De: densidade energética; PCS: poder calorífico superior; MV: materiais voláteis; Cz: teor de cinzas; CF: carbono fixo; CV: coeficiente de variação. As médias de cada parâmetro seguidas pela mesma letra minúscula se diferem estatisticamente pelo teste F ao nível de 5% de significância.

5.3. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis

O resultado de maior rendimento gravimétrico do processo de carbonização foi observado para o C3487, a quantidade de líquido pirolenhoso foi maior em C3335 (Tabela 5). Não foi verificada diferença na quantidade de gases não condensáveis, que apresentou média geral entre os genótipos de 21,34% (Tabela 5).

Tabela 5. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis de genótipos de *Eucalyptus* cultivados em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e em monocultivo.

Genótipo	ID	SC	RG (%)	LP (%)	GNC (%)
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	S01	ILPF	35,15 ab	41,34 b	21,14
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3335		30,51 b	50,41 a	21,06
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3336	Monocultivo	35,61 ab	41,90 b	21,88
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	C3487		35,97 a	42,76 b	21,26
Erro padrão			1,28	2,12	0,19
CV			9,52	7,16	8,98

Id = identificação; C = clone. S = propagação semínifera. SC = sistema de cultivo; RG: rendimento gravimétrico; LP: líquido pirolenhoso; GNC: gases não condensáveis; CV: coeficiente de variação. As médias de cada parâmetro seguidas pela mesma letra minúscula se diferem estatisticamente pelo teste F ao nível de 5% de significância.

5.4. Análise de correlação

A análise de correlação de Pearson entre as variáveis da qualidade da madeira e do carvão de genótipos de *Eucalyptus* são apresentadas na Figura 2. A largura das fibras, espessura da parede e fração parede possuem forte correlação positiva com a densidade básica e densidade energética da madeira, porém não se correlacionam com as densidades do carvão (Figura 2). A densidade básica e densidade energética da madeira também apresentam forte correlação positiva com a densidade aparente e densidade energética do carvão (Figura 2). A correlação foi negativa entre os teores de materiais voláteis com teor de cinzas tanto na madeira quanto no carvão, líquido pirolenhoso com rendimento gravimétrico, e entre o poder calorífico superior com rendimento gravimétrico (Figura 2).

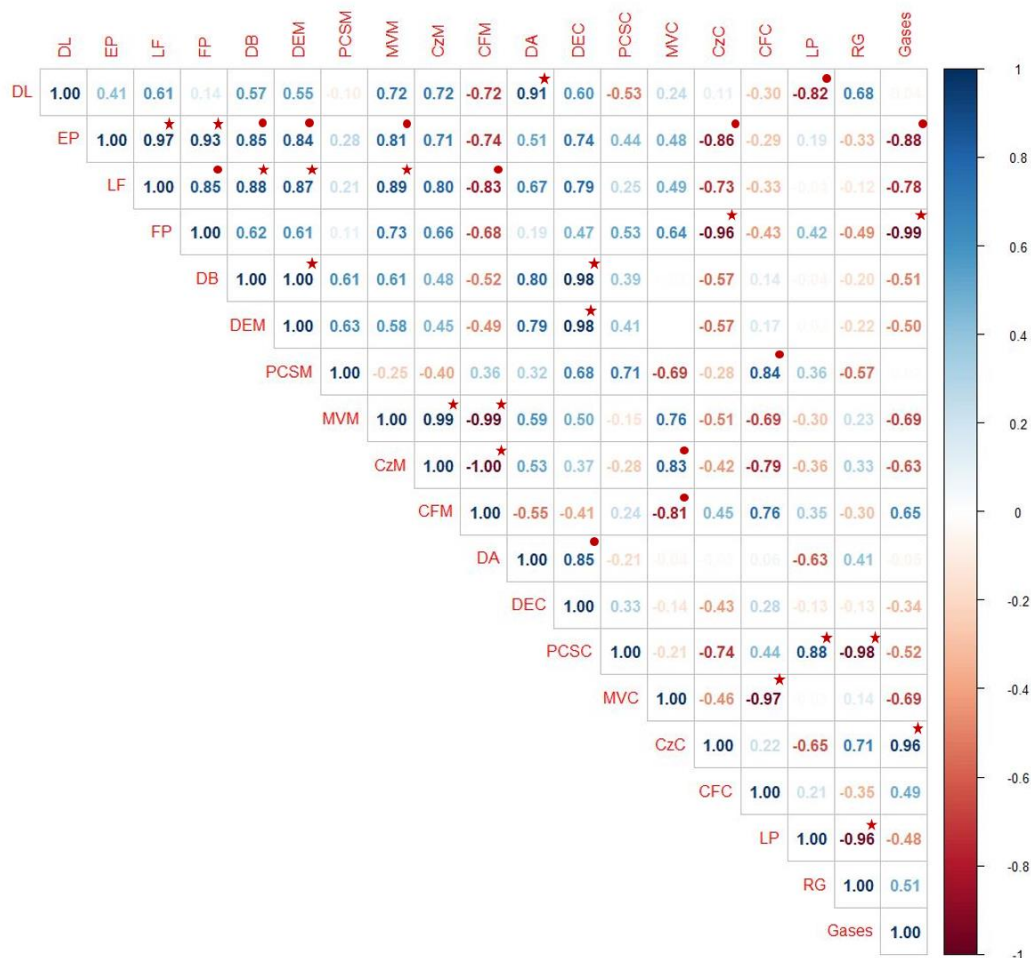


Figura 2. Análise de Correlação de Pearson entre as variáveis da madeira e do carvão de genótipos de *Eucalyptus* cultivados em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e em monocultivo. Significativo a 5% e 10% quando apresentar * e °, respectivamente. DL: diâmetro do lume; EP: espessura da parede; LF: largura da fibra; FP: fração parede; Db: densidade básica; DEM: densidade energética da madeira; PCSM: poder calorífico superior da madeira; MVM: materiais voláteis da madeira; CZM: teor de cinzas da madeira; CFM: carbono fixo da madeira; Da: densidade aparente; DEC: densidade energética do carvão vegetal; PCSC: poder calorífico superior do carvão vegetal; MVC: materiais voláteis do carvão vegetal; CZC: teor de cinzas do carvão vegetal; CFC: carbono fixo do carvão vegetal; RG: rendimento gravimétrico; LP: líquido pirolenhoso; Gases: gases não condensáveis.

6. DISCUSSÃO

A qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* provenientes de monocultivos para usos siderúrgicos é bem documentada na literatura (Sereghetti *et al.* 2015; Hsing, Paula, Paula 2016; Oliveira *et al.* 2021; Ramos *et al.*, 2023; Protásio *et al.*, 2011). No entanto, há uma ausência de estudos detalhados que abordem essa questão em sistemas integrados de produção, como na ILPF. Nesta pesquisa, foi possível observar que a madeira de *Eucalyptus* cultivados em sistemas ILPF apresenta potencial para a produção de energia por meio de carvão vegetal.

Os valores de densidade básica da madeira de genótipos de *Eucalyptus* foram mais elevados nos materiais cultivados no sistema ILPF (Tabela 3). No estudo feito por Serafim (2018), com clone H105 (*Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis*) aos 84 meses em sistema ILPF, foi encontrada densidade básica de 520 kg/m³, superior ao encontrado por Soares *et al.* (2015), estudando madeiras de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, em três diferentes idades, em plantios homogêneos, com densidade básica variando de 370 kg/m³ aos três anos, 440 kg/m³ aos cinco anos e 540 kg/m³ aos sete anos de idade. Nesse sentido, o genótipo, a idade e o tipo de sistema a qual o material de estudo foi analisado possa ter influenciado nos valores elevados da densidade básica da madeira encontrados no sistema ILPF.

Carneiro *et al.* (2014), relatam que a elevada densidade básica da madeira está diretamente relacionada à maior produção de energia e, conseqüentemente, resultará em um carvão de maior densidade aparente e energética. Essa relação entre a densidades básica da madeira e densidade aparente do carvão vegetal, junto com as densidades energéticas dos mesmos apresentam correlação positiva entre si no presente estudo (Fig. 2).

De acordo com Protásio *et al.* (2021), aos 81 meses de idade de diferentes espécies e híbridos de *Eucalyptus*, a média da densidade aparente do carvão vegetal encontrada foi de 390 kg/m³, considerada alta. Nessa pesquisa a menor densidade aparente do carvão encontrada foi de 424 kg/m³, sendo superior aos resultados encontrados na literatura (Tabela 4), o que pode ser atribuído à idade dos povoamentos estudados. Essa alta densidade aparente do carvão é

interessante para siderurgia por conferir maior resistência à abrasão nos altos fornos siderúrgicos (Assis *et al.*, 2012).

Na pesquisa feita por Reis *et al.* (2023), avaliando a qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* aos 72 meses de idade, foram encontrados valores de poder calorífico superior de 4.521,97 e 7.488,64 kcal/kg na madeira e no carvão, respectivamente, valores esses semelhantes aos resultados de Oliveira *et al.* (2023), analisando *Eucalyptus Cloeziana*, aos 96 meses de idade, poder calorífico superior na madeira de 4689 kcal/kg e, no carvão vegetal, de 7.175 kcal/kg. Nessa pesquisa foram encontrados valores aproximados para o poder calorífico superior da madeira, e valores abaixo para o carvão vegetal na literatura (Tabelas 3 e 4), essa diferença pode estar associada ao maior teor de carbono fixo dos clones avaliados no estudo de Reis *et al.* (2023) e Oliveira *et al.* (2021) em relação ao encontrado no presente estudo, que variou de 67,84 a 73,86%. O poder calorífico superior do carvão vegetal está relacionado ao teor de carbono fixo (Neves *et al.*, 2011), porém, essa correlação foi observada no presente estudo entre o poder calorífico superior da madeira com o carbono fixo do carvão vegetal (Figura 2).

Trugilho *et al.* (2001), ao estudarem clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal, mencionam, como características químicas desejáveis no carvão vegetal produzido, o baixo teor de materiais voláteis e de cinzas e os maiores teores de carbono fixo. No caso desta pesquisa, o clone em destaque é 3335, o menos favorável para a produção de carvão seria o clone 3.487 (Tabela 4). Por sua vez, Protásio *et al.* (2021), encontraram valores médios obtidos no carvão vegetal de carbono fixo, materiais voláteis e teores de cinzas de 74,9, 24,7 e 0,5%, respectivamente, que são valores mais elevados do que os encontrados no presente estudo.

O que pode ter influenciado esses valores, mais baixos dos que encontrados na literatura, são as características específicas da qualidade da madeira, o processo e tempo de carbonização do carvão vegetal. Oliveira *et al.* (2010), testando diferentes marchas de carbonização, observaram que, com o aumento da temperatura final de carbonização, houve diminuição do teor de materiais voláteis e aumento do teor de carbono fixo. Sendo assim, o processo de carbonização nessa pesquisa pode ter influenciado na qualidade energética do carvão vegetal.

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal também é influenciado pela composição química da madeira e pela temperatura final de carbonização (Costa *et al.*, 2020). Ramos *et al.* (2023) encontraram resultados de rendimento gravimétrico média 34,1%, próximo ao encontrados no presente estudo (30,5 a 35,9%).

Pesquisar as propriedades da madeira, assim como a qualidade da mesma para diversos usos industriais, é importante para empregar, de forma correta, sua utilidade (Carneiro *et al.*, 2014). Essa pesquisa visa a atribuir uso à madeira oriunda de sistemas ILPF, colaborando como estudos atuais para fins energéticos que são poucos disponíveis na literatura (Serafim, 2018; Tonini *et al.*, 2020, Ferreira *et al.*, 2021).

7. CONCLUSÕES

Os genótipos de *Eucalyptus* observados apresentam boa qualidade da madeira e carvão vegetal proveniente de sistemas ILPF e cultivo homogêneo, além de demonstrarem alta capacidade energética do carvão vegetal. Sendo assim, a biomassa de *Eucalyptus* de sistema ILPF pode ser utilizada para processamentos enérgicos através do carvão vegetal.

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing Materials. D1762 - 1984: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. ASTM International, Filadélfia.
- American Society for Testing Materials. ASTM E871-1982: Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International, Filadélfia.
- American Society for Testing Materials. E711 - 1987: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter, ASTM International, Filadélfia.
- ASSIS, M. R. *et al.* Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 01, p. 519–536. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0812-6>.
- ASSIS, M. R. *et al.* Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa florestal brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012. DOI: 10.4336/2012.pfb.32.71.291.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11941: Madeira - determinação da densidade básica., Rio de Janeiro, 2003.
- BALBINO, L. C. *et al.* Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária**

Brasileira, v. 46, n. 10, p. 1–12, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000001>.

BAROTTO, A. J. *et al.* Functional relationships between wood structure and vulnerability to xylem cavitation in races of *Eucalyptus globulus* differing in wood density. **Tree Physiology**, v. 38, p. 243-251, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx138>.

BARREIROS, R. M. *et al.* Potencialidade energética da madeira de três espécies de *Eucalyptus*. In: OLIVEIRA, R. J. O.; MOREIRA, R. C. **Recursos naturais: energia de biomassa florestal**, cap. 12, v. 1, p. 146-164, 2021. DOI: 10.37885/210203332

BARROS JUNIOR, U. O. **Tachigali vulgaris em plantios homogêneos na Amazônia: parâmetros de crescimento, madeira e carvão vegetal para fins energéticos**. 117 f. Dissertação (Mestre em Ciências Florestais), Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará, 2020.

BRAND, M. A. *et al.* Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na região serrana sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, v. 39, n. 6, p. 1165-1173, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000600020>.

BRUZUAL, C. F. Assessment of CO₂ mitigation potential, biomass use and plantation areas to sustain charcoal-ironmaking. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 12, n. 4, p. 325-334, 2015.

CANAL, W. D. *et al.* Comportamento térmico e emissão de gases condensáveis e não condensáveis no processo de carbonização da madeira. **Pesquisa florestal brasileira**, v. 36, n. 87, p. 261-267, 2016. DOI: 10.4336/2016.pfb.36.87.1083.

CAPELA, M. N. *et al.* Characterization of ashes produced from different biomass fuels used in combustion systems in a pulp and paper industry towards its recycling. **Biomass and Bioenergy**, v. 166, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106598>.

CARNEIRO, A. C. O. *et al.* Estudo da decomposição térmica da madeira de oito espécies da Região do Seridó, Rio Grande do Norte. **Revista Árvore**, v. 37, n. 6, p. 1153-1163, 2013. DOI: 10.1590/S0100-67622013000600017.

CARNEIRO, A. C. O. *et al.* Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>.

CIPRIANI, H. N. **Crescimento de *Eucalyptus* em dois espaçamentos dentro do renque em sistema iLPF**. In: Encontro brasileiro de silvicultura, Anais. Colombo: Embrapa Florestas, 2018.

COSTA, J. M. F. N. *et al.* Influência da temperatura de pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, v. 11, n. 1, p. 53-62, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v11n1p53-62>.

COSTA, N. R. *et al.* Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 852–863, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140269>.

DADSWELL, H. E. **The anatomy of Eucalypt wood**. CSIRO Forest Products Laboratory, Melbourne, n. 66, p. 1-28, 1972.

DAMÁSIO, R. *et al.* Perfil térmico e controle da carbonização em forno circular por meio da temperatura interna. **Revista Ciência da Madeira**, v. 6, n. 1, p. 11-22, 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6i1p11-22.

DONATO, D. B. *et al.* Influência do diâmetro da madeira de *Eucalyptus* na produtividade e propriedades do carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, v. 11, n. 2, p. 63-73, 2020. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v11n2p63-73.

DUFOURNY, A. *et al.* Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 137, p. 1-13, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.10.013>.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Transferência de Tecnologia Florestal**. 2019. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/sistema-silvipastoril>>. Acesso em: 18 fev. 2023.

FERREIRA, A. D. *et al.* Manejo das árvores e propriedades da madeira em sistema de ILPF com *Eucalyptus*. *In*: BUNGENSTAB, D. J. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: A produção sustentável. Ed. 2. DF: Embrapa, cap. 9, p. 122-142, 2012.

FERREIRA, M. D. *et al.* Crescimento, produção e qualidade da madeira em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta e monocultivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 3, p. 1-7, 2021. DOI: 10.5039/agraria.v15i3a7928.

FERREIRA, M. D. *et al.* Physical–mechanical properties of wood from a *Eucalyptus* clone planted in an integrated crop-livestock-forest system. **International Wood Products Journal**. V. 11, n. 1, p. 12-19, 2020. DOI:10.1080/20426445.2019.1706137.

FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G. Relações entre características da madeira e propriedades da celulose e papel. *In*: Congresso anual da ABTCP – Semana do Papel, São Paulo, 1975.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Forestry production and trade**. 2017. Disponível em: < <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>>. Acesso em: 09 fev 2023.

FROELICH, P. L.; MOURA, A. B. D. Carvão vegetal: Propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Tecnologias e tendências**, v. 9, n. 1, 2014. DOI: <https://doi.org/10.25112/rtt.v9i1.1329>.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 582-587, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300004> .

GOMES, S. L. **Efeito do espaçamento na produção de madeira e qualidade do carvão vegetal, em pequena propriedade**. 132 f. Dissertação (mestre em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2020.

HSING, T.Y.; PAULA, N.F.; PAULA, R.C. Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 273-283, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509821119>.

IMAM, T.; CAPAREDA, S. Characterization of bio-oil, syn-gas and bio-char from switchgrass pyrolysis at various temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 93, p. 170-177, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.010>

Indústria Brasileira de Árvores. Anuário Estatístico da Indústria Brasileira de Árvores: ano base 2022 – **Relatório 2023**. Brasília, DF: IBÁ, 2023.

Indústria Brasileira de Árvores. Anuário Estatístico da Indústria Brasileira de Árvores: ano base 2021 – **Relatório 2022**. Brasília, DF: IBÁ, 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da extração vegetal e da silvicultura** PEVS. 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/tabelas/brasil/2019>. Acesso: 16 mai. 2023.

KRUCHELSKI, S. *et al.* Growth and productivity of *Eucalyptus benthamii* in integrated crop and livestock systems in southern Brazil. **Agroforest Systems** v. 97, p. 45–57, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00785-0>.

LAVORANTI, O. J. *et al.* Florestas energéticas. In: OLIVEIRA, E. B.; PINTO JÚNIOR, J. E. **O Eucalyptus e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, DF: Embrapa, p. 942-980, 2021.

LIMA, M. D. R. *et al.* Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04>.

LOPES, L. C. A. *et al.* Desenvolvimento florestal em sistema integrado lavoura-pecuária-floresta. **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n. 11, 2021. DOI: [10.36560/141120211457](https://doi.org/10.36560/141120211457).

LOUREIRO, B. A. *et al.* Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia spp* para uso industrial. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 214-232, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509836120>.

LOUREIRO, B. A. *et al.* Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. **Maderas Ciência Tecnologia**, v. 21, p. 619 - 630, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000417>.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. Guarapuava: UNICENTRO, Ed. 2, p. 316, 2014.

MAGALHÃES, C. A. S. *et al.* Crop, livestock and forestry performance assessment under different production systems in the north of Mato Grosso,

Brazil. **Agroforest Systems**, v. 93, p. 2085–2096, 2019. DOI: 10.1007/s10457-018-0311-x.

MARCHIORO, V. **Influência do componente florestal na produtividade agrícola em sistemas de integração lavoura-pecuária floresta**. 43 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, São Paulo, 2019.

MELISSARI, B. Ash related with high alkali and its mitigation – experimental evaluation. **Memoria Investigaciones en Ingeniería**, n. 12, p. 31-44, 2014.

Ministério das Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional - Ano base 2020**. Empresa de Pesquisa Energética: Rio de Janeiro, p. 268, 2021.

NASSER, R. A. *et al.* Chemical analysis of different parts of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) using ultimate, proximate and thermo-gravimetric techniques for energy production. **Energies**, v. 9, n. 5, p. 374, 2016. DO: <https://doi.org/10.3390/en9050374>.

NEVES, T. A. *et al.* Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando a produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.319.

NOGUEIRA, L. A. H. *et al.* **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000.

NONES, D. L. *et al.* Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, v. 45, n. 1, p. 57-64, 2015. DOI: 10.5380/rev.v45i1.30157.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 557-566, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300019>.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Parâmetros da qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, A. L. S. *et al.* Densidade básica da madeira e propriedades do carvão vegetal do híbrido *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* sob influência dos espaçamentos de plantio. In: VANGELISTA, w. v. **Madeiras nativas e plantadas do Brasil: qualidade, pesquisas e atualidades**, cap. 29, p. 482-493, 2021.

OLIVEIRA, E. B. de; PINTO JUNIOR, J. E. **O Eucalyptus e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, DF: Embrapa, Ed. 1, 2021.

PEREIRA, G. F. *et al.* Painéis de madeira aglomerada de *Eucalyptus badjensis* e *Pinus spp.* **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, p. 373-382, 2017. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n114.13](https://doi.org/10.18671/scifor.v45n114.13).

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 295-307, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.68.295.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable**

Energy, v. 164, p. 34-45, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>.

QUIRINO, W. F. *et al.* Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100-106, 2005.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023.

RAMOS, D. C. *et al.* Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de *Eucalyptus* com idades entre 108 e 120 meses. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 1, p. 2, 2023. DOI: 10.5902/1980509848302.

REIS, C. A. F. SANTOS, A. M. PACHECO, A. R. Potencialidades e desafios para o melhoramento genético de *Eucalyptus* aos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). In: OLIVEIRA, E. B. de; PINTO JUNIOR, J. E. **O Eucalyptus e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. DF: Embrapa, Ed. 1, cap. 34, p. 1133-1146, 2021.

REZENDE, J. B.; SANTOS, A. C. **A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidade**. EPAMIG: Boletim Técnico, 2010.

REZENDE, M. A. *et al.* Estudo das interrelações entre massa específica, retratibilidade e umidade da madeira do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* aos 8 anos de idade. **IPEF**, n.48/49, p.133-141, 1995.

ROCHA, M. F. V. Propriedades energéticas do carvão vegetal em função do espaçamento de plantio. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 2, p. 54-63, 2017. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v8n2p54-63.

RODRIGUES, T.; BRAGHINI JÚNIOR, A. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143, 2019. DOI: 10.1016/j.jaap.2019.104670.

ROUSSET, P. *et al.* Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 10, p. 1890-1897, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.05.005>.

SERAFIM, J. S. V. **Comportamento silvicultural e da qualidade da madeira de Eucalyptus sob diferentes arranjos espaciais em sistemas integrados**. 87 f. Dissertação (Mestre em Agroenergia), Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Tocantins, 2018.

SEREGHETTI, G.C. *et al.* Efeito do espaçamento no crescimento e na densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* em florestas de ciclo curto. **Energia na Agricultura**, v. 30, n. 3, p. 257- 262, 2015. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n3p257-262>.

SILVA, A. J. *et al.* Influência da adubação ao rendimento de *Eucalyptus* em sistema de integração lavoura pecuária e floresta. **Scientia Forestalis**, v. 51, 2023. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.21>.

SIQUEIRA, H. F. *et al.* Avaliação de três madeiras nativas do cerrado goiano visando à utilização energética. **Nativa**, Sinop, v. 8, n. 5, p. 615-624, 2020. DOI: 10.31413/nativa.v8i5.10338.

Sistema Nacional de Informações Florestais. **Cadeia Produtiva**. Cadeia Produtiva. 2020. Disponível em:< <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/cadeia-produtiva>>. Acesso: 20 abr. 2023.

SOARES, V. C. *et al.* Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de *Eucalyptus* em três idades. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760201521021294>.

SOARES, V. C. *et al.* Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017>.

SOUZA, N. D. *et al.* Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 270-277, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.106114>.

TIAN, B. *et al.* Understanding the pyrolysis synergy of biomass and coal blends based on volatile release, kinetics and char structure. **Biomass and Bioenergy**, v. 168, n. 106687, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106687>.

TONINI, H. M. *et al.* Growth and energy quality of *Eucalyptus* wood in different crop-livestock-forest spatial arrangements. **Floresta**, v. 50, n. 4, p. 1707-1716, 2020. DOI: 10.5380/ufv.v50 i4. 59650

TRUGILHO, P. F. *et al.* Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

TRUGILHO, P. F. *et al.* Efeito da idade e material genético no rendimento e qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 3, p. 202-216, 2015. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n3p202-216.

VALE, A. T.; DIAS, Í. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050981767>.

VITAL, B. R. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, v. 10, n. 2, p. 151-160, 1986. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509814587>.